

สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธ์  $C_6S$  กับ  $CuAlO_2$

THE ELECTRICAL PROPERTIES OF  $C_6S/CuAlO_2$   
HETEROJUNCTION

อดิสร นพรุจิกุล

ADISON NOPPARUCHIKUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL - 2012 - SC - M - 031 - 048

สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO<sub>2</sub>

THE ELECTRICAL PROPERTIES OF CdS / CuAlO<sub>2</sub>  
HETEROJUNCTION



T123710

อดิศร นพรุจิกุล

ADISON NOPPARUCHIKUN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 123710  
วัน, เดือน, ปี 23 พ.ย. 2555



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-031-048

**THE ELECTRICAL PROPERTIES OF CdS / CuAlO<sub>2</sub>  
HETEROJUNCTION**

**ADISON NOPPARUCHIKUN**

**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-031-048**

**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF SCIENCE**

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

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ  $\text{CuAlO}_2$   
The Electrical Properties of CdS/ $\text{CuAlO}_2$  Heterojunction  
นักศึกษา นายอดิสร นพรุจิกุล  
รหัสประจำตัว 52650652  
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

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

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.30 - 16.30 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดชนัน ธีระนันทน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 18 เดือน 10 ปี พ.ศ. 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO <sub>2</sub>
นักศึกษา	นายอดิศร นพรุจิกุล
รหัสประจำตัว	52650652
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบาง CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเซรามิกของ CuAlO<sub>2</sub> ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ แผ่นฐานรองรับที่เป็นเซรามิกของ CuAlO<sub>2</sub> นี้เตรียมได้จากผงผลึกของสารประกอบ CuO และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ผสมกันตามสัดส่วนเคมีบดให้คลุกเคล้ากันดี แล้วทำการอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuAlO<sub>2</sub> จะประสบความสำเร็จได้โดยการแอนนีสในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากการวัด กระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ แפקเตอร์อุคมคติ และความต้านทานอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง พบว่าความสูงของกำแพงศักย์และแפקเตอร์อุคมคิตีมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิต่างกันมาก จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลงความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์มีค่าลดลงแต่แפקเตอร์อุคมคิตีมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าศักย์ไฟฟ้าคคร่อมรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.586 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องดีกับค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่วัดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปก โตรสโคปี ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส และช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ พบว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความถี่ อีกทั้งยังได้ทำการวัดความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ จากทั้งสองวิธีนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuAlO<sub>2</sub> มีค่าอยู่ในระดับ 10<sup>11</sup> ต่อตารางเซนติเมตรต่ออิเล็กตรอน โวลต์

<b>Thesis</b>	The Electrical Properties of CdS/CuAlO <sub>2</sub> Heterojunction
<b>Student</b>	Mr. Adison Nopparuchikun
<b>Student ID.</b>	52650652
<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 were deposited by thermal evaporation on the CuAlO<sub>2</sub> ceramic substrate. CuAlO<sub>2</sub> ceramic substrate was prepared from the stoichiometric mixture of high purity grade of CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. The mixed powders were well ground and pressed into pellet form of 2 mm. thick and 10 mm diameter and subsequently sintered at 1000 °C for 48 hours in air. Successful heterojunction device was obtained by annealing in a pure nitrogen atmosphere at 400 °C for 30 min. From the data of I-V measurements at low temperature range of 20-300 K, the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using thermionic emission theory (TE) and Cheung's method. The junction barrier height and ideality factor 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. In part of C-V measurements at room temperature, the obtained built-in potential value being 0.586 V is well consistent with the junction barrier height value evaluated from I-V measurements. The complex impedance characteristics of CdS/CuAlO<sub>2</sub> Heterojunction were investigated by impedance spectroscopy in the temperature range 25-80 °C and frequency range 20 Hz – 2 MHz. The real and imaginary parts of the complex impedance are changed with the temperature and frequency. Moreover, the capacitance and conductance measurements were used to calculate the density of the interface states. Both methods revealed the value of the interface state density distribution for CdS/CuAlO<sub>2</sub> interface of the order of  $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ .

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์าม นิตยวงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีเอ็ม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He  $\lambda$  ions  $\alpha$  ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสง โดยการ วัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu K}_\alpha$  1.5418 อังสตรอม ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้บริการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเซรามิกและฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุ โฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นายอดิศร นพรุจิกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก	6
2.2.1 การระบุตำแหน่ง	6
2.2.2 การระบุทิศทาง	6
2.2.3 การระบุชื่อระนาบ	6
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอม ของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI	8
2.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	8
2.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไชน์	9
2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	10
2.4 ผลึกจริง	11
2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิตติหรือแบบจุด	11
2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น	13
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	14
2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	14

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3.2 โครงผลิตกแฟคและขอบเขตรอยต่อของ โครงผลิตกแฟค หรือระนาบของ โครงผลิตกแฟค	15
2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลิตกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอม ผิดลำดับ	16
2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	16
2.5.1 อัตราการระเหยสาร	16
2.5.2 ความดันไอของธาตุ	17
2.5.3 การระเหยสารประกอบ	19
2.5.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีการระเหยสาร	19
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลิตกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	21
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลิตกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
2.8 รอยต่อ พี-เอ็น	29
2.8.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล	29
2.8.2 รอยต่อแบบขั้น	31
2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ	34
2.9 ค่าความจุไฟฟ้า	34
2.10 ลักษณะกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	38
2.11 เจือไนซขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย	38
2.12 การวิเคราะห์ไดโอดออคุมคติ	39
2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยว	40
2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	42
2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง	44
2.14 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	47
2.14.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	49
2.14.2 กลไกการชูดุโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของ พาหะ	49

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 อิทธิพลของการดูดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	52
2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	55
2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	55
2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	56
2.16.3 กราฟของโบด	60
2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์	63
2.16.5 แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี	65
2.17 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	72
2.18 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	74
2.19 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมเชื่อมต่อ	74
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	82
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	82
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$ จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติวิทยาศาสตร์ของแข็ง	82
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd/CuAlO}_2$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}$ ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$ ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิทยาศาสตร์ของแข็ง	83

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 3.2. ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS} / \text{CuAlO}_2$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 84
- 3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 84
- 3.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}/\text{CuAlO}_2$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 85
- 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS} / \text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส 87
- 3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค 87
- 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค 87
- 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า 87
- 3.3.3.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10 - 300 เคลวิน 87
- 3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน 89

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	94
4.1 ลักษณะสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	94
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	95
4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	95
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	96
4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-Cd/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	97
4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	97
4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	104
4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	112
4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	115
4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 โวลต์ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	122

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	128
4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่ง ตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	137
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	147
5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	147
5.1.1 ผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของ สิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธี ระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	147
5.1.2 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากันแรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ20-300 เคลวิน	147
5.1.3 ผลจากการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไบแอส โดยการป้อนความถี่ที่หลายๆค่า	148
5.1.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 โวลต์ถึง 0.5 โวลต์	148
5.1.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความจุไฟฟ้ากับ ความถี่ในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียส	149
5.1.6 ผลจากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ สูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์	149
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	150
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	150
เอกสารอ้างอิง	152
ภาคผนวก	156
ประวัติผู้เขียน	162

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมีดเลออร์และจุดตัดแกนผลึก	7
2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	19
4.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกและขนาดของเกรนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$	96
4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตชันย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุคมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{b0}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	104
4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตชันย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุคมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	108
4.4 แสดงค่า แรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด ค่าจินตภาพของความจุไฟฟ้าสูงสุด และความหนาแน่นของกักเก็บในผิวเชื่อมต่อ ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	121

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 แสดงค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าจินตภาพของค่าความจุไฟฟ้า และความหนาแน่นของกับดักที่ผิวเชื่อมต่อ และช่วงชีวิตของพาหะที่ขึ้นกับพลังงาน ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	127
4.6 แสดงค่า ความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	135
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	142
4.8 แสดงค่า ความถี่กำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	144

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	5
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	7
2.3 แสดงพันธะที่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	8
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	9
2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	10
2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	11
2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS	11
2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลตทิสที่ว่างอยู่	
ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่	
ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก	
ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่	12
2.9 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขดตักและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	13
2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบขอบ	14
2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบสกรู	14
2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน	15
2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแผ่นและระนาบของผลึกแผ่นหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแผ่น	15
2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดปกติ	16
2.15 แสดงกราฟค่าความดัน ใสของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว	18
2.16 แสดงกราฟค่าความดัน ใสของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	18
2.17 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น	20
2.18 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	22
2.19 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	24

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
2.21 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์และอยู่ใน สภาวะสมดุลเชิงความร้อน	30
2.22 แสดงรอยต่อแบบขั้นที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ก. ความเข้มข้นสารเจือ ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค. ประจุค้าง ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	31
2.23 แสดง โพรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอด พาหะ ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า เปลี่ยนไปเล็กน้อย	36
2.24 แสดง โครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน $V_a$	38
2.25 แสดงการลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไป หน้าค่าเท่ากับ $V_a$	40
2.26 แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสาร กึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไป หน้า $V_a$	41
2.27 แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็น ของไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า $V_a$	43

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงอัตราส่วนของ $x_i/x_d$ เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อ $p^+ - n$	47
2.29 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ $Cu(In,Ga)Se_2$ ที่แปรตามอุณหภูมิ	48
2.30 แสดงกลไกผลของการดูดอูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	50
2.31 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับ $J_0$ และค่าแฟกเตอร์อุคมคคิของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย $CdCl_2$	52
2.32 แสดงกราฟของ ไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	55
2.33 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	56
2.34 แสดงกราฟของ ไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	57
2.35 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	58
2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ $Z'$ และ $Z''$ จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัด ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	61
2.37 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของ โปด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	62
2.38 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของ ไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว	63
2.39 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข)	64
2.40 แสดงแบบจำลองอีลิเมนต์เฟสคงตัว (ก) และกราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอีลิเมนต์เฟสคงตัว (ข)	65

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.41 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า $C_{SCR}$ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับศักกประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม	69
2.42 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se <sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง	70
2.43 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na	71
2.44 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe <sub>2</sub>	71
2.45 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล (V=0) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี	72
2.46 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบอัสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงชุนนุพพาหะ ข. ช่วงพร่องพาหะ ค. ช่วงกลับกลาย	73
2.47 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	74
2.48 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	75
2.49 ก.-ข. แสดงวงจรมุมที่มี $C_{ii}$ และ $R_{ii}$ ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย ค. แสดงวงจรมุมในช่วงความถี่ต่ำ ง. แสดงวงจรมุมในช่วงความถี่สูง	76

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.50 ก. แสดงอิทธิพลของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ $\Psi_s$	78
2.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	81
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	83
3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}/\text{CuAlO}_2$ ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAlO}_2$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	
3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส	88
3.4 แสดงวงจรสมมูล $R_p$ กับ $C_p$ และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R ก. แสดงวงจรสมมูล $R_p$ กับ $C_p$ ต่อขนานกัน ข. แสดงค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	89
3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ก. ในกรณีที่ความจุ (C) มีค่าต่ำ ข. ในกรณีที่ความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก	90
3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $ Z $ ) กับความถี่ (f)	91
3.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z'$ ) กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $-Z''$ ) กับ ความถี่ (f)	92
3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z'$ ) กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $-Z''$ )	92

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $ Z $ ) กับความถี่ (f)	93
4.1 แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	94
4.2 แสดงเปลือกกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	95
4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	
ก. ภาพถ่ายผิวหน้า	
ข. ภาพถ่ายภาคตัดขวาง	96
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	98
4.5 แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	99

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	99
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศา เซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	103
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	103
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	105
4.10 แสดงกราฟของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-}$ $\text{CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	105
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง อุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการ แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	106

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	106
4.13 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	107
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไก เทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	109
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไก เทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	109
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $n(\ln I_s)$ กับ $1/kT$ เมื่อทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 100 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	110

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอนุกรม กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	110
4.18 แสดงแผนภาพการดูดกลืนรังสีที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนที่บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub>	112
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เวลา 30 นาที	112
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	114
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	115
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	116

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/W$ กับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	117
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอนุกรมกับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	118
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับความถี่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	120
4.26 แสดงการจับและคายประจุของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ	123
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	123
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	124

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	125
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับพลังงานของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	126
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของพาหะกับพลังงานของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	126
4.32 แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิที่เลื่อนขึ้นลงตามแรงดันไบแอส	128
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	128
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	129

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	129
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	131
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dG/d\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	131
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	132
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	132

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $dG/d\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	133
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N_T$ กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	136
4.42 แสดงระดับเฟอร์มิที่เลื่อนขึ้นที่ระดับพลังงานของกัณฑ์ $E_T$ ที่ตำแหน่ง $x_c$ ซึ่งอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ	137
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	137
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	138
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	139

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	140
4.47 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	141
4.48 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	142
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO <sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	143
4.50 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ CuAlO <sub>2</sub> ที่สภาวะสมดุลความร้อน	146

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนเกิดเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกสบายและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในยุคปัจจุบันได้มากยิ่งขึ้น สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงโดยส่วนใหญ่จะประดิษฐ์จากฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงมีสมบัติที่โดดเด่นคือสามารถส่งผ่านแสงในย่านตามมองเห็นได้ มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำและไม่ส่งผ่านรังสีอินฟราเรด จากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงถูกนำไปทำเป็นขั้วไฟฟ้าของจอแอลซีดี เซลล์แสงอาทิตย์ และฟิล์มสะท้อนรังสีความร้อน เป็นต้น

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่  $ZnO$ ,  $SnO_2$  และ  $In_2O_3$  โดยวัสดุเหล่านี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และยากที่จะประดิษฐ์ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ เมื่อไม่นานมานี้ คาวาโซเอะ (Kawasoe) และเพื่อนร่วมงาน [1] ได้รายงานที่สามารถประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CuAlO_2$  ชนิดพีโดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (pulse laser deposition : PLD) หลังจากนั้นงานวิจัยฟิล์มบางของอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพีที่เป็นสารประกอบออกไซด์ก็ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นสารประกอบในกลุ่มเคลาฟอสไซต์ (delafossite) และกลุ่มอื่นๆ ที่ไม่ใช่กลุ่มเคลาฟอสไซต์ ได้มีการประดิษฐ์เป็นรอยต่อ p-i-n และหัวต่อ p-n ทั้งในแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และรอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าเชิงแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงแบบต่าง ๆ เช่น จอแสดงผลแบบจอแบนชนิดไดโอดเปล่งแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

$CuAlO_2$  ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่ง ในกลุ่มเคลาฟอสไซต์ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานแถบพลังงาน เป็นทั้งแบบตรงและแบบเฉียงที่มีค่าเท่ากับ 3.5 และ 1.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ จากผลงานตีพิมพ์ของปาร์ค และผู้ร่วมงาน [2] พบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $CuAlO_2$  นั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ 2H (เฮกซะโกนัล) และ 3R (โรมโบฮีดรัล) ซึ่งมีสเปซกรุป  $P63/mmc$  และ  $R\bar{3}m$  ตามลำดับ ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกทั้ง 2 แบบ มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมของชั้นออกไซด์คริสตัล  $AlO_2$  ที่ต่างกัน กล่าวคือ โครงสร้างผลึก 2H จะมีการจัดเรียงระนาบอะตอมของชั้นออกไซด์คริสตัล  $AlO_2$  เป็นแบบ AaBbAaBb... ส่วน โครงสร้างผลึก 3R จะเป็นแบบ AaBbCcAaBbCc... พันธะโควาเลนต์ของผลึก  $CuAlO_2$  เกิดจาก p-d ไฮบริไดเซชันของออร์บิทัล Cu-3d กับ O-2p<sub>x</sub> ของคัมเบล O-Cu-O สถานะของพันธะเป็นได้ 3 แบบ [3] โดยแบบที่ 1 คือ แบบ

แอนติ-บอนดิง (anti-bonding)  $3d(3z^2-r^2)$ ,  $3d(yz)$ ,  $3d(zx)$  แบบที่ 2 คือ แบบนอน-บอนดิง (non-bonding)  $3d(x^2-y^2)$ ,  $3d(xy)$  และแบบที่ 3 คือ บอนดิง (bonding)  $3d(3z^2-r^2)$ ,  $3d(yz)$ ,  $3d(zx)$  ซึ่งจะส่งผลให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (bandgap) มีค่าประมาณ 4 อิเล็กตรอน โวลต์ ส่วนช่องว่างของแถบพลังงานของชั้นออกไซด์คริสตัล  $\text{AlO}_2$  มีค่าประมาณ 6 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังนั้นสถานะพลังงานของคัมเบล  $\text{O-Cu-O}$  จะแทรกอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของชั้นออกไซด์คริสตัล  $\text{AlO}_2$

ผลึกของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  เตรียมได้จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยการบดสารตั้งต้น  $\text{CuO}$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  แล้วอัดเม็ด (pellet) จากนั้นจึงนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง สภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  มีค่าประมาณ 1 โอห์ม-เซนติเมตร ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบที่เนื่องมาจากแวนแคนซีของอะตอม  $\text{Cu}$  และ/หรือ อินเตอร์สติเชียลของอะตอมออกซิเจน (oxygen interstitial) สัมประสิทธิ์ของซีเบก (Seebeck coefficient) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าสูงประมาณ 500 ไมโครโวลต์ต่อเคลวิน ดังนั้น สารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  จึงมีปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าเชิงความร้อน (thermoelectric effect) ที่โดดเด่นอีกชนิดหนึ่งของกลุ่มเดลตาฟอสไฟท์ที่ไม่นานมานี้ เบนเนอจี (Banerjee) และผู้ร่วมงาน [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าเชิงความร้อนและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารประกอบ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมโดยวิธีดีซีสปัตเตอริง (dc sputtering)

ฟิล์มบาง  $\text{CdS}$  เป็นสารประกอบโลหะกึ่งตัวนำหมู่ II-VI (II-VI compound) และเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) ผลึกแคดเมียมซัลไฟด์จะมีโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) หรือเวิร์ทไซท์ (wurtzite) ซึ่งอยู่ในระบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) และมีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) กว้างโดยมีค่าประมาณ 2.42 อิเล็กตรอน โวลต์ ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  น่าสนใจที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมรอยต่อวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็คเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้จากการเก็บปฏิกิริยาเคมีที่สถานะของแข็งแล้วใช้กาวเงินเป็นขั้วไฟฟ้า และต่อจากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆตลอดจนได้ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วนำผลที่ได้มาทำการคำนวณหาวงจรสมมูลภายในด้วยโปรแกรมเฉพาะ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงวิธีการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ต่อไป

2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve), ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาแอดมิตแตนซ์และอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ทำการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

2. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่อง

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 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-5410 LV ที่แรงดัน 15 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาแอดมิตแตนซ์และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่และอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสต่อไป

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ได้รู้ถึงขั้นตอนการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการพิเศษ

1.4.2. มีความรู้ความเข้าใจการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS / $\text{CuAlO}_2$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.4.3. ได้ทราบถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS / $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้โดยการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา นาน 30 นาที ต่อไป

1.4.4. ได้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS / $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้ ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ Brukerรุ่นD8Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5410 LV ที่แรงดัน 15 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็น  $\text{CdS}$  แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ (C-f curve) และความนำไฟฟ้ากับความถี่ ( $G/\omega$ -f curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์ สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ต่อไป

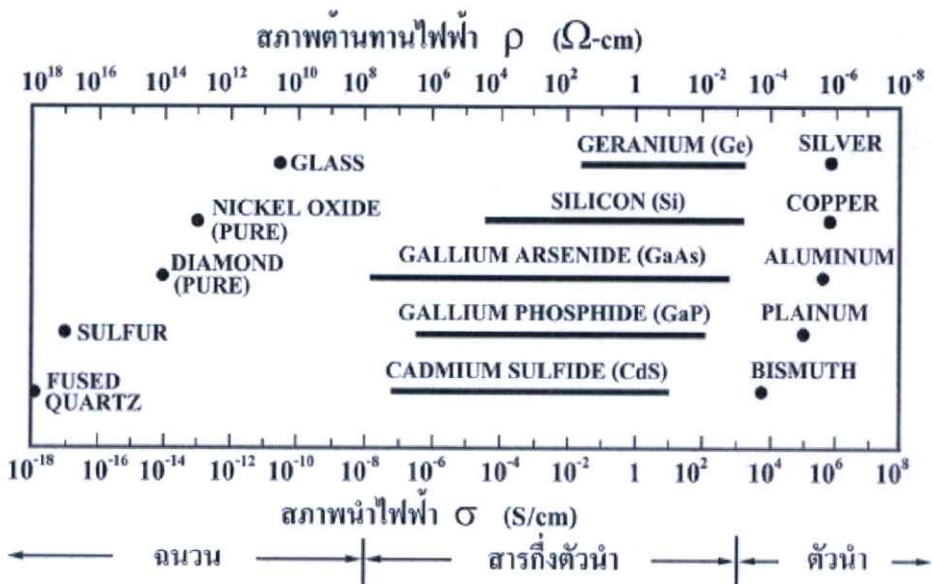
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [6-9]

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



รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

## 2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [6-17]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ตั้งกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.2.1 การระบุตำแหน่ง

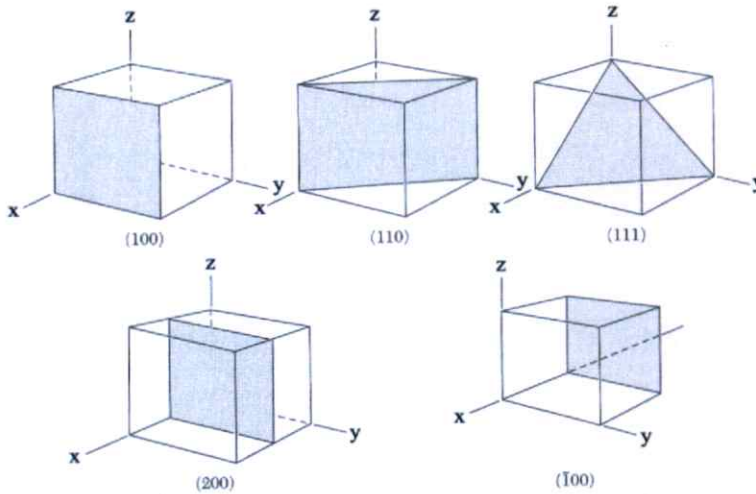
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$

### 2.2.2 การระบุทิศทาง

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

### 2.2.3 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 ต่อจากนั้นให้หาผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย (-) บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่น ระนาบ  $(010)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(\infty, 1, \infty)$  และระนาบ  $(\bar{1}11)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(-1, 1, 1)$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก $\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}$	ดัชนีมิลเลอร์(hkl)หรือระนาบ
( $\infty, 1, \infty$ )	$\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$	(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

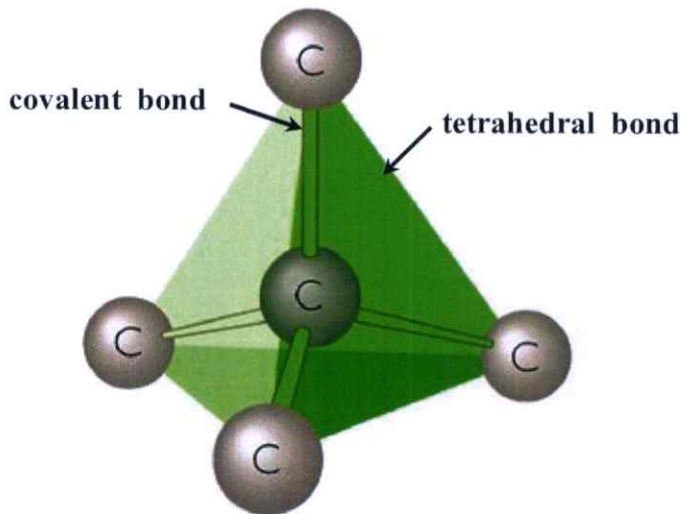
$$i = -(h + k) \quad (2.1)$$

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

## 2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[6-18]

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

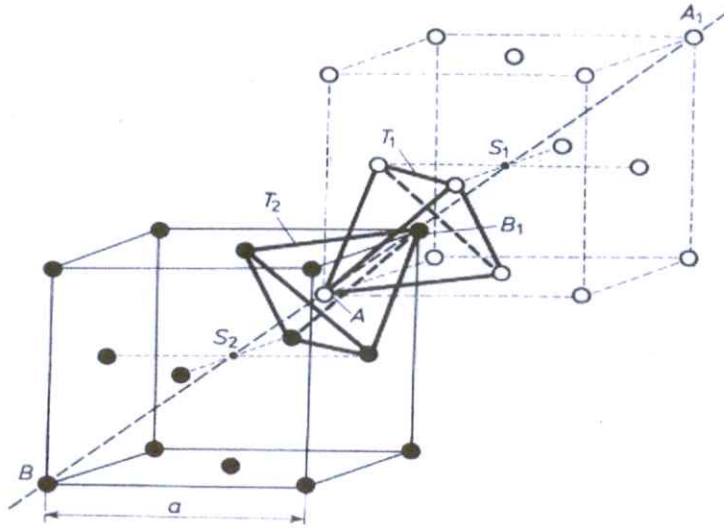


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และ

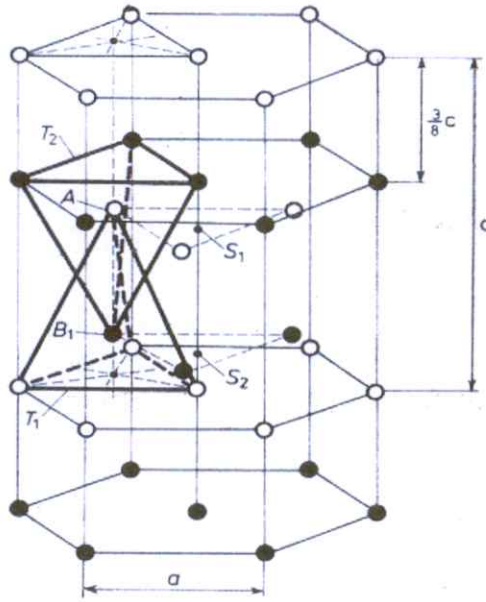
เซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4} AA_1 = \frac{1}{4} BB_1$  ฐานของพีระมิดสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม 60 องศารอบแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

### 2.3.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8} c = \sqrt{\frac{3}{8}} a$  ฐานพีระมิดสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$

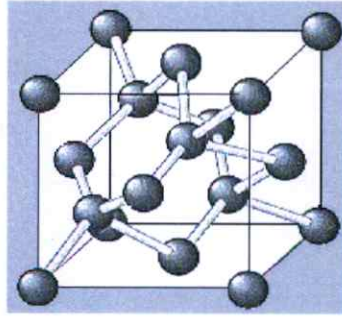


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

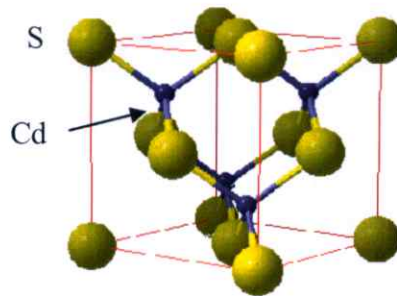
### 2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ [13-17]

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซท์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์หรือแบบซิงค์เบลนด์ โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.6 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกันว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 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 2.7 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ ก็คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS

## 2.4 ผลึกจริง [6-17]

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

### 2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

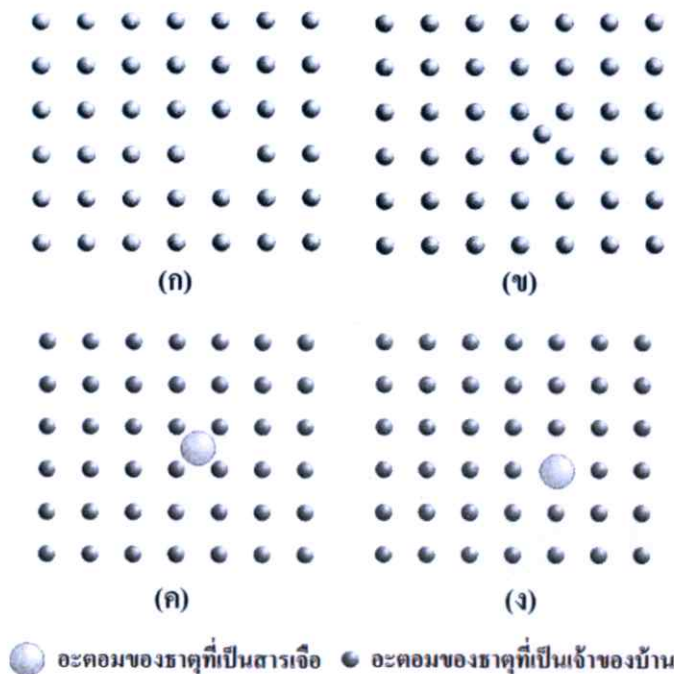
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิสที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

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

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurityatom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



### รูปที่ 2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

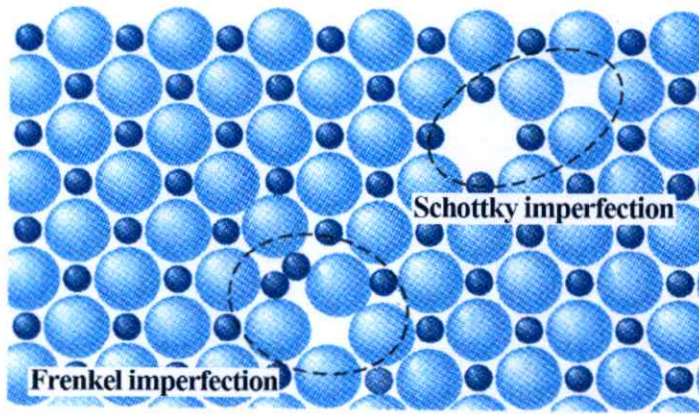
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของ

โครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก – ไอออนลบ (cation–anion divacancy)

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



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล

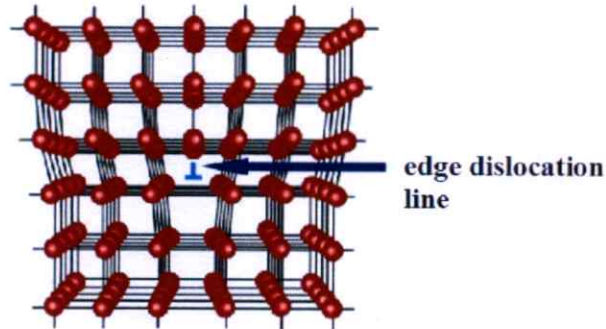
#### 2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

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

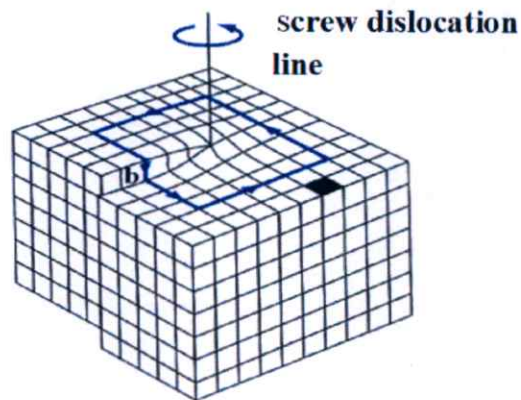
ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector :  $\vec{b}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกว่าคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนาน

กับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

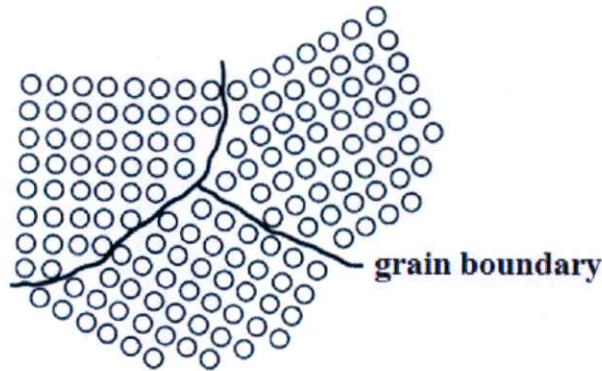
### 2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่ผลึกที่มี

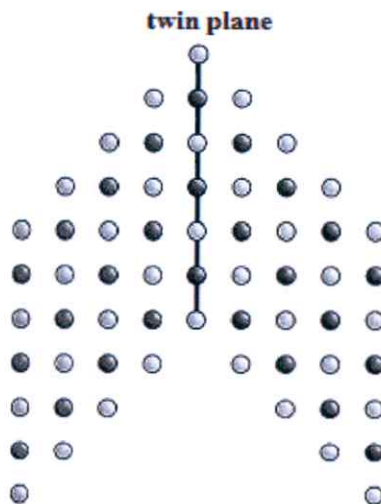
มากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธุ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธุ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



รูปที่ 2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.4.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

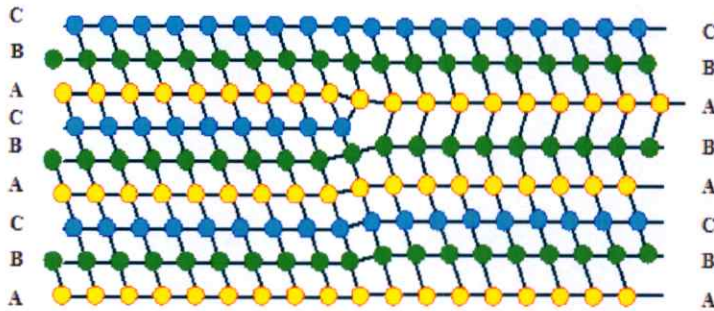
ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจก โดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

### 2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิบลำดับ (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิบลำดับ เช่น สำหรับ โครงผลึกออคตาฮีดรอนแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอม ที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณี โครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียง ระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิบลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับ ระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ใน โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่ อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็น ผลจากการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิบลำดับ

## 2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

[14, 15]

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

### 2.5.1 อัตราการระเหยสาร

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

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

- เมื่อ  $\Phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา  
 $P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์  
 $M$  คือ มวลโมเลกุล  
 $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

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

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

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

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

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

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

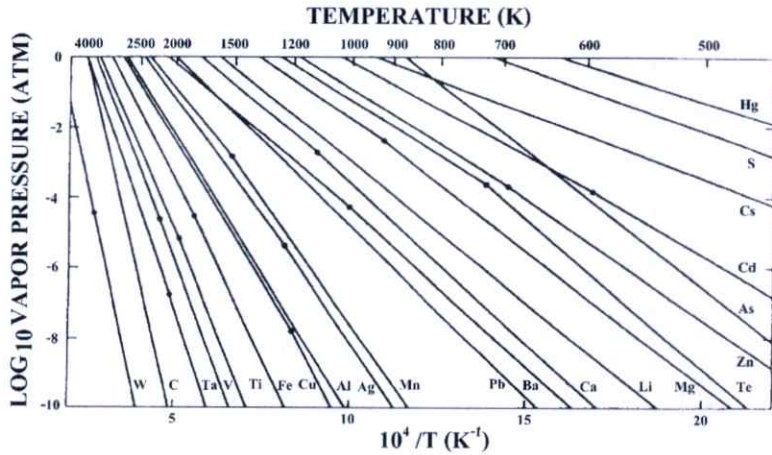
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V_v$ ) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว  $V_v$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.65) ใหม่ได้เป็น

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

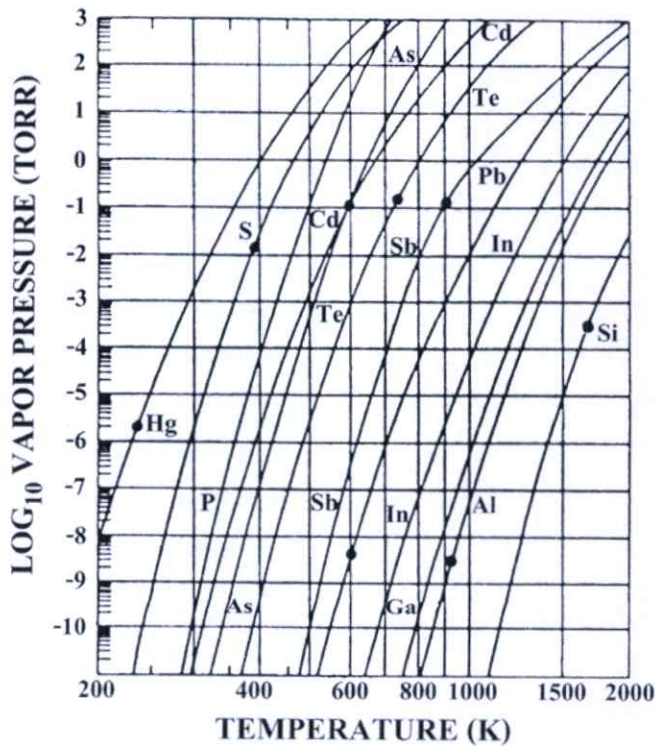
ถ้าประมาณให้  $\Delta H(T)$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta H_c$  (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

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

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



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

### 2.5.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้  $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$  โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น  $MX_{(s)}$  เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีกรแตกตัว	$MX_{(sหรือl)} \rightarrow MX_{(g)}$	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	$MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + 1/2 X_{2(g)}$	CdS, CdTe, CdSe
(ก) ซาลโคจีไนต์	X = S, Se, Te	SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(s) + 1/2 O_2(g)$	

M = โลหะ X = อโลหะ

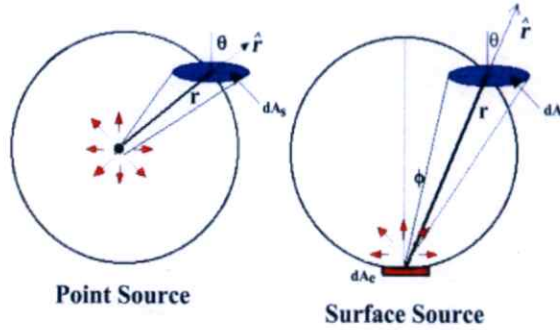
### 2.5.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการ

#### ระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจาก

การระเหย (total evaporation mass:  $\overline{M}_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\overline{M}_e = \int_0^t \int_{A_c} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_c dt = \int_0^t \int_{A_c} \Gamma_e dA_c dt \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่  $A_e$  คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล  $d\overline{M}_s$  ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.7  $dA_c$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_c = dA_s \cos \theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

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

เมื่อ  $r$  คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

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

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

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

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

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

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

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

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

เมื่อ  $n = 1$  สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า  $n > 1$  อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า  $n < 1$  จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ  $n = 0$  การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

## 2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [6-9,16-19]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

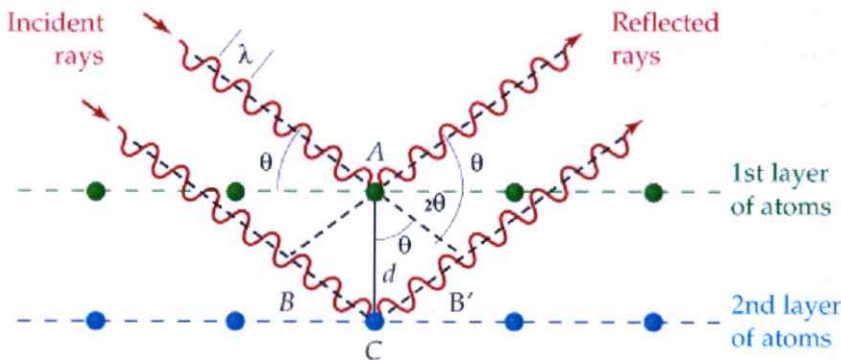
ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ  $10^{-10}$  เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย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

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม

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

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

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



รูปที่ 2.18 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 ( $hkl$ )

คังสมการ

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

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

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

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

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

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (texture coefficient) ของระนาบ ( $hkl$ ) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึกหาได้จากสมการ

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

เมื่อ  $TC(hkl)$  คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก ( $hkl$ )

$I(hkl)$  คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ

$I_0(hkl)$  คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

$N$  คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

ขนาดของเกรน ( $D$ ) และความเครียด ( $\mathcal{E}_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

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

ดังนั้น

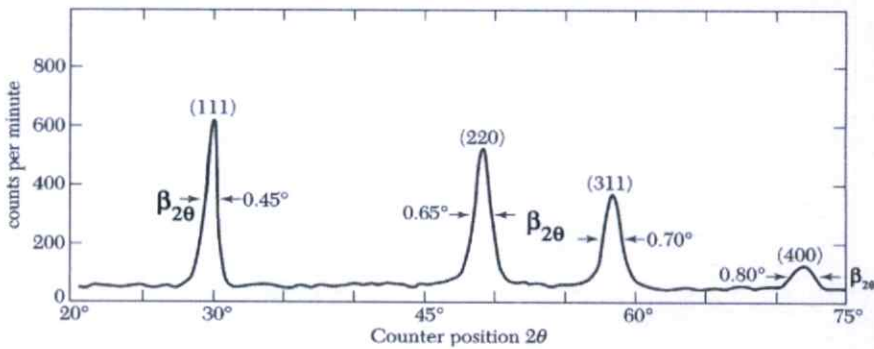
$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \varepsilon_s \sin \theta \quad (2.20)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน

$\beta$  คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์  
(full width at half maximum : FWHM)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก

$\varepsilon_s$  คือ ความเครียด



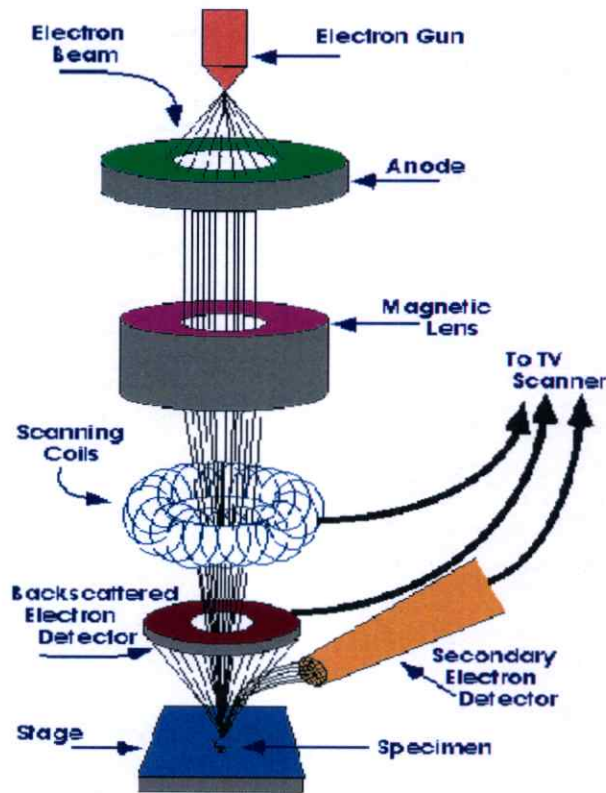
รูปที่ 2.19 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

## 2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

[6-9,12-21]

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

ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

**ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้**

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กัน โดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่ผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $I_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

### อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนทำให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจิอิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิดโดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอ็กซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

#### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงชันกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา

ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปในเรื่องของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่ำมาก โอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึงสัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นก็น้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบ์ใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาดังกล่าวถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (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 ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้ง

คายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) จากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้น โครของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### ออเจียอิเล็กตรอน

ออเจียอิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้น โครใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำย โอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้น โครถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวง โคร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจียอิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวง โครชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าลักษณะของภาพได้ดังนี้

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

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

## 2.8 รอยต่อพี-เอ็น [6-9,13-15,19]

รอยต่อพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ดังกล่าวนี้จะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญ ๆ ในปัจจุบันมีดังนี้คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซ์ (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

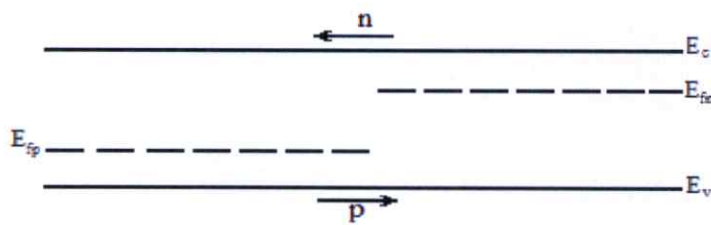
### 2.8.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึ่มไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่ซึ่มไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ซึ่มของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจากมีประจุบวกของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้าย ๆ กัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึ่มของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ด้านการแพร่ซึ่ม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

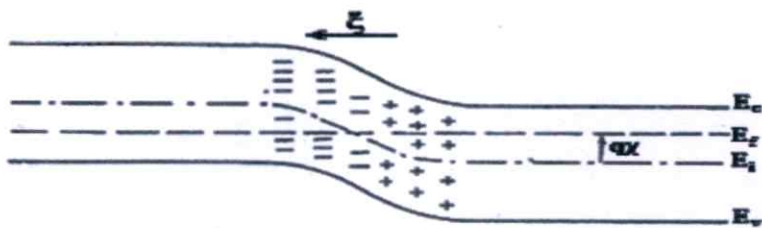
ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.21 โดยที่รูป 2.21(ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.21(ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค) โดยที่  $\phi$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ  $\xi$  คือ สนามไฟฟ้าที่รอยต่อ



(ก)



(ข)



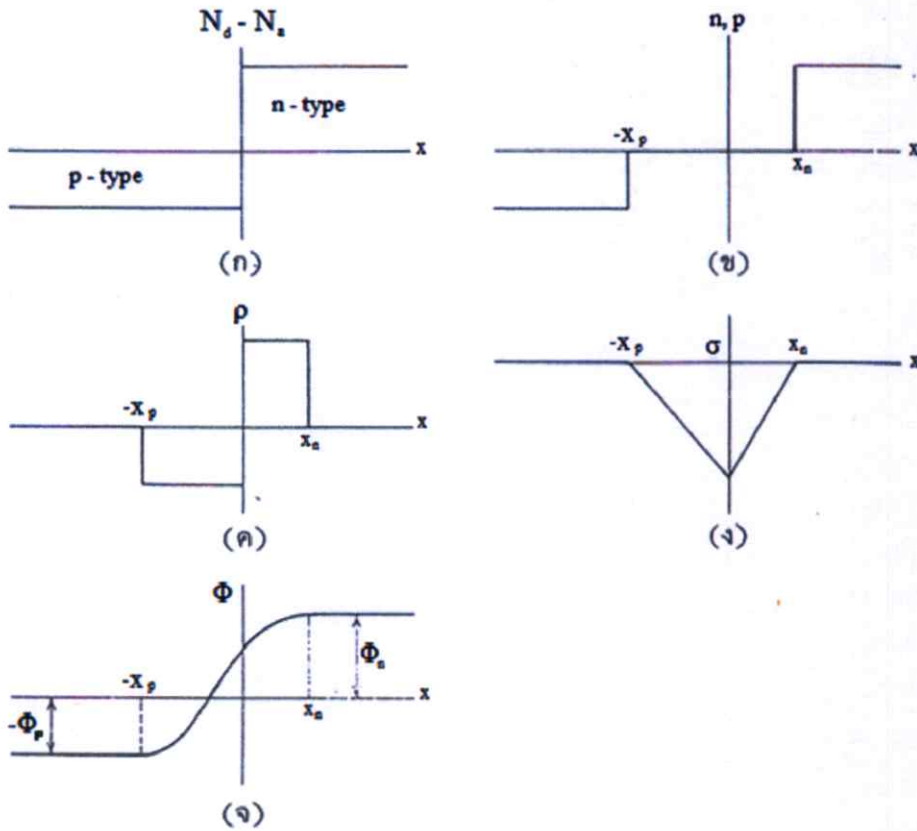
(ค)

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

- ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

### 2.8.2 รอยต่อแบบขั้น (step junction)

รอยต่อแบบขั้นเป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงรอยต่อแบบขั้นที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

- ก. ความเข้มข้นสารเจือ
- ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ
- ค. ประจุค้าง
- ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
- จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \quad (2.22)$$

แล้ว 
$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) ; 0 < x < x_n \quad (2.23)$$

สนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง  $x_n$  ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-q}{\epsilon_s} N_a (x + x_p) ; -x_p < x < 0 \quad (2.24)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกัน ที่ระยะ  $x=0$  สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.25)$$

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าไปในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่า เขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อแบบชั้นด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.24) เทียบกับ  $x$  นั่นคือ

$$\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s} (x_n - x)^2 ; 0 < x < x_n \quad (2.26)$$

โดยที่ 
$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.27)$$

ในทำนองเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_p)^2 \quad ; -x_p < x < 0 \quad (2.28)$$

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.29)$$

$\phi_p$  คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง  $\phi_n - \phi_p$  จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.30)$$

และเรียก  $\phi_i$  ว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก ( $\approx 10^{19}$  ต่อตารางเซนติเมตร) สมการที่ (2.30) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่าการณีที่มีการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มี-ดิแรคด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มีจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มีของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกเท่ากับ  $E_g/2q$  หรือราว ๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ใน Si ดังนั้นในรอยต่อ  $p^+ - n$  ศักย์ในตัวจะมีค่านั้นคือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.31)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[ \frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

### 2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ [6-9,12-13,19-20,30-33]

ถ้าให้แรงดันไฟ  $V_a$  แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน  $V_a$  ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น แรงดันในตัว  $\phi_i$  ของสมการที่ (2.33) จะถูกแทนที่ด้วย  $\phi_i - V_a$

$$x_d = x_n + x_p = \left[ \frac{2 \epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

ถ้า  $V_a$  มีค่ามากกว่า  $\phi_i$  แล้ว ความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ  $V_a$  จากรูปที่ 2.2 (ง) สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\frac{1}{2} \xi_{\max} x_d = (\phi_i - V_a)$$

ดังนั้น

$$\xi_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.34)$$

### 2.9 ค่าความจุไฟฟ้า [7-9,13-14,19-21]

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อจะแสดงอยู่ในรูปของประจุ  $Q_s$  (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

$$Q_s = qN_d x_n = qN_a x_p \quad (2.35)$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d \frac{dx_n}{dV_a} = qN_a \frac{dx_p}{dV_a} \quad (2.36)$$

แต่เนื่องจาก  $x_p = (N_d / N_a) x_n$  และ  $x_d = x_n + x_p$  รวมทั้งพิจารณาสมการที่ (2.33) จะได้ว่า

$$\frac{dx_n}{dV_a} = \frac{1}{N_d} \left[ \frac{\epsilon_s}{2q \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

และ

$$C = \left[ \frac{q \epsilon_s}{2q \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

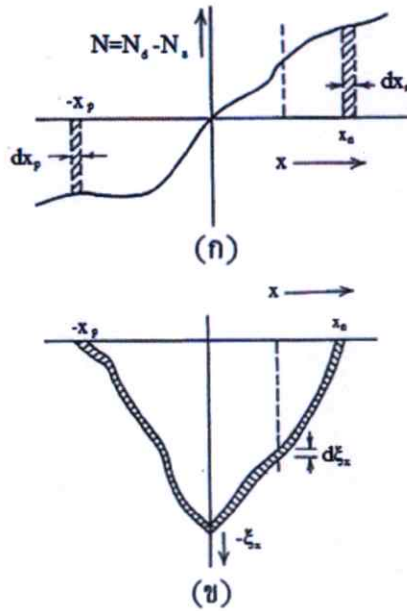
ในกรณีที่  $|V_a|$  มีค่ามากกว่า  $\phi_i$  แล้วค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบชั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ  $V_a$  ถ้าแทนสมการที่ (2.33) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้ว่า  $C = \epsilon_s / x_d$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสถิตสัญญาณขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอในช่วง  $-x_p$  ถึง  $x_n$  ดังรูปที่ 2.23 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่  $Q$  ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง  $x$  และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ  $x_n$  จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = q \int_x^{x_n} N dx \quad (2.39)$$

เมื่อ  $N$  คือค่าความหนาแน่นของประจุสุทธิและมีค่าเท่ากับ  $N_d - N_a$  แต่เนื่องจาก  $\xi_x(x_n) = 0$  โดยการใช้กฎของเกาส์ (Gauss' law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ มีค่าดังนี้คือ

$$-\xi(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_x^{x_n} q N dx = \frac{Q}{\epsilon_s} \quad (2.40)$$



**รูปที่ 2.23** แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในบริเวณเขตปลอดพาหะ

- ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ  
 ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย

จากรูปที่ 2.23 (ข) เมื่อแรงดันไฟย้อนกลับ  $V_a$  มีค่าเปลี่ยนไป  $dV_a$  ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป  $dx_n$  และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณตั้งแต่  $x$  จนถึง  $x_n$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n) dx_n \quad (2.41)$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด  $x$  จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N(x_n) dx_n \quad (2.42)$$

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ  $\xi_x$  กับ  $x$  จะสัมพันธ์กับ  $\phi_i - V_a$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.23 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s} dQ \quad (2.43)$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \quad (2.44)$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.44) เทียบกับ  $x_n$  คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)^2} \left( 1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.45)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไป ต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากัน

นั่นคือ 
$$|dQ| = |qN(-x_p) dx_p| = qN(x_n) dx_n \quad (2.46)$$

และ 
$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s} \left( 1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.47)$$

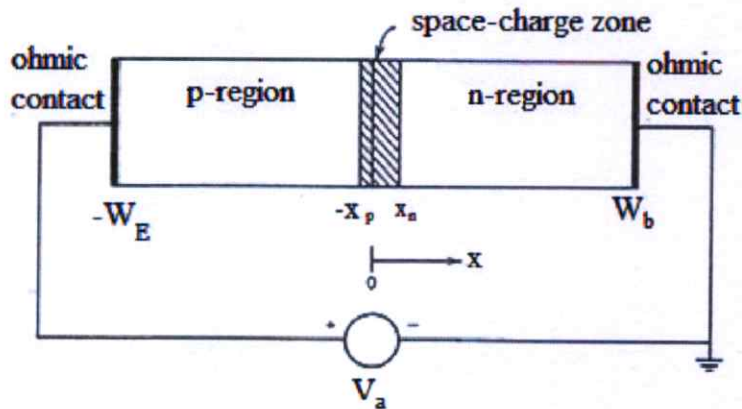
แทนค่า  $dx_n$  ของสมการที่ (2.47) ลงในสมการที่ (2.41) จะได้ว่า

$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s (dC / dV_a)} \left( 1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.48)$$

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนัก แล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ (2.48) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบข้างเดียว (one sided step junction)

## 2.10 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น [7-9,13-14,19-21]

จากรูปที่ 2.24 แสดงการป้อนแรงดันไฟตรง  $V_a$  ให้กับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน  $V_a$  แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ  $\phi_i - V_a$  ถ้า  $V_a$  มีค่าเป็นบวก (ดังรูปที่ 2.14) จะเรียกว่าการไบอัสไปหน้า แต่ถ้า  $V_a$  มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า  $V_a$  ในช่วงของ  $V_a$  ขนาดหนึ่ง



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน  $V_a$

## 2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Boundary Values of Minority Carrier Densities) [7-9,13-14,19-21]

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ติดกับรอยต่อพี-เอ็น คือที่ระยะ  $x_n$  จะเท่ากับ ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือภายใต้การไบอัสก็ตาม นั่นคือ  $n_{no}(x_n) = N_d(x_n)$  ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบของเนื้อสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดพีที่ระยะ  $-x_p$  จะมีค่า  $p_{po}(-x_p) = N_a(-x_p)$  ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} n_{po}(-x_p) &= n_{no}(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned}
 p_{no}(x_n) &= p_{po}(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\
 &= N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right)
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำจะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.51}$$

และ

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.52}$$

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน  $n'$  และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน  $p'$  ที่เกิดขึ้นคือ

$$n' \equiv n - n_0 \tag{2.53}$$

$$p' \equiv p - p_0 \tag{2.54}$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{po}(-x_p) \left[ \exp\left(\frac{-qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.55}$$

และ

$$p'_n(x_n) = p_{no}(x_n) \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.56}$$

## 2.12 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ (ideal-diode analysis) [7-9,13-14,19-21]

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อ คือ

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_n}{\partial t} &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - (G - R) \\
 &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - U
 \end{aligned}$$

แต่จากสมการที่ (3.22)

$$U = p'_n / \tau_p = (p_n - p_{no}) / \tau_p$$

ดังนั้น 
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} \quad (2.57)$$

ในสภาวะคงตัว  $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$  แล้วสมการที่ (2.57) จะกลายเป็น

$$0 = D_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} - \frac{p'_n}{\tau_p} \quad (2.58)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (2.58) คือ

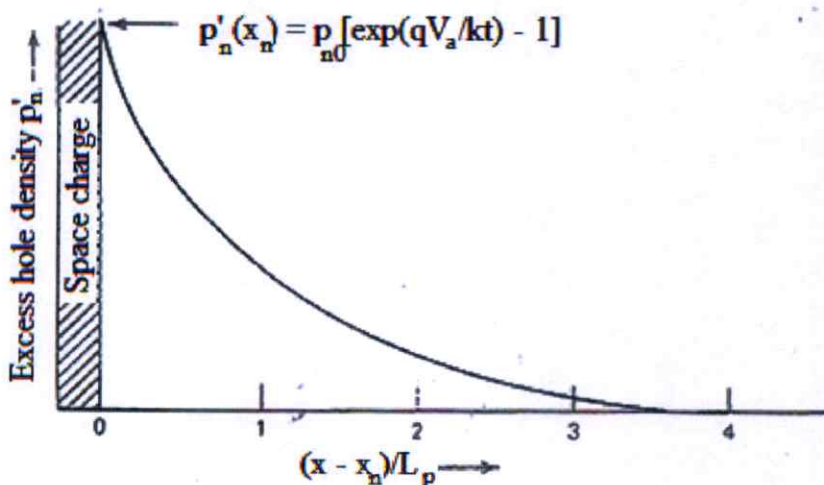
$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.59)$$

### 2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-bass diode characteristics)

จากรูปที่ 2.14 ถ้า  $W_B$  มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล  $L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$  ในกรณีนี้โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกรณีนี้อาไดโอดยาว เนื่องจาก  $p'_n$  ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง  $x$  ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว  $B$  ในสมการที่ (2.59) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.60)$$

ซึ่งแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.15



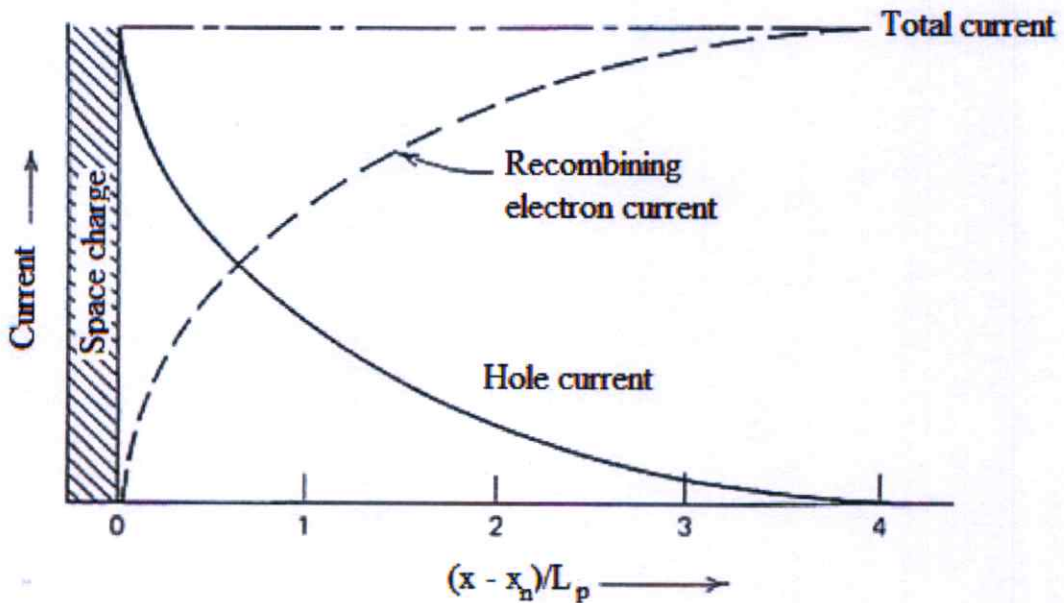
รูปที่ 2.25 แสดงการลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ  $V_a$

ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสารจะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้นเนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมากสนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่(2.58) จะได้ว่า

$$J_p(x) = -qD_p \frac{dp_n}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.61)$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ  $x = x_n$  เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า  $V_a$

ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีของรอยต่อพี-เอ็น อิเล็กตรอนจะกลายเป็นพาหะข้างน้อย จึงเรียกว่าการฉีดพาหะข้างน้อย (minority-carrier injection) ถ้า  $W_E \gg L_n$  กระแสของอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $-W_E$  คือ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{(x+x_p)/L_n} \quad (2.62)$$

โดยที่  $x$  ในสมการที่ (2.62) จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อ  $x$  ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็นไปสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้นกระแสสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ (2.61) รวมกับสมการที่ (2.62) นั่นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= J_p(x_n) + J_n(-x_p) = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.63)$$

เมื่อ  $J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right)$

และเรียก  $J_0$  ว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

### 2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง  $W_B$  และ  $W_E$  สั้นกว่า ความยาวแพร่ซึมของโฮล  $L_p$  และของอิเล็กตรอน  $L_n$  จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปเนื้อสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเนื้อสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $W_B$  และ  $-W_E$  สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.59) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ว่า

$$p'_n(x) = A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.64)$$

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง  $x = W_B, p'_n(W_B) = 0$

หรือ  $A' + B' \frac{(W_B - x_n)}{L_p} = 0$

$$B' = \frac{-A' L_p}{(W_B - L_n)} \quad (2.65)$$

ที่ตำแหน่ง  $x = x_n$  จะได้ว่า  $p'_n(x_n) = p_{n0} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$  (2.66)

และที่ตำแหน่ง  $x = x_n$  นี้สมการที่ (2.66) และสมการที่ (2.64) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$A' + B' \frac{(x_n - x_n)}{L_p} = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

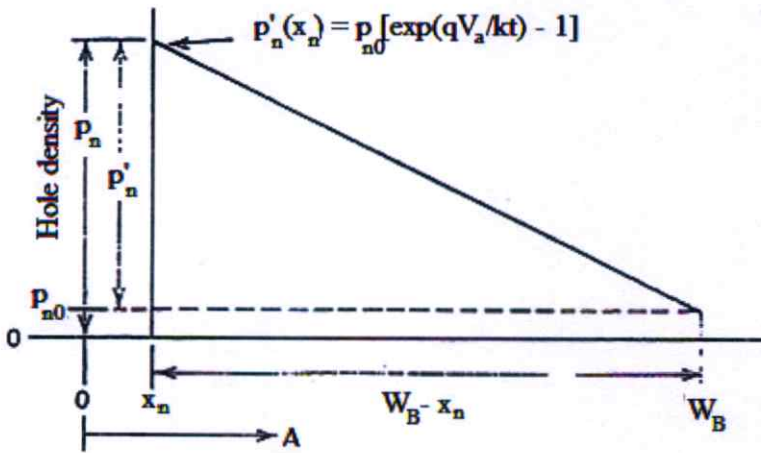
แล้ว

$$A' = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.67)$$

แทนสมการที่ (2.65) และสมการที่ (2.67) ลงในสมการที่ (2.64) จะได้

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \left( 1 - \frac{x - x_n}{W'_B} \right) \quad (2.68)$$

เมื่อ  $W'_B = W_B - x_n$  ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.27 แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดสั้นภายใต้การไบแอสไปหน้า  $V_a$

จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮลได้โดยการแทนสมการที่ (2.68) ลงในสมการที่ (2.58) จะได้ว่า

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{W'_B} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

$$= q D_p \frac{n_i^2}{N_d W'_B} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.69)$$

ในการทำงานเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ดังสมการ

$$J_n = q D_n \frac{n_i^2}{N_a W'_E} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.70)$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= q n_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d W'_B} + \frac{D_n}{N_a W'_E} \right) \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.71)$$

เมื่อ

$$J_0 = q n_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d W'_B} + \frac{D_n}{N_a W'_E} \right)$$

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริง อาจจะเป็นรูปแบบการผสมของไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ ซึ่งการหาค่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.71) ภายใต้การไบแอสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ  $V_a$  เนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อ แต่ภายใต้การไบแอสย้อนกลับจะมีกระแสอิมิตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิมิตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

### 2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents)

[7-9,13-14,19-21]

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.71) นั้นยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสที่อาจจะลดลงภายใต้การไบแอสไปหน้า เนื่องจากพาหะอิสระสูญหายไปบางส่วนซึ่งเกิดจากกลไกการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวในบริเวณประจุค้าง ในทางกลับกันพาหะอาจถูกสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบแอสย้อนกลับ ยังผลให้กระแสอิมิตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของชอกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัวสุทธิได้โดยการแทน  $pn = n_i^2 \exp(qV_a / kT)$  ลงในสมการที่ (2.65) แล้วจะได้ว่า

$$U = n_i^2 \frac{[e^{(qV_a/kT)} - 1]}{[p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \tau_0]} \quad (2.72)$$

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุก้างคือ

$$J_r = q \int_{-x_p}^{x_n} U dx \quad (2.73)$$

ถ้าประมาณว่า  $E_t \approx E_i$ ,  $p = n = n_i \exp(qV_a / 2kT)$  แล้วสมการ (2.72) จะกลายเป็น

$$U = \frac{n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \quad (2.73)$$

แทนสมการที่ (2.74) ลงในสมการที่ (2.73) จะได้

$$\begin{aligned} J_r &= \frac{q x' n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \\ &\approx \frac{q x' n_i}{2\tau_0} \exp(qV_a / 2kT) \end{aligned} \quad (2.74)$$

เมื่อ  $\tau_0 = 1/N_t \sigma v_{th}$  ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณประจุก้างภายใต้การไบอัสไปหน้า จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในแบบ  $\exp(qV_a/2kT)$  ซึ่งจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในกรณีของไดโอดอุดมคติ อัตราส่วนของ  $J_t / J_r$  ภายใต้การไบอัสไปหน้าคือ

$$\frac{J_t}{J_r} = \frac{2n_i}{x_d} \left[ \frac{L_n}{N_a} + \frac{L_p}{N_d} \right] \exp(qV_a / 2kT) \quad (2.75)$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้น ยังผลให้  $J_r$  ยิ่งเด่นกว่า  $J_g$  ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านเดียวที่มี  $L_n = 60$  ไมโครเมตร,  $X_d = 0.25$  ไมโครเมตร,  $N_a = 10^{16}$  ต่อตารางเซนติเมตร และ  $J_r$  จะมีค่ามากกว่า  $J_g$  เมื่อ  $V_a$  มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทาง ตัวเศษของสมการที่ (2.72) จะมีค่าเป็น  $-n_i^2$  ยังผลให้  $U$  มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุค้าง บริเวณความกว้าง  $x_i$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุค้าง  $x_d$  เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $p = n \ll n_i$  ซึ่งจะทำให้  $U$  ของสมการที่ (2.72) กลายเป็น

$$U = -n_i / 2\tau_0$$

แทนค่า  $U$  ลงในสมการที่ (2.73) จะได้ว่า

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0} \quad (2.76)$$

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิด-การรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ  $E_i$  ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ  $p^+ - n$  บริเวณประจุค้างจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ความกว้างของบริเวณประจุค้าง  $x_d$  และบริเวณ  $x_i$  ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุด จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

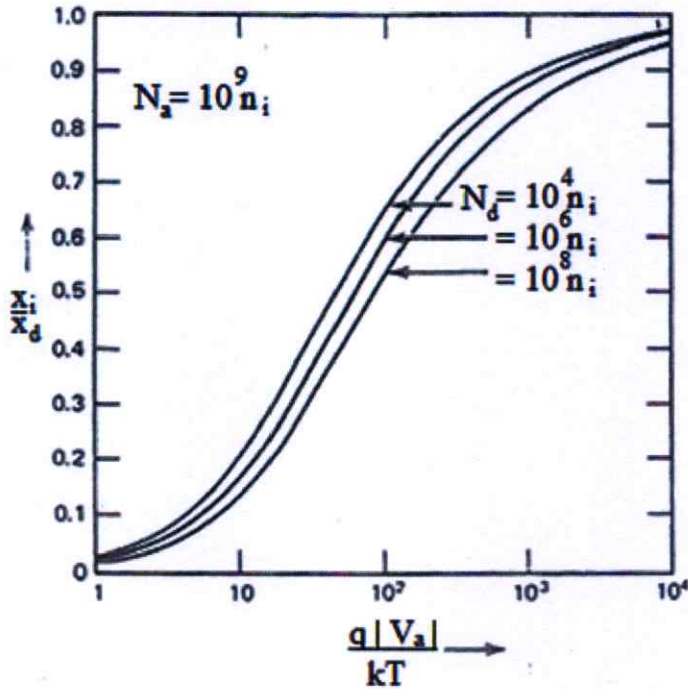
$$x_d = \left[ \frac{2\epsilon_s}{qN_d} (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \\ = \left[ \frac{2\epsilon_s kT}{q^2 N_d} \left( \ln \left( \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.77)$$

และ

$$x_i = \left( \frac{2\epsilon_s kT}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \ln \frac{N_d}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.78)$$

ซึ่ง  $V_a$  คือแรงดันไบอัส ( $V_a < 0$  ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง  $x_d$  และ  $x_i$  จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความแตกต่างระหว่าง  $x_d$  และ  $x_i$  จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดัน

ย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.18 แสดงอัตราส่วนของ  $x_i/x_d$  ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความเข้มข้นสารเจือผู้ให้ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อแบบชั้นด้านเดียว  $p^+ - n$



รูปที่ 2.28 แสดงอัตราส่วนของ  $x_i/x_d$  เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อ  $p^+ - n$

## 2.14 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์

[7-9,13-14,19-21]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.29 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสขึ้นขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.79)$$

เมื่อ  $J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right)$  (2.80)

โดยที่  $V$  คือ แรงดันไบอัสตรง

$n$  คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

$J_0$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น

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

$J_{00}$  คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

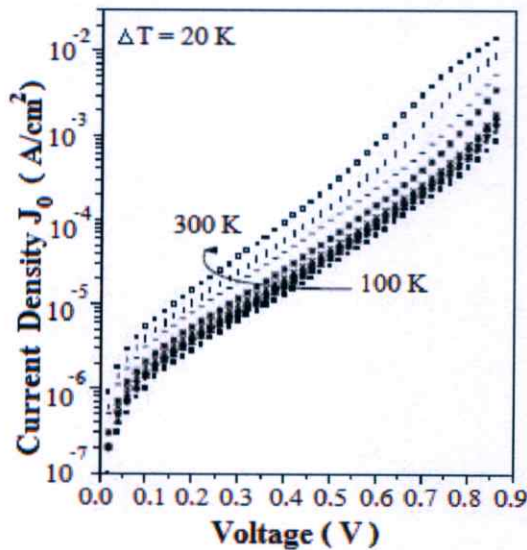
ซึ่ง  $J_{00}$  จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน ( $V_b$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_V \left[ \frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^2 \exp\left[ \frac{-qV_n}{kT} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.81)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.82)$$

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



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  ที่แปรตามอุณหภูมิ

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

### 2.14.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

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

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

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงคั้งนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

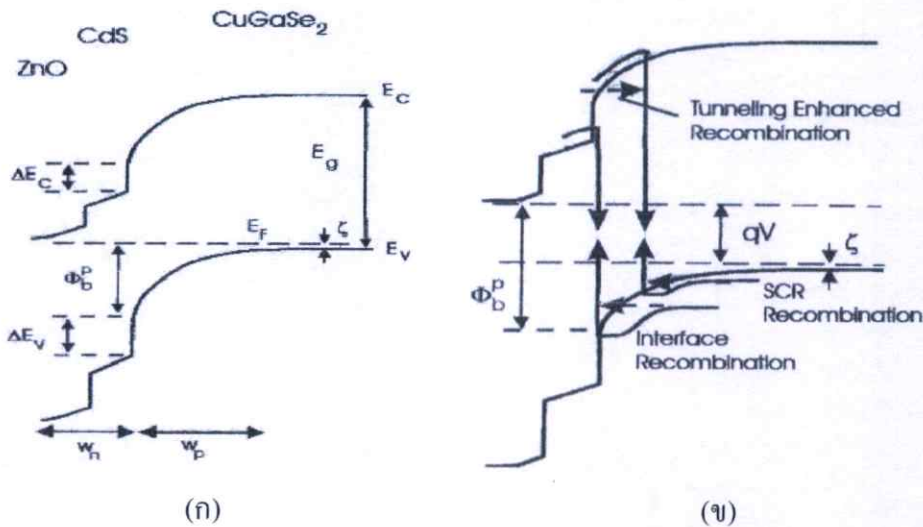
สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น  $p-n^+$ ) ปริมาณ  $N_d > N_A$  กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ  $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$  ซึ่ง  $N_D$  และ  $N_A$  คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ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

### 2.14.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.83)$$

โดยที่  $A$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ซึ่งค่าของ  $A$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนี้  $\ln J_0$  จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง  $\ln J_0$  ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการซุดคูโมงค์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลดปล่อยพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะซุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้  $J_0$  จะขึ้นกับอุณหภูมิจำกน้อย



รูปที่ 2.30 แสดงกลไกผลของการซุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการซุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลดปล่อยพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CuInGaSe}_2$  และของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CdTe}$  การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.84) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln (J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln (J_{00}) \quad (2.84)$$

พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J_0$  กับ  $1/T$  พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดจากการนำกระแสเกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีที่เกิดจากการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดุกกิ้นแสง พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของตัวดุกกิ้นแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดุกกิ้นแสงขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุคมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.85)$$

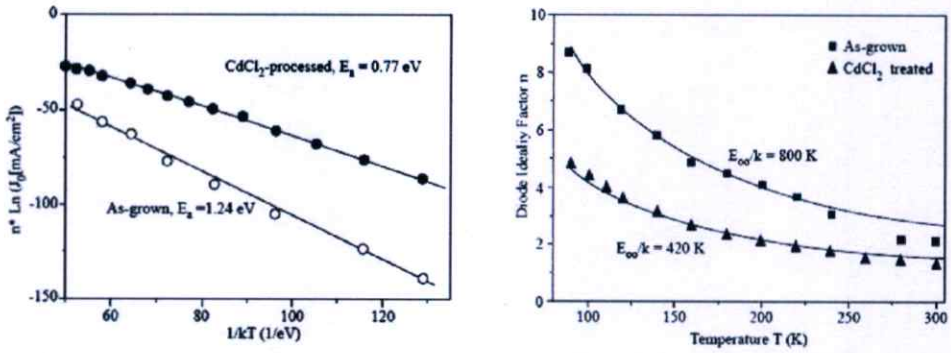
โดย  $E_{00}$  คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม  $E_{00}$  คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.86)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ  $\epsilon_s$  คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกิ้นแสง แฟกเตอร์อุคมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.87)$$

ซึ่ง  $kT^*$  คือ ลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.31 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  $J_0$  และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย  $\text{CdCl}_2$

## 2.15 อิทธิพลของการขูดโมังก์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [6-9,19-21,24,27]

อัตราการรวมตัวของพาหะ ( $R$ ) ของกลไกการขูดโมังก์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \quad (2.88)$$

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

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \quad (2.89)$$

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

เมื่อ  $S_{np}$  คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิลีกตรอน หรือโฮล,  $\tau_{n,p}$  คือ ค่าชีวิตของอิลีกตรอนและโฮลอิสระ ส่วน  $\Gamma$  คือ แฟกเตอร์แก้ (correction factor) ของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.90)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลาดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.91)$$

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

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวควบกลืนแสง จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.92)$$

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

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.87) ร่วมกับสมการ (2.92) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวควบกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.93)$$

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

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*} \right) \quad (2.94)$$

จากสมการที่ (2.94) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอด ( $n$ ) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ  $T^* \rightarrow \infty$  กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี  $E_{00} \rightarrow 0$  จะได้ว่า  $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$  ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.95)$$

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

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ในสมการ (2.95) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.84) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

## 2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

### 2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม [6-9,12-14,16-21,29,31,37]

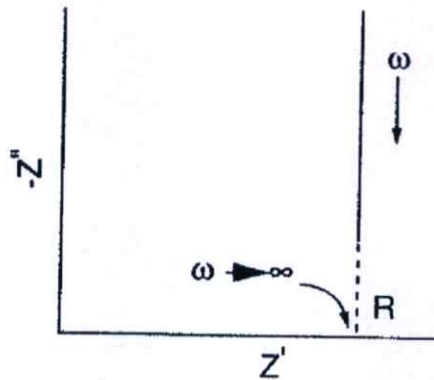
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.96)$$

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

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.97)$$

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 2.44



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

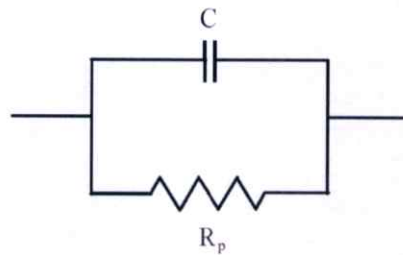
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.33 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.98)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.33 ดังนั้นสมการ (2.98) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.99)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.100)$$



รูปที่ 2.33 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

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} \right] \quad (2.101)$$

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

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

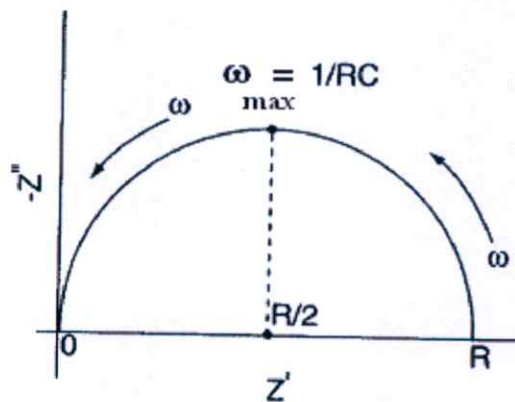
$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.102)$$

และ

$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.103)$$

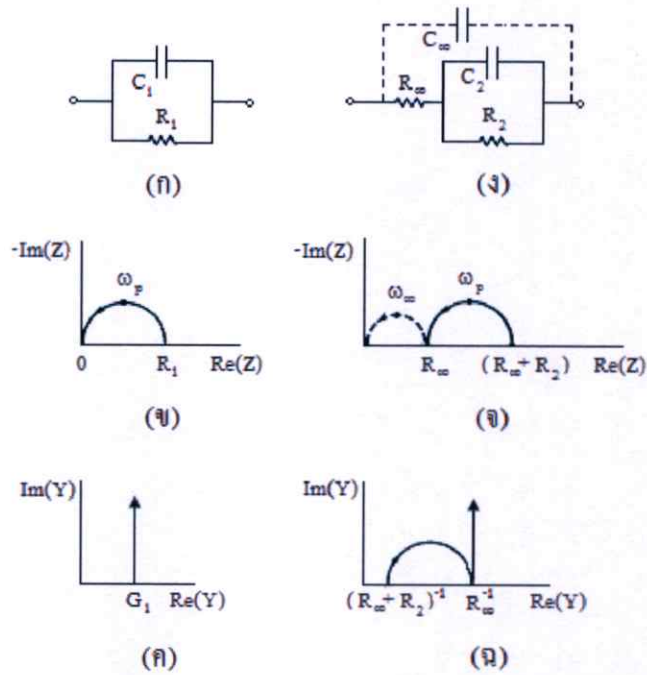
เมื่อ  $\tau = R_P C =$  ค่าคงตัวเวลา (time constant)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.34



**รูปที่ 2.34** แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.35



**รูปที่ 2.35** แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และ แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.35 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance:  $R_b$ ) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุด คือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.35(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีนี้ที่  $R_1 = R_{\infty}$  และ  $C_1 = C_{\infty}$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่มิปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน

(polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.35(ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูปที่ 2.25(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ  $R_1 C_1 \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไข่วัดดังรูปที่ 2.35(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.35(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $j\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.104)$$

กราฟของสมการที่ (2.104) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.35(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.35(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.105)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.105) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.35(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.35(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 และ  $Z'$  กับ  $Z''$  มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.106)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.107)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.35 ในกรณีที่มีความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) 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 2.26 ดังนี้คือ

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

และ

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

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.108)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

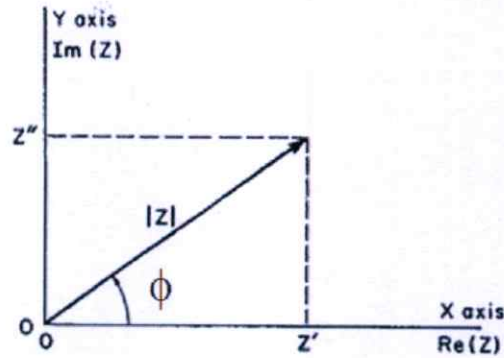
$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.109)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

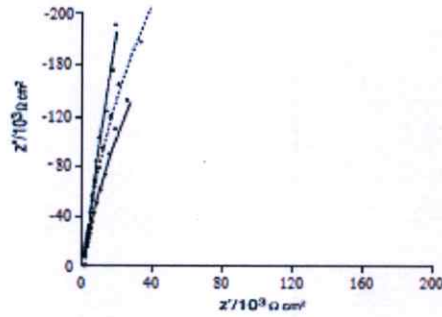
ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.110)$$

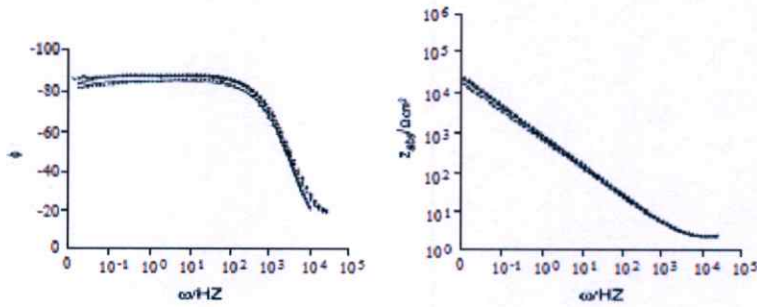


**รูปที่ 2.36** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส  $\phi = -90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลีเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.26 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



(ก)



(ข)

**รูปที่ 2.37** แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของโบด(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  $Z(\text{CPE})$  จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (2.111)$$

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

$$C_{dl} = \frac{P}{\sqrt[n]{R_s(n-1)}} \quad (2.112)$$

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

### 2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [6,24,29-30]

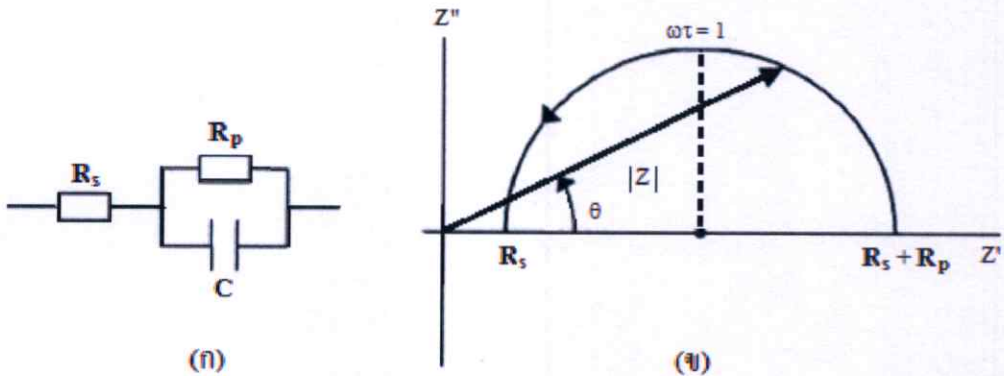
พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอยต่อความต้านทานชั้นที่และความต้านทานอนุกรมสามารถหาคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ขณะทำการวัดจะต้องป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกว่าค่ากระแสสลับจากนั้นอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Z = \frac{V \sin \omega t}{I \sin (\omega t + \varphi)} = Z' - jZ''$$

$$= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.113)$$

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

$G$  คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง  $G = \frac{1}{R}$  และ  $\varphi$  คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไบแอสกับกระแสสลับ วงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงดังรูปที่ 2.38 โดยที่  $R_p$  คือความต้านทานชั้นที่หรือความต้านทานขนาน (parallel resistor),  $C$  คือ ความจุของรอยต่อและ  $R_s$  คือความต้านอนุกรมของวงจร



รูปที่ 2.38 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

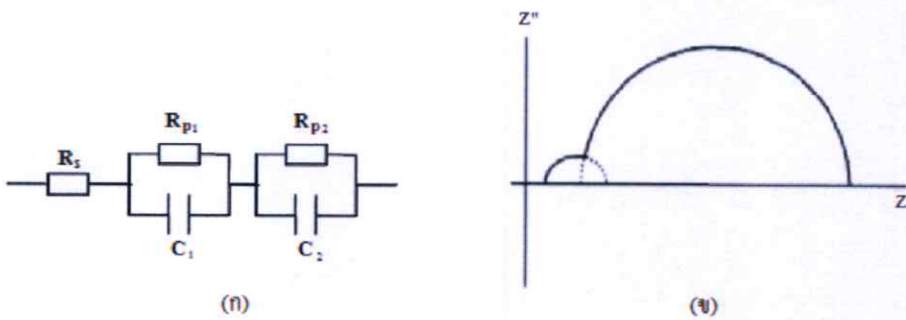
จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมจะอยู่บนแกน  $Z'$  โดยมีรัศมีเท่ากับ  $\frac{R_p}{2}$  จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่  $R_s$  และ  $R_s + R_p$  ส่วน  $Z''$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$Z'' = R_p = \frac{1}{\omega_{\max} C} \quad (2.114)$$

ค่าความจุ C สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.114) จากวงจรสมมูลจะมีส่วนของ RC ที่ต่อขนานกัน 1 ชุด ส่งผลให้ได้รูปครึ่งวงกลมซึ่งจะมีค่าคงตัวเวลา 1 ค่า ดังสมการ

$$\omega_{\max} = \tau^{-1} = (R_p C)^{-1} \quad (2.115)$$

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.39(ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงใน รูปที่ 2.39(ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



รูปที่ 2.39 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข)

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษา ซึ่ง เป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรนเป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน Z' (ดังรูปที่ 2.40(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย  $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$  ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงในสมการ(2.116) ดังนี้คือ

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

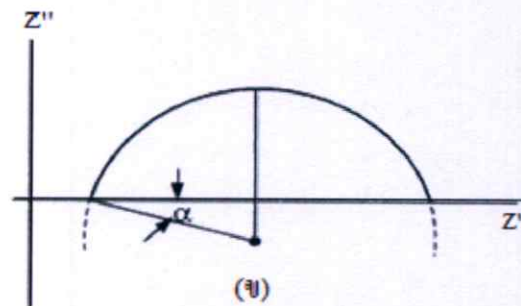
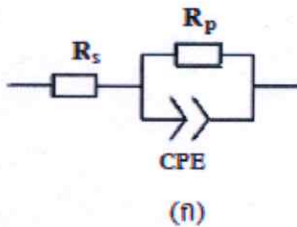
อิมพีแดนซ์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R,C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า n และ P ดังนั้นคือ

$$P = C^n (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-n} \quad (2.116)$$

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

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

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.40 แสดงแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ก) และกราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ข)

### 2.16.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี [6-9,16-21,24,29-30]

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่  $\omega$  ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.117)$$

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

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีแค่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับคั่น ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริกดังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.118)$$

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)

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

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left( \frac{\epsilon_s q N_a}{2V_{bi}} \right)^2 \quad (2.119)$$

เมื่อ  $W$  คือความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ,  $N_a$  คือความหนาแน่นของผู้รับ,  $\epsilon_s$  คือคงที่ไดอิเล็กทริก และ  $V_{bi}$  คือแรงดันในตัว (built-in voltage) กับดักประจุที่อยู่ในบริเวณพร่องพาหะก็มีผลต่อความจุของรอยต่อด้วยกล่าวคือกับดักประจุที่มีพลังงานเท่ากับระดับเฟอร์มิของอิเล็กตรอน ( $E_F^n$ ) หรือของโฮล ( $E_F^p$ ) กับดักประจุนั้นจะมีการให้ประจุและมีการคายประจุ (charging and discharging) สำหรับกับดักประจุชนิดเดี่ยว (single trap) จะส่งผลทำให้ความจุมรวมเป็นดังนี้คือ

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{If} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^{*2}} \quad (2.120)$$

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

$$\omega_0 = 2N_V v_{th} \sigma_p \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{kT}\right) \quad (2.121)$$

โดยที่  $N_V$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์,  $v_{th}$  คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ  $\sigma_p$  คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับโฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก  $N_V$  และ  $v_{th}$  ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.121) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.122)$$

เมื่อ  $E_T = E_V = E_a$  ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์และนิยมเรียก  $E_a$  ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด  $\omega$  มีค่าน้อยกว่า  $\omega_0$  นั่นคือ  $\omega$  จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั้นเอง ส่วน  $\xi_0$  เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง  $\xi_0$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่งไรก็ตาม  $\xi_0$  คงยังขึ้นกับ  $E_a$  ดังความสัมพันธ์

$$\xi_0 = \xi_{00} \exp\left(\frac{E_a}{E_{00}}\right) \quad (2.123)$$

เมื่อ  $\xi_{00}$  และ  $E_{00}$  คือค่าคงที่ของกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ [24,29-30]

ในกรณีที่กับดักประจุไม่เป็นกับดักประจุชนิดเดี่ยว แต่จะเป็นกับดักประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กับดักประจุ ( $N_T$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [29-30]

$$N_T(\omega) = c(E_\omega) \frac{\omega}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{c(E) dC(\omega)}{kT d \ln \omega} \quad (2.124)$$

ฟังก์ชัน  $c(E_\omega)$  จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกักประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกักประจุ ถ้าแทนสมการ (2.123) ลงในสมการ (2.122) และเปลี่ยนตัวแปร  $E_\omega$  เป็น  $E_\omega$  จะได้ว่า

$$E_\omega = \frac{kTE_{\omega_0}}{E_{\omega_0} - kT} \ln\left(\frac{\xi_{\omega_0} T^2}{\omega}\right) \quad (2.125)$$

ซึ่ง  $E_\omega$  ของสมการที่ (2.125) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน  $E_\omega$  จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงตัวของเวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F^D$ ) หรือ ( $E_F^C$ ) จะหาได้จากความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง  $\omega_0$  สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ  $C(\omega)$  ค่าพลังงานกระตุ้นของ  $\omega_0$  จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับเฟอร์มิ ( $E_F^D$ ) หรือ ( $E_F^C$ ) เว้นเสียแต่ระดับเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากสมการ (2.117) ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  ที่สอดคล้องกับ  $\tau_D$  จะแสดงได้ดังสมการ

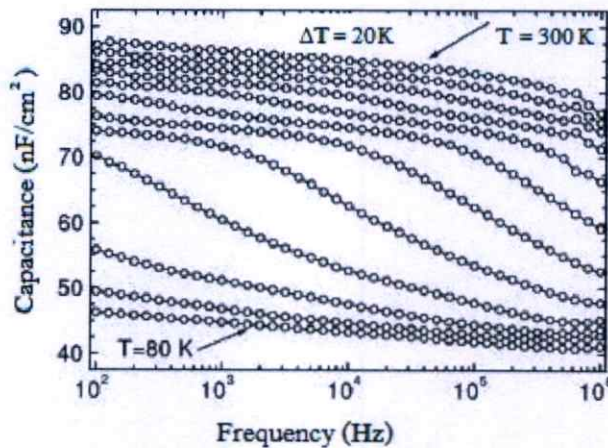
$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่มีความถี่เชิงมุม  $\omega$  ที่ใช้ในการวัด  $\omega$  มีค่ามากกว่า  $\omega_D$  ( $\omega > \omega_D$ ) พาหะอิสระไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุเรขาคณิตคือ

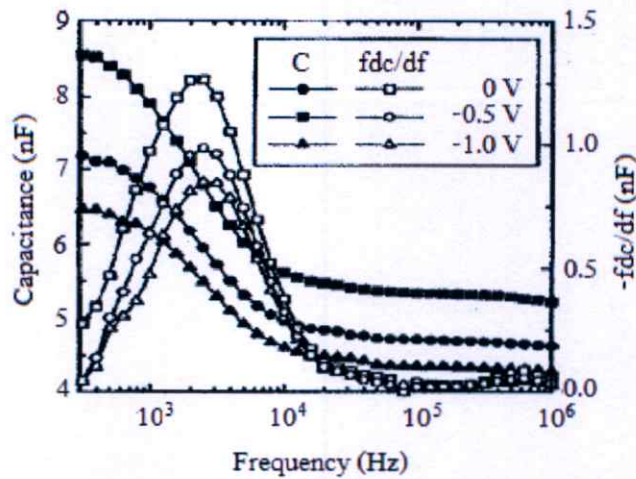
$$C_{\text{geo}} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.126)$$

เมื่อ  $d$  คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรคทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  จะมีค่าสูงกว่า  $\omega$  และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เชิงมุม  $\omega_0$  สถานการณ์ใดสถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น[24,29-30]

1. สำหรับ  $\omega_0 < \omega < \omega_D$  เราจะวัดได้ค่า  $C_{SCR}$  แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวิน ไปเป็น 300 เคลวิน การทรานซิชันครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้น โดยเปลี่ยนจาก  $C_{SCR}$  ไปเป็น  $C_H$  ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega = \omega_0$  ตามสมการ (2.120) การทรานซิชันของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.31 ส่วนรูปที่ 2.32 จะแสดงค่า  $C$  ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชันของค่าความจุจากช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  ซึ่งพีคของกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน



**รูปที่ 2.41** แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า  $C_{SCR}$  แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม



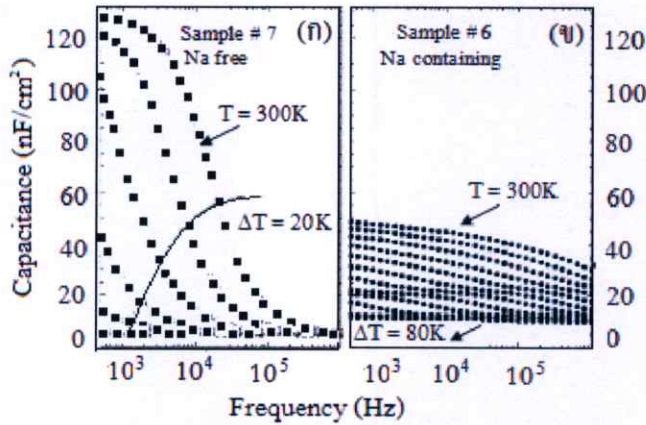
รูปที่ 2.42 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง

2. สำหรับ  $\omega < \omega_D < \omega_0$  ในแอตมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจะเห็นการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวซึ่งเกิดจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ ( $C_{IF}$ ) ซึ่งการทรานซิชันนี้เกิดขึ้นที่  $\omega = \omega_D$  พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะรูปที่ 2.43 แสดงการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิสูง/ความถี่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบขั้นบันได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทรานซิชันที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก ( $\tau_D$ ) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชันที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโฮลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

ถ้าทราบค่า  $\mu_p$  และ  $\epsilon_s$  ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของโฮล (p) ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า  $C_{IF}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออไนซ์ซึ่งก็คือมีการจับประจุและการคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลาง

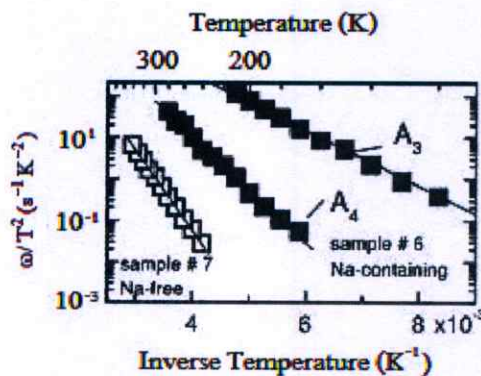
ทางไฟฟ้า การทรานซิชันในรูป 2.43(ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดโพลีตริกก่อนข้างสูงอยู่ในราว  $\tau_D = 10^{-5}$  s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้  $\omega_D = \omega_0$  ดังนั้นจากการวัดแอมพลิจูดสเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เชิงเบน ( $\omega_0$ ) ของกับดักประจุนี้คือไม่สามารถตรวจวัดระดับพลังงานของกับดักประจุได้



รูปที่ 2.43 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ

- กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na
- กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na

รูปที่ 2.44 แสดงการหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในรูปที่ 2.43 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ได้จากสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na ส่วน CuGaSe<sub>2</sub> ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า



รูปที่ 2.44 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub>

## 2.17 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [6-9,11,16-17]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกระแสตรงรูปที่ 2.45 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอสหรือไม่มีกระแสตรง ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.45 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

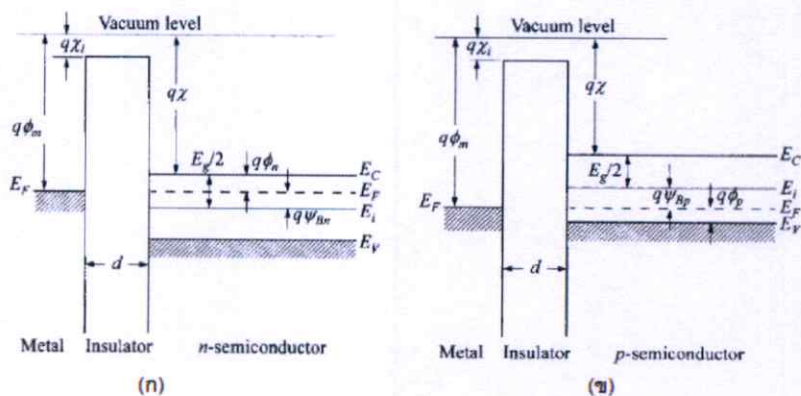
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (2.127ก.)}$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (2.127ข.)}$$

เมื่อ  $\chi, \chi_i$  คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

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

$\phi_n, \phi_p$  คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน

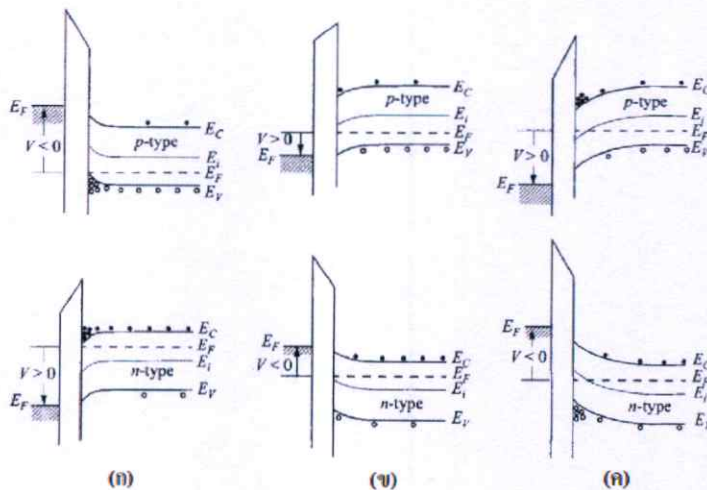


รูปที่ 2.45 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ( $V=0$ )

ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น

ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พานะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้น โดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.46 โดยกรณีแรกตามรูปที่ 2.46(ก.) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วโลหะ ( $V < 0$ ) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมขมของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ โดยกรณีนี้จะเรียกว่าช่วงขมขมพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ( $V > 0$ ) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าช่วงพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.46(ข.) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) เคลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.46(ค.) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าช่วงกลับกลาย (inversion case)

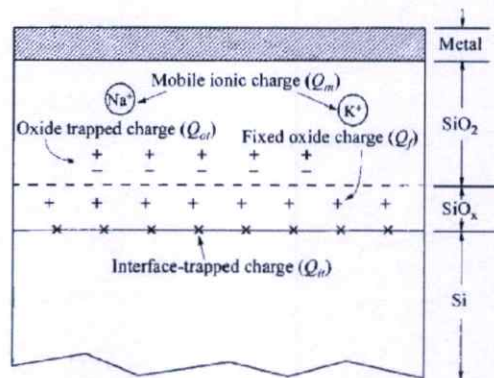


รูปที่ 2.46 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด

- ก. ช่วงขมขมพาหะ
- ข. ช่วงพร่องพาหะ
- ค. ช่วงกลับกลาย

## 2.18 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน [6-9,11,16-17]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดั่งที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.37 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) และประจุค้างภายในกัณฑ์ ( $Q_{it}$ ) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO<sub>2</sub> โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ  $Q_{it}$  จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ ( $Q_{ox}$ ) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ ( $Q_{oc}$ ) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอ็กซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.47 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

## 2.19 กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [6-9,11,16-17]

กัณฑ์ที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และเช่นเดียวกับลักษณะของผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

สำหรับกรณีที่เป็นกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้ให้

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

$$= \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \quad (2.128 \text{ ก.})$$

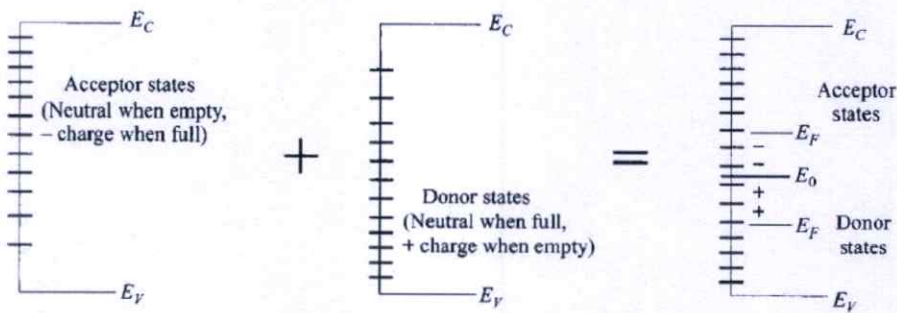
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้รับ

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (2.128 \text{ ข.})$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$g_D$  คือ สภาวะช้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้ให้

$g_A$  คือ สภาวะช้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้รับ



รูปที่ 2.48 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.48 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ  $E_0$

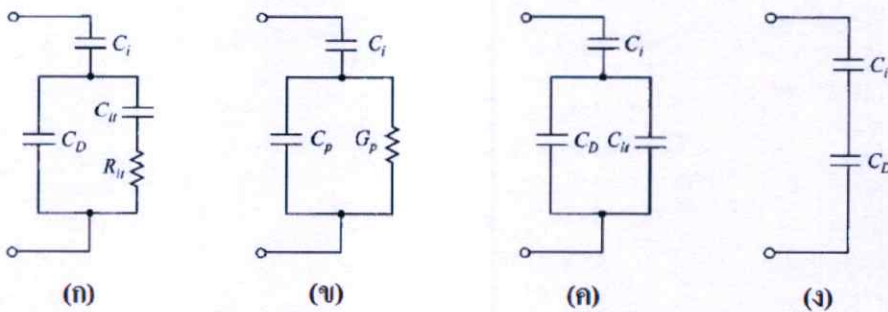
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\ &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \end{aligned} \quad (2.129)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (2.130)$$

สมการที่ (2.130) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ โดยการวัด  $Q_{it}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\Psi_s$ ) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.49 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  ของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอยู่ด้วย  
 ก. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ  
 ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุนี้จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน ( $C-V$ ) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกัณฑ์ประจุนั้นอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.49ก. โดยที่  $C_i$  และ  $C_D$  เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ ส่วน  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกัณฑ์ประจุซึ่งกัณฑ์ประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ  $C_{ii}$   $R_{ii}$  จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $\tau_{ii}$ ) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ของกัณฑ์ประจุ เนื่องจาก  $C_p$  และ  $G_p$  จะต่อขนานกัน ทั้ง  $C_p$  และ  $G_p$  จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.131)$$

และ

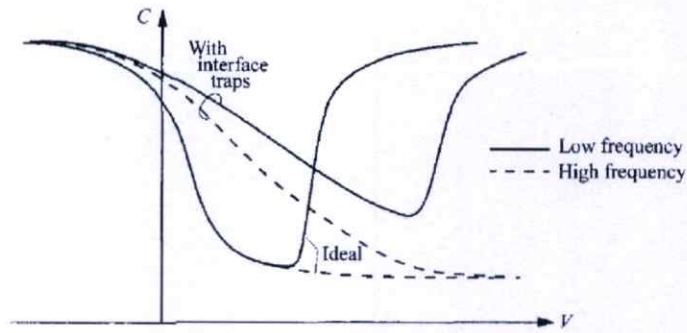
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it}\omega\tau_{it}}{1 + \omega^2\tau_{it}^2} \quad (2.132)$$

สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ  $R_{ii}$  ของวงจรมุมในรูปที่ 2.49ก. จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว  $C_D$  จะขนานกับ  $C_{ii}$  ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

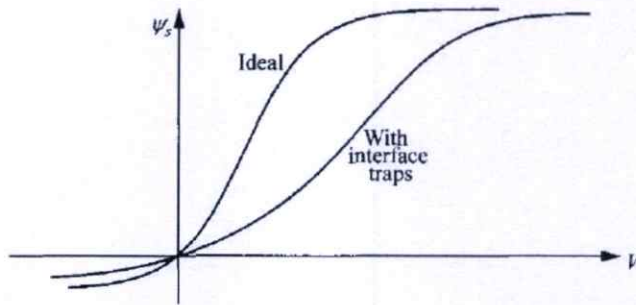
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{ii})}{C_i + C_D + C_{ii}} \quad (2.133)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.134)$$

รูปที่ 2.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\Psi_s$ ) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า  $\Psi_s$  ในรูปที่ 2.50ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Psi_s - V$  สามารถนำไปคำนวณหา  $D_{ii}$  ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ  $D_{ii}$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.50 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ  $\psi_s$

**การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ**

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.133) และสมการที่ (2.134) จะเขียนได้ว่า

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

$$= \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (2.135)$$

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

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

$$= \frac{\Delta C}{q^2} \left[ \left( 1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left( 1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (2.136)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกัปดักประจุที่แปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า ( $\Delta C$ ) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ  $D_{ii}$  ได้ก็สามารถที่จะหาค่า  $\Psi_i$  ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

### การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโทรสโคปี [6-9,16-17]

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้ ความแตกต่างของของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.50 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ต พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพีคค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.49ก. ความจุของฉนวน  $C_i$  ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชุมนุมพาหะอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอาไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์ สูดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น  $C_D$  ต่อขนานกันกับ  $R_{ii}$   $C_{ii}$  สำหรับค่า  $\frac{G_p}{\omega}$  ในสมการที่ (2.132) จะไม่มีพจน์  $C_D$  ปรากฏอยู่นั้นคือ  $\frac{G_p}{\omega}$  จะสัมพันธ์กับกัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้โดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้ของกัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_{in}}{G_{in}^2 + \omega^2 (C_i + C_{in})^2} = \frac{C_{ii} \omega \tau_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.137)$$

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

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.138)$$

โดยที่  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.138) นี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุก็มีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln(1+\omega^2\tau_{it}^2) \quad (2.139)$$

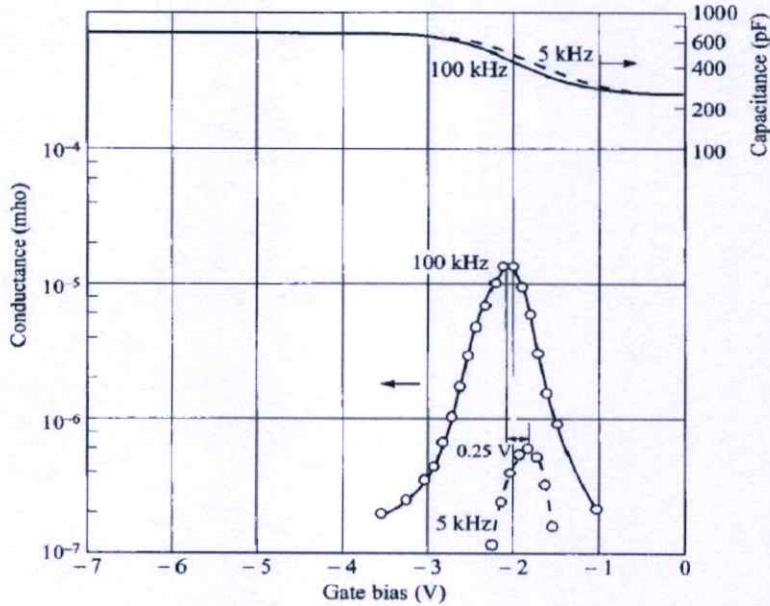
ซึ่ง  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega\tau_{it}=1.98$  และจากความสัมพันธ์  $D_{it} = C_{it} / q^2$  จะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{\left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}}{0.402q} \approx \frac{2.5}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.140)$$

และ 
$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{c,v})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.141)$$

เมื่อ  $\sigma_T$  คือพื้นที่ภาคตัดขวางของการจับประจุของกับดักประจุมีค่าประมาณ  $10^{-15}$  ต่อตารางเซนติเมตร ส่วน  $v_{th}$  คือความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน มีค่าประมาณ

$10^7$  เซนติเมตรต่อวินาที และ  $N_{C,V}$  คือค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ สำหรับ  $E_T$  คือระดับพลังงานของกักประจุเมื่ออุณหภูมิตั้งขึ้นแล้ว  $\tau_{it}$  จะมีค่าลดลง ดังนั้นความถี่ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกัก ( $\omega_0$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตั้งขึ้น ตามความสัมพันธ์  $\omega_0 \tau_{it} = 1.98$  เมื่อกักประจุเป็นชนิดที่มีพลังงานต่อเนื่องกัน



รูปที่ 2.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการเตรียมโคโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรายละเอียดของแข็ง และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS /CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย [16-21]

มีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติรายละเอียดของแข็ง

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ CuAlO<sub>2</sub> ที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub>
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ sartorius
3. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครูซิเบิ้ล
8. เครื่องอัดไฮโดรลิก



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd/CuAlO}_2$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ  $\text{CdS}$  ที่ถูกนำมาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ sartorius
5. เมทธานอล
6. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
7. เตาเผาสาร
8. ครูซิเบิ้ล

3.2. ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS} / \text{CuAlO}_2$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [17,34]

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับการเตรียมเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
2. นำผงผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  มาบดรวมกันในครกอาเกต ให้เป็นผงละเอียดมากคล้ายแป้งฝุ่น
3. นำผงผลึกที่บดแล้วมาทำการไล่ความชื้นและขจัดสารอินทรีย์ออกให้หมด โดยทำการเผาแคลไซน์ (calcination) ภายใต้บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. นำผงผลึกที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมาทำการอัดให้เป็นเม็ดกลมที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยใช้แรงอัดขนาด 4 ตัน
5. นำเม็ดสารตั้งต้น ไปใส่ไว้ในครุชเบิล เพื่อนำไปทำการเผาผนึกหรือการเผาซินเทอรั (sintering) ภายใต้บรรยากาศด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและต่อมาจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1100 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จึงปิดเตาให้ร้อนกระทั่งเตาเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำครุชเบิลออกจากเตา
6. เมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงนำเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ออกจากเตา เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$

3.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สูญญากาศซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ที่เป็นเม็ดยาเม็ดยานั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติมาตรฐานของแข็ง [16-17]

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสูญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมทธานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อน สูญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสูญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ที่เป็นเม็ดยาเม็ดยานั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติมาตรฐานของแข็งที่เป็นกระจกสไลด์โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ CdS, มาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัมแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงในภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทังสเตน
4. นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ที่ทำการเตรียมไว้แล้วตามลำดับมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสูญญากาศ ( ภาชนะสูญญากาศ ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์จนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย ( shutter ) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้า ๆ จน

กระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พัก สักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100-130 แอมแปร์ จะได้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่มีความหนาประมาณ 500-800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที

8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และทำการปิด แวริแอกโดยค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบ โมเลกุลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. ทำการแอนนิลไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้ทั้งหมดภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 และ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
12. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CuAlO}_2$  ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 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-5410LV ที่แรงดัน 15 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน โดยการทำให้ อิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็น เม็ดเซรา มิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลม ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ค่าความนำไฟฟ้า-ความถี่ (G/ $\omega$ -f curve) แล้วต่อจากนั้น จึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง

อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสต่อไป

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ

**CdS /CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส**

#### 3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค [16-21,34]

นำฟิล์มไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS /CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu<sub>K<sub>α</sub></sub> 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

#### 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5410 LV ที่แรงดัน 15 กิโลโวลต์

#### 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

**3.3.3.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10-300 เคลวิน**

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 25 มิลลิโวลต์

- มัลติมิเตอร์ รุ่น METEC 8007
- เครื่องทำความเย็นไครโอจินิกและไครโอสเตต ยี่ห้อ Leybold รุ่น RW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ



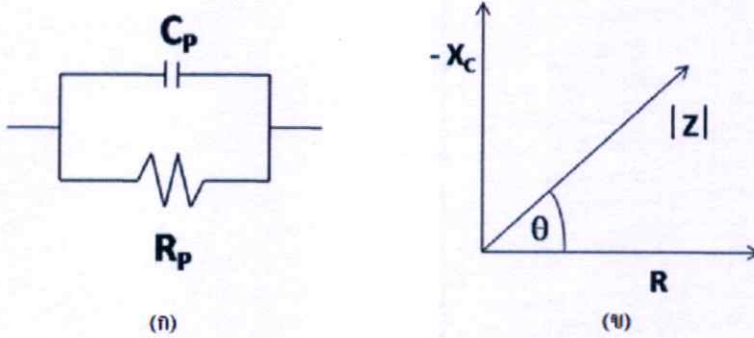
รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS/CuAlO}_2$  ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็คเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส

### 3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน [16-21]

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z$ ) ของรอยต่อพี-เอ็น คือ ความต้านทาน  $R_p$  ต่อขนานกับความจุ  $C_p$  ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรสมมูล  $R_p$  กับ  $C_p$  และแผนภาพแสดงเฟสของค่า  $-X_c$  กับ  $R$

- ก. แสดงวงจรสมมูล  $R_p$  กับ  $C_p$  ต่อขนานกัน  
ข. แสดงค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

ค่าจินตภาพแห่งความจุ (capacitive reactance,  $X_c$ ) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p} \quad (3.1)$$

มุมเฟส  $\theta$  จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan\theta = \frac{|X_c|}{R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.2)$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor,  $D$ ) คือ

$$D = \tan\theta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.3)$$

จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้วแฟกเตอร์สูญเสียจะมีค่าลดลง

และแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor,  $Q$ ) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_p C_p \quad (3.4)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ  $C_p$ - $D$ ,  $C_p$ - $Q$ ,  $C_p$ - $G$  และ  $C_p$ - $R_p$  โดยที่  $G$  คือ ความนำไฟฟ้า ซึ่ง

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (3.5)$$

โดยทั่วไปที่ความถี่ใดๆ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน  $Z^*$  จะเป็นดังสมการ

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (3.6)$$

และ

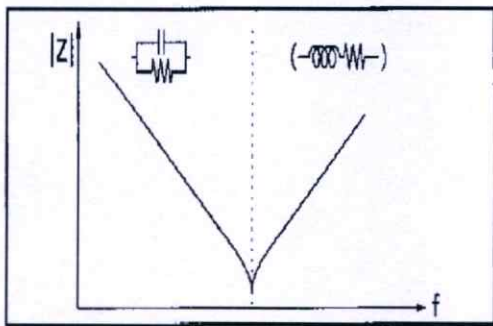
$$D = \frac{Z'}{Z''} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.8)$$

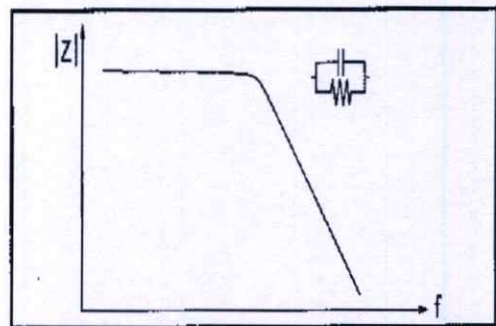
$$Z'' = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ ความถี่ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



Small C

(ก)



Large R

(ข)

รูปที่ 3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

ก. ในกรณีที่ความจุ (C) มีค่าต่ำ

ข. ในกรณีที่ความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเชอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \quad (3.10)$$

เมื่อ  $n$  คือเลขยกกำลัง

จำนวนจริง ( $Z'$ ) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

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

และ

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

ซึ่งค่า  $R_p$  จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน  $Z'$  ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$  ส่วนค่าความจุ  $C_p$  จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติ ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมคือ  $Z' = -Z''$  ดังนั้นจะได้ว่า

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

จะได้ว่า

$$C_p = \frac{1}{\omega R_p} \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time,  $\tau$ ) จะคำนวณได้จากความถี่สูงสุดของครึ่งวงกลม

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\max}} = C_p R_p$$

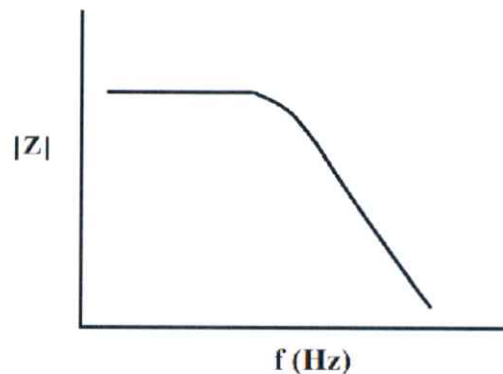
หรือ

$$\omega_{\max} C_p R_p = 1 \quad (3.12)$$

จากค่า  $Z'$  และ  $Z''$  จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้ว่า

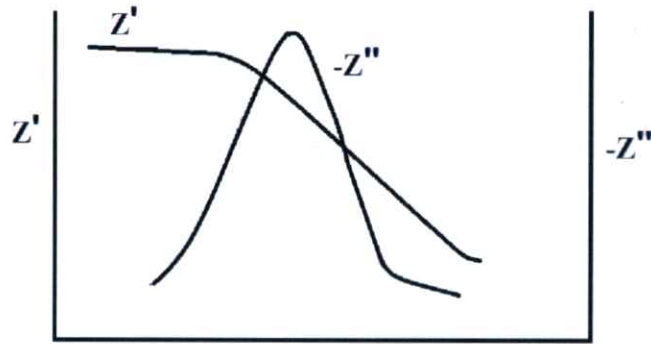
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (3.13)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ  $f$  จะเขียนได้ดังรูปที่ 3.6



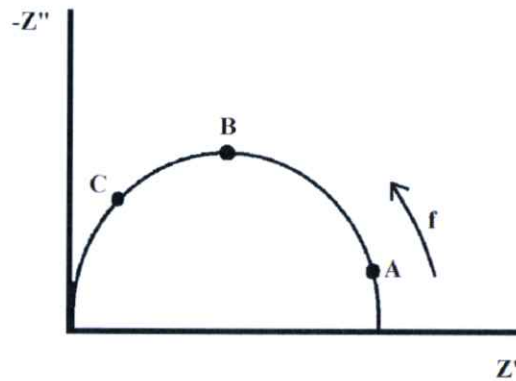
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $|Z|$ ) กับความถี่ ( $f$ )

แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z'$ ) กับความถี่ ( $f$ ) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $-Z''$ ) กับ ความถี่ ( $f$ ) จะได้กราฟดังรูปที่ 3.7



**รูปที่ 3.7** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z'$ ) กับความถี่ ( $f$ ) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $-Z''$ ) กับ ความถี่ ( $f$ )

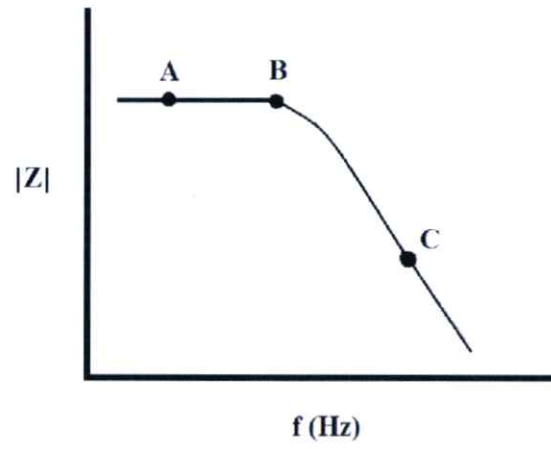
และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$  จะได้กราฟดังรูปที่ 3.8



**รูปที่ 3.8** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $Z'$ ) กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $-Z''$ )

- ที่ความถี่ต่ำ (ที่บริเวณจุด A)  $Z'$  จะมีค่ามาก ส่วน  $-Z''$  จะมีค่าน้อย
- ที่ความถี่ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B)  $Z'$  จะมีค่าลดลง ส่วน  $-Z''$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า  $Z' = -Z''$
- ที่ความถี่สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง  $Z'$  และ  $-Z''$  จะมีค่าลดลงอีก

และถ้านำมาเขียนกราฟ  $|Z|$  กับ  $f$  จะได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $|Z|$ ) กับความถี่ ( $f$ )

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ หลังจากนั้นจึงเอามาแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที นำสิ่งประดิษฐ์รอยต่อแบบพี-เอ็นมาทำการศึกษาศักยภาพไฟฟ้า โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน และวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษากลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าและอิทธิพลของกักประจุภายในรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/ CuAlO<sub>2</sub>

#### 4.1 ลักษณะสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียม

##### โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้นั้นมีลักษณะเป็นเม็ดแข็งสีเทาเข้มแวววาว เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกจะเห็นว่าฟิล์มบางสีเหลืองอมส้มเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิก

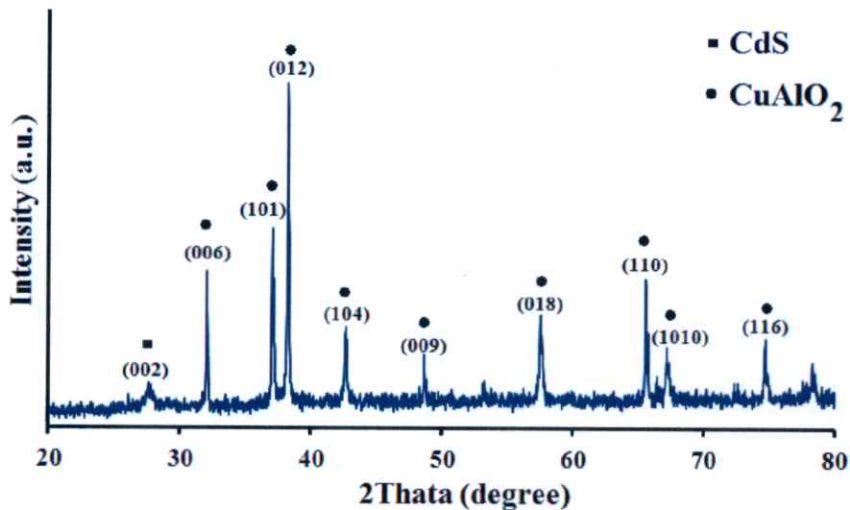


รูปที่ 4.1 แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

## 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

### 4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

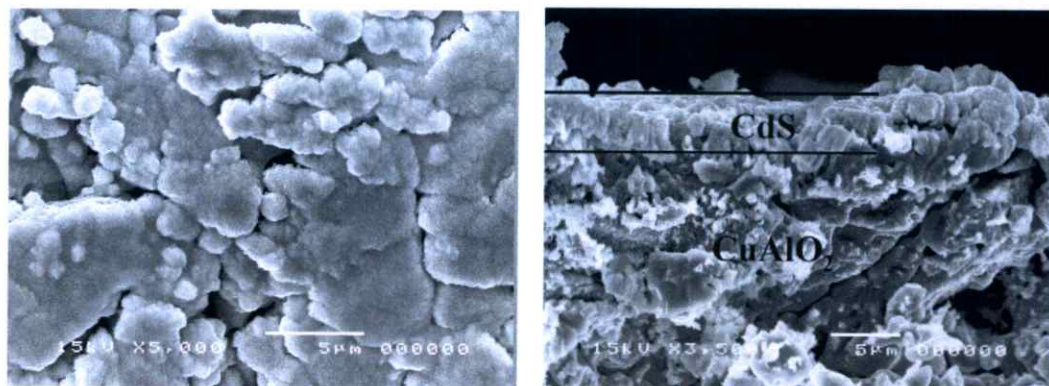
การศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงคุณภาพของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที จากการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏระนาบโครงผลึก (002) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่มีมุม  $2\theta = 27.825$  องศา ซึ่งเป็นโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล นอกจากนี้ยังพบพีคของระนาบโครงผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ได้แก่ ระนาบ (006), (101), (012), (104), (009), (018), (110), (1010), และ (116) ที่มีมุม  $2\theta$  เท่ากับ 32.050, 37.075, 38.225, 42.650, 48.675, 57.550, 65.600, 67.350 และ 74.675 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นโครงผลึกแบบรอมโบฮีดรัล



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

#### 4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่า มีผลึกเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ปกคลุมอยู่ที่บริเวณของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> และเมื่อทำการถ่ายภาพภาคตัดขวางของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> พบว่ามีชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เคลือบทับอยู่บนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS นั้นมีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร



(ก)

(ข)

**รูปที่ 4.3** แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ก. ภาพถ่ายผิวหน้า

ข. ภาพถ่ายภาคตัดขวาง

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub>

Lattice Constant ( Å )		c/a	Strain	Grain size ( μm )	
a	c			XRD	SEM
2.832	16.759	5.917	0.026	2.510	2.230

### 4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-Cd/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

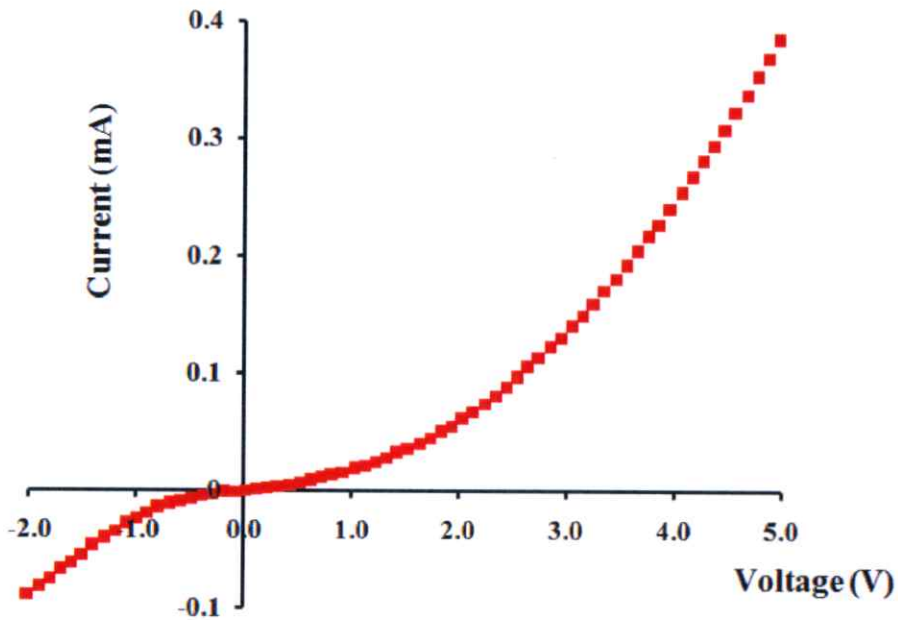
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและเมื่อทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ เช่น ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ เป็นต้น

#### 4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>

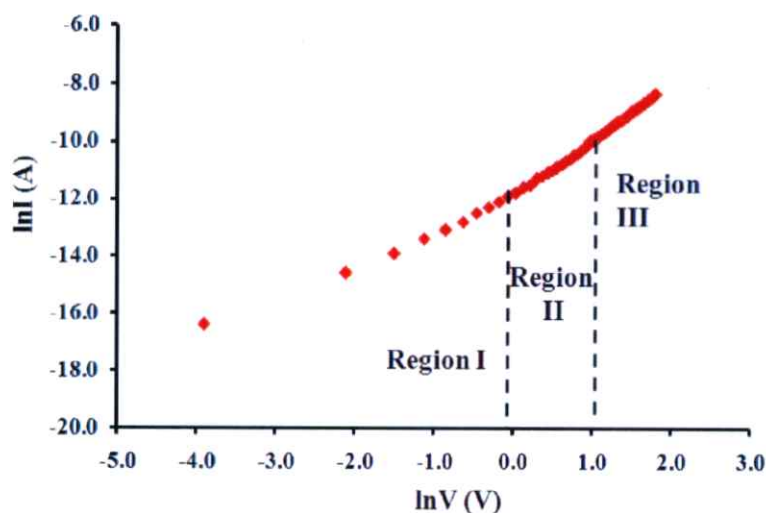
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1.00 ถึง 2.50 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในรูปที่ 4.4 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 1.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ 10<sup>16</sup> และ 10<sup>13</sup> ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> เป็นแบบรอยต่อ p<sup>+</sup>-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชอตต์กีโดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

กลไกของกระแสไฟฟ้า ที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 – 2.5 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 0.2 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.2 – 0.5 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.5

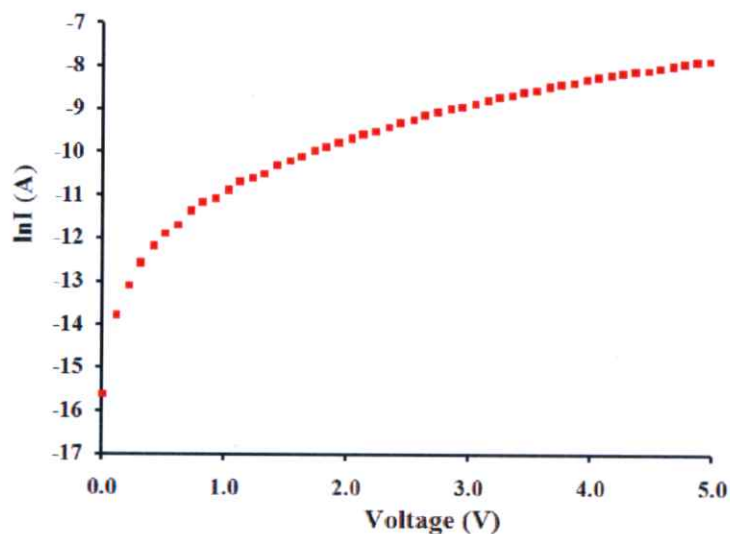
โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.6 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุโมงค์และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าโดยจะพิจารณาเฉพาะในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อ ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน การจำลองข้อมูล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเป็นวิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และแฟกเตอร์อุโมงค์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น รูปที่ 4.7 การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุโมงค์ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.8 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุโมงค์ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน และวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.1 [21]



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.5** แสดงกราฟของกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.6** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I)$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.6 คือกราฟความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิตชันดังสมการ

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

ภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะได้ว่า

$$\ln I = \left(\frac{q}{nkT}\right)V + \ln I_s \quad (4.2)$$

กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) คือ

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

จัดรูปใหม่ในรูปแบบลอการิทึมเพื่อหาค่าความสูงกำแพงศักย์จะได้ว่า

$$\phi_{B0} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \quad (4.4)$$

เมื่อ  $A^*$  คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสัน (Richardson's Constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4\pi q m_e^* k^2/h^3$

โดยที่  $m_e^*$  คือมวลยังผลของอิเล็กตรอน สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำ CdS จะมี  $m_e^* = 0.165 m_0$  ดังนั้น  $A^*$  จะมีค่าเท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร·เคลวินยกกำลังสอง

จากทฤษฎีของชวงจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความสูงของกำแพงศักย์ แฟกเตอร์ในอุดมคติ และความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (Region III) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมาโดยสมการตั้งต้นจะได้จากการดัดแปลงมาจากทฤษฎีของกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันโดยนำเอาสมการที่ (4.3) ไปแทนลงในสมการที่ (4.1) จะได้ว่า

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}\right) \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (4.5)$$

เมื่อทำการไบแอสไปข้างหน้าด้วยเงื่อนไข  $V > 3kT/q$  แล้ว  $R_s$  แสดงผลออกมาจะสามารถตัดเทอมของ -1 ออกจากสมการที่ (4.5) แล้วจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\frac{I}{AA^* T^2} = \exp\left(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right]$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) = \frac{-q\phi_{B0}}{kT} + \left(\frac{V - IR_s}{nkT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) = \frac{-q}{nkT} (-n\phi_{B0} + V - IR_s)$$

$$V = IR_s + n\phi_{B0} + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (4.6)$$

ค่าความต้านทานอนุกรมจะหาได้จากผลลัพท์ของอนุพันธ์ของสมการที่ (4.6) คือ

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (4.7)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร ( $R_s$ )

ส่วนการหาความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ 4.6 ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $H(I)$  ดังนี้

$$V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) = IR_s + n\phi_{B0}$$

$$H(I) = IR_s + n\phi_{B0} \quad (4.8)$$

เมื่อ

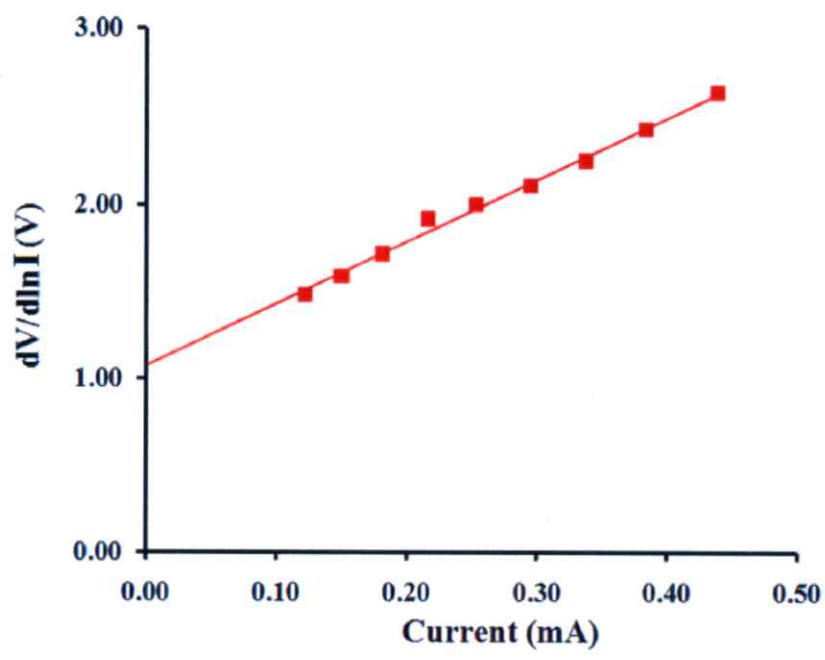
$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า  $H(I)$  จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ก็จะได้ผลดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.13 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกน  $y$  ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน  $H(I)$  นั่นก็คือค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.7) ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

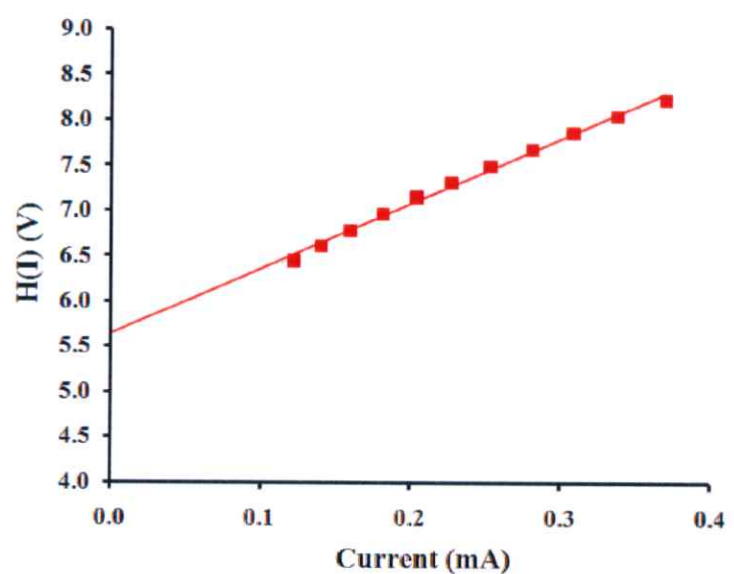
$$I = kV^m \quad (4.9)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.10)$$

เมื่อ  $m$  คือความชันของกราฟถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชล์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m$  เท่ากับ 2.23 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล [29-31]



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



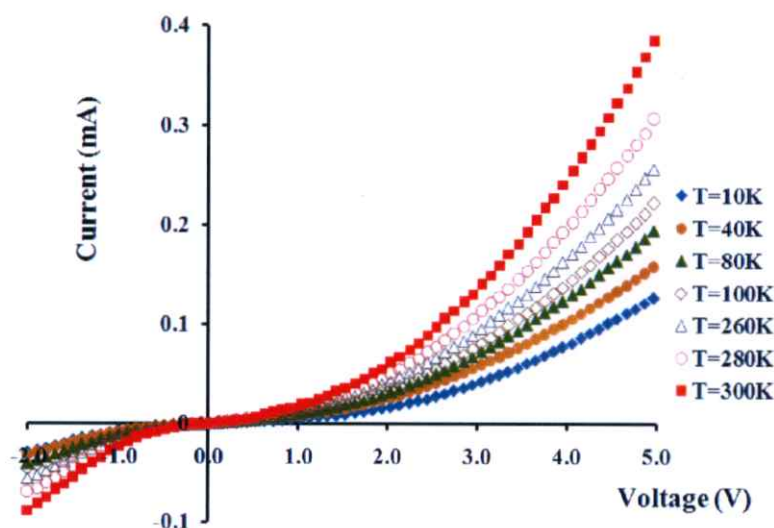
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

**ตารางที่ 4.2** แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของ กำแพง ศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{B0}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการ คำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

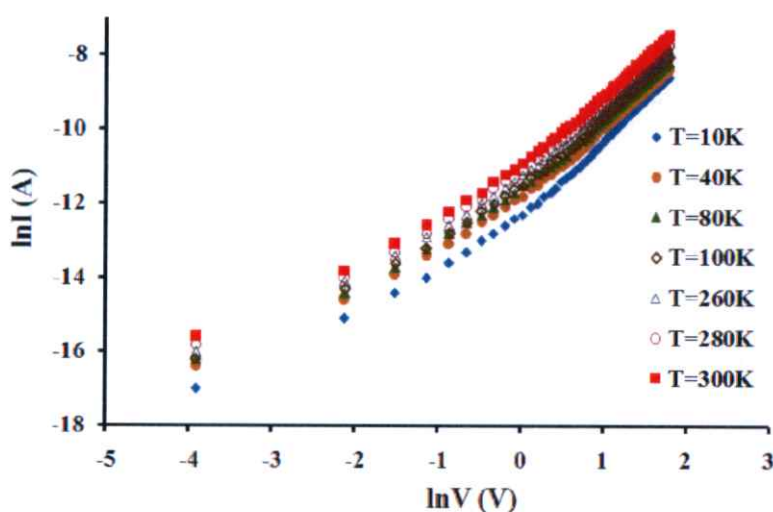
Temperature (K)	Saturation Current $I_s$ (A)	Ideality Factor n		Barrier Height $\phi_{B0}$ (eV)		Series Resistance $R_s$ ( $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)]-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)]-I
300	$6.08 \times 10^{-7}$	7.895	7.364	0.592	0.596	17,971	15,296

#### 4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>

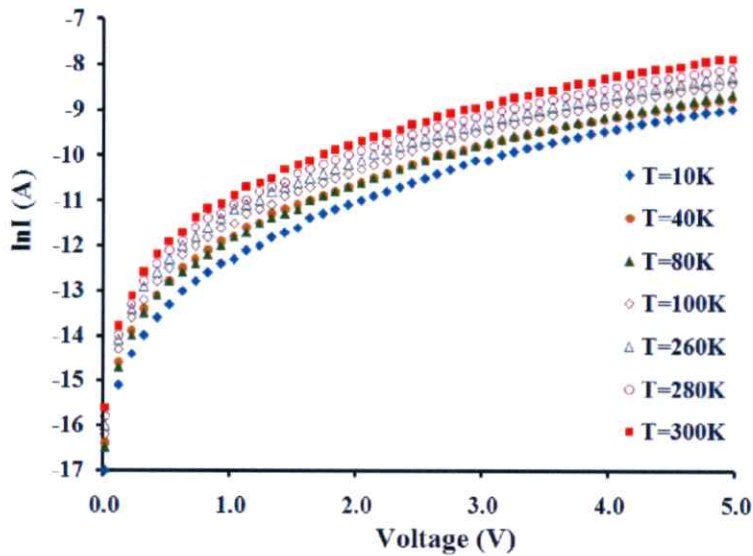
เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านกำแพงศักย์ค่าสูงได้โดยไม่ต้องใช้แรงดันไบแอสมากนัก ซึ่งจะสังเกตได้จาก รูปที่ 4.9 จะพบว่าแรงดันขีดเริ่มของสิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 300 เคลวิน อีกทั้งยังมีกับดักประจุที่ปรากฏที่บริเวณผิวเชื่อมต่อซึ่งจะทำให้เกิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ (tunneling enhance recombination) โดคเด่นขึ้น จึง ส่งผลให้แฟกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง [21]



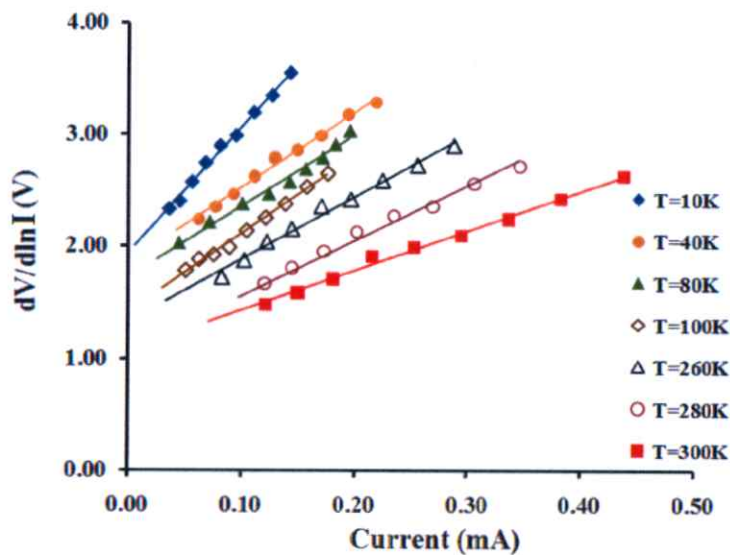
**รูปที่ 4.9** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



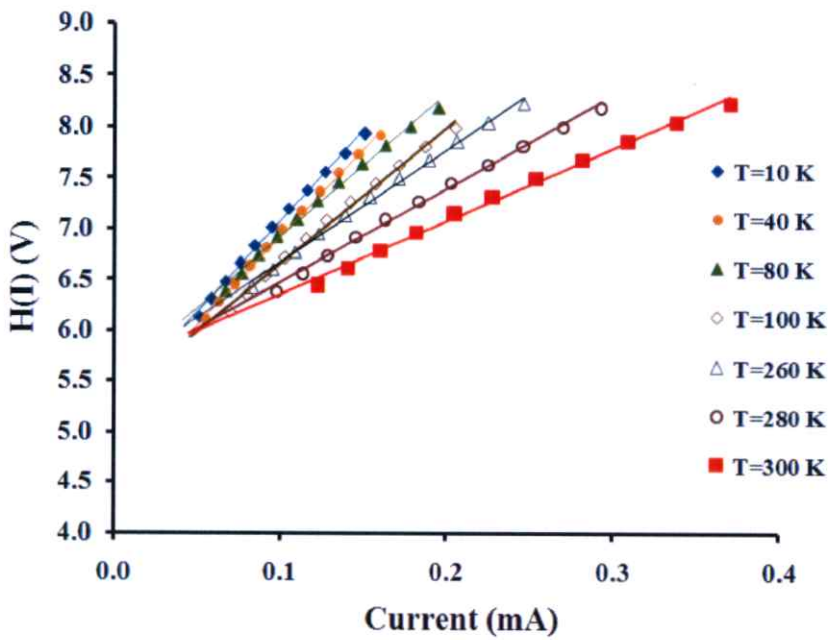
**รูปที่ 4.10** แสดงกราฟของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



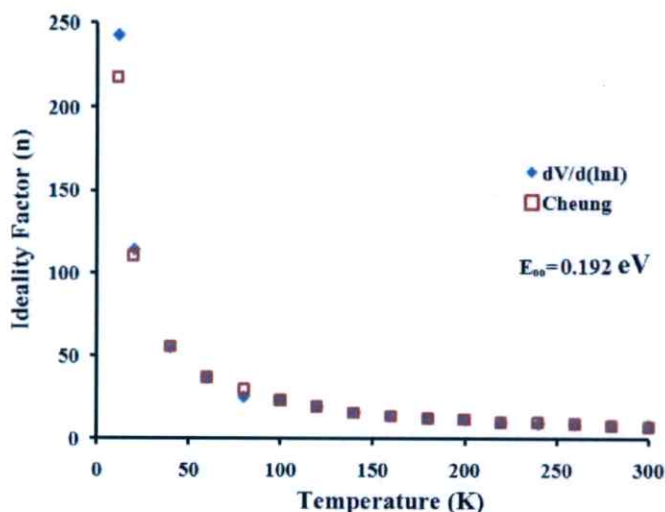
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงกีที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



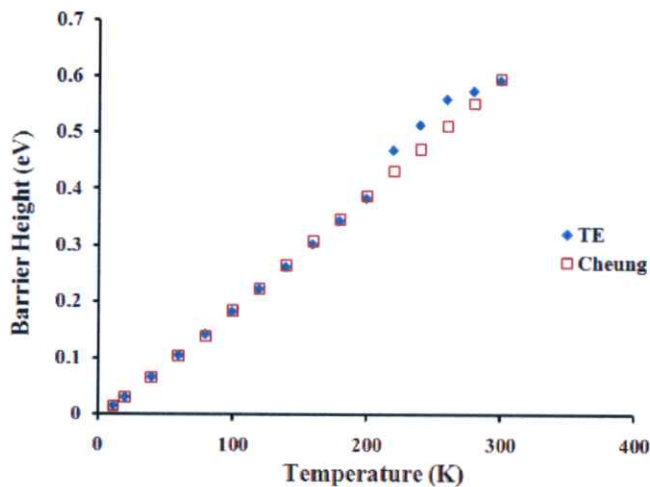
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าเฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

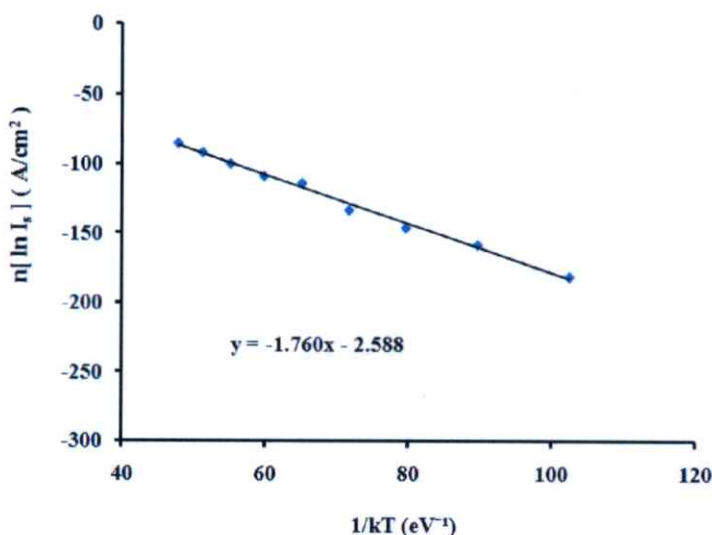
T (K)	I <sub>s</sub> (A)	Ideality Factor		Barrier Height (eV)		Series Resistance (kΩ)	
		I-V	[dV/dln(I)]-V	I-V	H(I)-I	[d(V)/dln(I)]-V	H(I)-I
11	1.67E-07	242.73	217.25	0.016	0.016	53.25	62.27
20	2.45E-07	114.43	110.47	0.031	0.031	36.77	48.15
40	2.78E-07	55.23	55.23	0.067	0.067	29.80	38.04
60	2.83E-07	36.83	36.82	0.105	0.105	33.47	42.70
80	3.60E-07	25.83	29.87	0.143	0.140	25.06	36.67
100	3.78E-07	23.41	23.42	0.182	0.185	36.81	45.45
120	4.08E-07	19.81	19.51	0.222	0.223	34.30	37.02
140	4.41E-07	15.83	15.78	0.261	0.265	29.80	38.70
160	4.64E-07	13.75	13.80	0.302	0.308	33.47	42.82
180	4.82E-07	12.78	12.27	0.343	0.347	27.56	36.78
200	5.24E-07	11.81	11.71	0.383	0.388	27.97	34.52
220	5.54E-07	10.01	10.04	0.468	0.432	24.81	33.93
240	5.71E-07	11.17	9.75	0.513	0.471	22.21	29.89
260	5.82E-07	9.75	9.01	0.559	0.512	20.79	27.39
280	5.97E-07	9.01	7.89	0.575	0.553	18.95	23.64
300	6.08E-07	7.89	7.36	0.592	0.596	15.29	17.97



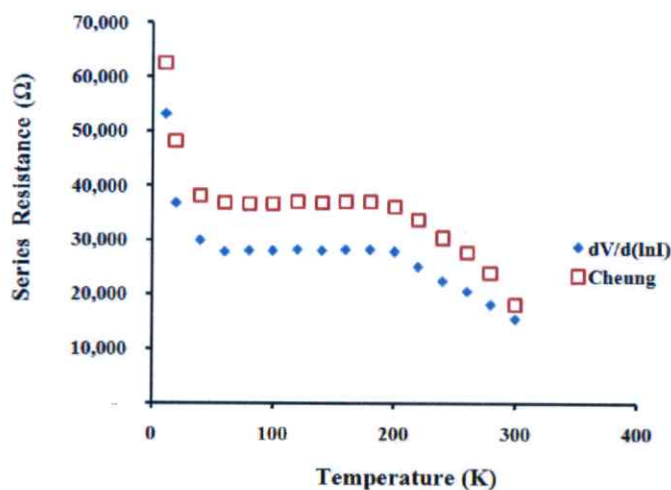
**รูปที่ 4.14** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไก เทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.15** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไก เทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n(\ln I_r)$  กับ  $1/kT$  เมื่อทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 100 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอนุกรม กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีลดลง เมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4.14 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบเคียงกับสมการที่ 4.11 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ( $E_{00}$ ) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.192 อิเล็กตรอน โวลต์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth \left( \frac{E_{00}}{kT} \right) \quad (4.11)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิสชันจะได้ว่า

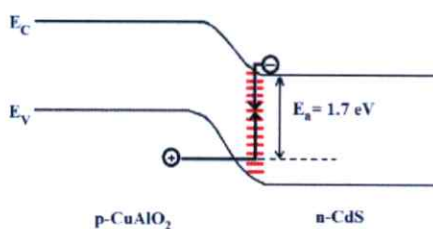
$$E_{00} = \left( \frac{q\hbar}{2} \right) \left[ \frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right] \quad (4.12)$$

และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

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

และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.16 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 1.76 อิเล็กตรอน โวลต์ ส่วน  $E_{00}$  ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิค่าๆนั้นกลไกการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลโดดเด่นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจากนั้น โฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อในบริเวณพร่องพาหะ

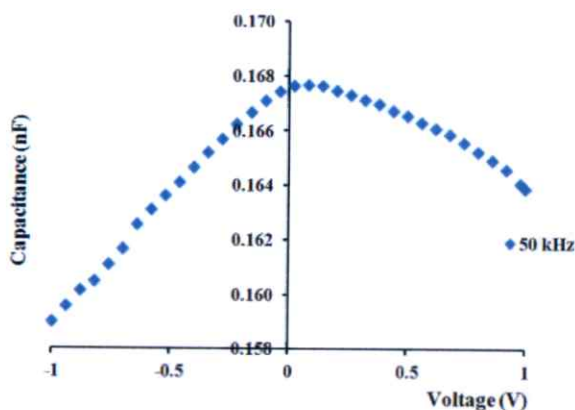
การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุณหคณิต ( $n$ ) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อในช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง [27]



รูปที่ 4.18 แสดงแผนภาพการขุดคูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนที่บริเวณพร่องพาหะของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>

#### 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>

รูปที่ 4.19 แสดงผลของการศึกษาค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 1 โวลต์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับมากขึ้น และสำหรับกรณีการไบแอสไปหน้าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งจากนั้น ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็น นั้นหายไปชั่วขณะ



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรูปที่ 4.19 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้า จะสามารถหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_D$ ) ได้จากความสัมพันธ์ของตามสมการดังนี้ [31]

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_D A^2} \right) \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.13)$$

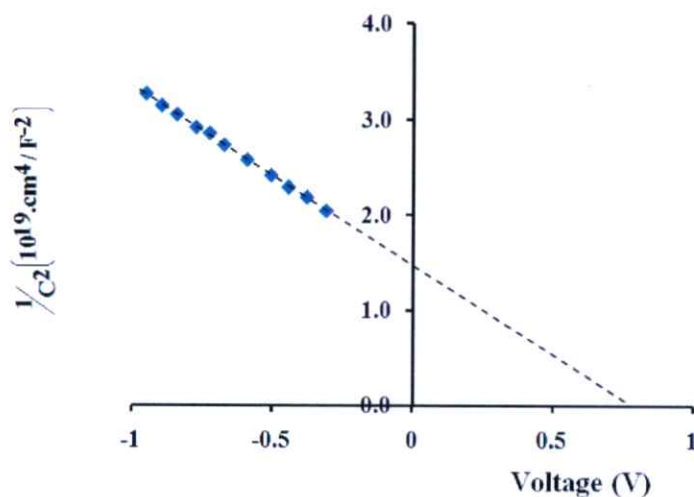
โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.13) จะเลือกเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันย้อนกลับตั้งแต่ -1 ถึงช่วง 0.3 โวลต์ โดยประมาณ แล้วทำการลากเส้นตรงจนตัดผ่านแกน x จะทำให้ได้ค่า  $V_i$  แล้วนำมาหาศักย์ตกคร่อมรอยต่อจากความสัมพันธ์

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้สามารถคำนวณหาได้จาก ความชันของสมการที่ (4.13) คือ

$$\text{slope} = \frac{2}{q \epsilon_s N_D A^2} \quad (4.15)$$

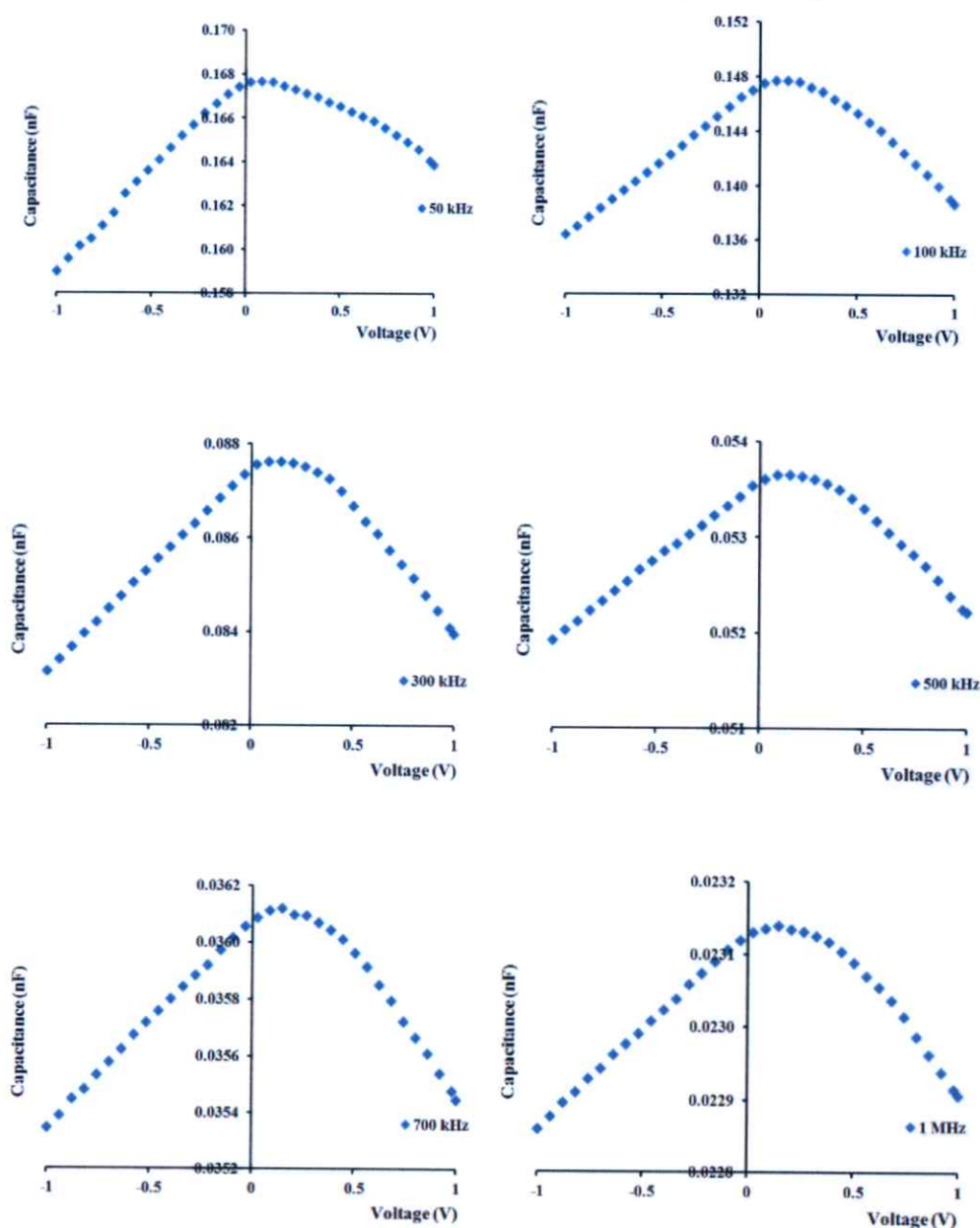
เมื่อ  $\epsilon_s$  คือเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีค่า  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$  โดยที่  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.38



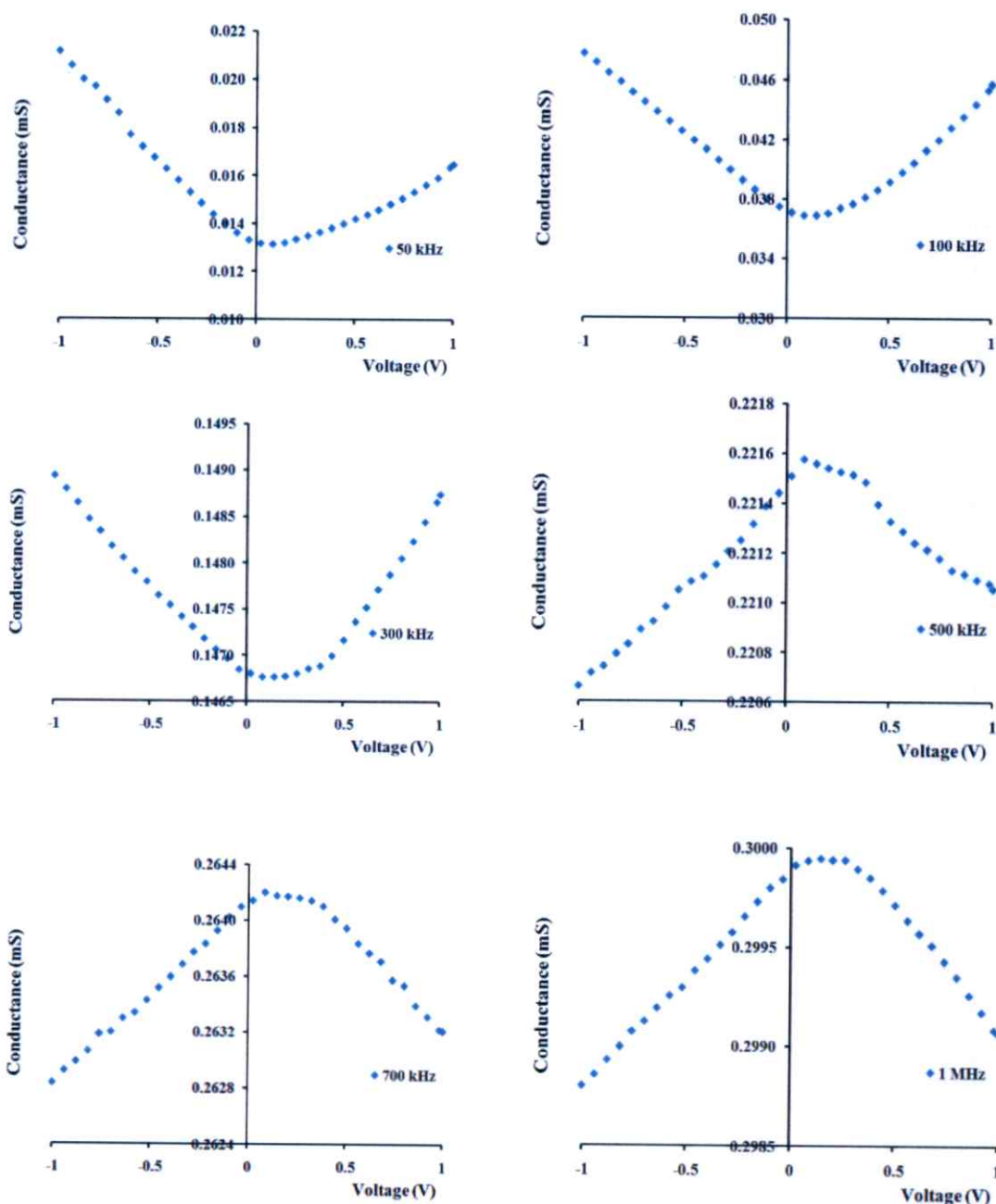
**รูปที่ 4.20** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ใช้ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากผลการคำนวณจะได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.58 โวลต์ ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากการศึกษาสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน และมีความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เท่ากับ  $4.20 \times 10^{14}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  $V_1$  และ  $V_{bi}$  มีค่าเท่ากับ 0.56 และ 0.58 โวลต์ตามลำดับ

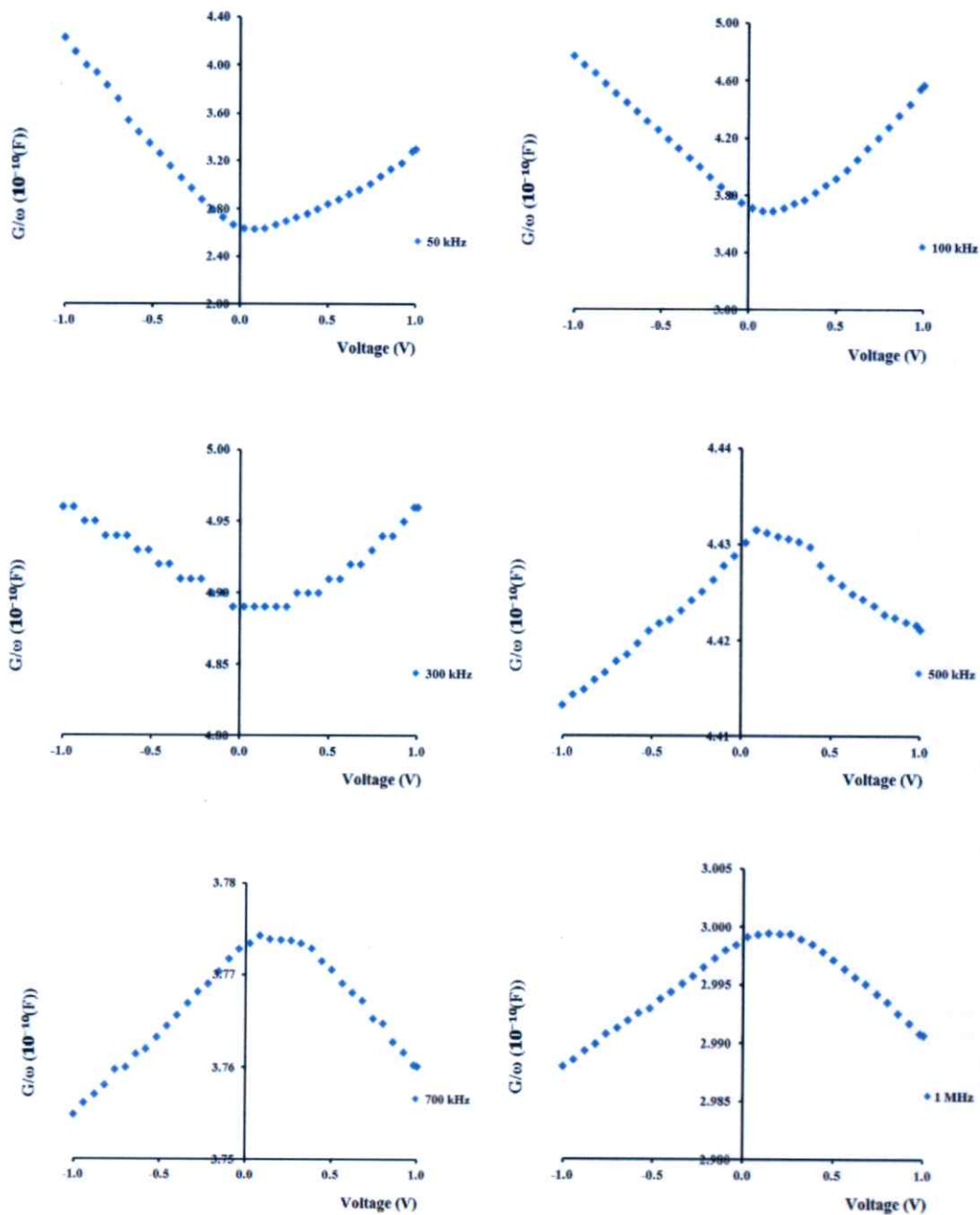
4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>



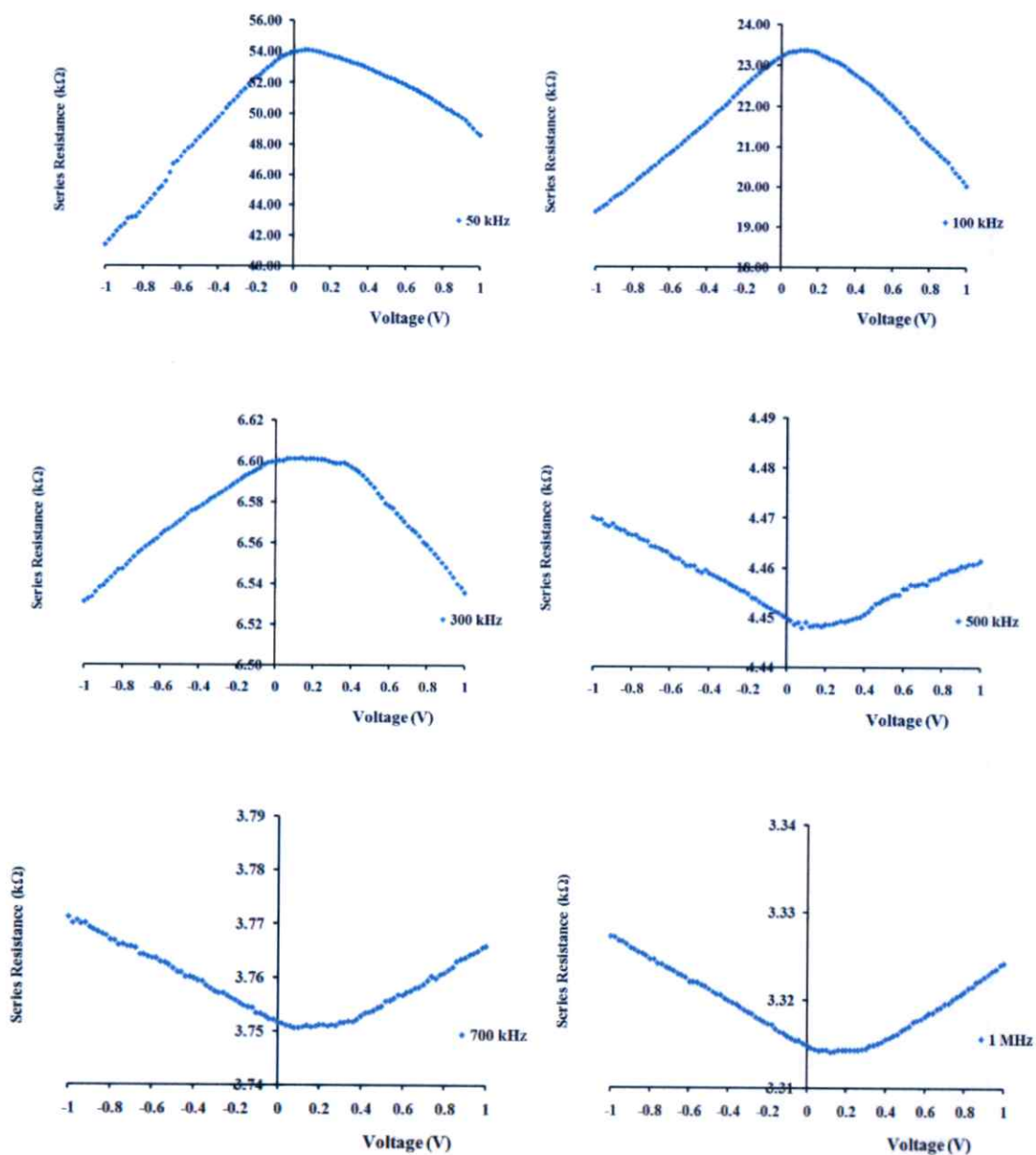
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.22** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ของแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่ออิมพริชันของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.23** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.24** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอนุกรมกับแรงดันเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

การศึกษาในขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความถี่ที่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากราฟของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง  $-1$  ถึง  $1$  โวลต์ นั้นมีลักษณะเป็นกราฟระฆังคว่ำตามแบบพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุแบบรอยต่อพีเอ็น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันนั้นลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้นตามรูปที่ 4.21 เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้นกับดักประจุจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลัปได้น้อย ส่วนรูปที่ 4.22 นั้นจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับแรงดันซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ที่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 300 กิโลเฮิร์ตซ์นั้น มีลักษณะเป็นกราฟระฆังหงายแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการไบแอสไปหน้ารอยต่อพีเอ็นจะสามารถนำกระแสได้ดีขึ้น ความนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรถ (R<sub>s</sub>) จะลดลง สำหรับในขณะที่มีการไบแอสกลับทางกระแสอิมพัลส์ย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรถจะมีค่าลดลงตามไปด้วยดังที่แสดงในรูปที่ 4.24 อีกทั้งจุดต่ำสุดของกราฟความสัมพันธ์ G-V จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงที่มีความถี่สูงกว่า 500 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นจะมีลักษณะของกราฟ G-V เป็นแบบระฆังคว่ำ และจุดสูงสุดของกราฟจะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรถอย่างมาก และในรูปที่ 4.24 จะพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมยังขึ้นกับแรงดันไบแอสและความถี่ด้วย

ในรูปที่ 4.23 นั้นคือกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับแรงดันที่ได้มาจากการนำค่าความนำไฟฟ้ามาหารด้วยความถี่เชิงมุมที่ป้อนเข้าไปโดยมีค่าเท่ากับ  $\omega = 2\pi f$  และพบว่าในช่วงความถี่ที่ 50 ถึง 300 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นก็ยังคงได้ลักษณะของกราฟที่เป็นระฆังหงาย และจะเป็นแบบระฆังคว่ำในช่วงที่สูงกว่า 500 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป นอกจากนี้จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของกักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งตั้งสมมติฐานได้ว่ามีชั้นบางๆของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกของ CuAlO<sub>2</sub> คั่นอยู่จากสมการของความนำไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อ คือ [38]

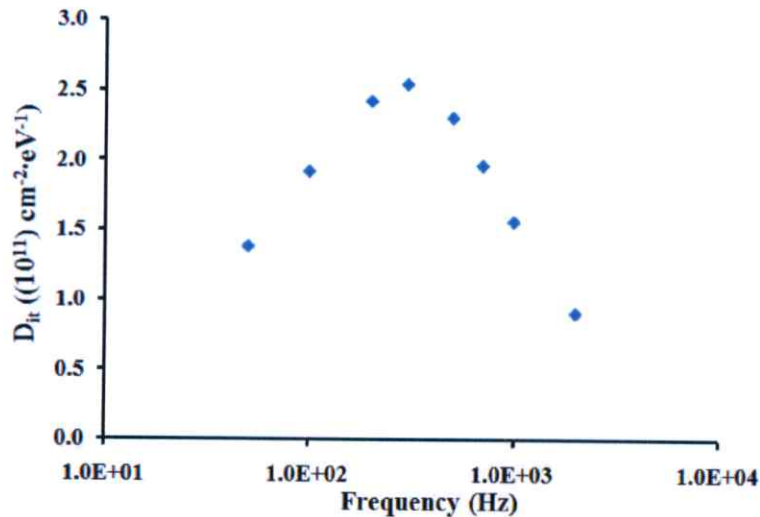
$$\frac{G_{ii}}{\omega} = \frac{\omega G_m (C_{dep}^{i-CAO})^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{dep}^{i-CAO} - C_m)^2} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $G_m$  และ  $C_m$  คือค่าความนำไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดที่ค่าความถี่ใดๆ ส่วน  $C_{dcp}$  คือความจุไฟฟ้าของบริเวณพ่องพาหะของชั้นอินทรีนสิกของสารกึ่งตัวนำ  $CuAlO_2$  จากสมการที่ (4.16) เมื่อทำให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) จะได้ว่า

$$\frac{G_{it}}{\omega} = \frac{q\omega\tau_{it}D_{it}}{1 + (\omega\tau_{it})^2} \quad (4.17)$$

และสมการที่ (4.17) ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ  $\left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{\max}$  เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อได้ดังนี้ คือ

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{\max}}{0.402qA} \quad \text{หรือ} \quad D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{\max} \quad (4.18)$$



**รูปที่ 4.25** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับความถี่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuAlO}_2$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความหนาแน่นของกัณฑ์ที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ แล้วจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.25 และนอกจากนี้ในตารางที่ 4.4 ยังแสดงค่าของความจุไฟฟ้าและค่า  $G/W$  สูงสุดก็พบว่าจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ กล่าวคือเมื่อมีค่าความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สถานะกัณฑ์ที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการจับและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่เมื่อความถี่สูงกว่า 300 กิโลเฮิร์ตซ์แล้วความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุมิจะมีค่าลดลง

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่า แรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด ค่าจินตภาพของความจุไฟฟ้าสูงสุด และความหนาแน่นของกัณฑ์ในผิวเชื่อมต่อ ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ความถี่ (Hz)	$V_m$ (V)	$C_{max}$ (F)	$\left(\frac{G_m}{\omega}\right)_{max}$ (F)	$D_i$ (cm <sup>2</sup> ·eV <sup>-1</sup> )	$R_s$ (k $\Omega$ ) (bias = 1V)
50 k	0.10	1.68E-10	2.66E-10	1.37E+11	48.63
100 k	0.08	1.48E-10	3.70E-10	1.91E+11	20.03
200 k	0.06	1.14E-10	4.67E-10	2.42E+11	9.69
300 k	0.04	8.76E-11	4.89E-10	2.53E+11	6.54
500 k	0.04	5.36E-11	4.43E-10	2.29E+11	4.46
700 k	0.02	3.61E-11	3.77E-10	1.95E+11	3.77
1 M	0.02	2.31E-11	3.00E-10	1.55E+11	3.32
2 M	0.02	1.03E-11	1.74E-10	9.01E+10	2.87

#### 4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 โวลต์ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการจ่ายค่าแรงดันไบแอสด้วยค่าต่างๆ ตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ พบว่าในกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ค่าของความจุไฟฟ้านั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงช่วงความถี่ ประมาณ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วและจะคงที่ที่ค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วง ประมาณ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และเมื่อมีการไบแอสด้วยแรงดัน -0.5 โวลต์ ไปจนถึง 0.5 โวลต์ จะเห็นว่าตัวกราฟจะเคลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นเล็กน้อยตามรูปที่ 4.27 ส่วนทางด้านรูปที่ 4.28 นั้นจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่มีการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ พบว่าความนำไฟฟ้านั้นมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในช่วงที่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และตัวกราฟก็จะเคลื่อนไปยังด้านที่มีความถี่สูงขึ้น เมื่อมีการไบแอสแรงดันมากขึ้นเช่นกัน โดยขึ้นกับสมการความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ว่าเมื่อมีระดับพลังงานของกักมีเพียงค่าเดียว (single trap)

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.19)$$

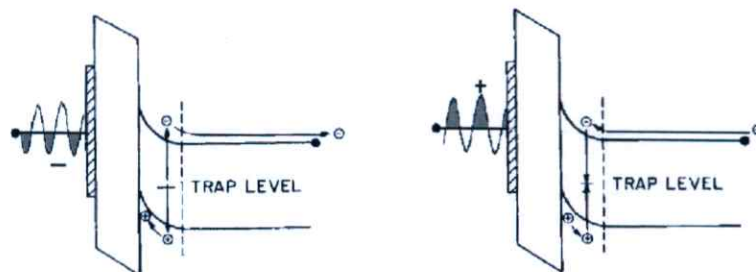
โดย  $C_{it} = qD_{it}$  และ  $\omega\tau = 1$

และถ้ากรณีที่กักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

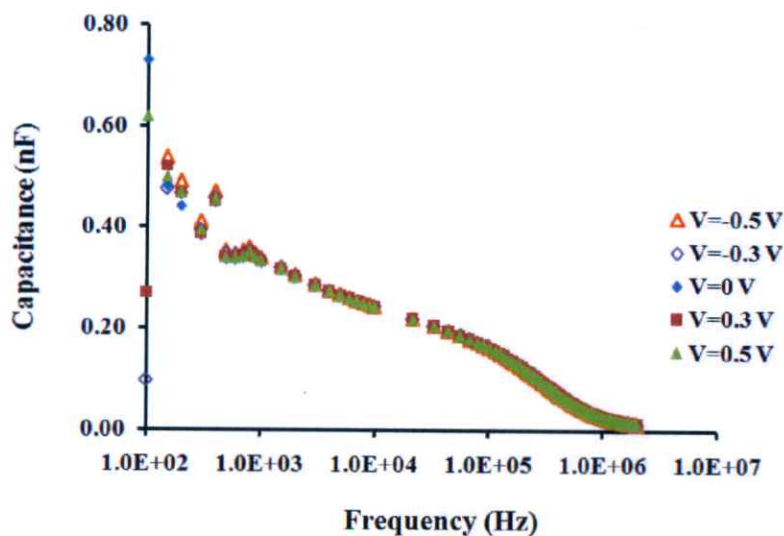
$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \arctan(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}} \quad (4.20)$$

เมื่อ  $C_D$  คือความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน  $C_{it}$  คือ ความจุไฟฟ้าของกักประจุ โดย  $C_{it} = qD_{it}$  และ  $\omega\tau = 1.98$  พฤติกรรมการจับและคายประจุของตัวเก็บประจุภายในบริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นจะเป็นดังรูปที่ 4.22 คือ เมื่อมีสัญญาณโพลที่มีค่าความถี่ต่ำเข้ามาสู่รอยต่อ แบบ MIS อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกักจะถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกจากกักแล้วเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะ และจะเหนี่ยวนำให้โฮลมาชุมนุมกันที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และเมื่อได้รับสัญญาณโพลเข้ามาอีเล็กตรอนที่อยู่บริเวณด้านนอกของบริเวณ

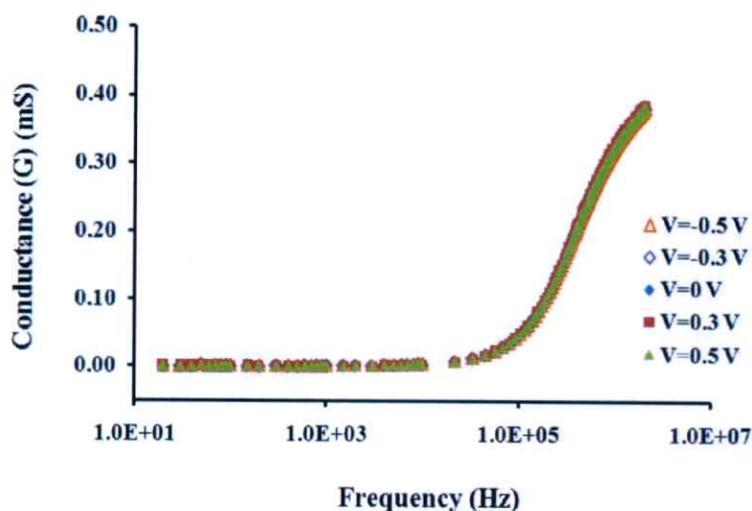
พรีองพหะจะถูกลงเข้ามายังกับดักประจุในบริเวณพรีองพหะส่วน โสลที่บริเวณรอยต่อของชั้น ฉนวนและสารกึ่งตัวนำจะถูกลงผลักกลับ ไปสู่กับดักเช่นเดิม โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ไปมาอยู่เสมอเมื่อมีการจ่ายสัญญาณ ไฟสลับที่มีค่าความถี่ต่ำให้กับรอยต่อ [11]



รูปที่ 4.26 แสดงการจับและคายประจุของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัด โดยการจ่าย ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.28** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัด โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อนำเอาข้อมูลของความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาหารด้วยความถี่เชิงมุม ( $2\pi f$ ) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ที่มีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ดังรูปที่ 4.29 จะเห็นว่ากราฟของค่า  $G/\omega$  จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ในช่วงความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ส่วนในช่วงที่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์นั้นจะเป็นเส้นโค้งลงเชื่อมต่อกันเป็นทางของกราฟระฆังคว่ำ โดยจุดสูงสุดของกราฟระฆังคว่ำนั้นหมายถึงจุดที่มีค่าความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ทำให้พาหะ สามารถหลุดออกจากกับดักได้ หรือจะอธิบายได้อีกอย่างว่า ณ จุดความถี่ที่เกิดค่า  $G/\omega$  สูงสุดนั้น คือความถี่ที่สอดคล้องกับพลังงานที่สัญญาณไฟสลับสูญเสียไปเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุ ซึ่งจะนำมาใช้ในการหาค่า ความหนาแน่นของกับดักและช่วงชีวิตของพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆ ได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับสมการที่ว่า

เมื่อกับดักประจุมีระดับพลังงานเพียงค่าเดียว (single trap)

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.21)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักประจุได้จาก

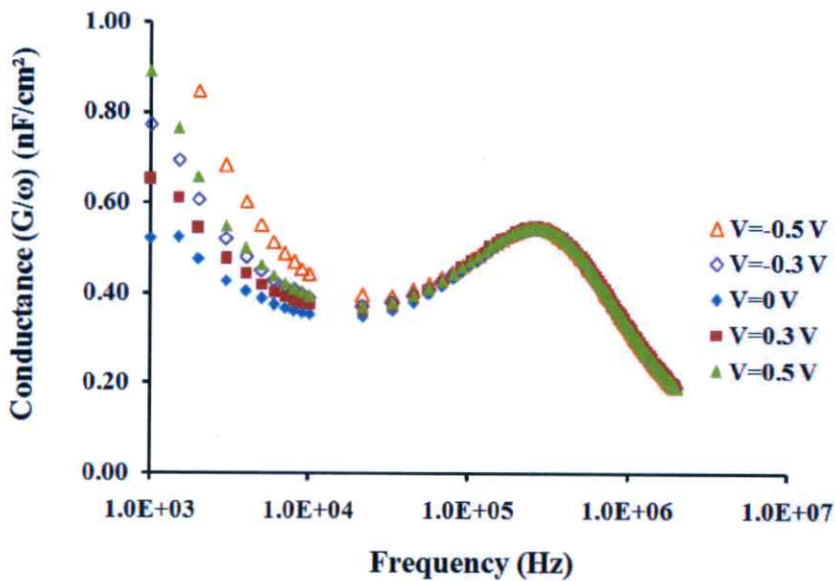
$$D_{it} = \frac{2}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}$$

และถ้ากรณีทีกับดักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

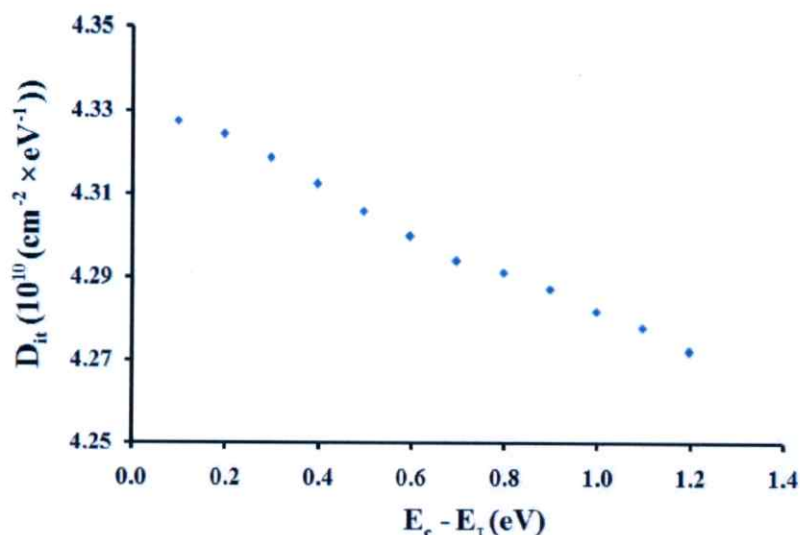
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2)}{2\omega \tau_{it}} \quad (4.22)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักได้จาก

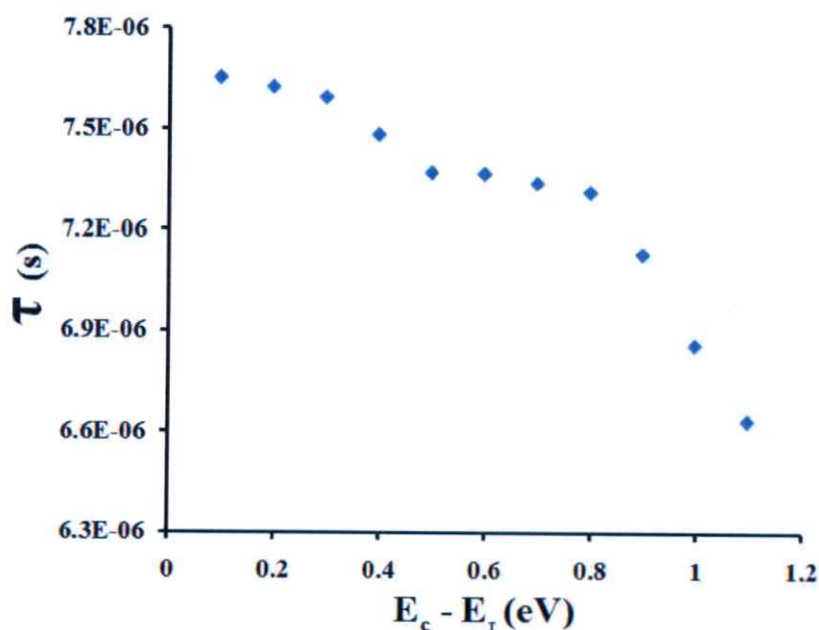
$$D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}$$



**รูปที่ 4.29** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของพาหะกับพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

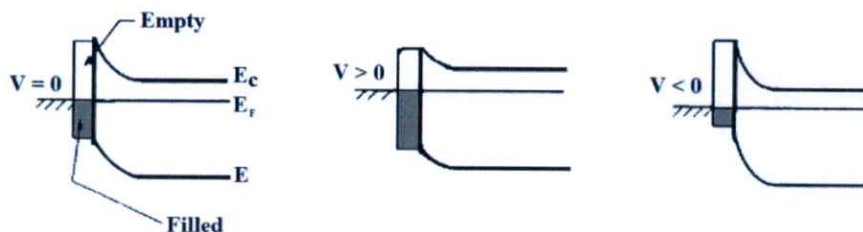
**ตารางที่ 4.5** แสดงค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าจินตภาพของค่าความจุไฟฟ้า และความหนาแน่นของกับดักที่ผิวเชื่อมต่อ และช่วงชีวิตของพาหะที่ขึ้นกับพลังงาน ที่หาได้จากผลการศึกษาคอมพิวเตอร์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ของรอยต่ออิมิตชันของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

แรงดัน (V)	$f_m$ (Hz)	$\left(\frac{G}{\omega}\right)_{\max}$ (F)	$E_c - E_T$ (eV)	$D_t$ (cm <sup>2</sup> ·eV <sup>-1</sup> )	$\tau$ (μs)
0.5	258,750	8.350E-11	0.096	4.327E+10	7.652
0.4	259,700	8.344E-11	0.196	4.324E+10	7.624
0.3	260,750	8.333E-11	0.296	4.319E+10	7.593
0.2	264,600	8.321E-11	0.396	4.312E+10	7.483
0.1	268,650	8.309E-11	0.496	4.306E+10	7.370
0.0	268,800	8.297E-11	0.596	4.300E+10	7.366
-0.1	269,800	8.286E-11	0.696	4.294E+10	7.339
-0.2	270,800	8.280E-11	0.796	4.291E+10	7.312
-0.3	277,800	8.272E-11	0.896	4.287E+10	7.127
-0.4	288,750	8.262E-11	0.996	4.282E+10	6.857
-0.5	298,500	8.255E-11	1.096	4.278E+10	6.633

จากผลที่ได้จากการคำนวณดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 จะได้ว่าที่  $E_c - E_T$  มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของกับดักจะมีค่าลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.30 จะสามารถสรุปได้ว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบล่างของแถบนำแล้วจะค่อยๆลดลงตามระดับพลังงานที่เลื่อนออกจากแถบนำมากขึ้น ซึ่งจะรวมไปถึงช่วงชีวิตของพาหะก็จะลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่ช่วงชีวิตพาหะคำนวณได้จากความสัมพันธ์  $\omega\tau = 1.98$  [11]

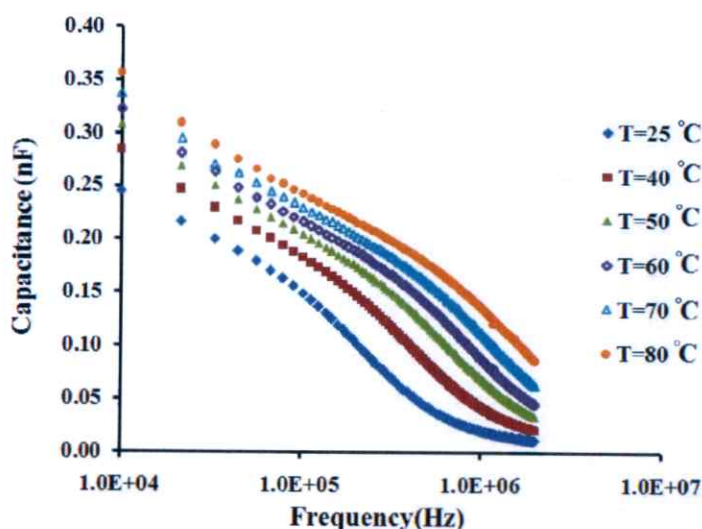
จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เมื่อทำการจ่ายแรงดันในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ จะสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นหรือลงตามค่าแรงดันที่ไบแอสระดับพลังงานของกับดัก ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิซ้อนทับกันจะส่งผลให้กับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับและปล่อยพาหะได้โดยต้องทำ

การป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของกับดักนั้นๆ จากกราฟความสัมพันธ์ของค่า  $G/\omega$  กับความถี่ดังรูปที่ 4.29 นั้นแสดงถึงกับดักสองประเภทคือกับดักที่ตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ที่ต่ำมากๆ (slow trap) ซึ่งจะเห็นจากเส้นโค้งที่เป็นส่วนหางของกราฟประหมังคว่ำ โดยส่วนที่จุดสูงสุดของกราฟประหมังคว่ำจะแสดงถึงกับดักที่ตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่สูงๆ (fast trap) [11,39]

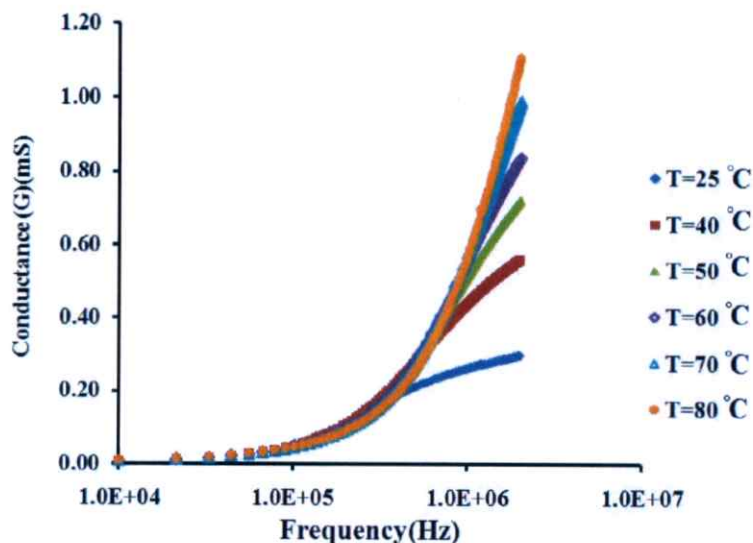


รูปที่ 4.32 แสดงระดับเฟอร์มีที่เลื่อนขึ้นลงตามแรงดันไบแอส

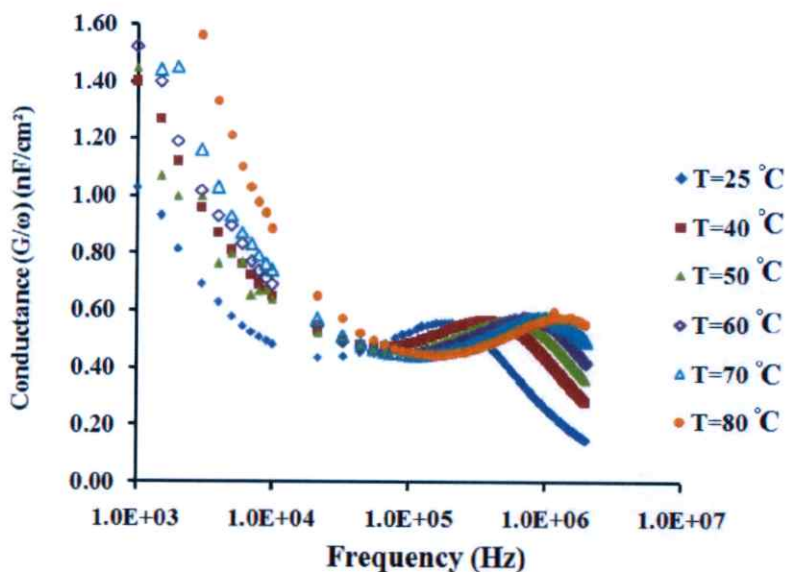
#### 4.3.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS / p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ในหัวข้อนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง  
 อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะมีค่ามากขึ้นตาม  
 อุณหภูมิที่สูงขึ้น รูปที่ 4.33 ซึ่งกรณีความหนาแน่นของกัปดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน  
 ความจุของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่วัดได้คือ C<sub>p</sub>จะสอดคล้องกับ  
 ความสัมพันธ์

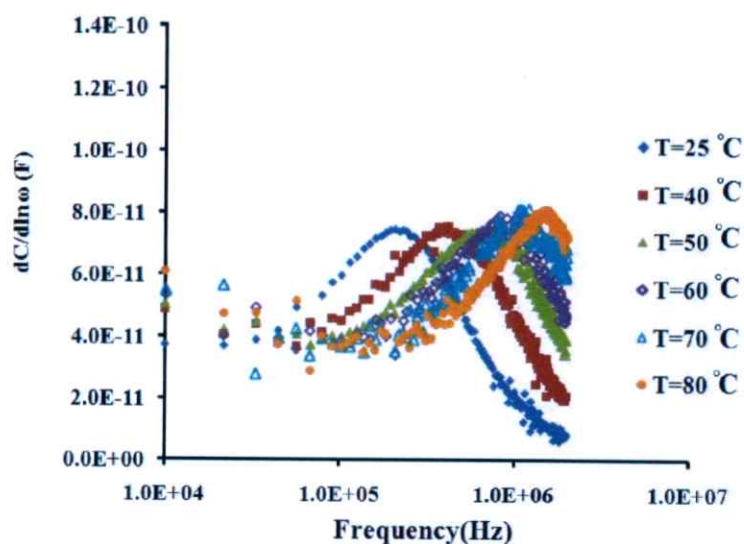
$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \tan^{-1}(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}}$$

เมื่อ C<sub>D</sub> คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C<sub>it</sub> คือความจุไฟฟ้าของกัปดักประจุ รูปที่ 4.34 ที่  
 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่พบว่าความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม  
 ความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ จอนเชอร์ (Joncher relation)  
 [28] คือ

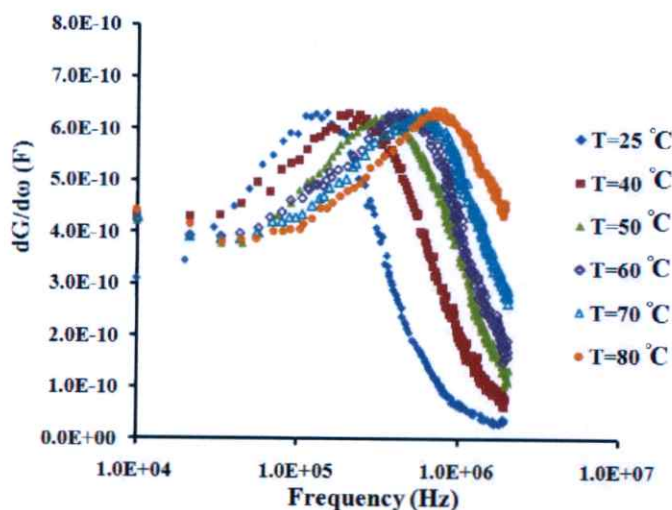
$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^S$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ ส่วนเลขยกกำลัง S จะมีค่าน้อยกว่า 1 และนอกจากนี้เมื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่วัด  
 ได้มาเขียนเป็นกราฟของค่า G/ω กับความถี่ก็ยังคงแสดงให้เห็นช่วงของการตอบสนองของกัปดัก  
 ประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ความถี่เป็นสองช่วง ได้อย่างชัดเจน โดยค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับ  
 ความถี่เฉพาะที่ทำให้อิเล็กทรอนิกส์หลุดออกจากกัปดัก (ω<sub>0</sub>) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  
 ด้วยเช่นกัน

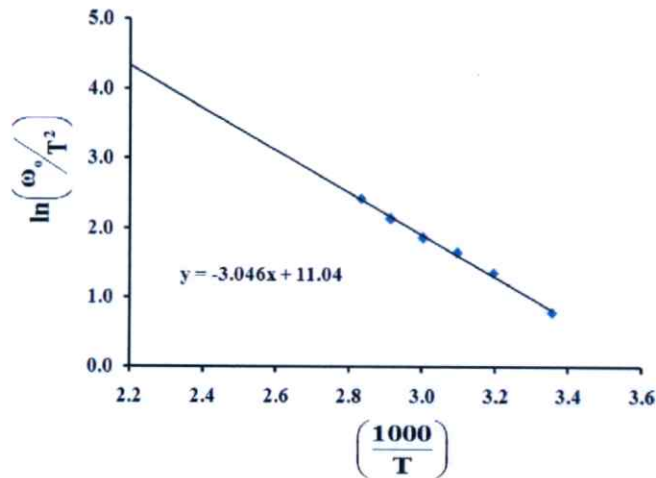
การหาค่าความถี่เฉพาะ (ω<sub>0</sub>) นอกจากความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่แล้วก็ยังสามารถ  
 หาได้หลายวิธีด้วยกัน โดยเริ่มจากการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับลอการิทึมของความถี่  
 เชิงมุมจะทำให้ช่วงจุดเปลี่ยนโค้งของค่าความจุกลายเป็นจุดสูงสุดของรูปที่ 4.36 และในรูปที่ 4.37  
 จะเป็นการหาค่าอนุพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมซึ่งจะได้รูปกราฟที่มีลักษณะ  
 คล้ายกันแต่จะสังเกตเห็นจุดสูงสุดได้ชัดเจนกว่ากราฟอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งค่า ω<sub>0</sub> ที่ได้  
 จากทั้งสามวิธีนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 4.6



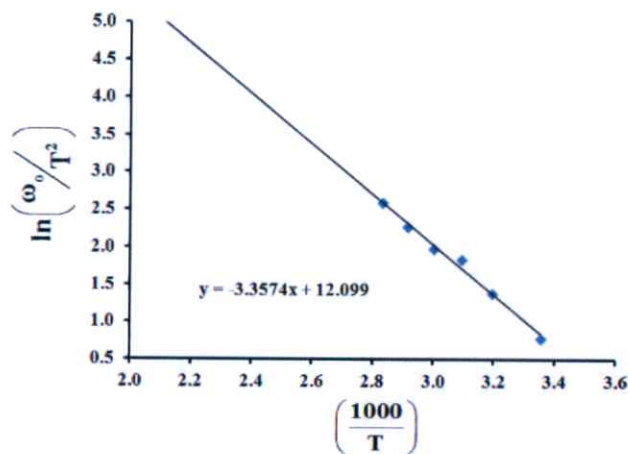
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln(\omega)$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



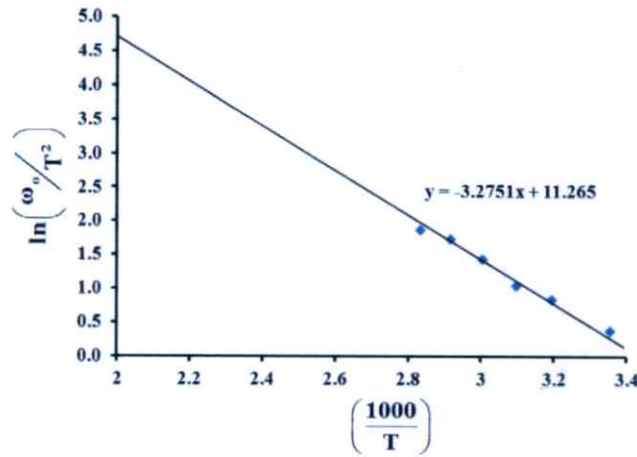
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dG/d\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.38** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.39** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $dC/d\ln(\omega)$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.40** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $dG/d\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

การหาค่า  $\omega_0$  จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมแล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ

$$\omega_0 = \zeta_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.23)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\zeta_0 \quad (4.24ก.)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.24) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.24ข.)$$

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

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

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c} \quad (4.25)$$

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

ค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $1,000/T$  ซึ่ง  $\omega_0$  สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ค่าของ  $\xi_0$  และ  $\sigma_T$  นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากโดยค่า  $\xi_0$  ที่ได้จากวิธีการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าอยู่ที่  $1.80 \times 10^5$  ต่อวินาทีเคลวินยกกำลังสอง ( $s^{-1}K^{-2}$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่า ความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Method	T (°C)	$\omega_0$ (rad/s)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ (s <sup>-1</sup> K <sup>-2</sup> )	$\sigma_i$ (cm <sup>-2</sup> )
$\frac{G}{\omega} - f$	25	195,120	0.221	$6.23 \times 10^4$	1.73E-22
	40	380,240			
	50	542,220			
	60	715,770			
	70	993,450			
	80	1,409,970			
$\frac{dG}{df} - f$	25	218,260	0.282	$7.80 \times 10^5$	2.17E-22
	40	229,830			
	50	299,250			
	60	472,800			
	70	669,490			
	80	738,910			
$\frac{dC}{d \ln f} - f$	25	195,120	0.289	$1.80 \times 10^5$	4.99E-22
	40	391,810			
	50	657,920			
	60	808,330			
	70	1,132,290			
	80	1,664,510			

ในรูปที่ 4.41 นี้จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกับดักในเนื้อสารที่บริเวณพ้องพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆซึ่งเกิดจากสมการความสัมพันธ์ของ

$$E_{\omega} = E_c - E_T = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{2\xi_0 T^2}{\omega} \right) \quad (4.26)$$

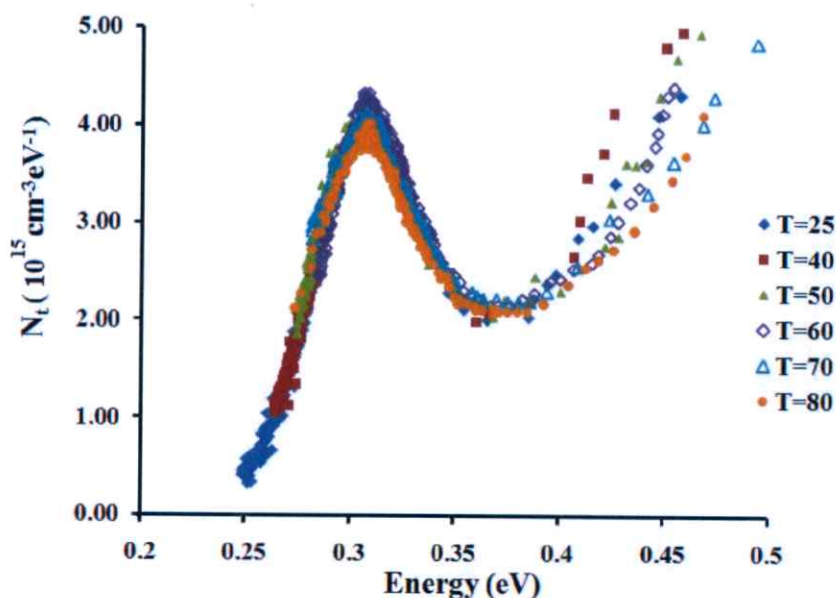
และจาก

$$N_T = \frac{-V_{bi}}{qkTW_D A} \left( \frac{\ln C}{d \ln \omega} \right) \quad (4.27)$$

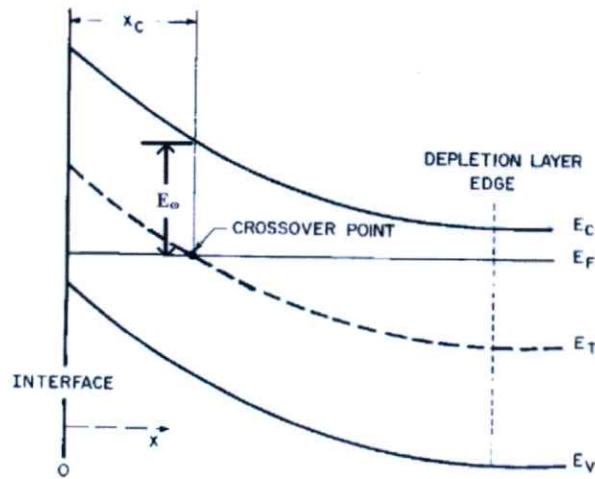
เมื่อ  $V_{bi} \approx \phi_{B0}$  และ

$$W_D = \left[ \frac{2\epsilon_s}{qN_d} (V_{bi} - V) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_T$  กับ  $E_C - E_T$  ในแต่ละอุณหภูมิโดยให้  $N_T$  เป็นแกนตั้ง ส่วน  $E_C - E_T$  เป็นแกนนอนจะได้กราฟของทุกค่าอุณหภูมิดังรูปที่ 4.41 พบว่าแต่ละอุณหภูมิกกราฟจะซ้อนทับกันพอดีและจุดสูงสุดของความหนาแน่นของกับดักในเนื้อสารที่ทุกอุณหภูมิจะอยู่ที่ระดับพลังงานประมาณ 0.3 อิเล็กตรอน โวลต์ และเมื่อนำไปเทียบกับระดับพลังงานกระตุ้นที่แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่ามีความใกล้เคียงกัน หรือจะประมาณได้ว่าพลังงานกระตุ้นที่หาได้นั้นคือระดับพลังงานของกับดักในเนื้อสาร (bulk trap) นั่นเอง

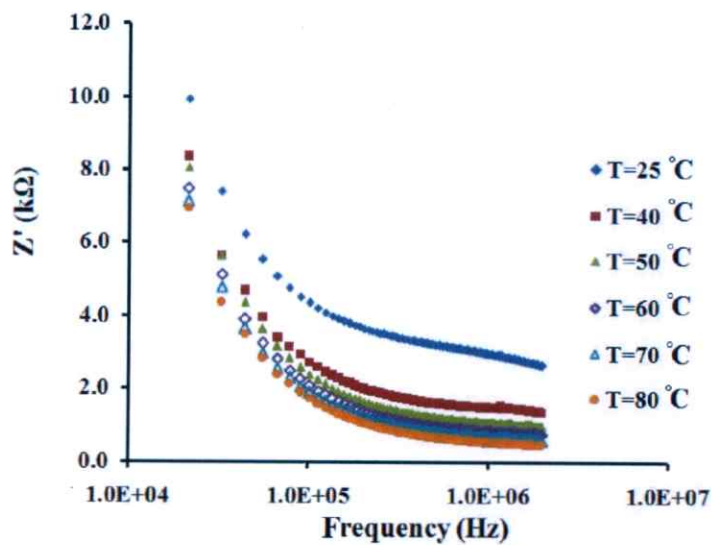


**รูปที่ 4.41** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N_T$  กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

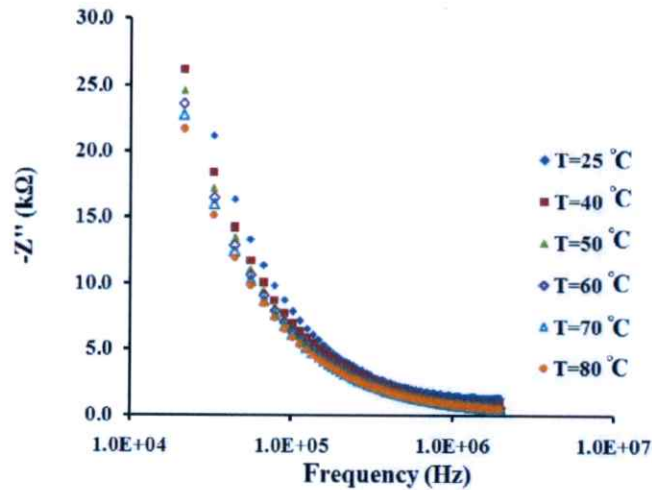


รูปที่ 4.42 แสดงระดับเฟอร์มีที่เลื่อนขึ้นที่ระดับพลังงานของกับดัก  $E_T$  ที่ตำแหน่ง  $x_c$  ซึ่งอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ

#### 4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub>



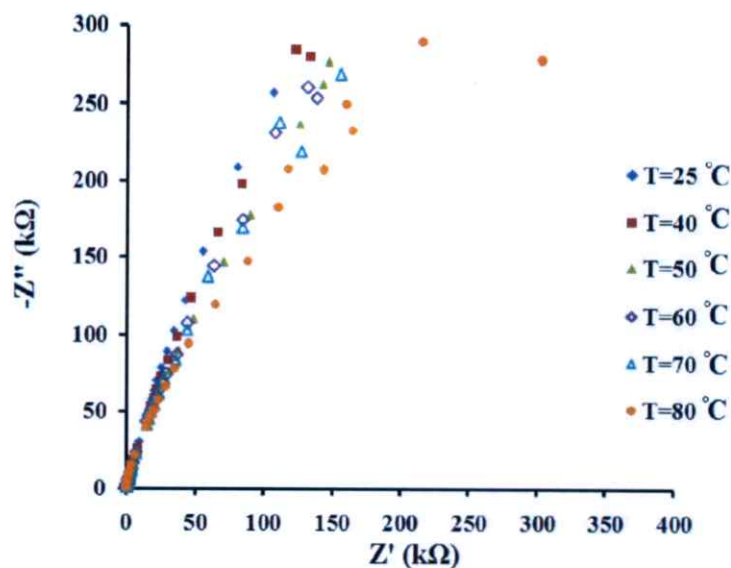
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



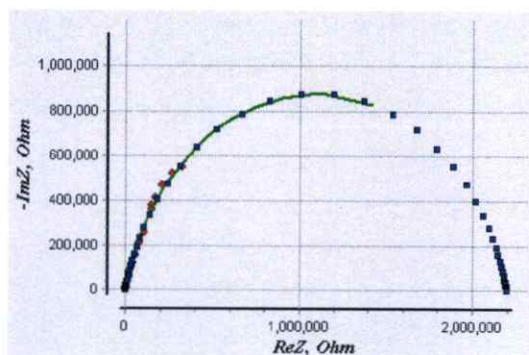
**รูปที่ 4.44** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่ทำกรวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยในรูปที่ 4.43 ได้แสดงความสัมพันธ์ของส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่างๆจะเป็นช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และในส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์นั้นจะไม่สามารถพบจุดสูงสุดของค่าจินตภาพได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นเพียงส่วนที่เป็นกราฟทางลาดลงเท่านั้น

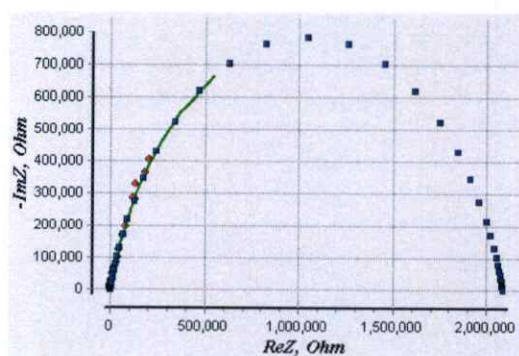
และเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแล้วจะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.45 จึงมีความจำเป็นในการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าตัวแปรที่สำคัญต่างๆที่จำเป็นต่อการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



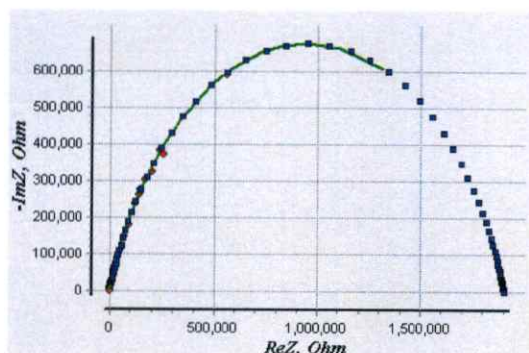
**รูปที่ 4.45** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



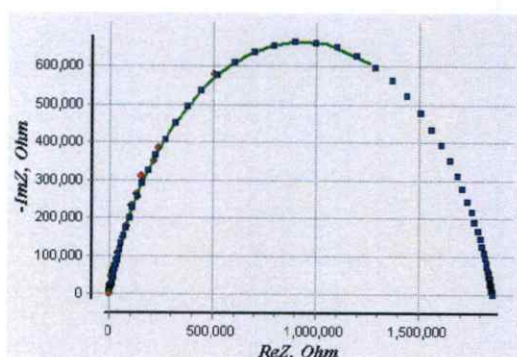
T = 25 °C



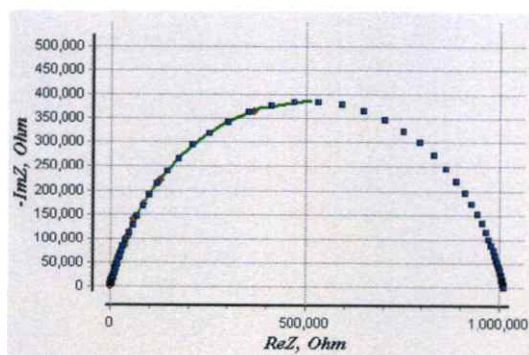
T = 40 °C



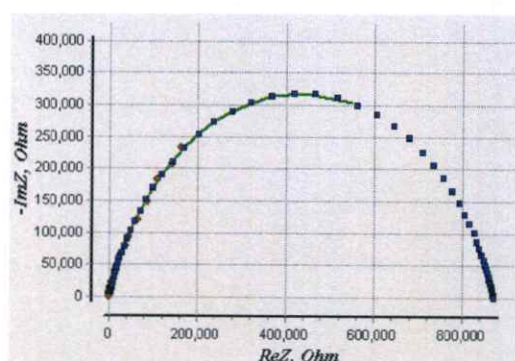
T = 50 °C



T = 60 °C



T = 70 °C



T = 80 °C

รูปที่ 4.46 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ในรูปที่ 4.46 ได้แสดงแบบจำลองของกราฟ โคล-โคล พล็อต (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่ทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ

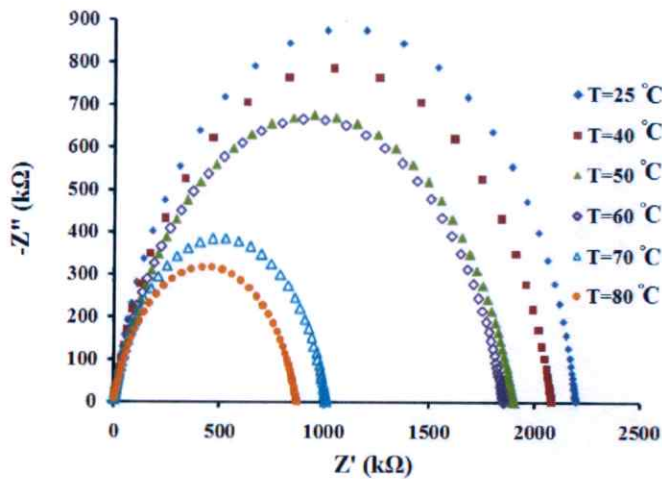
25 ถึง 80 องศาเซลเซียส จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก โดยจะขึ้นกับสมการ [28]

$$\left[ Z' - \left( R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + [Z'']^2 = \left( \frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (4.29)$$

ก็จะสามารถหาค่าความจุของรอยต่อแล้วนอกจากนี้ยังหาค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดได้จากกราฟที่ได้จากการจำลองนี้อีกด้วย และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองค่ามาพลอตรวมกันตามรูปที่ 4.47 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน ส่วนในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะได้จากสมการ

$$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p} \quad (4.30)$$

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

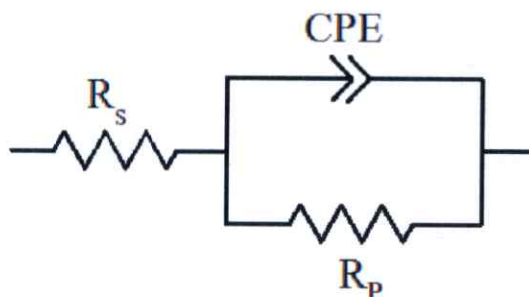


**รูปที่ 4.47** แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

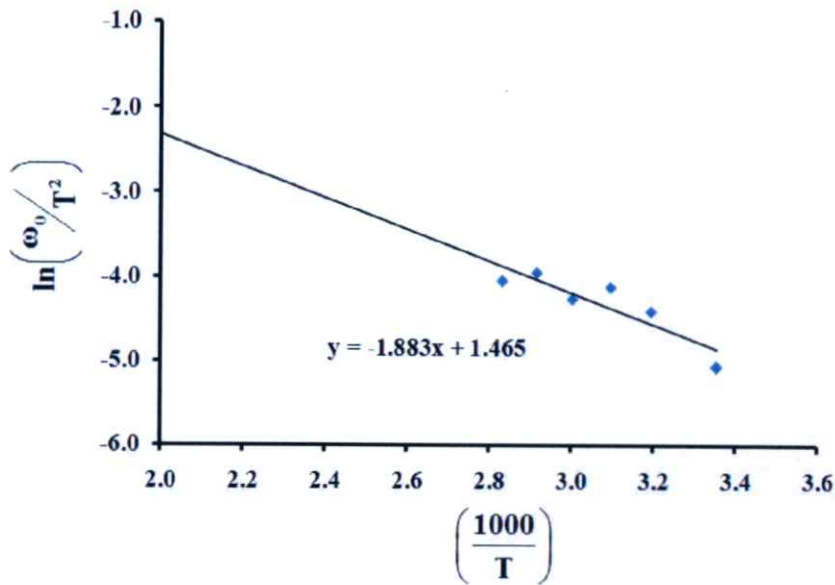
**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Temperature (°C)	Extracted Parameters								
	R <sub>s</sub> (Ω)	CPE			C <sub>p</sub> (F)	τ (s)	f(max) (Hz)	ω (rad)	ωτ
		R <sub>p</sub>	P <sub>1</sub>	n					
25	260.40	2.20E+06	2.65E-09	0.82193	8.57E-10	1.79E-03	89.022	559.34	1.00
40	226.78	2.08E+06	2.57E-09	0.83162	7.69E-10	7.77E-04	190.55	1197.26	0.93
50	200.35	1.90E+06	6.92E-10	0.8578	2.36E-10	5.19E-04	271.44	1705.50	0.88
60	196.32	1.86E+06	2.62E-09	0.80362	5.92E-10	5.16E-04	250.42	1573.41	0.81
70	167.31	1.01E+06	1.14E-09	0.79259	2.28E-10	4.24E-04	361.13	2269.04	0.96
80	126.18	8.71E+05	1.12E-09	0.78586	2.10E-10	4.00E-04	344.11	2162.10	0.87

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า R<sub>s</sub> และ R<sub>p</sub> มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ เมื่อ R<sub>p</sub> ลดลงแล้ว τ (τ=R<sub>p</sub>C) จะมีค่าลดลงจึงส่งผลให้ค่าความถี่เชิงมุม (ω) มีค่าสูงขึ้น



**รูปที่ 4.48** แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.49** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของ อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ สารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของ แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

และท้ายที่สุดยังสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ตามสมการที่ (4.24ก.) และสมการ (4.24ข.) ตามที่เคยเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากวิธีการต่างๆ มาสรุปตาม ตารางที่ 4.8 จะพบว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์นั้นมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดทั้งนี้มีส่วนเกิด มาจากการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั่นเอง โดยค่าของความถี่ที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ สูงสุดนั้นควรจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าแต่ด้วยในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีสัญญาณ รบกวนอยู่มากจึงทำให้สามารถทำการวัดได้เพียงบางส่วนของกราฟอิมพีแดนซ์เท่านั้น โดย สัญญาณรบกวนดังกล่าวนี้ อาจเกิดจากกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีค่ามากกว่าหนึ่งชนิด ที่สามารถตอบสนองได้ในช่วงความถี่ต่ำจึงส่งผลให้เกิดความไม่คงที่และความไม่ต่อเนื่องกันของ ข้อมูลที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะในช่วงบริเวณความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วง 100 เฮิร์ตซ์ นั้นเอง

**ตารางที่ 4.8** แสดงค่า ความถี่ก้ำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/ p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Method	T (°C)	$\omega_0$ (rad/s)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ (s <sup>-1</sup> K <sup>-2</sup> )	$\sigma_t$ (cm <sup>-2</sup> )
$\frac{G}{\omega} - f$	25	195,120	0.221	$6.23 \times 10^4$	1.73E-22
	40	380,240			
	50	542,220			
	60	715,770			
	70	993,450			
	80	1,409,970			
$\frac{dG}{df} - f$	25	218,260	0.282	$7.80 \times 10^4$	2.17E-22
	40	229,830			
	50	299,250			
	60	472,800			
	70	669,490			
	80	738,910			
$\frac{dC}{d \ln f} - f$	25	195,120	0.289	$1.80 \times 10^5$	4.99E-22
	40	391,810			
	50	657,920			
	60	808,330			
	70	1,132,290			
	80	1,664,510			
$Z' - Z''$	25	559.34	0.259	$4.33 \times 10^3$	1.20E-26
	40	1,197.26			
	50	1,705.48			
	60	1,573.43			
	70	2,269.04			
	80	2,162.10			

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานภายในแถบนำ ( $N_c$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS สามารถคำนวณหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_c^* kT}{h^2} \right]^{3/2}$$

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

มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ ( $m_c^*$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ  $0.165 m_0$  [31] ดังนั้น  $N_c$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้ คือ

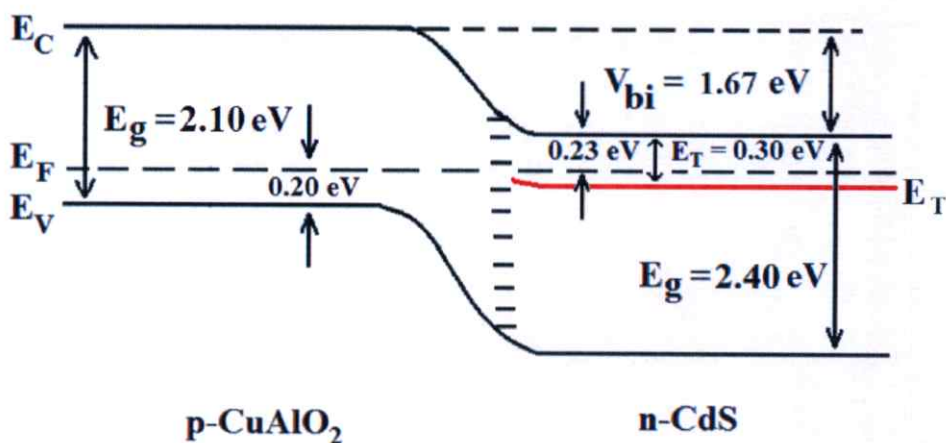
$$\begin{aligned} N_c &= (4.83 \times 10^{15}) (300)^{3/2} \left( \frac{0.165 m_0}{m_0} \right)^{3/2} \\ &= 1.68 \times 10^{18} \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันไฟฟ้า (C-V measurement) พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ  $4.20 \times 10^{14}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับระดับพลังงานเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_c - E_F &= kT \ln \left( \frac{N_c}{N_d} \right) \\ &= (0.0258) \ln \left[ \frac{1.68 \times 10^{18}}{4.20 \times 10^{14}} \right] \\ &= 0.23 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned}$$

ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct energy gap) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ 2.40 อิเล็กตรอน โวลต์ ส่วนช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียง (indirect energy gap) ของ  $\text{CuAlO}_2$  มีค่าเท่ากับ 2.10 อิเล็กตรอน โวลต์ [32] ส่วนระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  หาได้จากการวัดพลังงานกระตุ้นของสัมประสิทธิ์ซีเบก พบว่ามีค่าประมาณ 200 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ [35] จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์สารกึ่งตัวนำ CdS/ $\text{CuAlO}_2$  ได้ดังรูปที่ 4.50 และศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) จะมีค่าเท่ากับ 1.67 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีค่าต่างกับแรงดันทำงาน (working voltage) หรือแรงดันเทิร์นออน (turn on

voltage) ของกราฟ I-V ที่อุณหภูมิห้องที่มีค่าประมาณ 1.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากสถานะผิวเชื่อมต่อ การเกิดชั้นออกไซด์บางๆ ที่บริเวณรอยต่อ กระแสรั่วที่ขอบรอยต่อ หรือระดับพลังงานลึก ก่อให้เกิดกระแสจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ (generation-recombination current) หรือกระแสจากกลไกการเจาะอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์หลายชั้นอย่างต่อเนื่อง (multi-step tunneling) [36-37] โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ดังรูปที่ 4.50 มีลักษณะใกล้เคียงดังที่มีผู้รายงานไว้ [34-36]



รูปที่ 4.50 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/ CuAlO<sub>2</sub> ที่สภาวะสมดุลความร้อน

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็นหัวข้อหลักๆดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาถึงประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

##### 5.1.1 ผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของสิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากผลการศึกษารายละเอียดของรังสีเอ็กซ์ พบว่าปรากฏระนาบ โครงผลึก (002) ของ CdS ที่มีมุม  $2\theta = 27.825$  องศา ซึ่งเป็น โครงผลึกแบบเฮกซะ โกนัล นอกจากนี้ยังพบพีคของระนาบ โครงผลึกของ CuAlO<sub>2</sub> ได้แก่ ระนาบ (006), (101), (012), (104), (009), (018), (110), (1010), และ (116) ที่มีมุม  $2\theta$  เท่ากับ 32.050, 37.075, 38.225, 42.650, 48.675, 57.550, 65.600, 67.350 และ 74.675 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็น โครงผลึกแบบรอม โบฮ์ดรัล

ในด้านการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจากภาพถ่ายผิวหน้าพบว่ามีผลึกเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ปกคลุมอยู่ทั่วบริเวณของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> และเมื่อทำการถ่ายภาพภาคตัดขวางของสิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/CuAlO<sub>2</sub> พบว่ามีชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เคลือบทับอยู่บนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS นั้นมีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

##### 5.1.2 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuAlO<sub>2</sub> โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1.00 ถึง 2.50 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขั้วเริ่ม

(threshold voltage) อยู่ที่ 1.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  อยู่ในระดับ  $10^{16}$  และ  $10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS}/p\text{-CuAlO}_2$  เป็นแบบรอยต่อ  $p^+-n$  ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชอตต์กีโดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  โดยสามารถคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติเท่ากับ 7.89 และความสูงกำแพงศักย์ 0.592 อิเล็กตรอน โวลต์

และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างในช่วง 10 ถึง 300 เคลวินพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ แต่ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคตินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง โดยการที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้า ประจุมิที่ระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้กำแพงศักย์ที่มีค่ามาก และค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อในช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง

### 5.1.3 ผลจากการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสโดยการป้อนความถี่ที่หลายๆ ค่า

พบว่าค่าความหนาแน่นของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ คือ  $2.53 \times 10^{11}$  ต่อตารางเซนติเมตร อิเล็กตรอน โวลต์ แล้วจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ คือเมื่อมีค่าความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สถานะกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด และที่ความถี่ที่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์นั้นจะสามารถคำนวณหาศักย์ตกคร่อมรอยต่อเท่ากับ 0.58 อิเล็กตรอน โวลต์ และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ  $8.37 \times 10^{14}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

### 5.1.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 โวลต์ถึง 0.5 โวลต์

พบว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบบนของแถบวาเลนส์แล้วจะค่อยๆ ลดลงที่ระดับพลังงานออกห่างจากแถบวาเลนส์มากขึ้น และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นตามค่าแรงดันที่ไบแอสเข้าไปและ ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิพาดผ่านนั้นจะส่งผลให้กับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับพาหะที่อยู่บริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิและถ้าต้องการให้กับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นทำการคายประจุออกมาต้องทำการป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะของกับดักนั้นๆ

### 5.1.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่

ในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียส

พบว่าเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความถี่เฉพาะของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.289 อิเล็กตรอน โวลต์ และค่า  $\xi_0$  ก็เท่ากับ  $1.80 \times 10^7$  ต่อวินาที เคลวินยกกำลังสอง และเมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ผ่านสมการ

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

และ

$$N_T = \frac{-V_{bi}}{qkTW_D A} \left( \frac{\ln C}{d \ln \omega} \right)$$

ในบริเวณพร่องพาหะพบกับดักประจุในเนื้อสาร (bulk trap) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีระดับพลังงานอยู่ที่ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์  $G/\omega - f$ ,  $\frac{dG}{df} - f$ , และ  $\frac{dC}{d \ln f} - f$

### 5.1.6 ผลจากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuAlO<sub>2</sub> พบว่าค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะมีค่าลดลง

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดจะเลื่อนไปในทางความถี่ที่สูงขึ้น

## 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $CdS/CuAlO_2$  นั้นพบว่า สิ่งประดิษฐ์รอยวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้นั้นมีชั้นฉนวนบางๆ คั่นอยู่ระหว่างผิวเชื่อมต่อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  กับเม็ดยุติของสารกึ่งตัวนำ  $CuAlO_2$  ซึ่งข้อสันนิษฐานดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากผลของการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ค่าแรงดันไบแอสไปหน้าซึ่งพบว่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสไปหน้าที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความจุมีค่าสูงสุดแล้วจะคงที่ไม่เพิ่มตามแรงดันไบแอสไปหน้า และนอกจากนี้ในการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในเงื่อนไขต่างๆ ยังพบปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนมากในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 200 เฮิร์ตซ์ และรวมไปถึงการค้นคว้าข้อมูลเพื่อที่ใช้ในการประกอบคำอธิบาย ซึ่งได้รับคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาในหลายๆด้านจนสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้นั้นอย่างถูกต้องและมีความเข้าใจถึงจุดหมายของงานวิจัยที่ทำการศึกษานี้ โดยรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำจำนวนมากนั้นเป็นที่รู้จักกันมานานแล้วว่ามีคุณสมบัติพิเศษในด้านการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางด้านโฟโตอิเล็คทรอนิกส์ ซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง และทำการศึกษาในแง่มุมใหม่ๆ อยู่เสมอและในงานวิจัยฉบับนี้ก็ได้ทำการคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ และระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุในบริเวณพร่องพาหะ พฤติกรรมการตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $CdS/CuAlO_2$  ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ จนได้ข้อสรุปเป็นแผนภาพของแถบพลังงานอย่างง่าย เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบการเกิดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เป็นไดโอดโปร่งแสงต่อไปในอนาคต

## 5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังฐานรองรับควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้
2. ต้องทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างเตรียมฟิล์มบาง
3. การวัดค่าต่างๆ ที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบป้องกันสัญญาณรบกวนที่ดี เพราะเวลาวัดค่าไฟสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

4. ในการทำขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะ จึงควรเคลือบฟิล์มโลหะด้วยระบบสปีดเตอริงเนื่องจากการใช้  
กาวเงินนั้น ตัวอนุภาคเงินจะแพร่เข้าไปยังเนื้อเซรามิกซึ่งจะก่อให้เกิดพฤติกรรมการนำไฟฟ้าที่  
ไม่พึงประสงค์แสดงออกมามีการวัดได้
5. เนื่องจากชิ้นงานถูกเตรียมขึ้นมาในรูปแบบของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจึงสมควรที่จะมี  
การศึกษาการตอบสนองต่อก๊าซชนิดต่างๆ ด้วย
6. เพื่อให้สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์มีประสิทธิภาพที่สูงกว่านี้ควรที่จะเตรียมขึ้นมาในรูปแบบ  
ของรอยต่อของฟิล์มบางกับฟิล์มบางด้วยกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Kawazoe, H. et. al. 1997. "p-type Electrical Conduction in Transparent Thin Films of  $\text{CuAlO}_2$ ." *Nature.*, 389 : 939-942.
- [2] Park, K.S. et al. 2005. "Thermoelectric Properties of  $\text{CuAlO}_2$ ." *J. Eur. Ceram. Soc.*, 25 : 2219-2222.
- [3] Koyanagi, T. et. al. 2003. "Materials Design of p-type Transparent Conducting Oxides of Delafossite  $\text{CuAlO}_2$  by Super-Cell FLAPW Method." *J.Phys. Chem Solids.*, 64 : 1443-1446.
- [4] Banerjee, A. N. et. al. 2005. "Thermoelectric Properties and Electrical Characteristics of Sputter-Deposited p- $\text{CuAlO}_2$  Thin Films." *Thin Solid Films.*, 474 : 26 -266.
- [5] Melo , O.D. , Hernandez L. , O.Zelaya-Angel. , R. Lozasa-Morales , and M. Becerril ,1994. Low Resistivity Cubic Phase CdS Films by Chemical Bath Deposition Technique, *Appl. Phys. Lett.*, 65 : 19215-19217
- [6] Sze S.M. and Kwok K. Ng. **Semiconductor Devices Physics and Technology.** 3rd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2007.
- [7] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics.** 8th ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2005.
- [8] ฐิตินัย แก้วแดง. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2531.
- [9] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [10] Chavez,H., Jordan M. , McClure J.C. , Lush G. and Singn V.P. , 1997. Physical and Electrical Characterization of CdS Films Deposition by Vacuum Evaporation , Solution Growth and Spray Pyrolysis , *J.Master.Sci : Mater. 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] คูสิต เครื่องงาม. "โซลิตสเตรทฟิสิกส์." พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น.2535.

- [13] Schroder D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1990.
- [14] สัทธชัย โกโดยอุดม. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551.
- [15] มนตรีเข้มวงษ์. **ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2543.
- [16] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ญัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [17] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [18] จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [19] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่ออิมพัลชัน  $CdS/CdTe$ ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [20] ไกรศักดิ์ ยืนยง “การศึกษาข้อจำกัดของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [21] สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [22] Ignatowicz S. and Kobendza A. **Semiconducting Thin Films of A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> Compounds**. Warsaw : PWN-POLISH SCIENTIFIC. 1990.
- [23] 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.

- [24] Adachi S. **Properties of Group-IV,III-V and II-VI Semiconductors**. West Sussex : John Wiley&Sons. 2005.
- [25] Perrier G., Philippe R. and Dodelet J.P. "Growth of Semiconductors by the Close-Spaced Vapor Transport Technique : A review" **J. Mater. Res.** 1988. pp. 1031-1042.
- [26] Ohring M. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure**. 2nd ed. San Diego : ACADEMIC PRESS. 2002.
- [27] Bayhan Habibe A. Sertap Kavasoglu A.S. "Tunneling Enhanced Recombination in Polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Heterojunction Solar Cell " **Solid-State Electronics**. vol. 49. 2005. pp. 991-996.
- [28] Barsoukov E. and Macdonald J.R. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application**. 2nd Ed., John Wiley&Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2005.
- [29] Subhash C. and Saroj B. "Analysis of Current–Voltage Characteristics of Inhomogeneous Schottky diodes at Low Temperatures" **Appl. Surf. Sci.** vol. 252. 2005. pp. 358–363.
- [30] Tataroglu A. and Altindal S. "Characterization of Current-Voltage(I-V) and Capacitance – Voltage – Frequency (C – V – f) Feature of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky Diodes" **Microelectronic Engineering**. vol. 83. 2006. pp. 582-588.
- [31] Karatas S., Altindal S., Turut A. and Cakar M. "Electrical Transport Characteristics of Sn/p-Si Schottky Contacts Revealed from I-V-T and C-V-T Measurements" **Physica B**. vol.329. 2007. pp. 43-50.
- [32] Blood P. and Orton J.W. **The Electrical Characterization of Semiconductor Majority Carriers and Electron State**. London : Academic Press. 1992.
- [33] Rakhshani A.E. "Heterojunction properties of electrodeposited CdTe/CdS solar cells." **J. Appl. Phys.** Vol. 90 (2001) pp. 4265 – 4271.
- [34] ประธาน ประจวบโชค "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO<sub>2</sub> ชนิดพี" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [35] Kumar, P., Adhikari, S. and Banerji, P. "Fabrication and Characterization of Polyaniline/Porous Silicon Heterojunction" **Synth. Met.**, vol. 160, 2010. pp.1507–1512.
- [36] Takahata, S., Saiki, K., Imao, T., Nakanishi, H., Sugiyama, M. and Chichibu, S.F. "Fabrication of n-Type ZnO/p-Type Cu-Al-O Heterojunction Diode by Sputtering Deposition Methods" **Phy. Status Solidi C** vol. 6, no.5, 2009. pp. 1105 – 1108.

- [37] Banerjee, A.N., Nandy, S., Ghosh, C.K. and Chattopadhyay, K.K. "Fabrication and Characterization of All – Oxide Heterojunction p-CuAlO<sub>2+x</sub>/n-Zn<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>O Transparent Diode for Potential Application in Invisible Electronics", **Thin Solid Films**, vol. 515, 2007. pp.7324 – 7330.
- [38] Altindal, S., Kanbur, H., Yücedağ, İ.,and Tataroğlu, A. "On The Energy Distribution of Interface States and Their Relaxation Time and Capture Cross Section Profiles in Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky Diodes" **Microelectronic Engineering**, vol. 85 , 2008 . pp. 1495-1501.
- [39] Kordoš, P., Stoklas, R., Gregušová, D., Gaži, 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.

ภาคผนวก

Pattern : 71-967		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated				
CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		2th	I	h	k	l		
		19.014	2	1	1	1		
<b>Lattice</b> : Face-centered Cubic		<b>Mol. weight</b> = 181.51		31.294	49	2	2	0
S.G. : Fd3m (227)		<b>Volume[CD]</b> = 527.12		36.874	100	3	1	1
a = 8.07800	Z = 8	<b>I/Icor</b> = 3.20		38.557	<1	2	2	2
				44.845	17	4	0	0
				49.121	1	3	3	1
				55.700	13	4	2	2
				59.405	32	5	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 009558		65.289	40	4	4	0		
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 1468.		68.686	<1	5	3	1		
TEMPERATURE FACTOR : ITF		69.800	<1	4	4	2		
		74.184	4	6	2	0		
		77.409	7	5	3	3		
		78.475	1	6	2	2		
		82.700	2	4	4	4		
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce: * J.Am.Ceram.Soc., volume 55 , page 395, (1972): Cooley , R.F.,Read,J.S.		85.842	<1	5	5	1		
<b>Radiation</b> :CuKa1	<b>Fitter</b> : Not specified							
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Calculated spacings							

Pattern : 35-1401		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
CuAlO <sub>2</sub> Copper Aluminum Oxide		2th	I	h	k	l
		15.678	10	0	0	3
		31.671	40	0	0	6
		36.690	47	1	0	1
		37.851	100	0	1	2
		42.282	23	1	0	4
		48.311	9	0	0	9
		52.870	4	1	0	7
		57.222	30	0	1	8
		65.263	26	1	1	0
		66.123	5	0	0	12
		66.871	15	1	0	10
		67.572	1	1	1	3
		72.423	1	0	1	11
		74.350	9	1	1	6
		77.259	2	0	2	1
		77.979	6	2	0	2
		80.891	2	0	2	4
		85.202	3	1	1	9
		90.229	2	0	1	14
		92.305	3	2	0	8
		100.198	3	1	1	12
		100.900	3	0	2	10
		104.608	2	1	0	16
		109.837	2	0	0	18
		111.194	1	2	1	1
		111.954	4	1	2	2
		112.859	1	0	1	17
		115.046	2	2	1	4
		128.451	3	1	2	8
		138.182	3	3	0	0
		140.439	2	2	1	10
		146.467	1	0	2	16
		147.921	1	0	1	20
Lattice : Rhombohedral		Mol. weight = 122.53				
S.G. : R-3m (166)		Volume [CD] = 119.74				
a = 2.85670	Z = 3	Dx = 5.097				
c = 16.94300		Dm = 5.060				
COLOR :Dark blue						
SAMPLE PREPARATION ; Prepared by solid state reaction of Cu <sub>2</sub> O and Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> at 1373 K in N <sub>2</sub> atmosphere.						
ANALYSIS :Chemical analysis ( wt.% ) : Cu 51.8, Al 22.1,O 26.1.						
ADDITIONAL PATTERN: To replace 9-185						
GENERAL COMMENTS : 3R polytype						
*Private Communication,(1984) primary reference: Ishizawa, N., Tokyuu Institute of Technology, Tokyo, Japan.						
*Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, Volume 39, page 564, (1983) unit cell data : Ishiguro, T.et al.						
Radiation :CuKa	Fitter : Not specified					
Lambda : 1.54180	<i>d-sp</i> : Calculated spacings					
SS/FOM :	External Standard : Si					
F30=45(0.0159,42)						

Pattern : 75-1792		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
CuAlO <sub>2</sub> Copper Aluminum Oxide		2th	I	h	k	l	
		15.682	11	0	0	2	
<b>Lattice</b> : Hexagonal		<b>Mol. weight</b> = 122.53	31.667	29	0	0	4
<b>S.G.</b> : P63/mmc (194)		<b>Volume[CD]</b> = 79.88	36.265	5	1	0	0
<b>a</b> = 2.85800	<b>Z</b> = 2	<b>Dx</b> = 5.094	37.157	100	1	0	1
<b>c</b> = 11.29300		<b>I/Icor</b> = 4.36	39.730	45	1	0	2
			43.736	9	1	0	3
			48.317	6	0	0	6
			48.898	<1	1	0	4
ICSD COLLECTION CODE : 031368		54.995	23	1	0	5	
TEMPERATURE FACTOR : ATF		61.882	20	1	0	6	
TEST FROM ICSD : At least one TF implausible		65.238	21	1	1	0	
		66.142	3	0	0	8	
		67.565	1	1	1	2	
		69.493	11	1	0	7	
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)		74.338	11	1	1	4	
primary reference:		76.989	<1	2	0	0	
* Z.Kristallogr., volume 165 , page 313, (1983):		77.535	7	2	0	1	
Koehler , B.U., Jansen, M.		79.168	4	2	0	2	
		81.871	1	2	0	3	
		85.189	4	1	1	6	
		86.016	<1	0	0	10	
		86.988	1	1	0	9	
<b>Radiation</b> : CuKα1	<b>Fitter</b> : Not specified						
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Calculated spacings						



Pattern : 77-2306		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
CdS		2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.635	45	0	0	2
		28.216	100	1	0	1
		36.862	25	1	0	2
		43.738	43	1	1	0
		47.894	41	1	0	3
		50.949	6	2	0	0
		51.890	31	1	1	2
		52.866	13	2	0	1
		54.644	2	0	0	4
		58.354	5	2	0	2
		60.912	2	1	0	4
		66.858	12	2	0	3
		69.359	8	2	1	0
		70.962	9	2	1	1
		72.472	4	1	1	4
		75.512	8	1	0	5
		75.689	5	2	1	2
		77.566	1	2	0	4
		80.366	4	3	0	0
		83.367	10	2	1	3
		86.434	4	3	0	2
		87.021	1	0	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.13600 c = 6.71300 Z = 2		Mol. weight = 144.47 Volume [CD] = 99.45 Dx = 4.824 Vcor = 7.93				
ICSD COLLECTION CODE : 060629 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakineos, Stevenco REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35 415 424. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 521, (1984) :						

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ — นามสกุล นายอดิศร นพรุจิกุล
- วัน เดือน ปีเกิด 22 มิถุนายน 2529
- ที่อยู่ประวัติการศึกษา 7/3 ซอยวิเศษมุกดาร์กษ์ ถนนสมุทรศักดิ์รักษ์ อำเภอเมือง  
จังหวัดมุกดาหาร 49000
- 2540 จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนมุกดาลัย  
จังหวัดมุกดาหาร
- 2547 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก  
โรงเรียนมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร
- 2548 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2551 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2552 เข้ารับการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง