



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ
วิวิธพันธุ์ CdS/CuO

Fabrication and Characterization of CdS/CuO Heterojunction Thin Film
Solar Cell



T137639

นายฉัตรินัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรศน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภูรัศม์เกียรติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิทยาศาสตร์

KCH
73354
2557

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. ๖. ๑๒๖๘๑๗๖๓
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 137639
รับเดือนปี 13 ก.ค. 2558

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์บนการคำ
ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ
รอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 300,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายฐิตินัย แก้วแดง สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kwngamni@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kgthitin@kmitl.ac.th

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ อ.
คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, E-mail: tiparatana.w@bu.ac.th

นายชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330, E-mail: Chaisingh.P@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วย
ความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และบน
แผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ FTO ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกและ
ผิวหน้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสามารถหาได้จากการวัดสเปกตรัม
ของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง จากนั้นได้ทำการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสาร
กึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ด
เซรามิกของ CuO ซึ่งหนา 1 มิลลิเมตร โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ
สุญญากาศ และได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส - แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ภายใต้สภาวะไบแอสตรงที่อุณหภูมิในช่วง 20 - 300 เคลวิน
และทำการคำนวณหาพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ค่าความสูงของกำแพงศักย์ แพลกเตอร์อุดมคติ และค่า
ความต้านทานอนุกรมเป็นต้น พบว่าความสูงของกำแพงศักย์และแพลกเตอร์อุดมคติที่คำนวณได้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก จากการทดลองยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์จะมีค่าลดลง แต่เฟกเตอร์อุคมคิตีมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพาหะอิสระของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถคำนวณได้จากการวัดความจุ – แรงดันไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 20 -300 เคลวิน อีกทั้งยังทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสถานะระหว่างรอยต่อของไดโอดจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของความจุ - ความถี่ไฟสลับภายใต้สภาวะไบแอสตรงที่อุณหภูมิห้อง ความต้านทานชั้นที่และพลังงานกระตุ้นของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ สามารถหาได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน



คำสำคัญ : ไดโอด CdS/CuO, ลักษณะเฉพาะของกระแส – แรงดันไฟฟ้า, ลักษณะเฉพาะของ
ความจุ – แรงดันไฟฟ้า, อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Fabrication and Characterization of CdS/CuO Heterojunction Thin

Film Solar Cell

Researcher: Mr. Thitinai Gaewdang Mrs. Ngamnit Wongcharoen, Mrs. Tiparatana

.....Wongcharoen and Chaisingh Poo-Rakkiat

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้นำปลอดประจวบมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาววรรณภา จำเนียรพิช นายพนัญญ์ เดชะคำภู นายทศพร ชันตยาภรณ์ นายอดิศร นพรุจิกุล และนายจักรพงษ์ สวัสดิวงศ์ นักศึกษาปริญญาโทของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุไฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิ้ล บีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น HeLios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิทธิ์ ภูริภัยเกียรติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XII
สารบัญภาพ	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
2.1.1 ชนิดของงานวิจัย	7
2.2 โครงสร้างผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม	8
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อของผลิตภัณฑ์	10
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	10
2.3.2 การระบุทิศทาง	10
2.3.3 การระบุชื่อของผลิตภัณฑ์	10
2.4 โครงสร้างผลิตภัณฑ์ของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และ กลุ่ม VI	12
2.4.1 โครงสร้างผลิตภัณฑ์แบบซิงค์เบลนด์	13
2.4.2 โครงสร้างผลิตภัณฑ์แบบเวอร์ทไซด์	13
2.4.3 โครงสร้างผลิตภัณฑ์ของแคดเมียมซัลไฟด์	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์	14
2.4.5 โครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์	15
2.5 ผลึกจริง	16
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	16
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น	18
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	19
2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	19
2.5.3.2 โครงสร้างผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของโครงสร้างผลึกแฝดหรือระนาบของโครงสร้างผลึกแฝด	20
2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	21
2.6 การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	21
2.6.1 อัตราการระเหยสาร	22
2.6.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	22
2.6.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	22
2.6.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป	23
2.6.3 ความดันไอของธาตุ	24
2.6.4 การระเหยสารประกอบ	25
2.6.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร	26
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	28
2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
2.9 ร้อยต่อ พี-เอ็น	36
2.9.1 บริเวณพร่องพาหะ	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	36
2.9.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพ่วงพหะ	42
2.9.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	44
2.9.3 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพหะอิสระ	51
2.9.4 ความจุแพร่ซึม	55
2.10 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพหะในรอยต่อวิวิพันธ์	58
2.10.1 กลไกการรวมตัวของพหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิว รอยต่อ	59
2.10.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงกักช่วยเสริมการรวมตัว ของพหะ	60
2.11 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงกักแล้วทำให้เกิดการ รวมตัวกันของพหะที่เนื้อสาร	63
2.12 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	65
2.13 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	67
2.14 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมเชื่อมต่อ	68
2.15 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและ ความถี่ต่ำ	72
2.15.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโทรสโกปี	73
2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	76
2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	76
2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	77
2.16.3 กราฟของโบค	81
2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์ แสงอาทิตย์	83
2.16.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี	86

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

92

- 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 92
- 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 92
- 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 93
- 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดยาเม็ดยานั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 94
- 3.2. ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดยาเม็ดยาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS /p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดยาเม็ดยานั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 94
- 3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 94

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	96
3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	96
3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	96
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS /CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	100
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	100
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	101
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	101
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	102

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.4.1	การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส	102
บทที่ 4 ผลการวิจัย		106
4.1	ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	106
4.2	การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และรอยต่อวิวิธพันธุ์ ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	107
4.2.1	ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
4.2.2	ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_x ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 115
- 4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ สารกึ่งตัวนำ $n-Cd/p-CuAlO_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและ ทำการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 117
- 4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n-CdS/p-CuO$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 118
- 4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n-CdS/p-CuO$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 124
- 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n-CdS/p-CuO$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 132

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	140
4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	148
4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสและทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	173
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	190
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	196
เอกสารอ้างอิง	204
ภาคผนวก	208
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	211
ข้อมูลประวัตินักวิจัย	213

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	11
2.3 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	26
4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิธานสถานะของแข็ง และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111
4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{b0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	124
4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	128
4.4 แสดงค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_u) แรงดันตกคร่อมรอยต่อ (V_b) ความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_{c-v}) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ (Φ_{br}) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.5	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) ความจุไฟฟ้าสูงสุด (C_m) ความนำไฟฟ้าสูงสุด (G_m/W) ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และค่าความต้านทาน (R_s) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	146
4.6	แสดงค่า E_c-E_v ค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) และค่าความหนาแน่นของกักตักที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	170
4.7	แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) ที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/W กับความถี่และจากกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ ค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/W กับความถี่ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส	180
4.8	แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	171
4.9	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	179
4.10	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1000/T$ ของค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	185

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	186



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	6
2.2 แสดงภาพขนาดเกรนของวัสดุผลึกพหุพันธ์	7
2.3 แสดงโครงสร้างของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก และมีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก	7
ก. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก	
ข. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก	
2.4 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ	8
2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	11
2.6 แสดงพันธะที่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	12
2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	13
2.8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	14
2.9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	15
2.10 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdS	15
2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์	16
2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	17
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง	
ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก	
ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก	
ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่	
2.13 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขดตึกและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	18
2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	19
2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	19
2.16 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อองเกรน	20
2.17 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแผ่นและระนาบของโครงผลึกแผ่น	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.18	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ	21
2.19	แหล่งกำเนิดชนิดกึ่งสแตน	23
2.20	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	23
2.21	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	24
2.22	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	25
2.23	แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น	26
2.24	แสดงการเกี่ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	29
2.25	แสดงวิธีการหา β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเกี่ยวเบนรังสีเอกซ์	31
2.26	แสดงส่วนประกอบของกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์แบบสองกราด	32
2.27	แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉบับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน	37
	ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)	
	ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	
	ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ	
	ง. โครงสร้างแถบพลังงาน	
2.28	แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ ($\psi_{bi} - V - 2kT/q$) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉบับพลันในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์	42
2.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2 - V$ ซึ่งจะทำได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	44
2.30	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มิสำหรับอเล็กตรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข	47
	ก. ไบแอตตรง	
	ข. ไบแอตกลับทาง	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.31	แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ ก. เส้นใยไบแอสตรง ข. เส้นใยไบแอสกลับทาง	49
2.32	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ก. กราฟเชิงเส้น ข. กราฟกึ่งลอการิทึม	50
2.33	ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง ง. ผลของความต้านทานอนุกรม จ. การแพร่ไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด - การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ	53
2.34	แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง	57
2.35	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ	59
2.36	แสดงกลไกผลของการดูดอูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ โดย ก. รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	61
2.37	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิมิตด้วยย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย CdCl_2	62
2.38	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ($V=0$) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.39	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงหุมนุมพาหะ ข. ช่วงพร่องพาหะ ค. ช่วงกลับกลาย	67
2.40	แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	68
2.41	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	69
2.42	ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{μ} และ R_{μ} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อรวมอยู่ด้วย ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	70
2.43	ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ Ψ_s	72
2.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	75
2.45	แสดงกราฟของ โนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	76
2.46	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	77
2.47	แสดงกราฟของ โนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	78
2.48	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	79
2.49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของ โคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับค่าความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	81
2.50	แสดงกราฟในควิสต์(ก) และกรัฟของ โบนด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.51	แสดงวงจรมวลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของโนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรมวลดังกล่าว	84
2.52	แสดงวงจรมวลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของโนควิสต์ (ข)	84
2.53	แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ก) และกราฟโนควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ข)	85
2.54	แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe ₂ ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า C _{SCR} แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับคักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม	89
2.55	แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se ₂ ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพิกของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง	90
2.56	แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe ₂ ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na	91
2.57	แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับคักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe ₂	91
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง	93
3.2	แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO	95
3.3	แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO	95
3.4	แสดงโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	100
3.5	แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	101
3.6	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV	101

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.7	แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios	102
3.8	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโคโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	103
3.9	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น	103
3.10	แสดงภาพถ่ายของโคโอดแคตที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของโคโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	104
3.11	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของโคโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	104
3.12	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียสเพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของโคโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	105
4.1	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	107
4.2	แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
4.3	แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที	108

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4	109
<p>แสดงความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ</p>	
4.5	110
<p>การหาขนาดของเกรนและความเครียดของ</p> <p>(ก) เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิทยาสถานะของแข็ง</p> <p>(ข) เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO</p>	
4.6	113
<p>แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที</p>	
4.7	114
<p>แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิทยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง</p>	
4.8	114
<p>แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ</p>	
4.9	115
<p>แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที</p>	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.10	แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	116
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานและอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	117
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	119
4.13	แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	119
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	120
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	123
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	123

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	125
4.18	แสดงกราฟของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	126
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	126
4.20	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	127
4.21	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	127
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุคมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	130
4.23	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	130

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากการใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.25	แสดงแผนภาพการชูดอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	133
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	134
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	137
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	139

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบบราบ กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	139
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ (Φ_{c-v}) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบบราบ (Φ_{Br}) กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	140
4.32 แสดงแผนภาพรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในย่านอุณหภูมิห้อง โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีชั้นอินทรินสิกของ CuO ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ	142
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	143
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (G/W) กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	144
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	145
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับความถี่ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	147

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.37 แสดงการจับและคายประจุของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ	149
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	150
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	151
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	151
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	152
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	152

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	153
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า ศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	154
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	155
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	155
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า ศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	156
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	157
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	159
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	159
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	160

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	160
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	161
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	162
4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_g กับ E_c-E_T ที่ได้จากการหา ω_0 จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	163
4.57 แสดงค่า E_c-E_T ซึ่งมีค่าเท่ากับ $q(\Phi_B-V)$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอส	164
4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับ E_c-E_T ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ G/W กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	165

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\Omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	165
4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\Omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	166
4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\Omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	166
4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\Omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	167
4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\Omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	167

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	168
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{ii} กับ อุณหภูมิที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	172
4.66	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	174
4.67	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	174
4.68	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสไปหน้าในช่วง 0 – 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	175
4.69	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	176

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.70	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า 0 – 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	178
4.71	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอส -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	178
4.72	วงจรมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ รวมทั้งเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	180
4.73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	181
4.74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	181
4.75	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	182

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.76	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	183
4.77	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	184
4.78	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	185
4.79	โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	189

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมาจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด พบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่ใช่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝุ่นกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราก็จำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ ได้รับการวิจัยและพัฒนาค้นหาลดหลาย เช่น p-Cu₂O/n-ZnO [1], p-Cu₂O/n-CuO [2], CuO/ZnO [3], และ p-CuO/n-Si [4] เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาขอมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษา

ในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ [5] จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลโคจีไนด์ เช่น CuAlO₂/CdZnS [6], p-Cu_xSn_yS₂O/n-ZnO [7] และ CuO/CdS [8] พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์เกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

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

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของแสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยทำการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.2.2 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.2.3 ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.2.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงนำไปแอนนิลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.3.2 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ได้แก่การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) การศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

1.3.3 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านทาง
การค้าใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

1.3.4 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.3.5 ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและควบคุมอุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับให้อยู่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.3.6 ศึกษาลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน วัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

1.4.2 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการแอนนัลฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.4.3 ทำการศึกษาคูสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและกรณีที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu K_α 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษารูปร่างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($\text{He } \lambda$ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์โดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ทางฟิสิกส์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้

1.4.5 ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและควบคุมอุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับให้อยู่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.4.6 ทำขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) ของเซลล์โดยการสปีดเตอร์ฟิล์ม Cu เคลือบบนเซรามิก CuO ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านบน (front contact) ใช้กาวเงินนำไฟฟ้าทำเป็นรูวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS จากนั้นจึงนำไปศึกษาลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ทั้งขณะภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน วัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 90 องศาเซลเซียส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ให้เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเคลือบบนแผ่นเซรามิก โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1.5.2 ทำให้ทราบคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่ผ่านการแอนนัลและกรณีที่ผ่านการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.5.3 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.5.4 ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO และได้ศึกษาสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และได้ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 90 องศาเซลเซียส

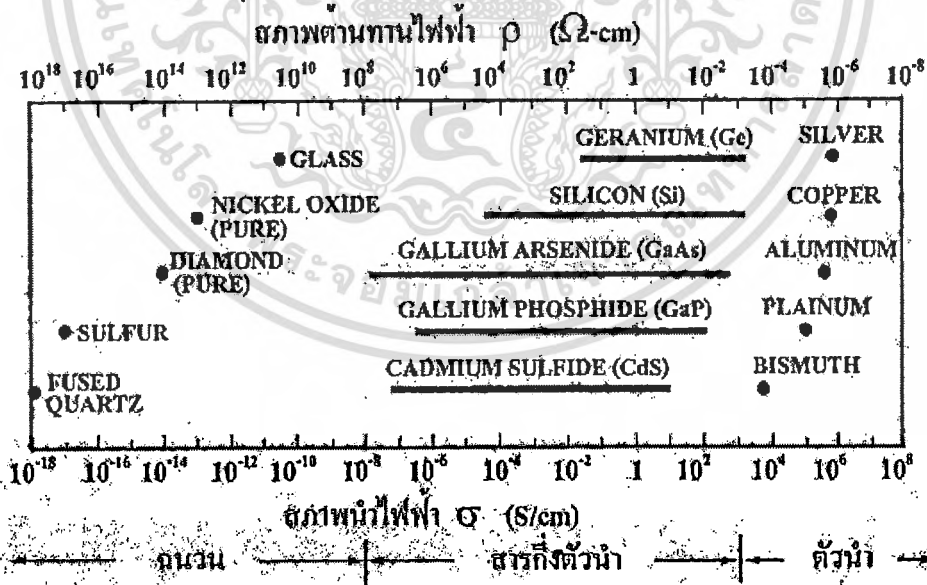
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะไล่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [13-23]

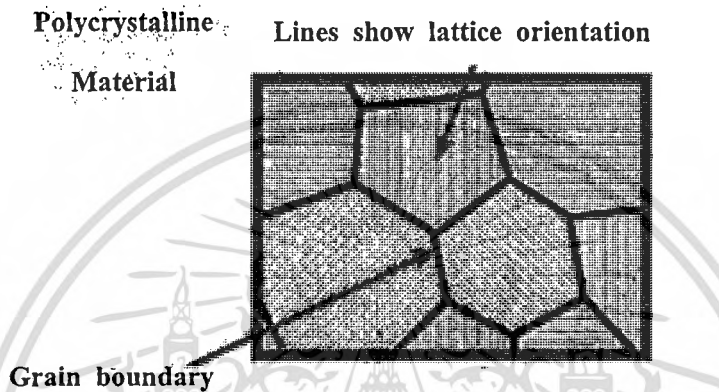
วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ในภาพที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง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



ภาพที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

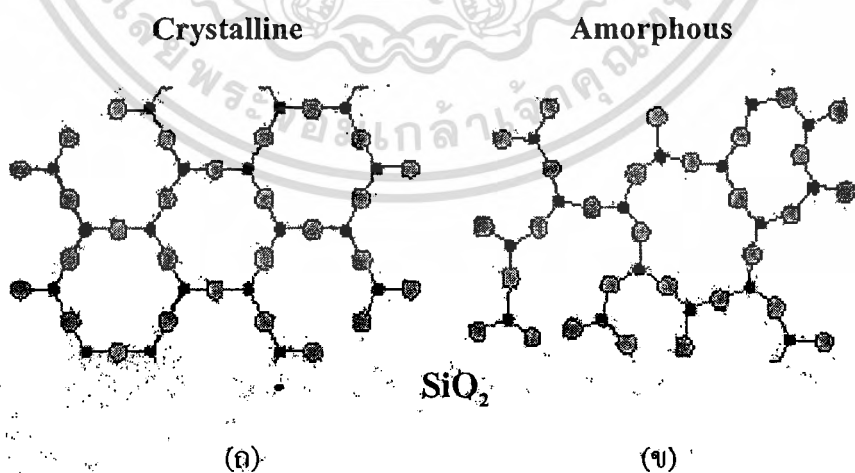
2.1.1 ชนิดของของแข็ง

วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) คือ อะตอมที่เรียงตัวในแนวระนาบอย่างเป็นระเบียบ ผลึกเดี่ยว (single crystal) คือ อะตอมที่เรียงตัวเป็นแบบๆ หนึ่งในระนาบวัสดุผลึก วัสดุผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline material) คือ การประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์เล็กๆเป็นจำนวนมากจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน หรือ เรียกว่าเกรน (grain) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงภาพขนาดเกรนของวัสดุผลึกพหุพันธ์

โครงสร้างของสสารที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) คือ ลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกหรือเป็นผลึกในระดับสเกลนาโนเมตร



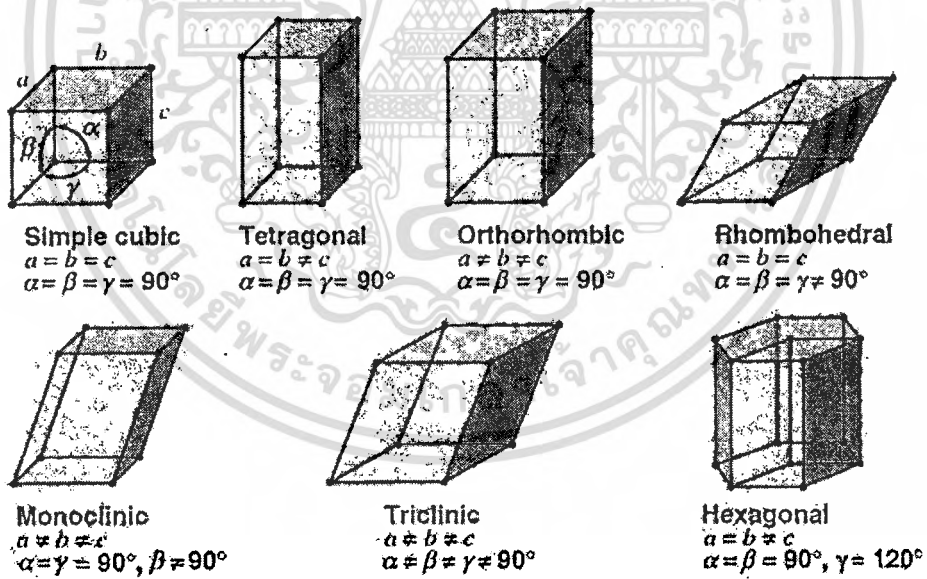
ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของวัสดุของแข็ง

ก. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก

ข. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส

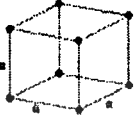
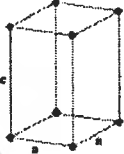
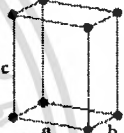

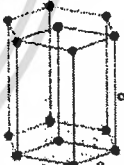


2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [14-23]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก อาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุลเซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิส (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 3 มิติ ดังรูปที่ 2.4 ในระบบสามมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a b และ c และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสาม ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้อาจจัดแบบดังตารางที่ 2.1 คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)



ภาพที่ 2.4 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [14-23]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

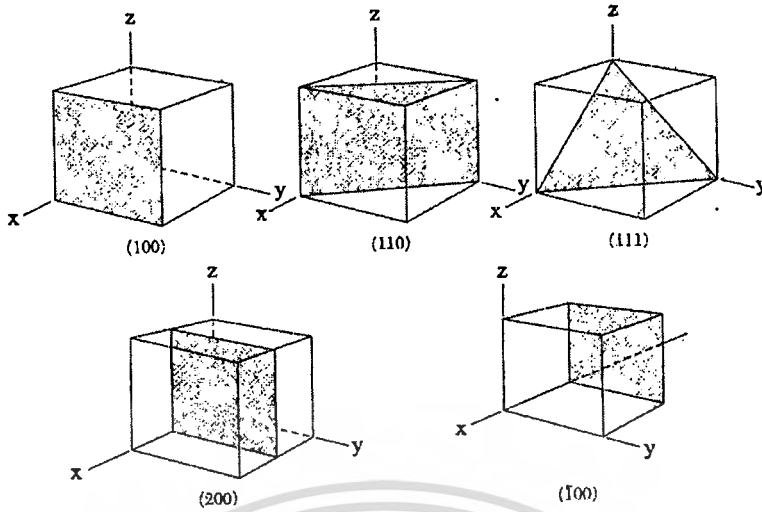
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$

2.3.2 การระบุทิศทาง

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

2.3.3 การระบุชื่อระนาบ

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



ภาพที่ 2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.2 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

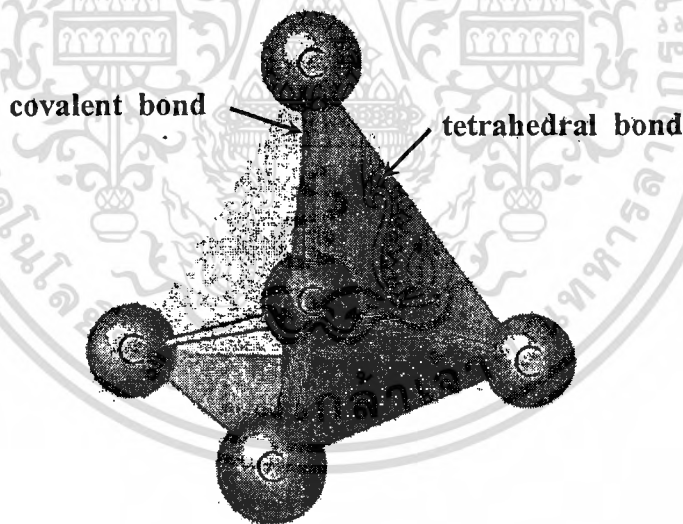
สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [14-23]

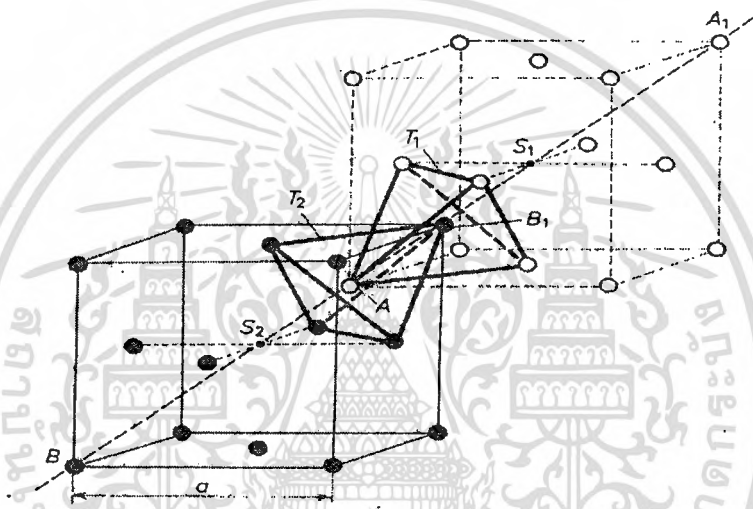
ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์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



ภาพที่ 2.6 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

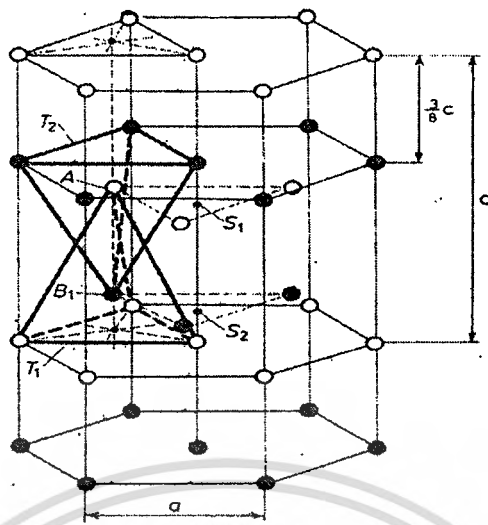
โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว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



ภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไมท์

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



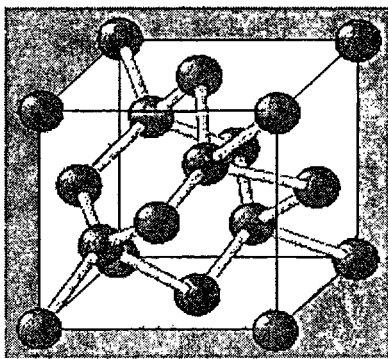
ภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์

2.4.3 โครงสร้างผลึกของแกลดเมียมซัลไฟด์ [14-30]

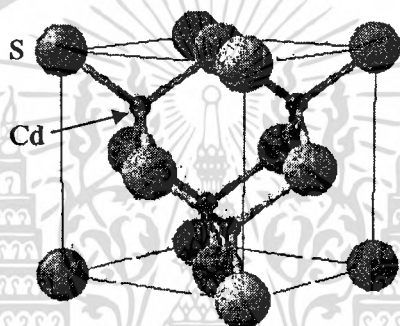
โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแกลดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแกลดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังภาพที่ 2.9 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกันว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสอง โครงผลึกมาวางซ้อนกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอม ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดคือ Cd และ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



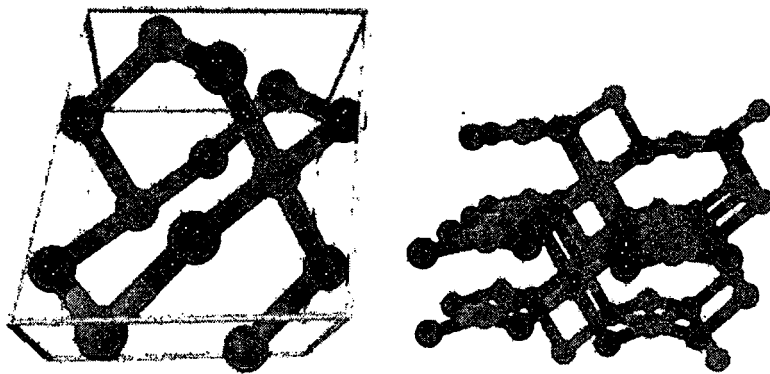
ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์



ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซ์ของผลึก CdS

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

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



ภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์ (II) ออกไซด์

2.5 ผลึกจริง [14-30]

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

2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

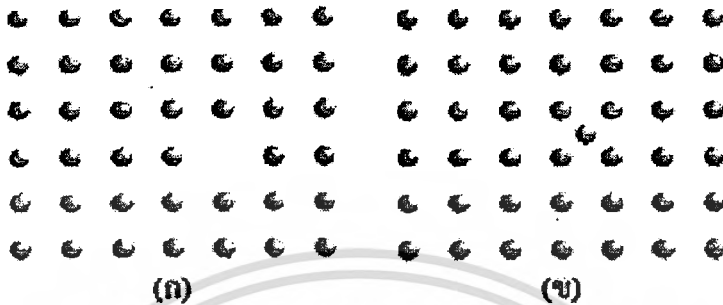
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.12 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซว่างหรือเวแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

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

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



● อะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ ● อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน

ภาพที่ 2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

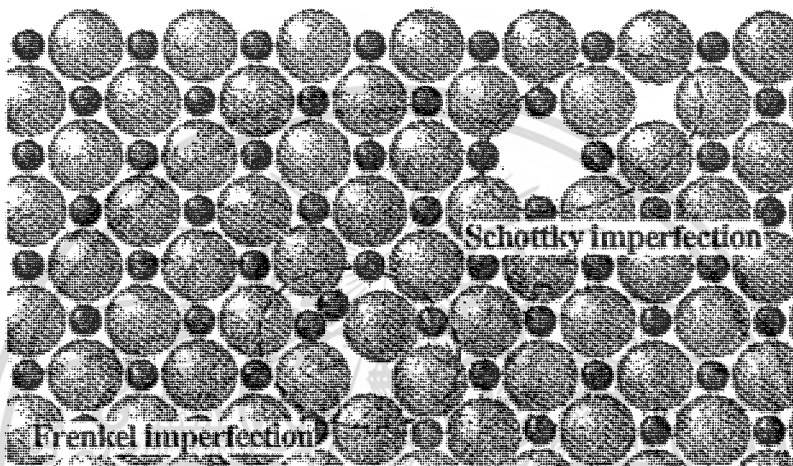
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ใน โครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแดนซี 2 ช่องของไอออนบวก - ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของ ผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้าย ไปยังบริเวณที่ ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของ โครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่า ไม่ได้หลุดหายออกไปจาก โครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่าง ไอออนลบกับ ไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของ ไอออนบวก (cation vacancy)



ภาพที่ 2.13 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์คีย์และความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

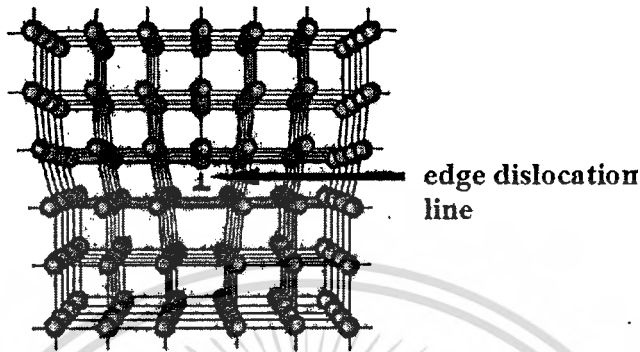
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีก อย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของ โครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่ แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว(distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

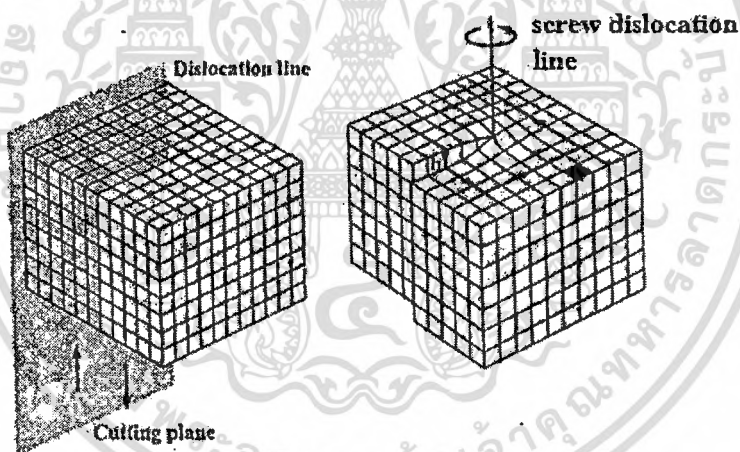
ก. การเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของ โครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือ ดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : b) ดังแสดงในภาพที่ 2.14

ข. การเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของ โครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนาน

กับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



ภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

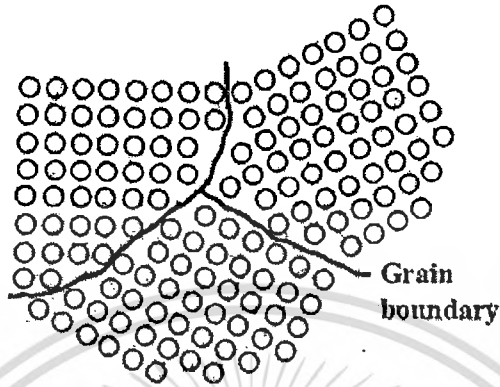
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface-imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงสร้างหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่า รอยต่อเกรน (grain boundary) ดังแสดงในภาพที่ 2.16 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

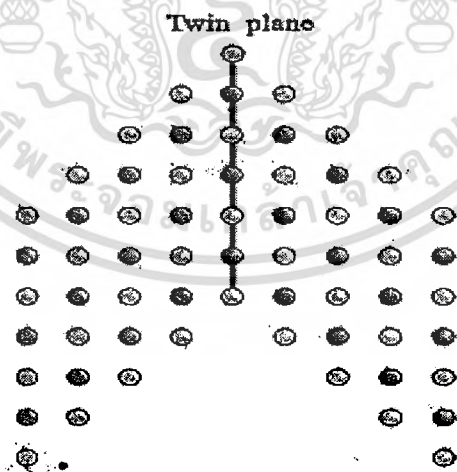
หนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



ภาพที่ 2.16 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

โครงผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า รอยต่อโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด (twin boundary or twin plane) ดังแสดงในภาพที่ 2.17

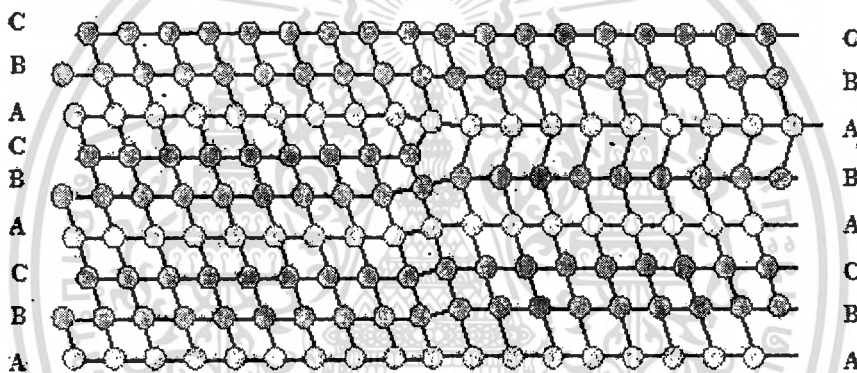


ภาพที่ 2.17 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแฝดและระนาบของโครงผลึกแฝด

2.5.3.3 ความบกพร่องของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิวด้าน

(stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิวด้าน เช่น สำหรับ โครงผลึกอูมคติแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิวด้านจากตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนย้าย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิวด้าน

2.6. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

[17, 19-30]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-3} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.6.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนุคเซน (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 Φ_e	คือ	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
P_e	คือ	ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
M	คือ	มวลโมเลกุล
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

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

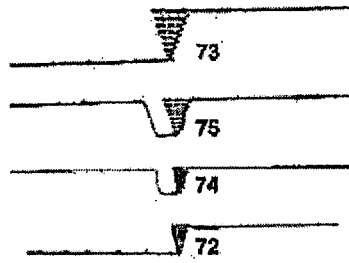
ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.6.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารถึงตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.6.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

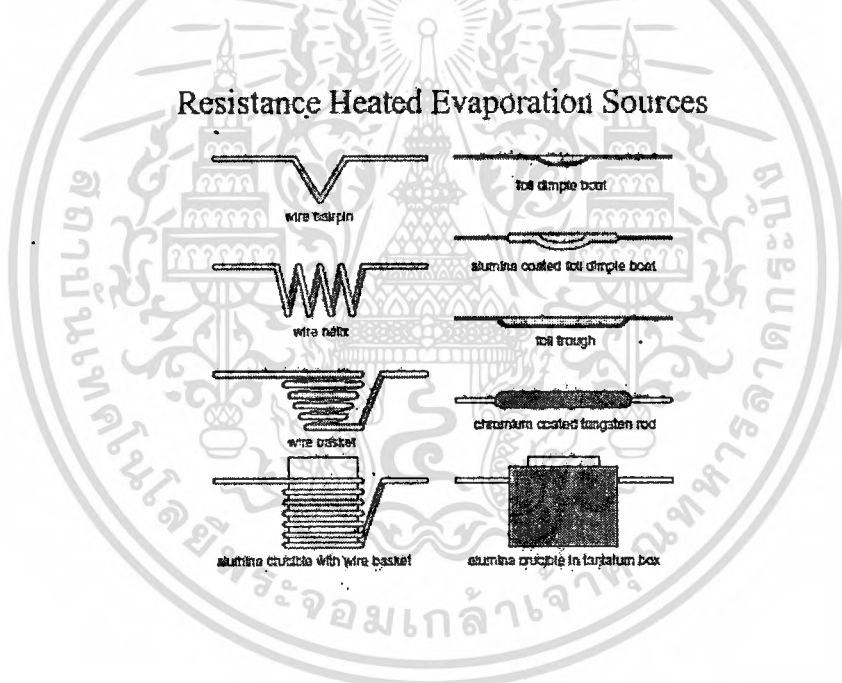
แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดี่ยวหรือหลายรอบ เป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน ดังแสดงในภาพ 2.19 โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง



ภาพที่ 2.19 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.6.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป

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



ภาพที่ 2.20 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.6.3 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดง ได้ดังสมการ

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

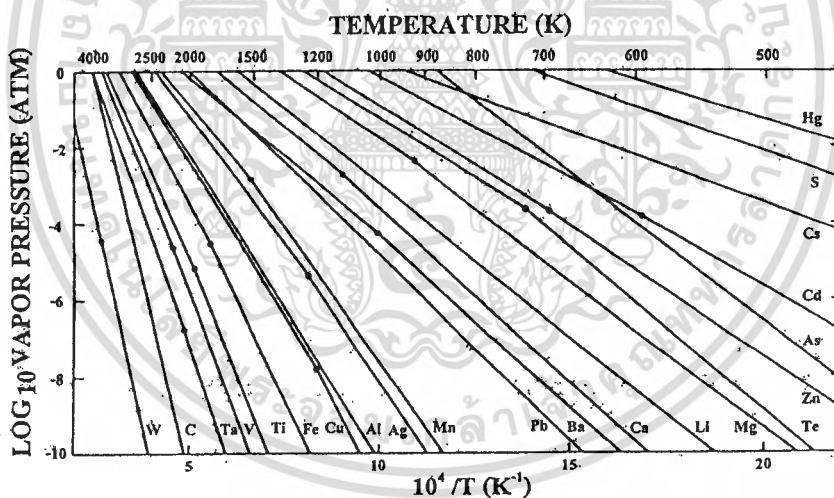
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.4) ใหม่ได้เป็น

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

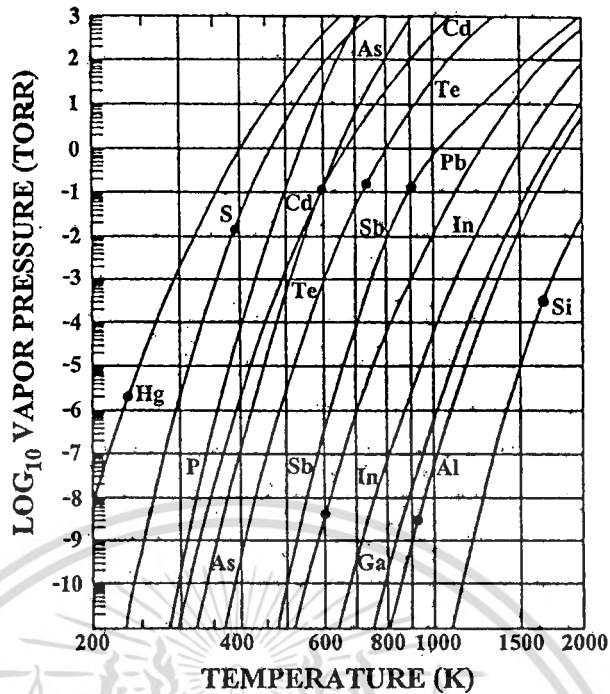
ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

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

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



ภาพที่ 2.21 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



ภาพที่ 2.22 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.6:4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

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

ตารางที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

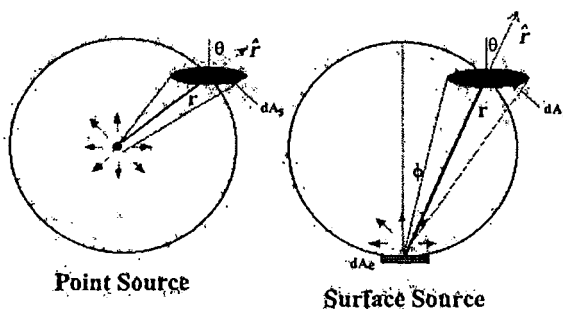
ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีกรแตกตัว	$MX(\text{หรือ}l) \rightarrow MX(\text{g})$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{s}) + 1/2 X_2(\text{g})$ $MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{l}) + 1/n X_n(\text{g})$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se สารกึ่งตัวนำกลุ่มIII-IV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

M = โลหะ X = อโลหะ

2.6.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass: \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

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



ภาพที่ 2.23 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อ r คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

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

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

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

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

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

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

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

เมื่อ $n = 1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [14-23]

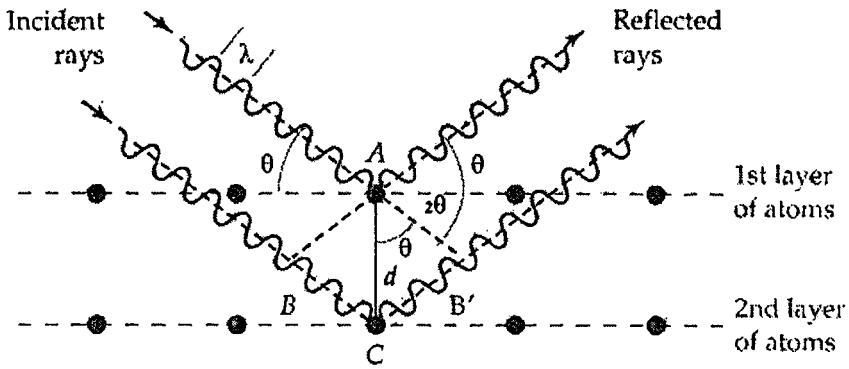
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงรูปร่างการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่างๆ ของโครงสร้างผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม ลอว์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.13)

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

- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
 2θ คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
 n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



ภาพที่ 2.24 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของ โครงผลึกได้ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 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 (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

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

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาดโคไฟไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 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 (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

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

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดปกติการจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึกหาได้จากสมการ

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

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

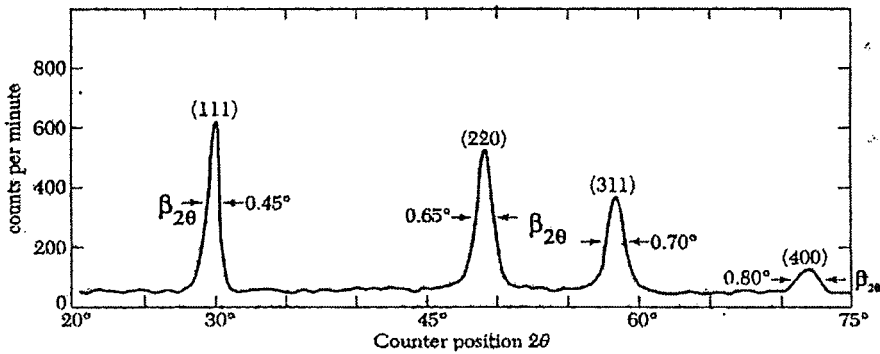
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

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

ดังนั้น

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

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

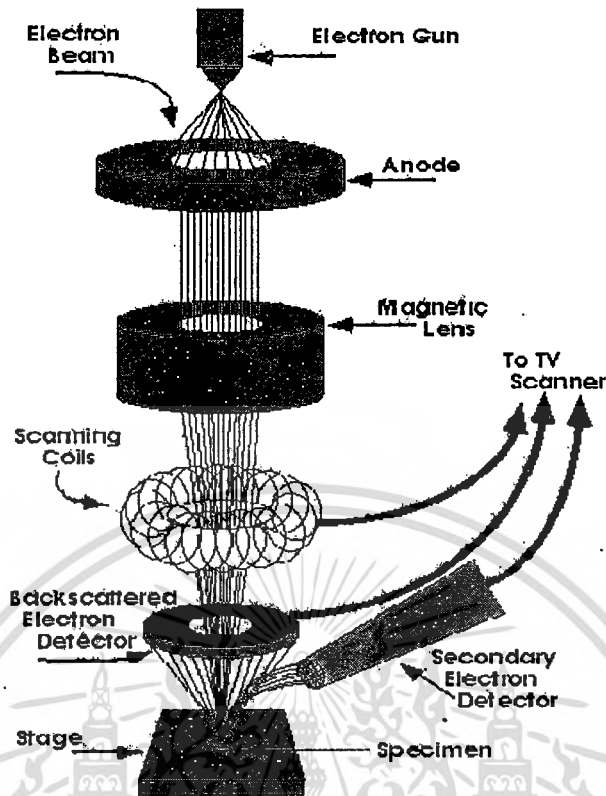


ภาพที่ 2.25 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสี

เอกซ์

2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [14-30]

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



ภาพที่ 2.26 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

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

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

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

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจอิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่า การชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้

โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลง
ไม่ทราบใดทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปในเนื้อหาของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจำกัด โอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลงหมายถึงสัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามกลุ่อบบ่ไกคลื่นนิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี $E_0 > E_1$) .

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

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

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากรวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) จากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้น โครจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

ออเจิเล็กตรอน

ออเจิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้น โครจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้น โครจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวง โครจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่จับอยู่บนผิวที่บางมาก

การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวง โครจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นตัวนำ (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกระจัดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกระจัดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกระจัดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกระจัดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าตั้งขยายของภาพได้ดังนี้

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

หูดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

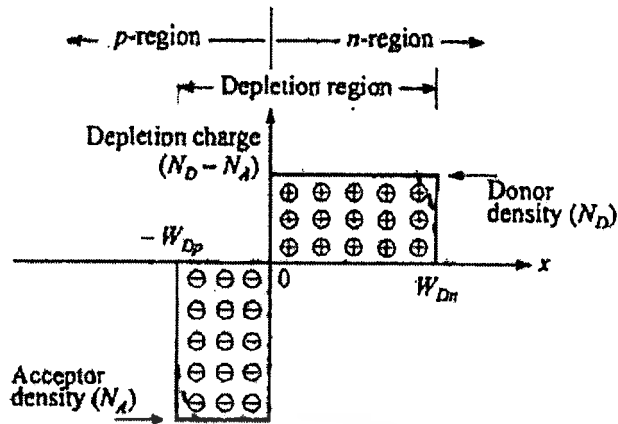
2.9 รอยต่อพี-เอ็น [13-14, 16, 20, 28-30]

รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็น ได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอกลีย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ซาห์ (Sah), นอยซี (Noyce), ชอกลีย์ (Shockley) และมอลต์ (Moll) ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น การเกิดและการรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุที่บริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานอนุกรมเป็นต้น รอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้วโดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็นมีสมบัติการเรียงกระแส กล่าวคือยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียวซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดชนิดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อะวาลานซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาเรกเตอร์ เป็นต้น

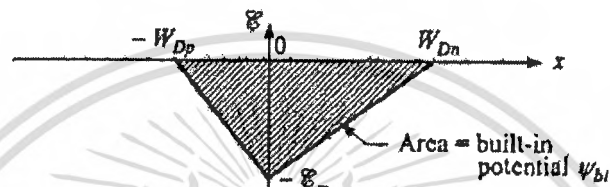
2.9.1 บริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

2.9.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน (abrupt junction)

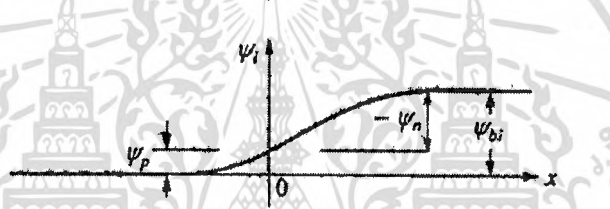
เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จากสารเจือผู้รับ (N_A) ไปยังสารเจือผู้ให้ (N_D) แสดงไว้ในภาพที่ 2.27 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้า $N_A \gg N_D$ (หรือในทางกลับกัน) ผลที่ได้รับจากรอยต่อฉับพลันทำให้เกิด p^+n (หรือ n^+p)



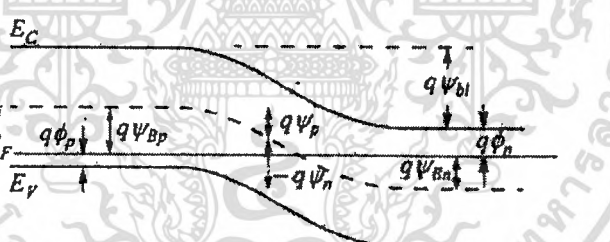
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 2.27 แสดงรอยต่อพี-เอ็นกับพลาโนสภาวะสมดุลความร้อน

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

ก่อนอื่นต้องพิจารณาภาวะสมดุลทางความร้อนขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอส กระแสพัดพาและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

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

หรือ

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

กระแสของโฮลก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ

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

ดังนั้นเงื่อนไขของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนสุทธิขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ จะต้องกำหนดให้ระดับพลังงานเฟอร์มิคิงที่ตลอด ศักย์ดักคร่อมรอยต่อหรือศักย์แพร่ซึม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.27 (ข), 2.27 (ค) และ 2.27 (ง) มีค่าเท่ากับ

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (non-degenerate semiconductor)

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

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

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

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละข้างของรอยต่อ ถัดไปเราจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า และการกระจายศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ โดยการประมาณว่าประจุบวกและประจุลบที่อยู่เฉพาะภายในบริเวณพร่องพาหะและจะอยู่แยกกันคนละด้านของบริเวณพร่องพาหะอิสระ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถือว่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ประจุลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านพีจะต้องเท่ากับประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านเอ็นดิ่งสมการ

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

จากสมการปัวซอง (equation Poisson) จะได้ว่า

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

ภายในบริเวณพร่องพาหะ, $n(x) \approx p(x) \approx 0$, แล้วสมมติว่าเกิดการโฮอโนซ์ที่สมบูรณ์,

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

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

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

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

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

โดยที่ ξ_m คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ $x=0$ จะได้ว่า

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แต่ละด้านของบริเวณพ่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เราสามารถคำนวณได้จาก

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

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

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ψ_{bi} จะมีค่าดังนี้คือ

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

ξ_m สามารถคำนวณได้จาก :

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

จากสมการที่ (2.37) และ (2.28) บริเวณพ่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

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

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

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

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

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

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

สำหรับรอยต่อฉนวนกับสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ($p^+ - n, n^+ - p$) ในกรณีนี้สมการที่ (2.25) จะใช้ในการคำนวณหาศักย์ตกคร่อมรอยต่อ โดยที่ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและบริเวณพ่องพาหะจะปรากฏอยู่ในบริเวณสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนน้อยๆ เมื่อลดรูปสมการที่ (2.40) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

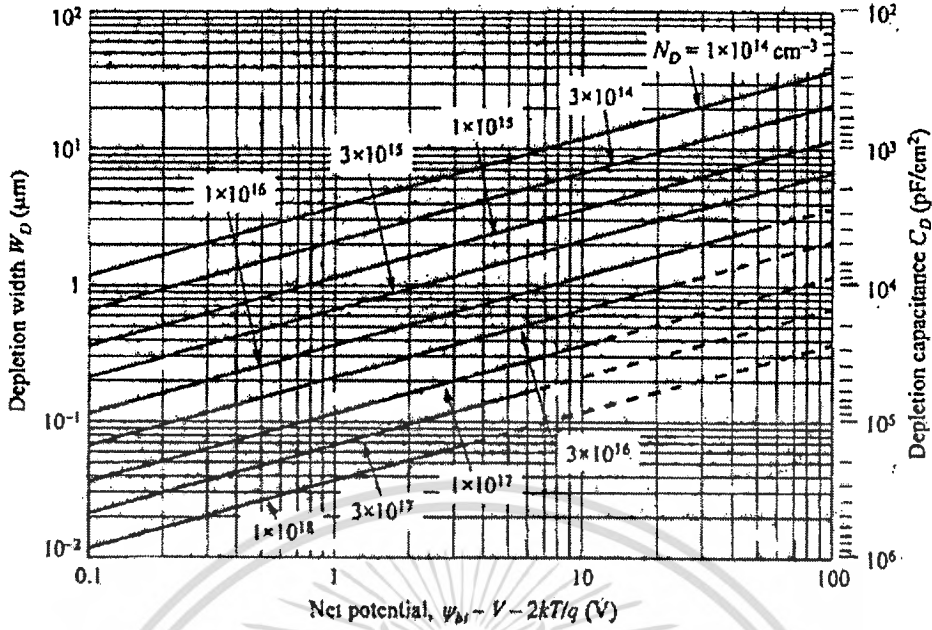
ที่ N คือ N_D หรือ N_A โดยที่ $N_A \gg N_D$ หรือในทางตรงข้ามกัน, และ

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

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

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

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



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

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

2.9.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ (depletion-layer capacitance)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ V เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 จากสมการที่ (2.45) จะได้

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

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

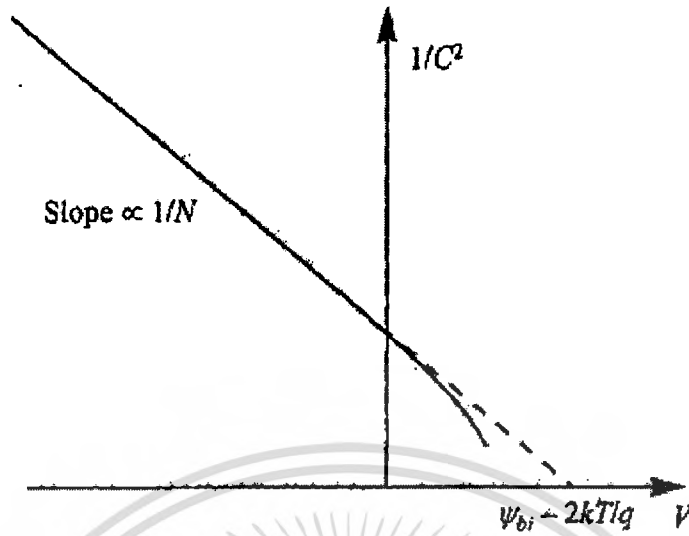
จากสมการที่ (2.46) และ (2.47) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V (ภาพที่ 2.29) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่ $1/C^2 = 0$ จุดตัดแกน x คือ $\psi_{bi} - 2kT/q$ สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ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

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

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

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

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



ภาพที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ - V ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ดักคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

2.9.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

2.9.2.1 สมการของช็อกเคิลีย์ในกรณีอุดมคติ

ลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันไฟฟ้าในกรณีอุดมคติจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อดังนี้คือ

1. มีการประมาณว่าบริเวณพร่องพาหะเป็นแบบลึบพลัน กล่าวคือ เกิดศักย์ดักคร่อมรอยต่อเนื่องจากประจุของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ และแรงดันไบแอสจะตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อนี้ ส่วนนอกบริเวณพร่องพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การประมาณแบบ โบลตซ์มันน์จะยังใช้ได้ดี
3. การฉีดกระแสอยู่ในระดับต่ำ กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสที่เกิดจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ ในบริเวณพร่องพาหะ ดังนั้น ประมวลกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบริเวณพร่องพาหะ

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของโบลตซ์มันน์ที่สภาวะสมดุลความร้อน จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ที่สภาวะสมดุลความร้อนผลัฟ์ของ pn จากสมการข้างต้นจะเท่ากับ n_i^2 เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับรอยต่อ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของรอยต่อทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง และผลัฟ์ของ pn ไม่เท่ากับ n_i^2 เราจึงกำหนดระดับควอไซ-เฟอร์มี (quasi-Fermi) ได้ดังนี้

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

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

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

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

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

ผลัฟ์ของ pn กลายเป็น

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

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

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

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

ในทำนองเดียวกัน

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

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

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

แรงค้ำไบแอสที่ป้อนให้กับรอยต่อจะแสดงดังสมการ

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

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

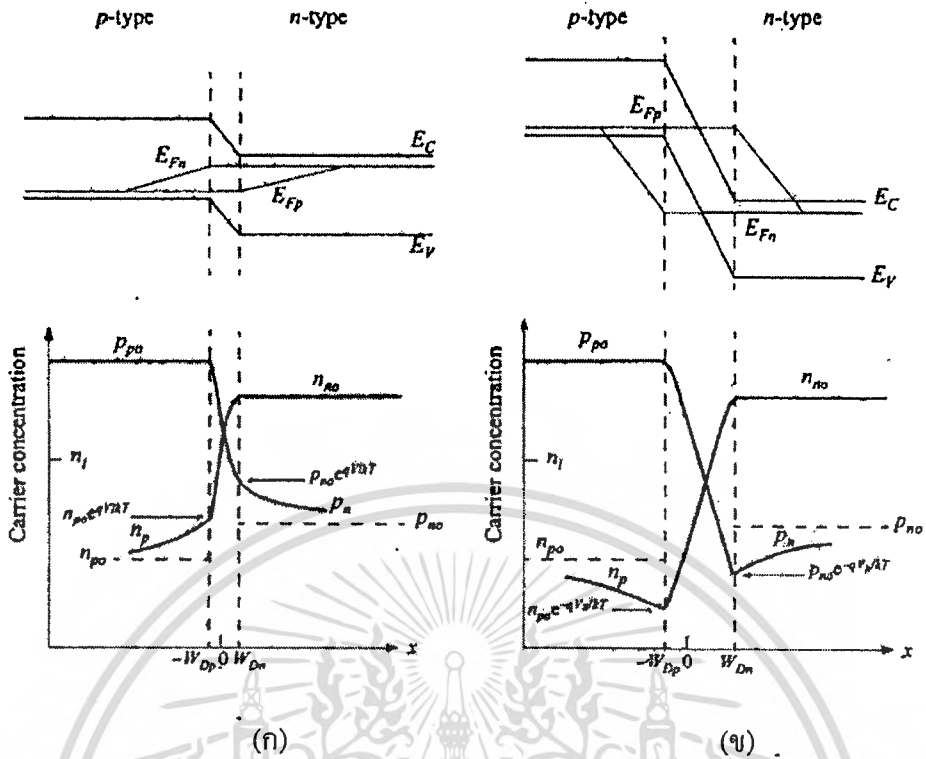
$$n_p(-W_{DP}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.58ก.)$$

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

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

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

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณีอุดมคติ



ภาพที่ 2.30 แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิลีกตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข
 ก. ไบแอสตรง
 ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านเอ็นคือ

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

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

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

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

ซึ่ง

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

สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะคู่ (ambipolar) คือ

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

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

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

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

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

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

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

ซึ่ง

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

ที่ $x = W_{Dn}$ กระแสแพร่ซึมของโฮลคือ

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

ในทำนองเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านพีคือ

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

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอส

กลับทาง แสดงไว้ในภาพที่ 2.31 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวไว้ว่ากระแสโฮลจะถูกฉีดจากด้านพีไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

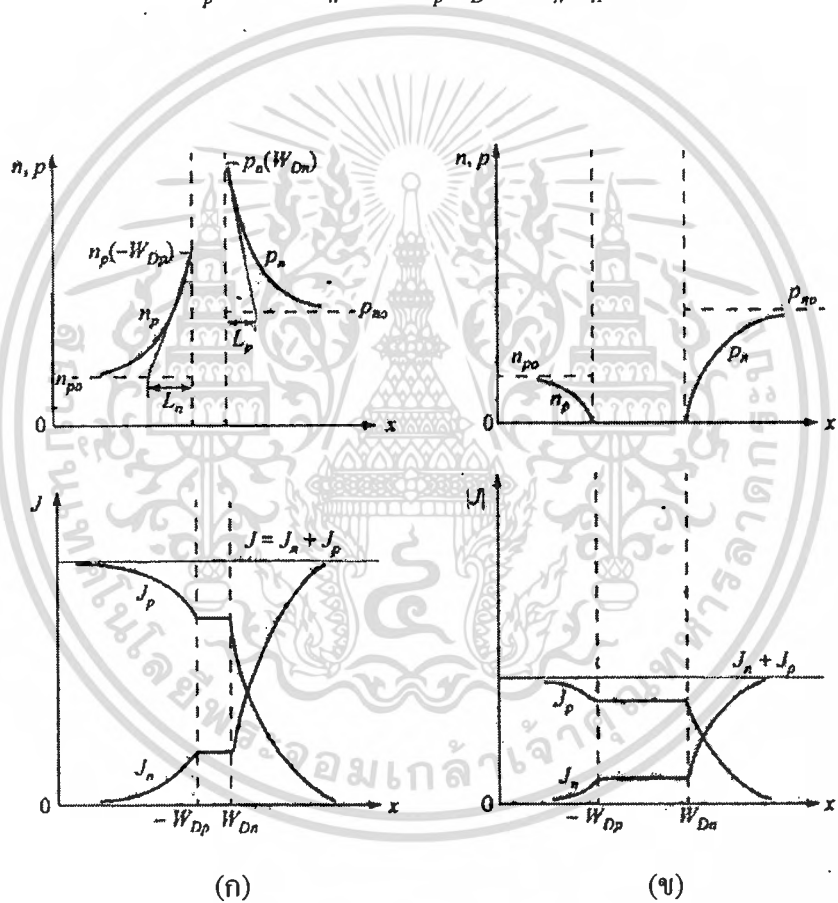
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

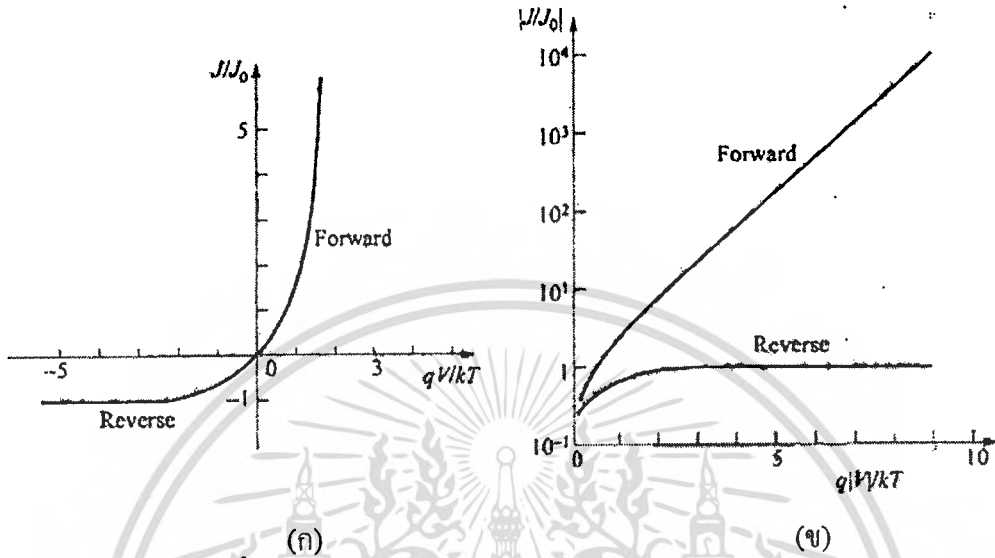


ภาพที่ 2.31 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ
 ก. เจ็อนไบแอสตรง
 ข. เจ็อนไบแอสกลับทาง

สมการที่ (2.68) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอกคีย์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในภาพที่ 2.32 (ก) และ 2.32 (ข)

โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวก) ไม่ควรตีความผิดว่าห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ภาพที่ 2.32 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ
 ก. กราฟเชิงเส้น
 ข. กราฟกึ่งลอการิทึม

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 กระบวนการเกิด - การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation - recombination process)

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

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

เมื่อ σ_n และ σ_p คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอนและการจับโฮลตามลำดับ ส่วน τ_g คือ ช่วงชีวิตของการเกิดพาหะ (generation time)

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

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

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

เมื่อ W_D คือ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเล็กน้อย แล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า n_i ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ τ_g จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอส

สำหรับรอยต่อฉนวน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

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

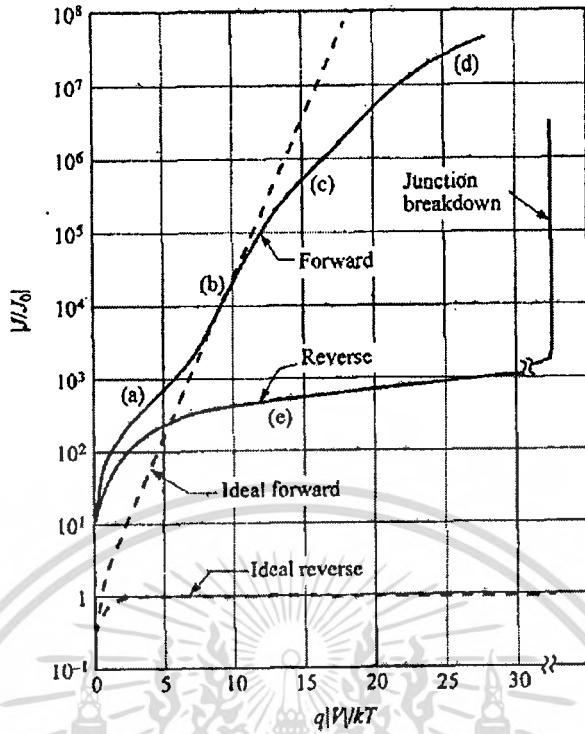
กระแสรวมขณะไบแอสกลับทาง (สำหรับ $p_{no} \gg n_{po}$ และ $|V| > 3kT/q$) สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสแพร่ซึมที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะกับกระแสที่เกิดจากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะ

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ n_i มีค่ามาก (เช่น เซอร์มาเนียม) กระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอเคลย์ แต่ถ้า n_i มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.33, เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่น

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

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



ภาพที่ 2.33 ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

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

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

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

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

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

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

และ

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

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

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

ที่ ξ_0 คือ สนามไฟฟ้าที่บริเวณที่มีอัตราการรวมตัวสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

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

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

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

ผลการทดลองทั่วไปสามารถแสดงในรูปแบบดังนี้ คือ

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

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

2.9.4 ความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance)

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

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

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

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

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

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

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

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

ส่วนรอยต่อด้านพี (p-side) จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการ

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

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

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

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

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

หรือ

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

สมการที่ (2.91) จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.64) ถ้ากำหนดให้ช่วงชีวิตพาหะเป็นดังนี้

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

และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากสมการที่ (2.67) และจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

$$\begin{aligned} J &= \left(q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \right) \exp \left\{ \frac{q [V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx \left(q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \right] \left[1 + \frac{qV_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \end{aligned} \quad (2.93)$$

ความหนาแน่นไฟฟ้ากระแสสลับ J_1 คือ

$$J_1 = \left(\frac{q D_p p_{no} \sqrt{1 + j\omega \tau_p}}{L_p} + \frac{q D_n n_{po} \sqrt{1 + j\omega \tau_n}}{L_n} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \right] \frac{qV_1}{kT}$$

ถ้า J_1 / V_1 ทั้ง G_d และ C_d สามารถหาค่าได้และพบว่าทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

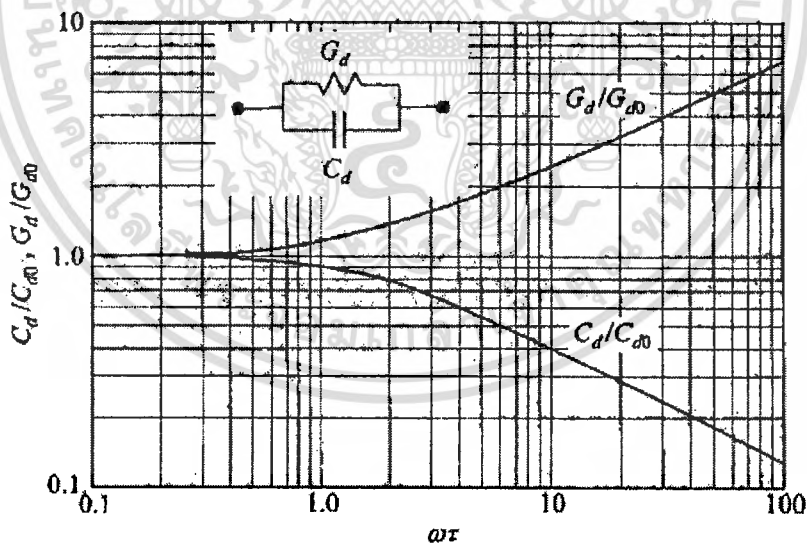
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า $\sqrt{1+j\omega\tau} \approx (1+0.5j\omega\tau)$

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

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ $n-p$ จะได้ว่า

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

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.34 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า $\omega\tau$



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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.10 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์

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

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในภาพที่ 2.35 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสเพิ่มขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนี้กระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

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

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

โดยที่

V คือ แรงดันไบแอสตรง

n คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

E_a คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์

J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

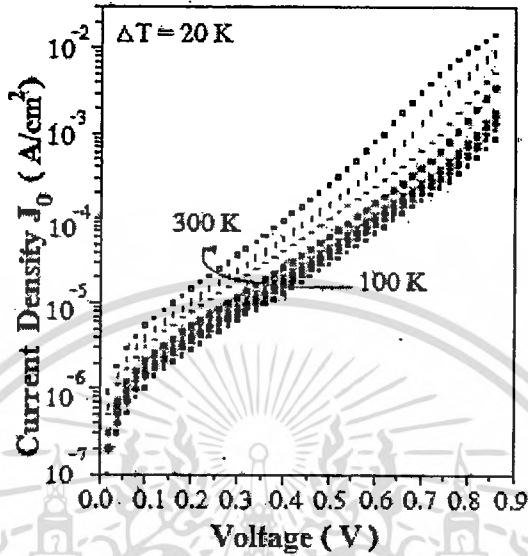
ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

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

โดยที่

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

เมื่อ S_p คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (ϕ_p^0) คือค่าแฟกต์ยกขวางกัน โฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.36



ภาพที่ 2.35 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ

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

2.10.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

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

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

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

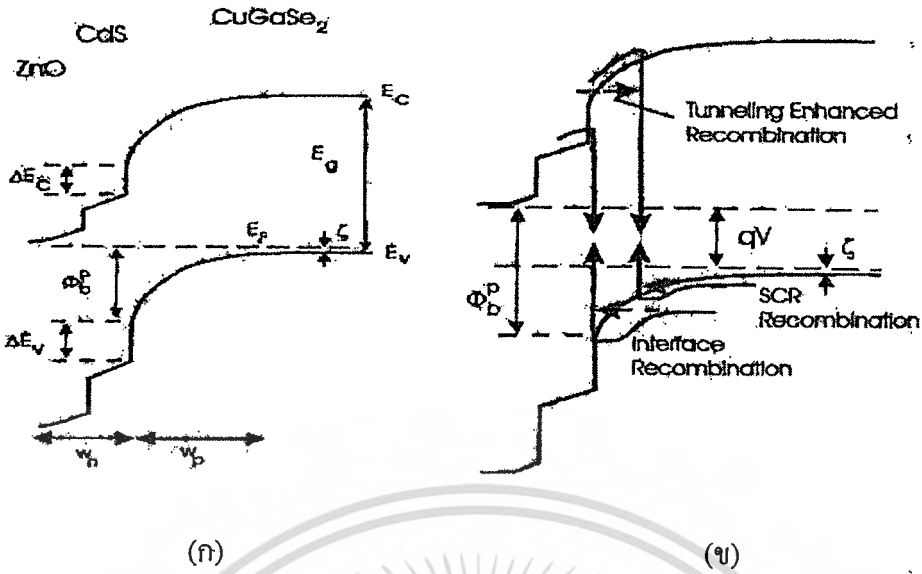
สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_A > N_D$ กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n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

2.10.2 กลไกการซุดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการซุดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

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

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่าแฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงกรซุดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงานโดยเฉพะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับ โฮลจะซุดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



ภาพที่ 2.36 แสดงกลไกผลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย
 ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
 ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe₂ และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.102) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

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

พลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J_0$ กับ $1/T$ พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดการนำกระแสเกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_g) ของตัวดุกกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสงชด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอน โดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุคมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

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

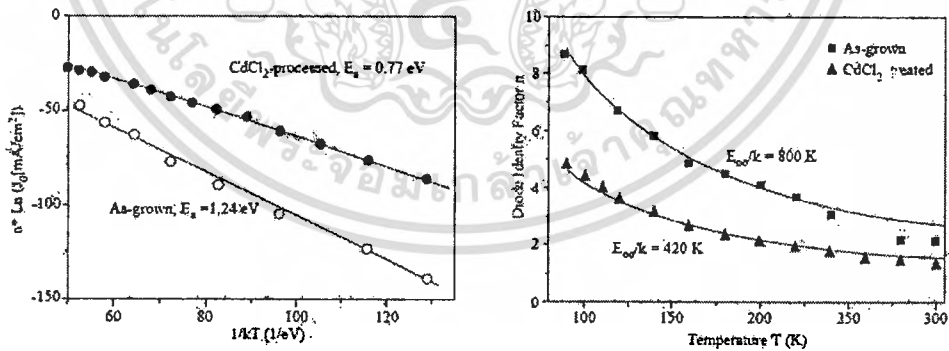
โดย E_{00} คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม E_{00} คือ

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

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ ϵ_s คือ สถานะขอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง แฟกเตอร์อุคมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

ซึ่ง kT^* คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 2.37 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสสัมพันธ์ย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุคมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนิลและเมื่อผ่านการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

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

และ $p^* = N_V \exp[-(E_T - E_V)/kT]$

ซึ่ง N_C และ N_V คือ ความหนาแน่นขั้วผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ, E_T คือ ระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ, n และ p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ, n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือ โฮล (electron/hole cross section: $\gamma_{n/p}$) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

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

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

เมื่อ $s_{n/p}$ คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือ โฮล, $\tau_{n/p}$ คือ ค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ส่วน Γ คือ แฟกเตอร์แก้ไข (correction factor) ของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลา ดังนี้คือ

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

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

จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

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

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

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.94) ร่วมกับสมการ (2.110) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงดังนี้คือ

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

ซึ่ง J_{00} จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) จะมีค่าดังนี้

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

จากสมการที่ 2.112) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ $T^* \rightarrow \infty$ กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี $E_{00} \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกซ์เลย์-ริต-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนี้ยังได้จำไว้ได้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด (V_{∞}) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แพกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} กับ T ในสมการ (2.113) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.97) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

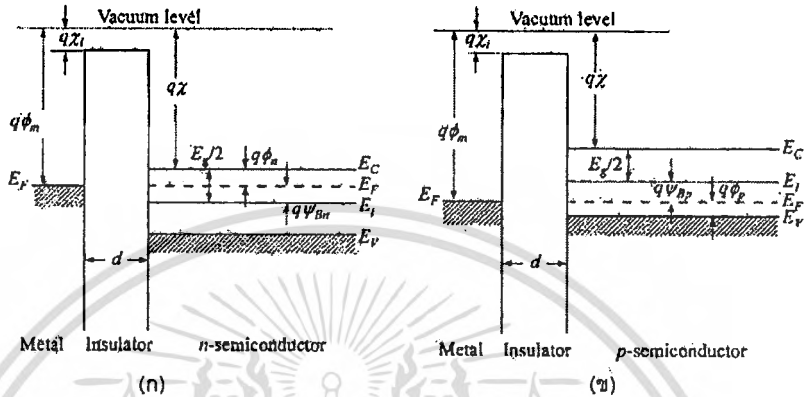
2.12 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [13-14, 16, 20, 28, 30-33]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกรไบแอตกระแสตรงรูปที่ 2.38 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอตหรือไม่มีการไบแอต ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอตจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.38 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

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

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

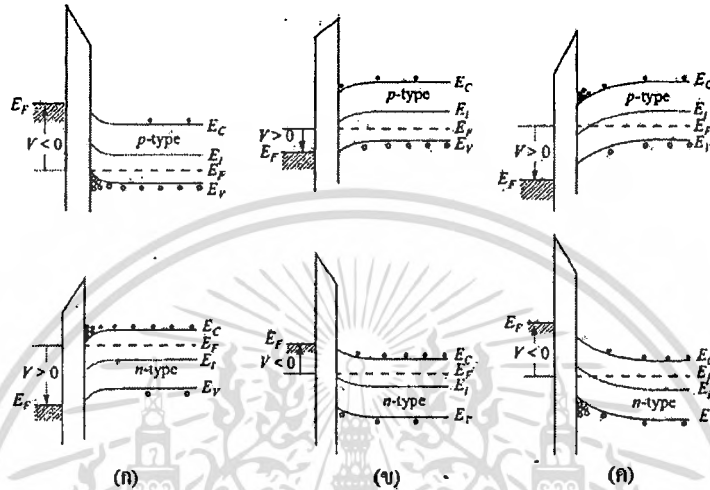
- เมื่อ χ, χ_i คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน
 ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน
 ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน



ภาพที่ 2.38 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$)
 ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
 ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้น โดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.39 (ก) โดย กรณีแรกตามภาพที่ 2.39 (ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วโลหะ ($V < 0$) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมุกขมูกันของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ โดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมุกขมูพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ($V > 0$) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าบริเวณพร่องพาหะ (depletion case) ดังภาพที่ 2.39 (ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้น

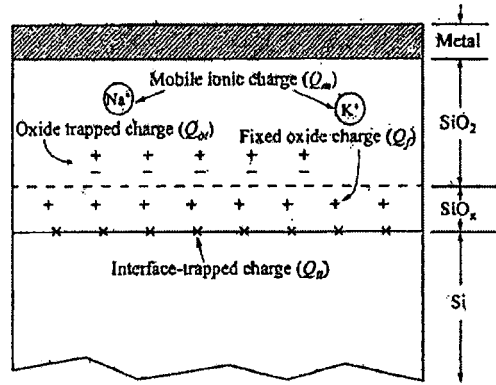
ดังที่แสดงในภาพที่ 2.39 (ค) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)



ภาพที่ 2.39 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิด
 ก. บริเวณชุนุมพาหะ
 ข. บริเวณพร่องพาหะ
 ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

2.13 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อส MOS ในซิลิคอน [13, 16; 20-23]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.40 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และประจุค้างภายในกัณฑ์ (Q_{it}) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO₂ โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ Q_{it} จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ (Q_{ox}) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ (Q_{ox}) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนเอกสร็อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณวาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.40 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.14 กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [13, 16, 20-23]

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

สำหรับกรณีที่เป็นกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

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

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

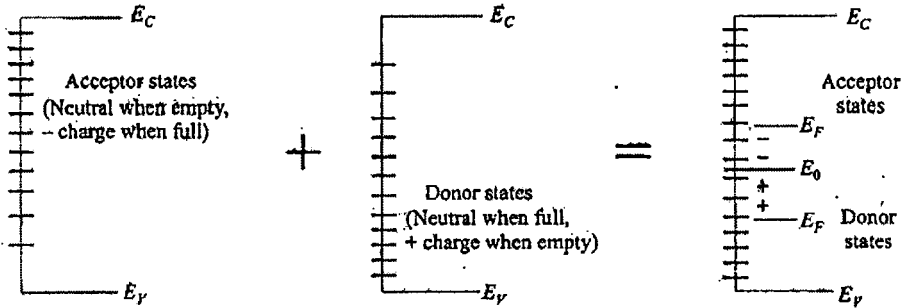
สำหรับกรณีที่เป็นกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

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

เมื่อ E_t คือ ระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

g_D คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

g_A คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



ภาพที่ 2.41 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากภาพที่ 2.41 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

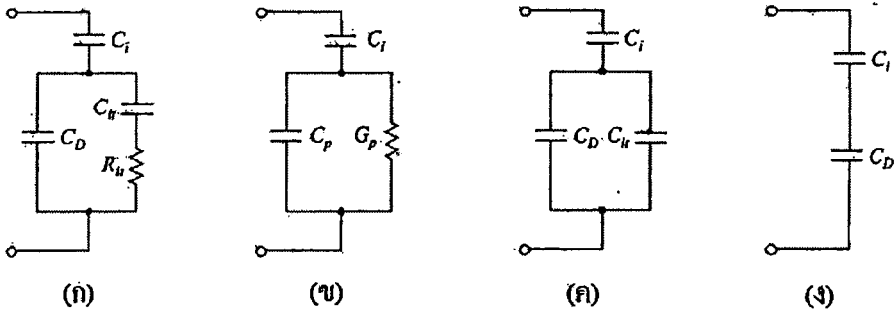
$$Q_{it} = -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0$$

$$= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \tag{2.116}$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

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

สมการที่ (2.117) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ โดยการวัด Q_{it} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) ที่เปลี่ยนแปลงไป



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

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้จะมีผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจุรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังภาพที่ 2.42 (ก) โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ C_{ii} และ R_{ii} คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ $C_{ii}R_{ii}$ จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{ii}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกัน ทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่

เมื่อ

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

และ

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

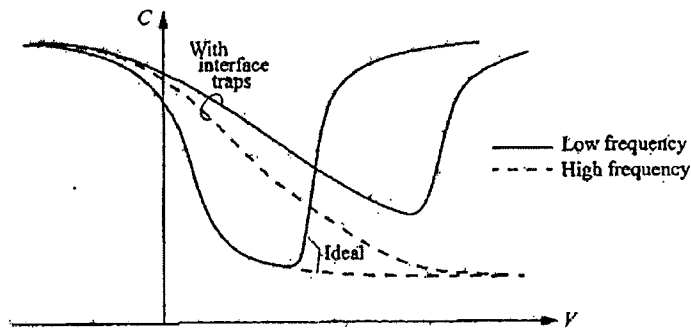
สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{ii} ของวงจรสมมูลในภาพที่ 2.42(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว C_D จะขนานกับ C_i ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{ii} และ R_{ii} ออกไปได้ หรือเอกลำดับชั้นเอกลำดับพลังงานโวลตาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นไปเสียประโยชน์ด้านการคำนวณวาทกรรมใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

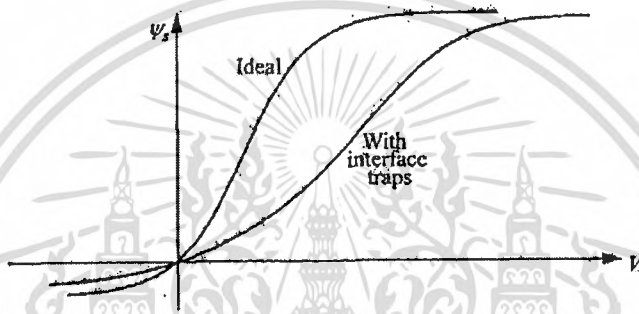
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_I(C_D + C_{II})}{C_I + C_D + C_{II}} \quad (2.120)$$

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

ภาพที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ψ_s ในภาพที่ 2.40ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\psi_s - V$ สามารถนำไปคำนวณหา D_{II} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{II}



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.43 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s

2.15 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ

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

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.121) และสมการที่ 2.120 จะเขียนได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

$$= \frac{\Delta C}{q^2} \left[\left(1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_I} \right)^{-1} - \left(1 - \frac{C_{HF}}{C_I} \right)^{-1} \right] \quad (2.123)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกับดักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า (ΔC) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ D_{II} ได้ก็สามารถที่จะหาค่า ψ_c ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

2.15.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้ ความแตกต่างของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนี้ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.40 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพิกัดค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดจนที่ช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในภาพที่ 2.42(ก) ความจุของฉนวน C_I ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีเอกสาคาร์บอนสูงมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนที่ความถี่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนวนจะถูกนำเอาไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์ สูดท้ายแล้ววงจรมูลจะเป็น C_D ต่อขนานกันกับ R_{ii} C_{ii} สำหรับค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ในสมการที่ (2.119) จะไม่มีพจน์ C_D ปรากฏอยู่นั้นคือ $\frac{G_p}{\omega}$ จะสัมพันธ์กับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแดนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

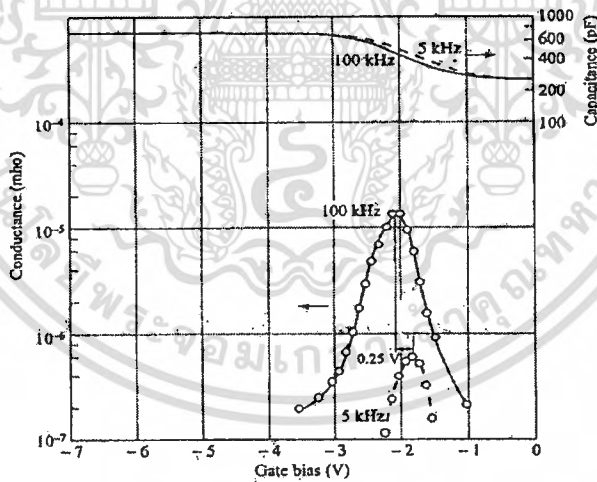
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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



ภาพที่ 2.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS

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

2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

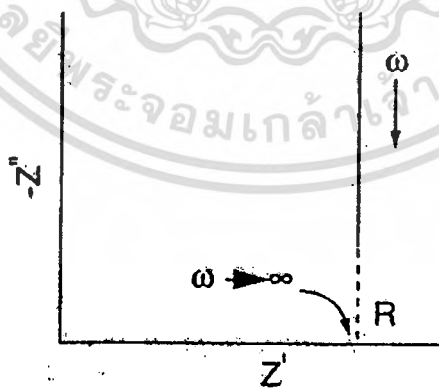
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

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

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

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

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



ภาพที่ 2.45 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

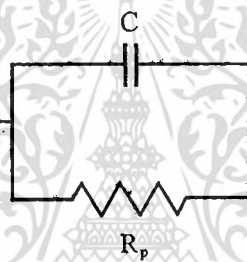
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังภาพที่ 2.46 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

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

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

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

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



ภาพที่ 2.46 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

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

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

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

ดังนั้น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

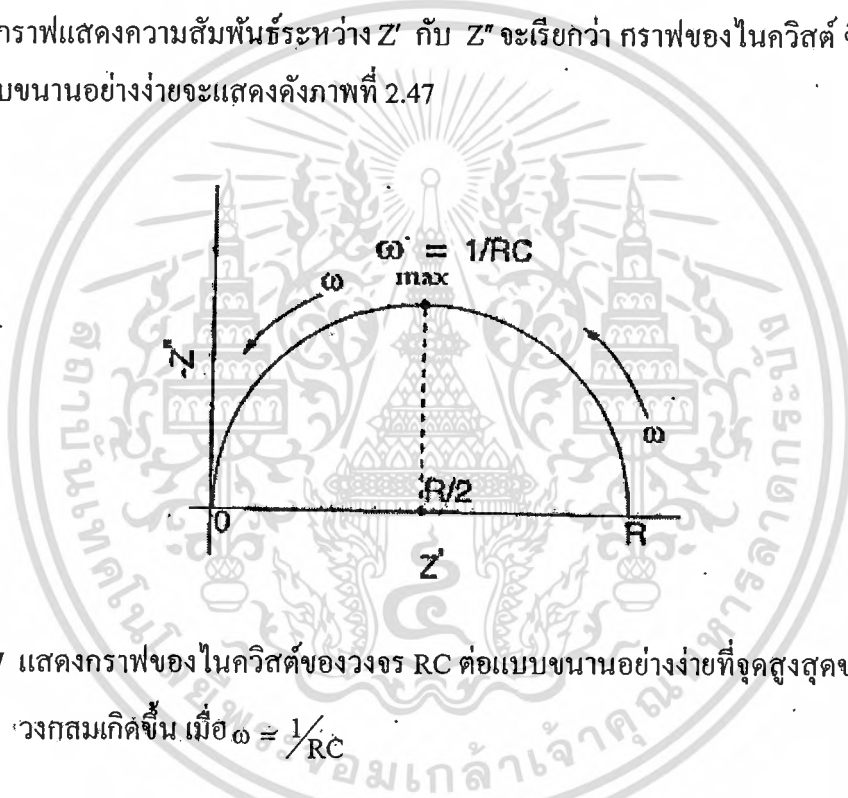
$$= Z' - jZ''$$

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

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

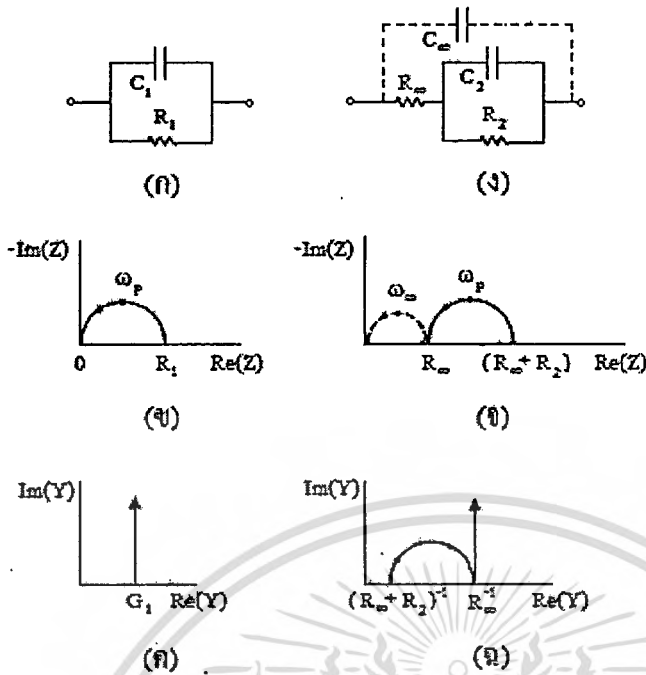
เมื่อ $\tau = R_p C =$ ค่าคงตัวเวลา (time constant)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังภาพที่ 2.47



ภาพที่ 2.47 แสดงกราฟของ ไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$

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



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

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

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

(polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของภาพที่ 2.48(ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนภาพที่ 2.48(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไขปลาดังภาพที่ 2.48(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z^*)$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจрдังภาพที่ 2.48(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ($j\omega C_1$) ดังนั้นจะได้ว่า

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

กราฟของสมการที่ (2.137) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.48(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรภาพที่ 2.48(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

ซึ่งกราฟของสมการ (2.138) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.48(ง) อย่างไรก็ตามกราฟของภาพที่ 2.48(ข), (ค), (จ) และ (ง) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

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

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.16.3 กราฟของโบด (Bode plot)

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

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

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

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

โดยที่ โมดูลัสคือ

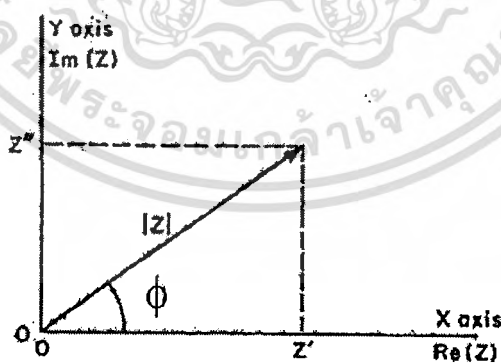
$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.142)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

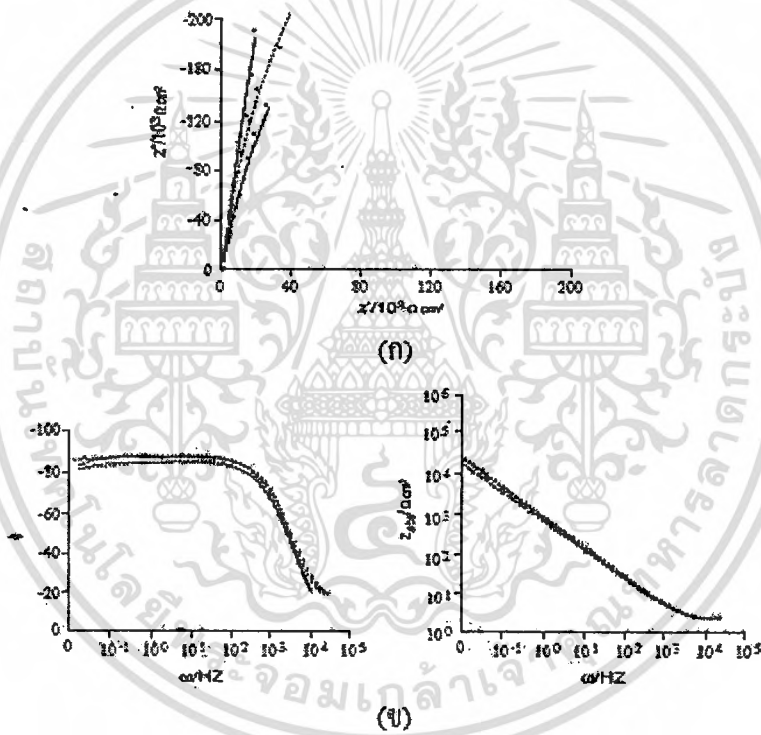
ดังนั้น

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



ภาพที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90^\circ$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบคจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบคคือ น้ำหนัก(weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลีเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบคสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังภาพที่ 2.49 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.50 แสดงกราฟไนควิสต์ (ก) และกราฟของโบค (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

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 ω^{-n} ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม ω^{-n} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

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

ส่วนความจุสองชั้น (double-layer capacitance: C_{dl}) เนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ติดกับขั้ว อิเล็กโทรดจะแสดงได้ดังนี้คือ

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

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

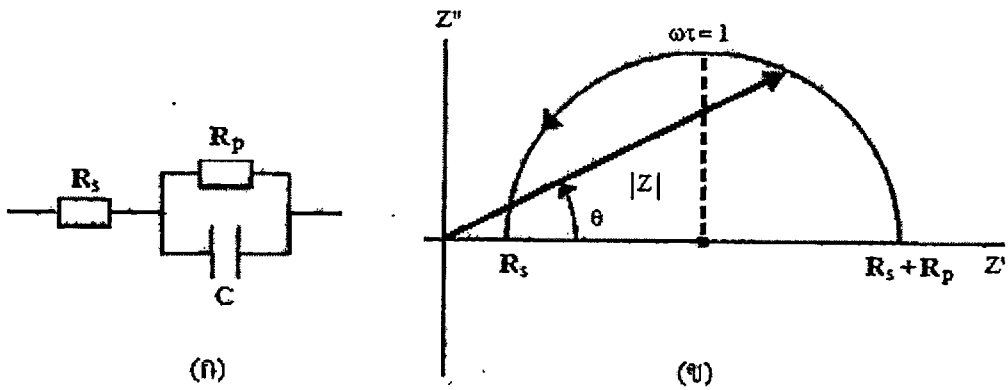
2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [13,17,27-28]

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

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

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

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



ภาพที่ 2.51 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

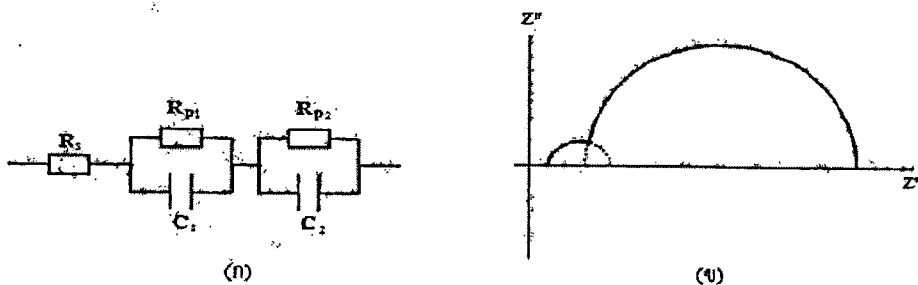
จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมจะอยู่บนแกน Z' โดยมีรัศมีเท่ากับ $\frac{R_p}{2}$ จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ R_s และ $R_s + R_p$ ส่วน Z'' จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

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

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

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

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.52(ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่า จะแสดงในรูปที่ 2.52 (ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดี่ยวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



ภาพที่ 2.52 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ กรุณาติดต่อขอสงวนลิขสิทธิ์จากเจ้าของลิขสิทธิ์

แบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษานี้ ซึ่งเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมมูลที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรนเป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน Z' (ดังภาพที่ 2.53(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิมพีแดนซ์เฟสคงตัวจะแสดงในสมการ(2.149) ดังนี้คือ

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

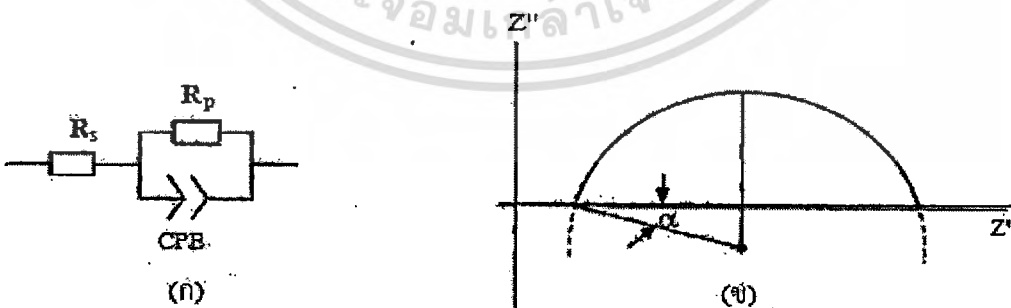
อิมพีแดนซ์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R, C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า n และ P ดังนั้นคือ

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

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

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

โดยที่ α มีหน่วยเป็นเรเดียน



ภาพที่ 2.53 แสดงแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ก) และกราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ข)

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

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟฟ้าสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่ ω ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

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

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับเดิม ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริกคังสมการ

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

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้าและ ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แต่ถ้าความถี่สูงกว่าค่า $\frac{1}{\tau_D}$ แล้วพาหะข้างมากจะไม่ตอบสนองต่อความถี่และถ้าความถี่ยิ่งสูงขึ้นไปอีก สารกึ่งตัวนำนี้จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า และ C จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าขึ้นกับรูปทรงของสารตัวอย่างซึ่งเรียกว่า ความจุเรซาคณิต ความถี่การผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation frequency) ของความจุเรซาคณิตนี้ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ถ้า σ เปลี่ยนตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในสารตัวอย่างที่เป็นสารพหุพันธ์ (polycrystalline materials) พลังงานการกระตุ้น (activation energy) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายพาหะอิสระซึ่งถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ที่อยู่ภายในเกรนหรือที่บริเวณรอยต่อเกรน (grain-boundaries)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

เมื่อ ω_0 คือความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

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

โดยที่ N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์, v_{th} คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน, E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ σ_p คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับโฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก N_V และ v_{th} ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.154) จะเขียนใหม่ได้เป็น

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

เมื่อ $E_T - E_V = E_a$ ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์ และนิยมเรียก E_a ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด ω มีค่าน้อยกว่า ω_0 นั่นคือ ω_0 จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั้นเอง ส่วน ξ_0 เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง ξ_0 จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ξ_0 คงยังขึ้นกับ E_a ดังความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในกรณีอื่นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ξ_{∞} และ E_{∞} คือค่าคงที่ของกลไกการขูดขูดโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์

ในกรณีที่กักประจุไม่เป็นกักประจุชนิดเดียว แต่จะเป็นกักประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กับดักประจุ (N_T) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [25-26]

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

ฟังก์ชัน $c(E_{\infty})$ จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกักประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกักประจุ ถ้าแทนสมการ (2.155) ลงในสมการ (2.151) และเปลี่ยนตัวแปร E_{∞} เป็น E_{ω} จะได้ว่า

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

ซึ่ง E_{ω} ของสมการที่ (2.157) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน E_{∞} จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงที่เวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ (E_F^N) หรือ (E_F^P) จะหาได้จากความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง ω_0 สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ $C(\omega)$ ค่าพลังงานกระตุ้นของ ω_0 จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F^N) หรือ (E_F^P) เว้นเสียแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากสมการ (2.149) ความถี่เชิงมุม ω_D ที่สอดคล้องกับ τ_D จะแสดงได้ดังสมการ

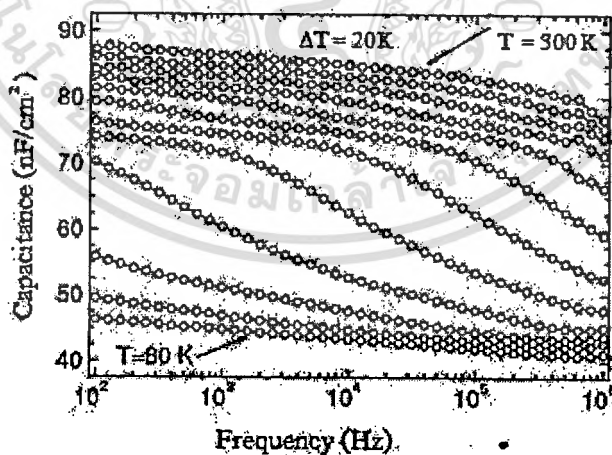
$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม ω ที่ใช้ในการวัด ω มีค่ามากกว่า ω_D ($\omega > \omega_D$) พาหะอิสระไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุจะขาดชนิดคือ

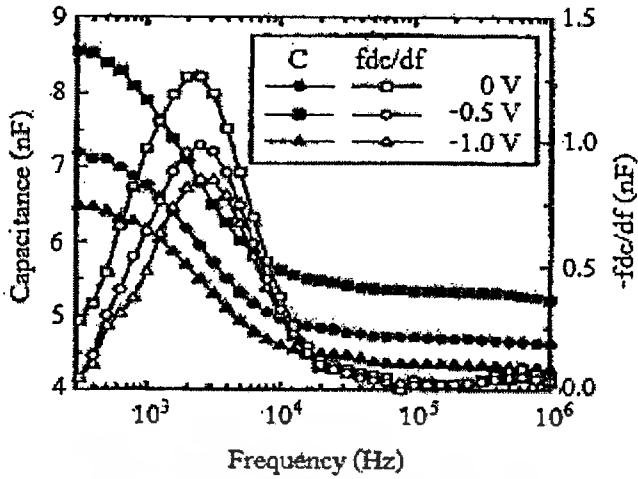
$$C_{geo} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.158)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม ω_D จะมีค่าสูงกว่า ω และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เบี่ยงเบน ω_0 สถานการณ์ใดสถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น

1. สำหรับ $\omega_0 < \omega < \omega_D$ เราจะวัดได้แต่เฉพาะค่า C_{SCR} แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวินไปเป็น 300 เคลวิน การทรานซิชันครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้นโดยเปลี่ยนจาก C_{SCR} ไปเป็น C_{IR} ที่ความถี่เชิงมุม $\omega = \omega_0$ ตามสมการ (2.152) การทรานซิชันของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดัง ภาพที่ 2.54 ส่วนภาพที่ 2.55 จะแสดงค่า C ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชันของค่าความจุจากช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ซึ่งพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน



ภาพที่ 2.54 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe₂ ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80-100 เคลวิน คือ ค่า C_{SCR} แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม



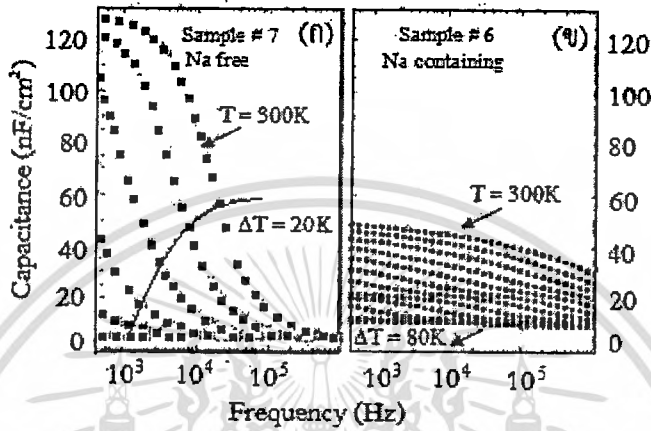
ภาพที่ 2.55 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se₂ ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง

2. สำหรับ $\omega < \omega_D < \omega_0$ ในแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีจะเห็นการทรานซิชั่นเพียงหนึ่งเดียวซึ่งเกิดจากความจุเรขาคณิต (C_{geo}) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C_{tr}) ซึ่งการทรานซิชั่นนี้เกิดขึ้นที่ $\omega = \omega_D$ พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะรูปที่ 2.56 แสดงการทรานซิชั่นเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรขาคณิต (C_{geo}) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิสูง/ความถี่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบขึ้นบันได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของสารกึ่งตัวนำ CuGaSe₂ ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทรานซิชั่นที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (τ_D) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชั่นที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโฮลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

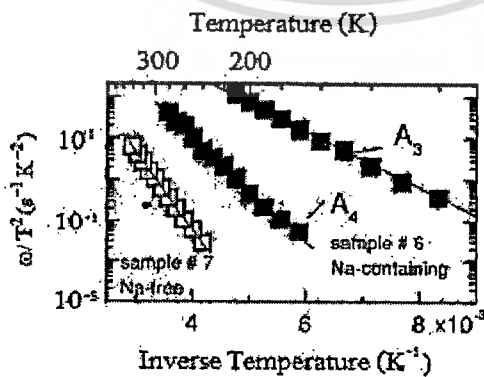
ถ้าทราบค่า μ_p และ ϵ_s ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของโฮล (p) ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า C_{tr} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออไนซ์ซึ่งก็คือมีการจับประจุและการคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไฟฟ้า การทรานซิชันในภาพ 2.56(ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก
 ก่อนข้างสูงอยู่ในราว $\tau_D = 10^{-5}$ s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้ $\omega_D = \omega_0$ ดังนั้นจากการวัดแอดมิต
 แตนซ์สเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เบี่ยงเบน (ω_0) ของกับดักประจุ นั่นคือไม่สามารถตรวจวัด
 ระดับพลังงานของกับดักประจุได้



ภาพที่ 2.56 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe₂ ที่
 ความถี่ค่าต่าง ๆ
 ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na
 ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na

ภาพที่ 2.57 แสดงการหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในภาพที่ 2.56
 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ได้จากสารกึ่งตัวนำ CuGaSe₂ ที่ไม่มีการเจือด้วย
 อะตอมของธาตุ Na ส่วนสารกึ่งตัวนำ CuGaSe₂ ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า



ภาพที่ 2.57 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ที่สำหรับใช้ในการหาพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้กระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe₂ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

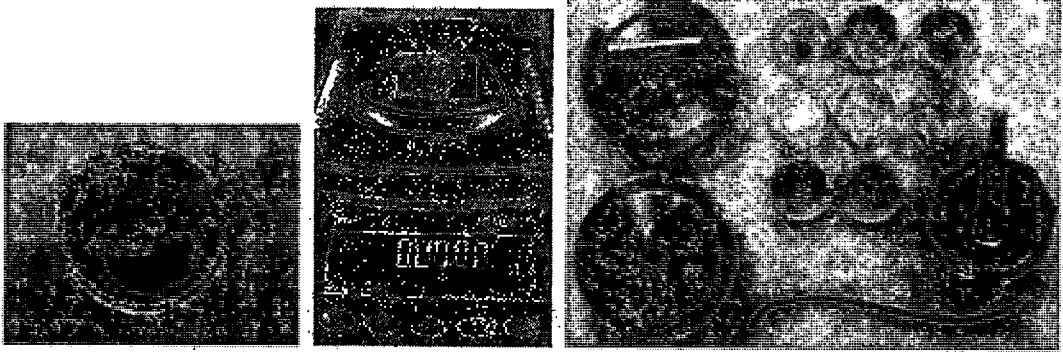
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิ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

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

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



ภาพที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

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

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

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

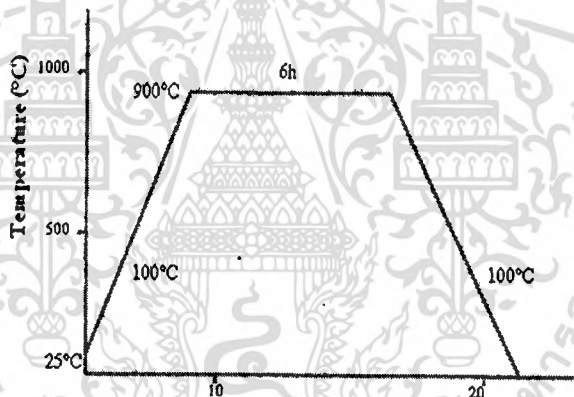
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ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

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำการเตรียมเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง
2. นำผงผลึกของสารประกอบ CuO มาบดในครกอากทให้เป็นผงละเอียดมากคล้ายแป้งฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ภาพที่ 3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO



ภาพที่ 3.3 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

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

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

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมททานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cds ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติภาสถานะของแข็งที่เป็นกระจกสไลด์ โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ Cds ตามลำดับมาคให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัมแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงในภาชนะระเหยสาร(boat)ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ทำการเตรียมไว้แล้วตามลำดับมาวางลงบนหน้า กาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์จนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ 5×10^{-5} มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

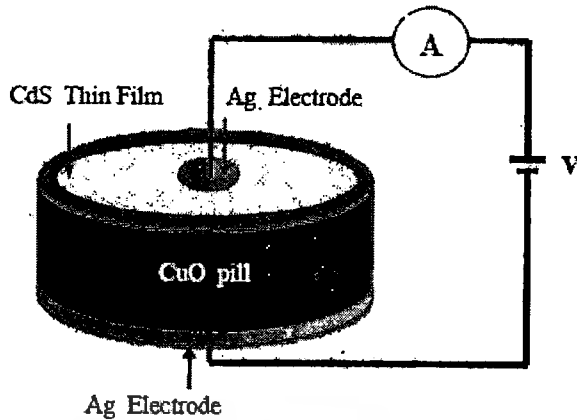
แล้วแช่พัก สักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100 - 130 แอมแปร์ จนได้ความหนาประมาณ 500 - 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที

8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และทำการปิดแวนิแอก โดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงาน ต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสูบลำอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100- 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและกรณีที่มีการแอนนัล ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดีฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

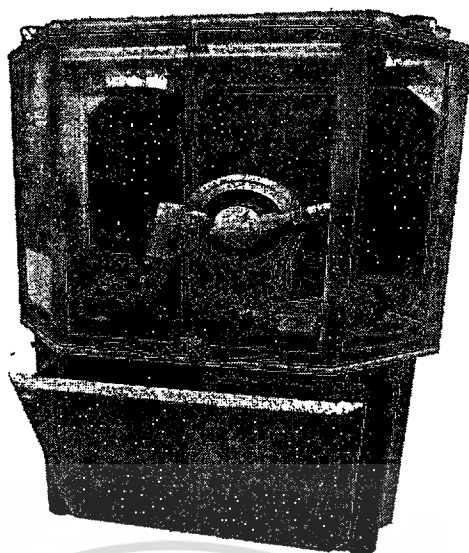


ภาพที่ 3.4 แสดงแผนภาพของโครงสร้างของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

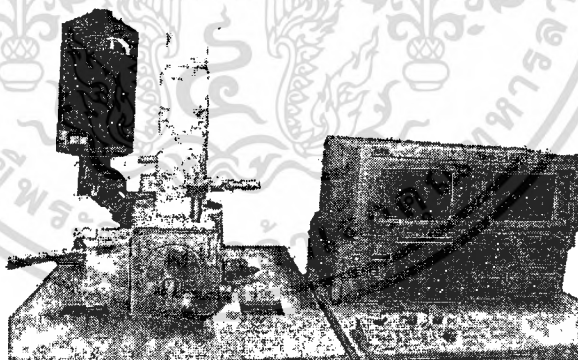
นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสดี และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu K_α 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



ภาพที่ 3.5 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

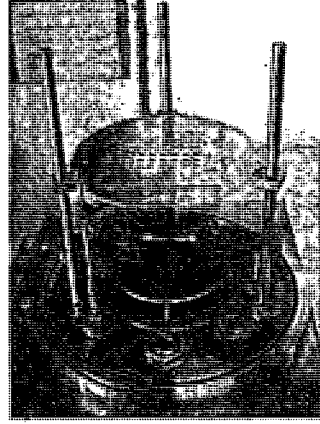
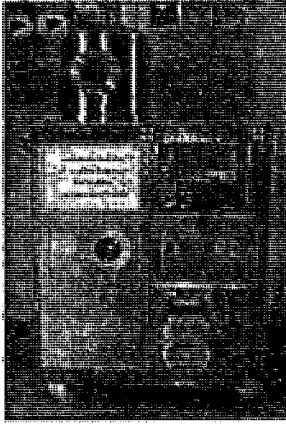
นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400



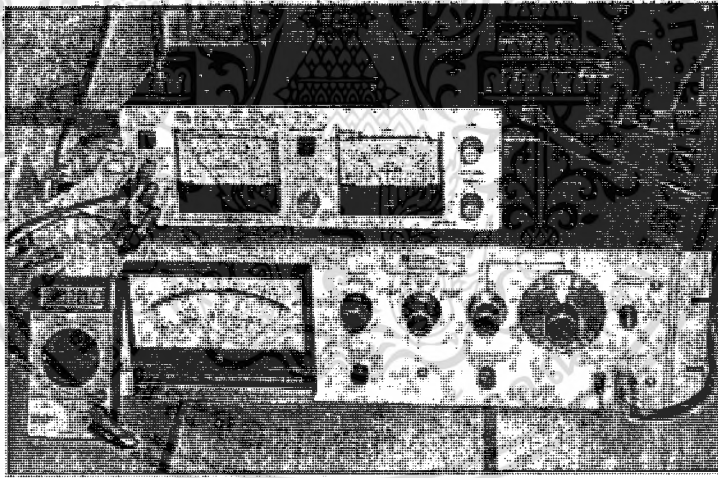
ภาพที่ 3.6 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

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

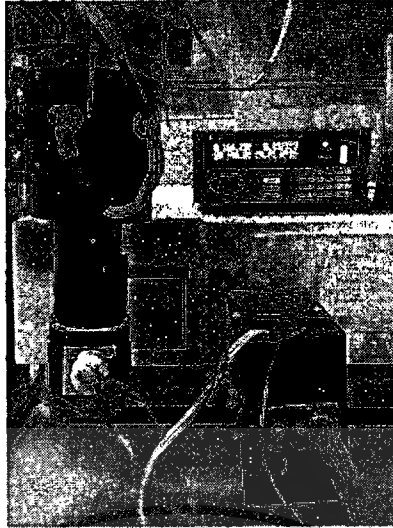


ภาพที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสและที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

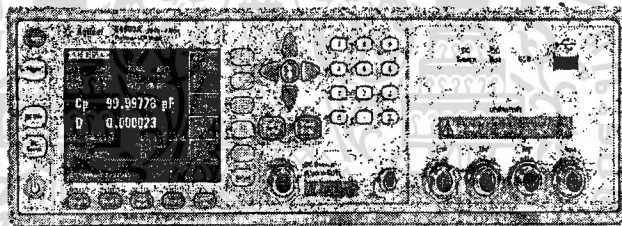


ภาพที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายของไดโอดแอดที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน



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



ภาพที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

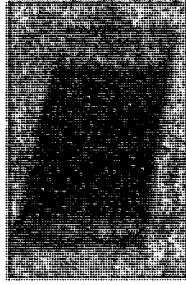
บทที่ 4

ผลการวิจัย

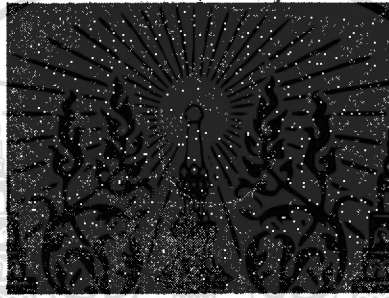
ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทำการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดค่าความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20–300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO วัดความสัมพัทธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ความนำไฟฟ้ากับกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน และยังได้ทำการศึกษาความสัมพัทธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ความนำไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25. – 90 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ

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

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีสีเหลืองส้ม ผิวหน้าเรียบ สะท้อนแสงและยึดติดแน่นกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นมีสีดำ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จะเห็นว่า มีฟิล์มบางสีเหลืองส้มเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO



ภาพที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



ภาพที่ 4.2 แสดงถึงประติมากรรมของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

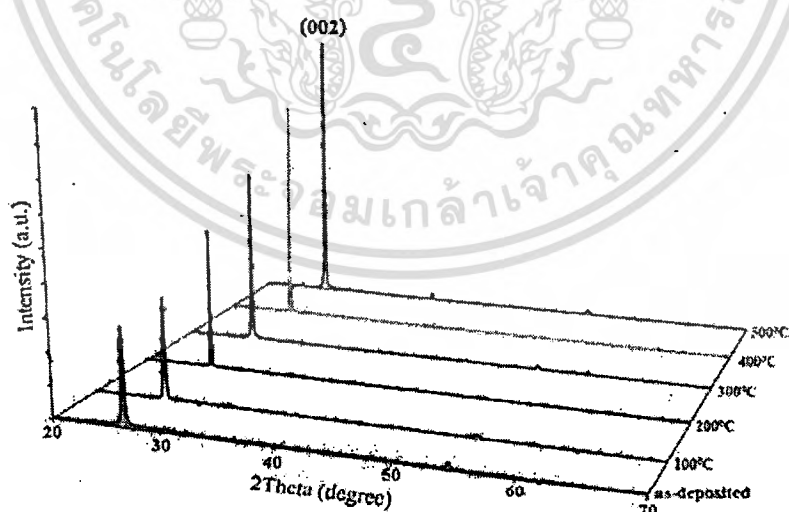
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาศรึกศาสตร์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส ทั้งในกรณีที่ไม่มีแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

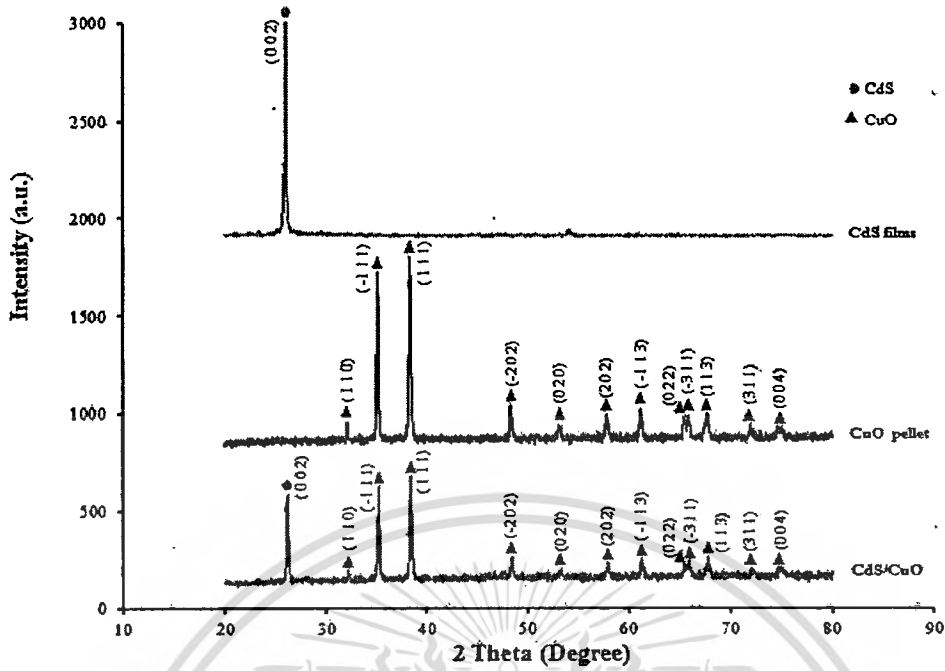
30 นาที พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) เค้นชัดที่สุดอยู่ที่มุม $2\theta \approx 26.50$ องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS มาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่าระนาบการเลี้ยวเบน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

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

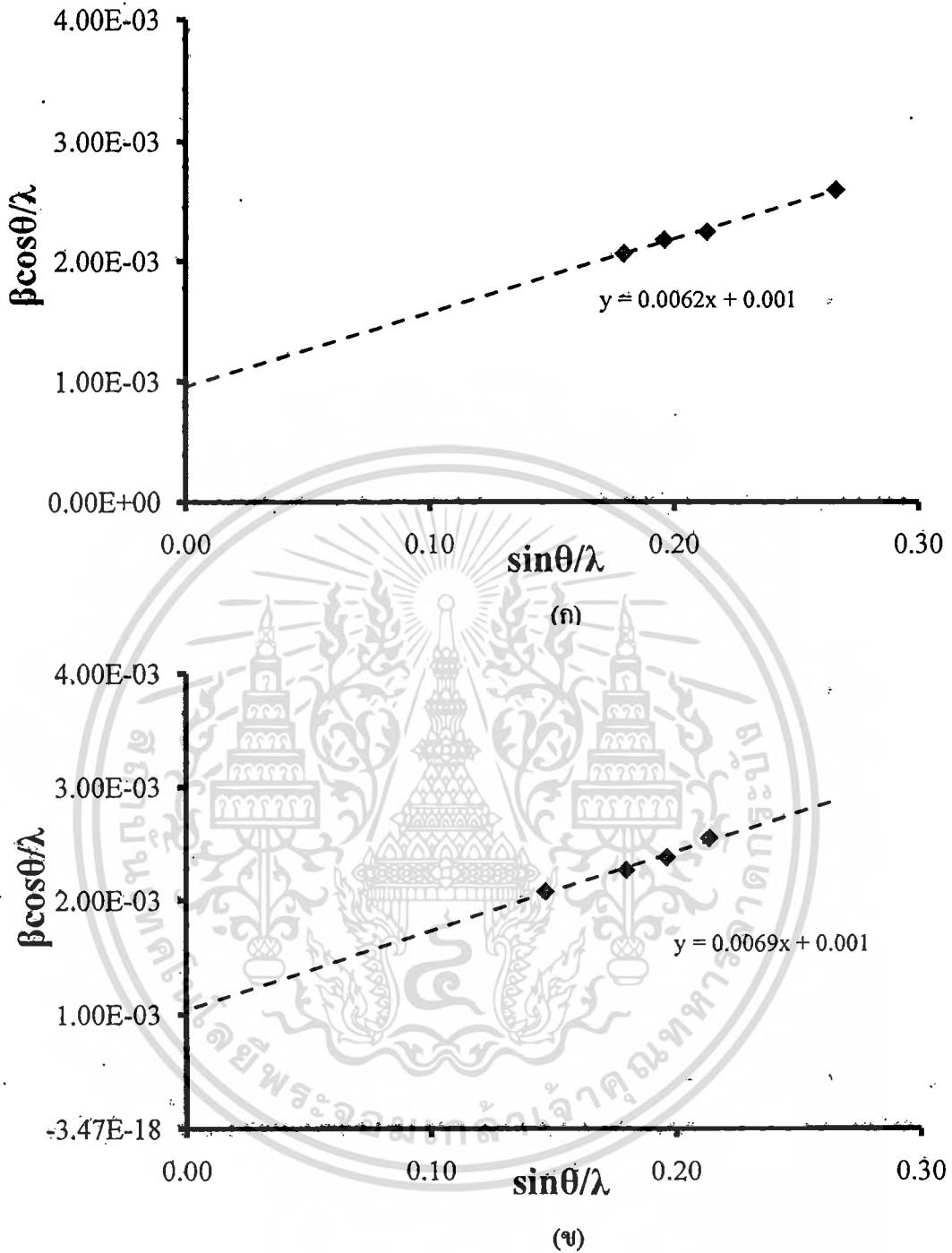


ภาพที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ

ออกซิเจนเป็นเวลา 30 นาทีนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่-4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดของเกรนและความเครียดของ

- ก. เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธี
ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- ข. เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิ
พันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิทยาศาสตร์ของแข็ง และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

CuO ceramic	Lattice Constant (Å)				Grain size (µm) from XRD	Strain
	a	b	c	β		
pellet	4.809	3.438	5.038	99.777	3.02	0.0094
CuO/CdS diode	4.899	3.433	5.025	99.678	2.11	0.0060

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

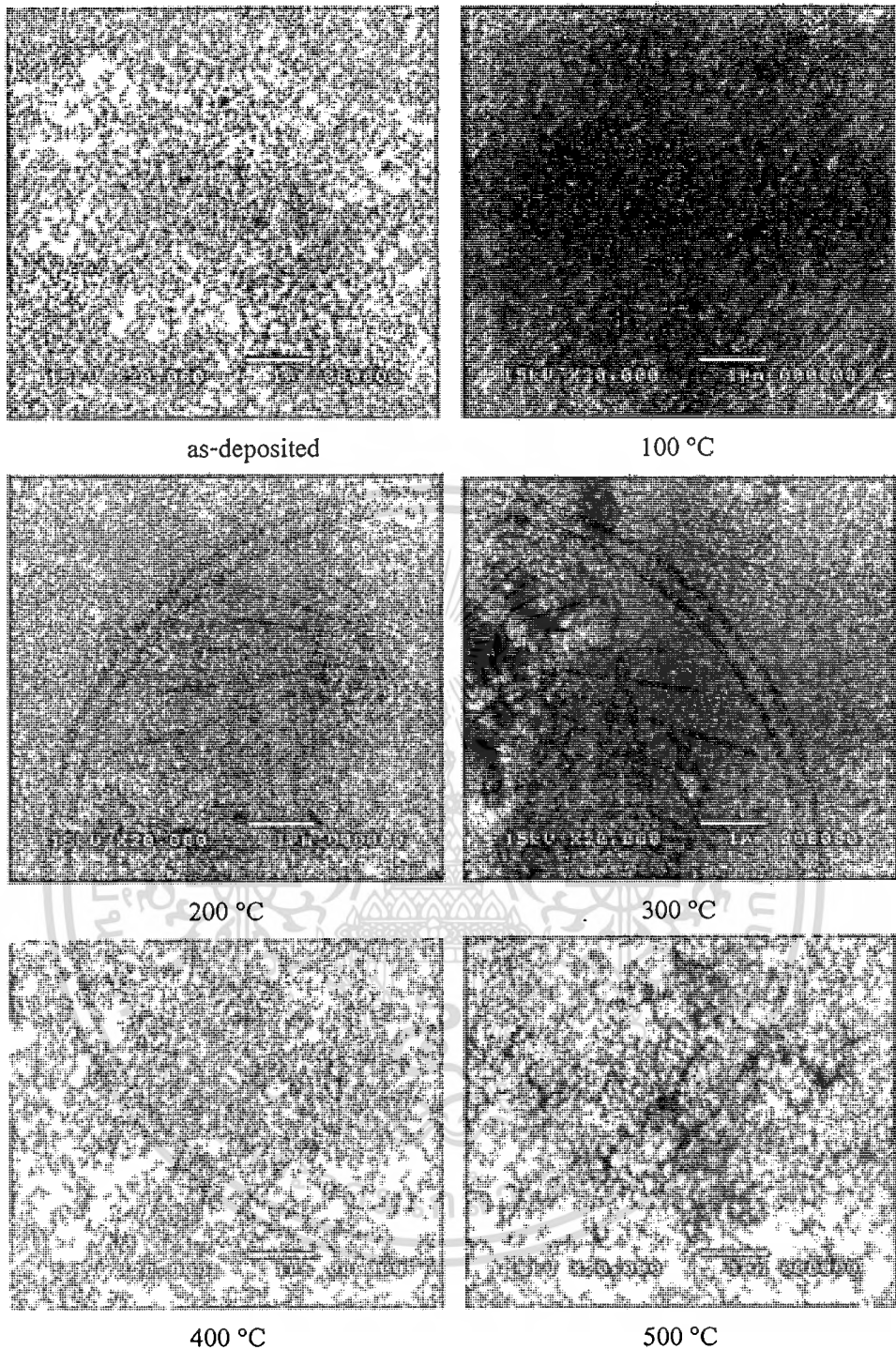
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นประมาณ 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20 ไมโครเมตร ตามลำดับดังภาพที่ 4.6

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิทยาศาสตร์ของแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงบริเวณผิวหน้าของเม็ดของเซรามิกจากภาพถ่าย SEM ของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO พบว่าเกรนมีขนาดประมาณ 3.00 ไมโครเมตรดังภาพที่ 4.7

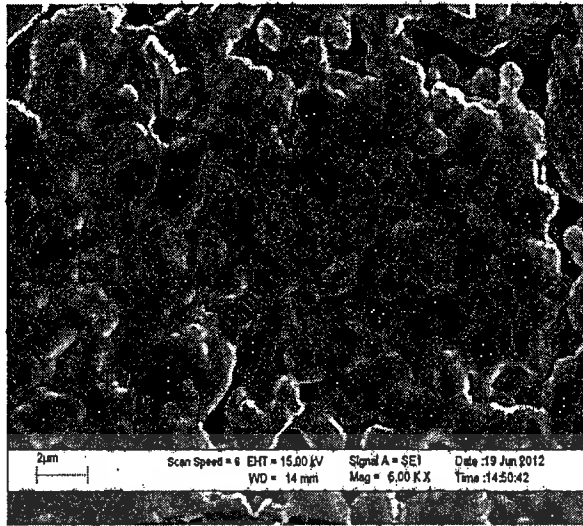
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CuO ขนาดของเกรนประมาณ 2.00 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.7 จากภาพที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



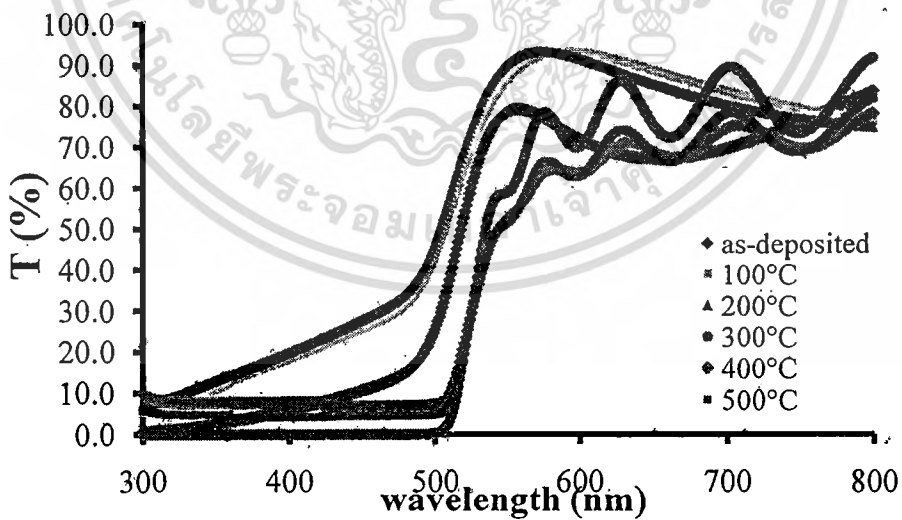
ภาพที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธี ปฏิกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณภาคตัดขวางของ รอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนในระบอบสุญญากาศ

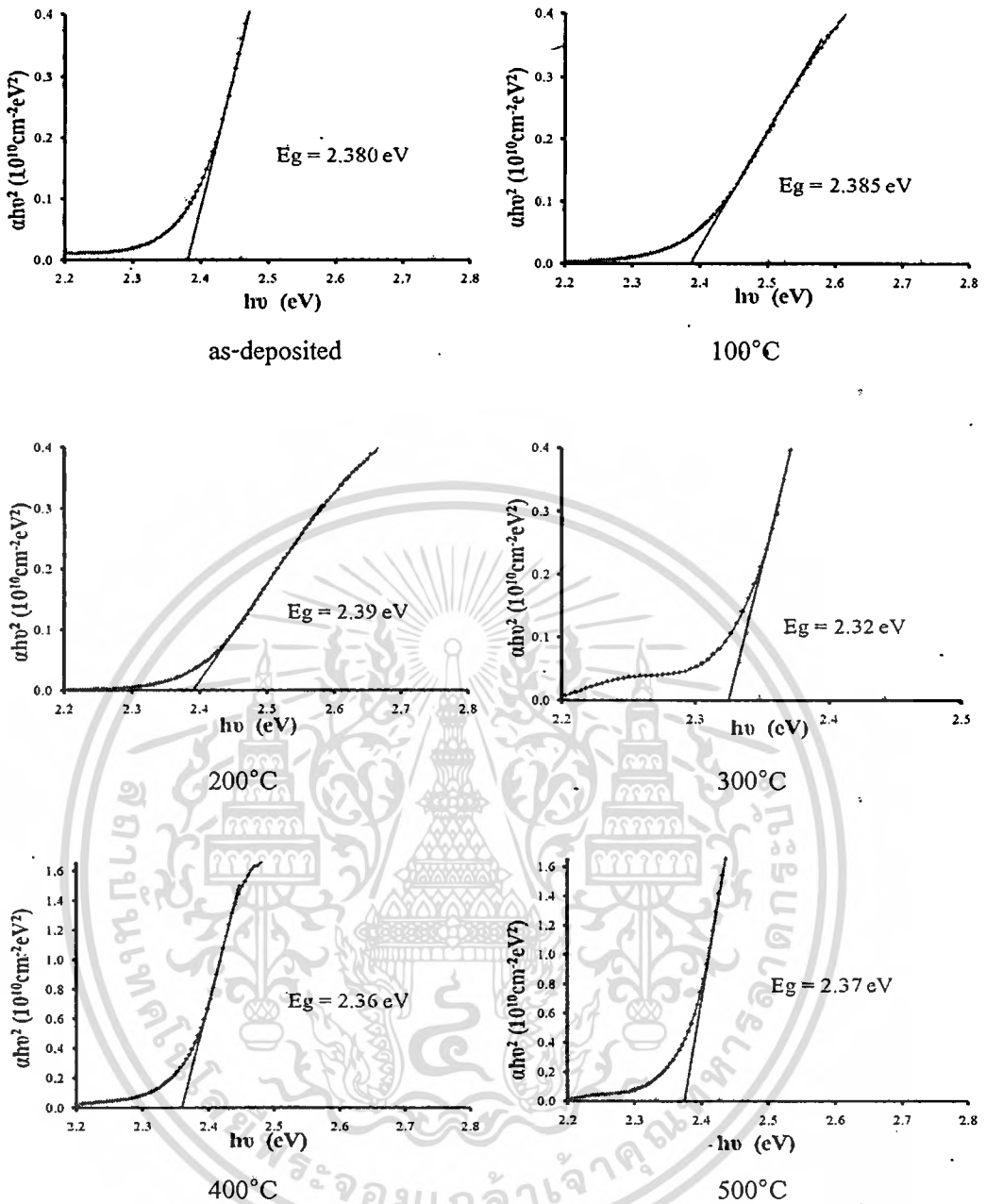
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ได้ทำการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิแอนนัล 500 องศาเซลเซียสเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ แล้วลากส่วนของเส้นตรงให้ตัดกับแกนพลังงานของโฟตอน โดยที่จุดตัดแกนคือค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจากการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการแอนนัลพบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิแอนนัล 300 องศาเซลเซียส จะมีการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศา

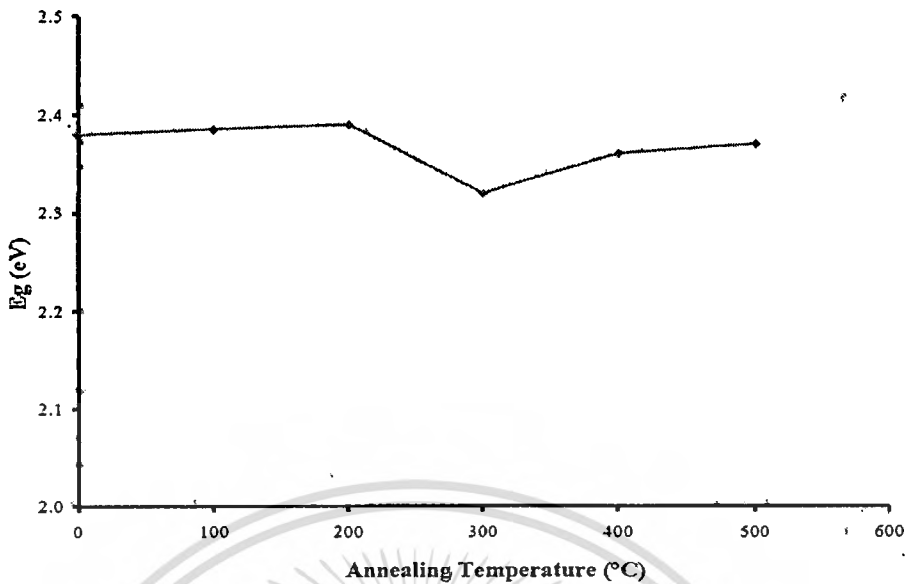
เซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ยখনด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่

บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานและอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีก และมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

4.3 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ

n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

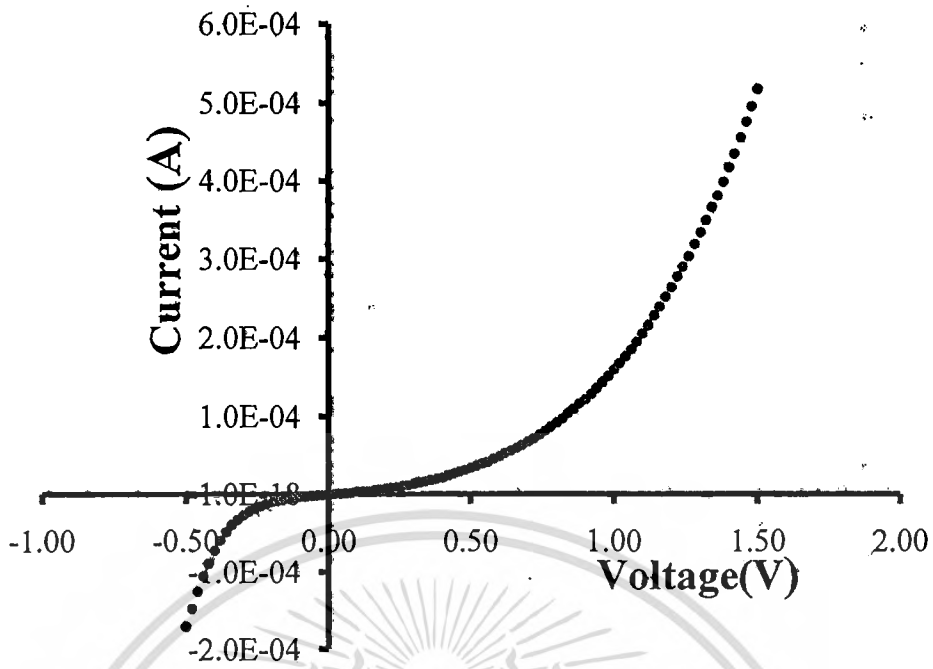
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_{cv}) และความสูงของกำแพงศักย์ในสภาวะแถบแบนราบ (Φ_{BF}) อีกทั้งยังได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ ภายใต้แรงดันไบแอส -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ และพลังงานกระตุ้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

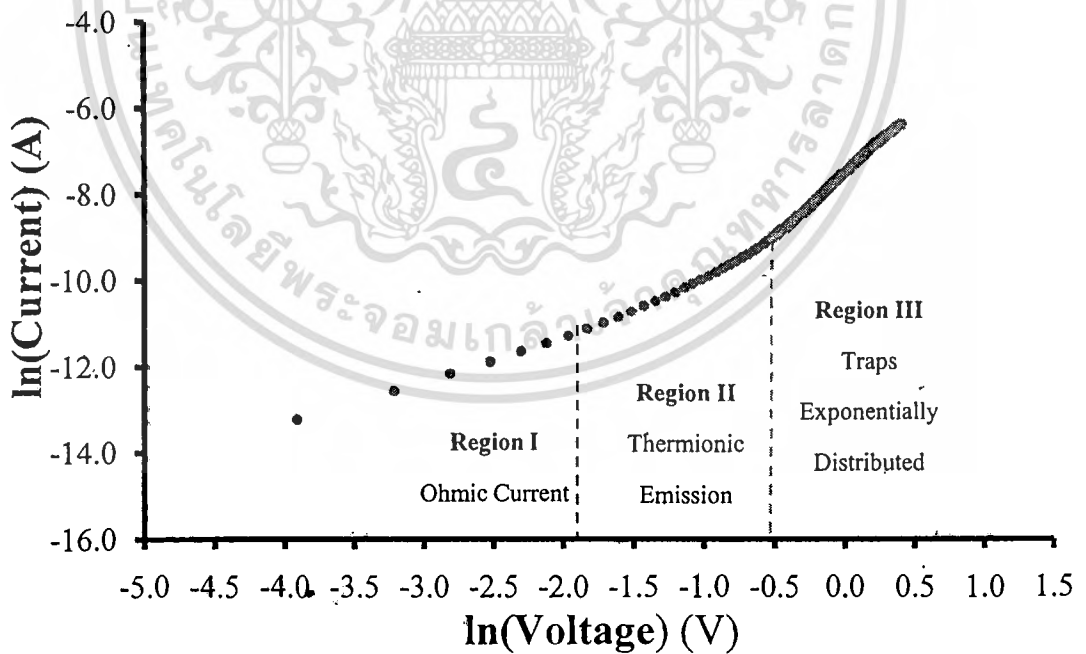
4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในภาพที่ 4.12 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p⁺-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชนิดที่ 1 โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

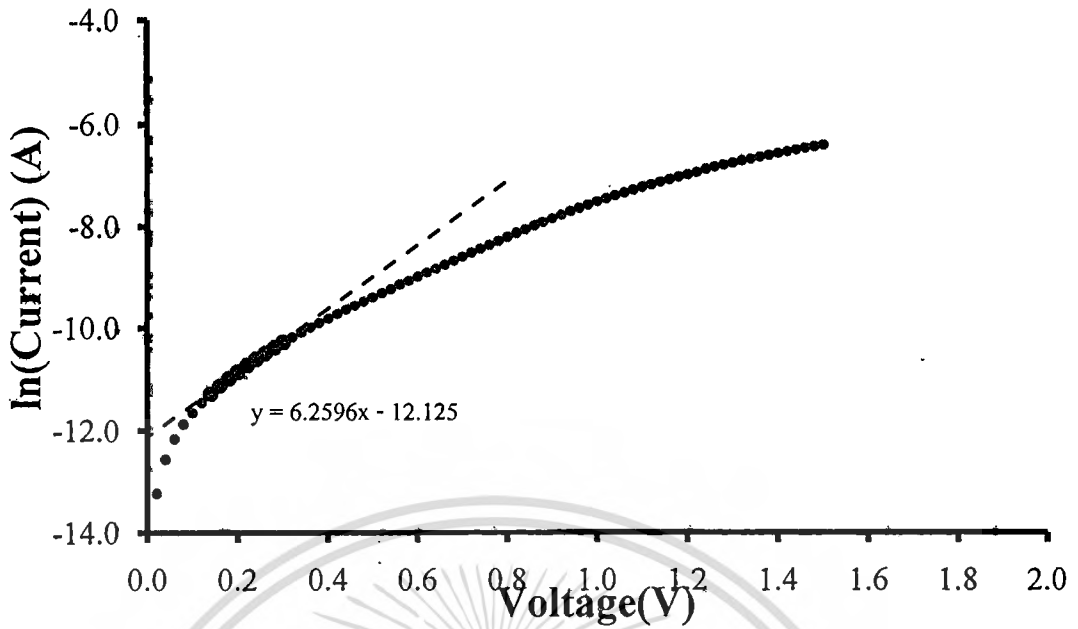
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังภาพที่ 4.13 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังภาพที่ 4.14 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อแบบชนิดที่ 1 ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันการจำลองข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเป็นวิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุดมคติได้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dnI กับ I ดังภาพที่ 4.15 ซึ่งจากกราฟนี้จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ดังภาพที่ 4.16 จะหาค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.2



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



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



ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากภาพที่ 4.14 คือกราฟความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (m) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มियोอนิกอิมิชันดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

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

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิชันตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (m) ได้จากสมการที่ 4.2 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงกำแพงศักย์ ϕ_{p0} ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร – เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

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

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับคือ

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

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ส่วนการหาความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ 4.8 ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ $H(I)$ ดังนี้

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

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

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

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

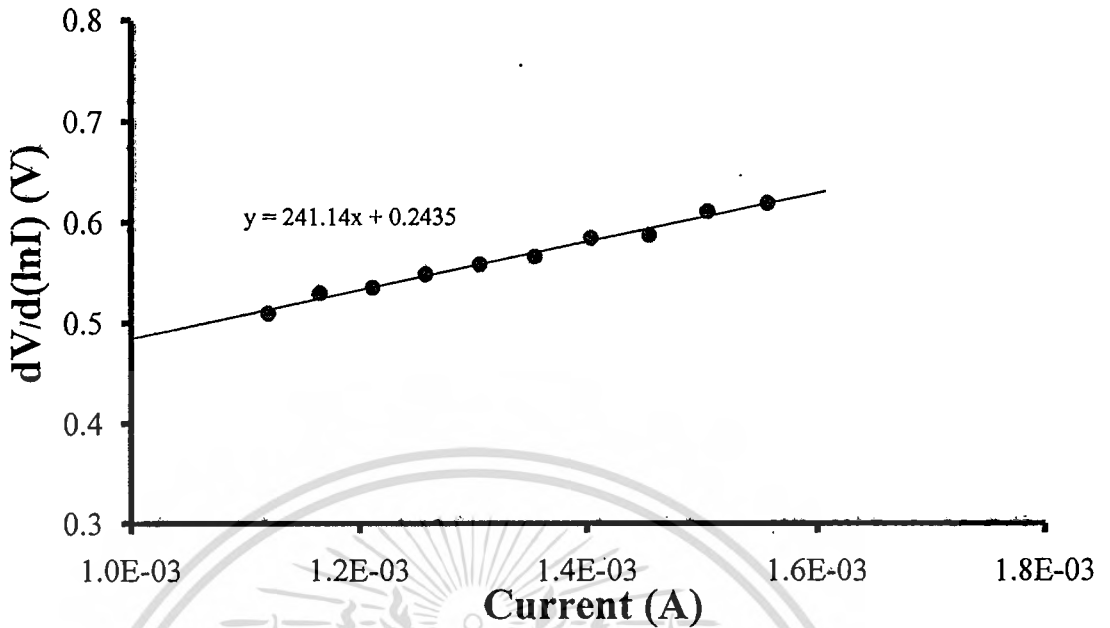
กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

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

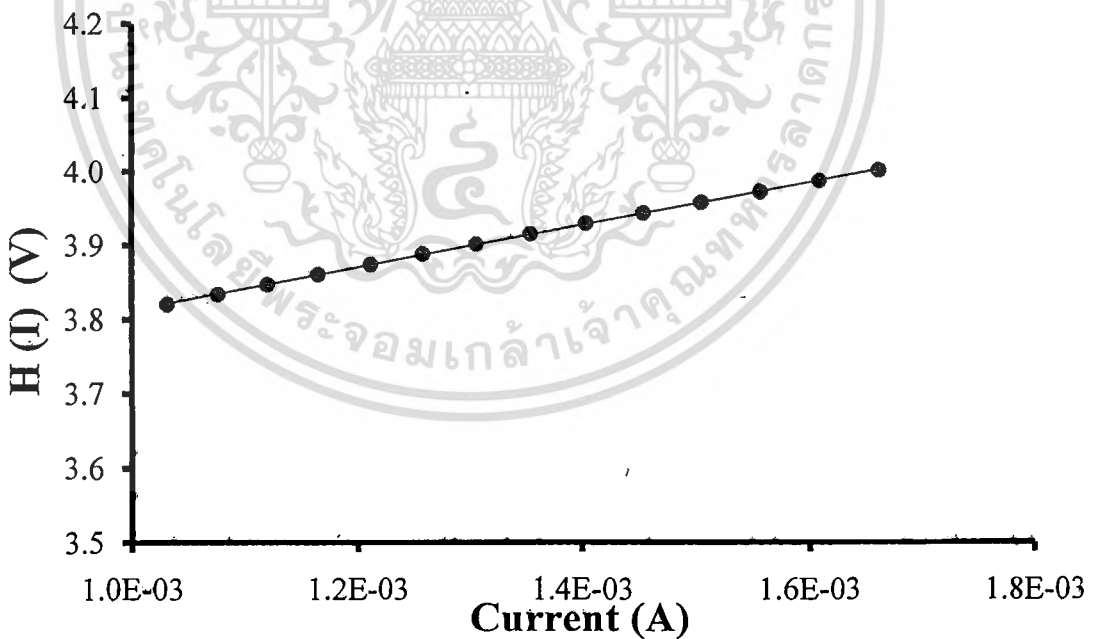
$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



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

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

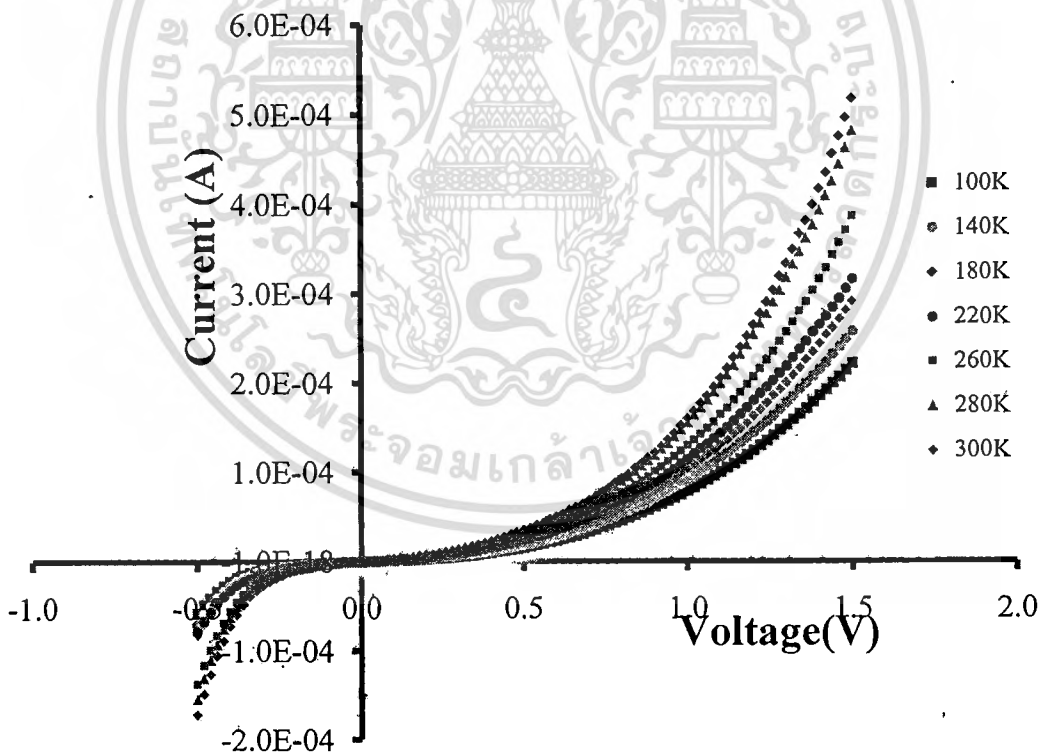
Temperature (K)	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor n		Barrier Height ϕ_{B0} (eV)		Series Resistance R_s (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$[dV/d(\ln I)]-I$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$[dV/d(\ln I)]-I$
300	5.10×10^{-6}	6.1741	6.4500	0.5374	0.5467	286.07	241.14

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

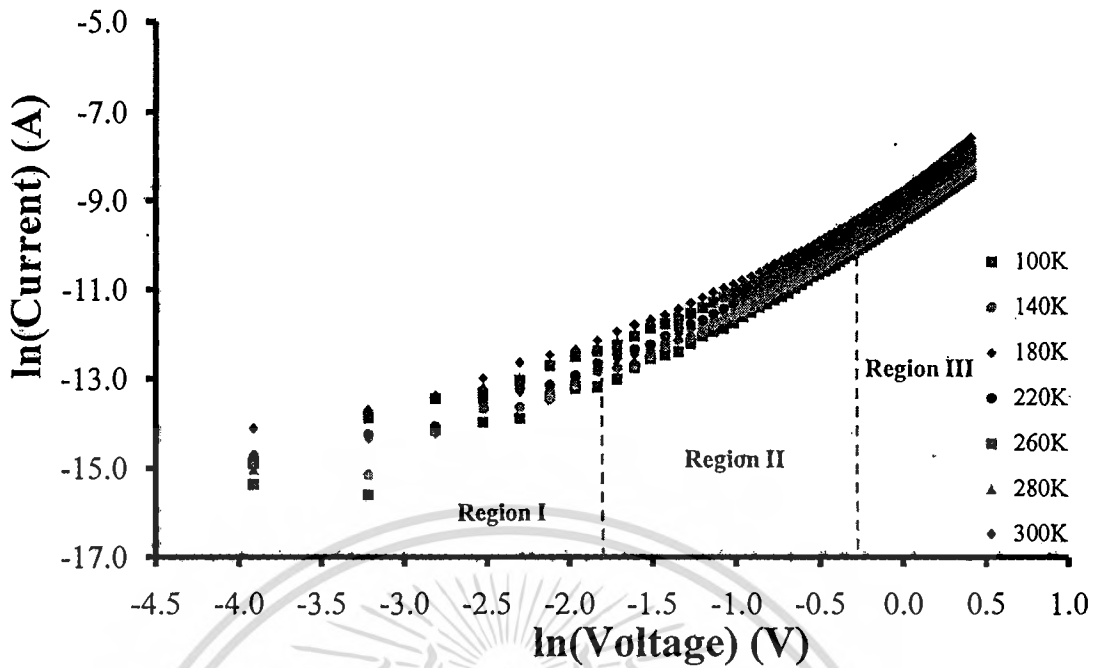
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวินพบว่าที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านกำแพงศักย์ค่าสูงได้โดยไม่ต้องใช้แรงดันไบแอสมากนักจากภาพที่ 4.17 จะพบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีกับดักประจุที่ปรากฏที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะช่วยให้เกิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ (tunneling enhance recombination) โคเด้นขึ้นจึงส่งผลให้แฟกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไบแอส -0.5 ถึง 1.5 โวลต์จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เมื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

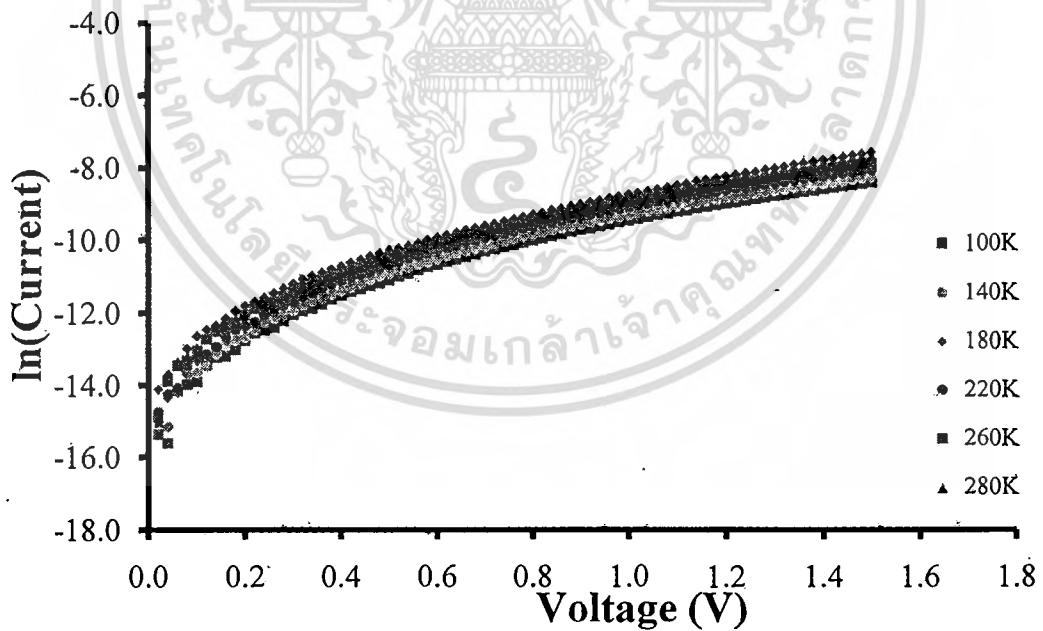
วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวินพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.17 โวลต์ (Region I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.17 – 0.61 โวลต์ (Region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.61 โวลต์ (Region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแสดงดังภาพที่ 4.18 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V แสดงดังภาพที่ 4.19 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตและค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อเทียบกับผลจากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันแสดงดังภาพที่ 4.19 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุณหคณิตให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวง ดังภาพที่ 4.20 และ 4.21 โดยค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุณหคณิต ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



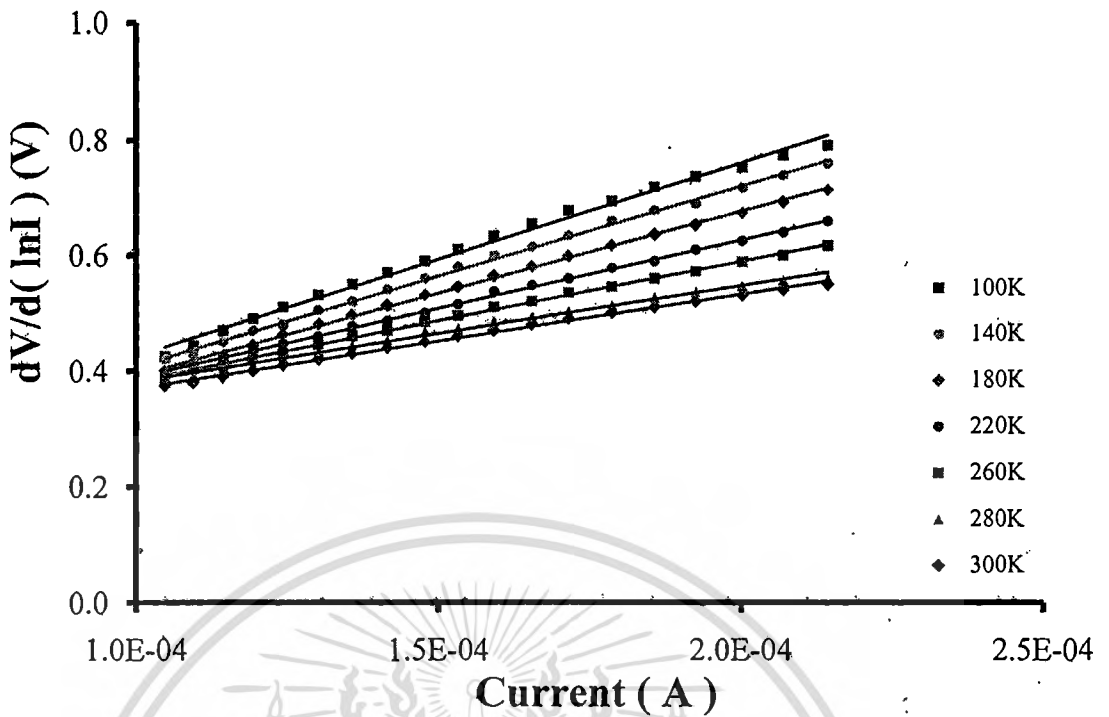
ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



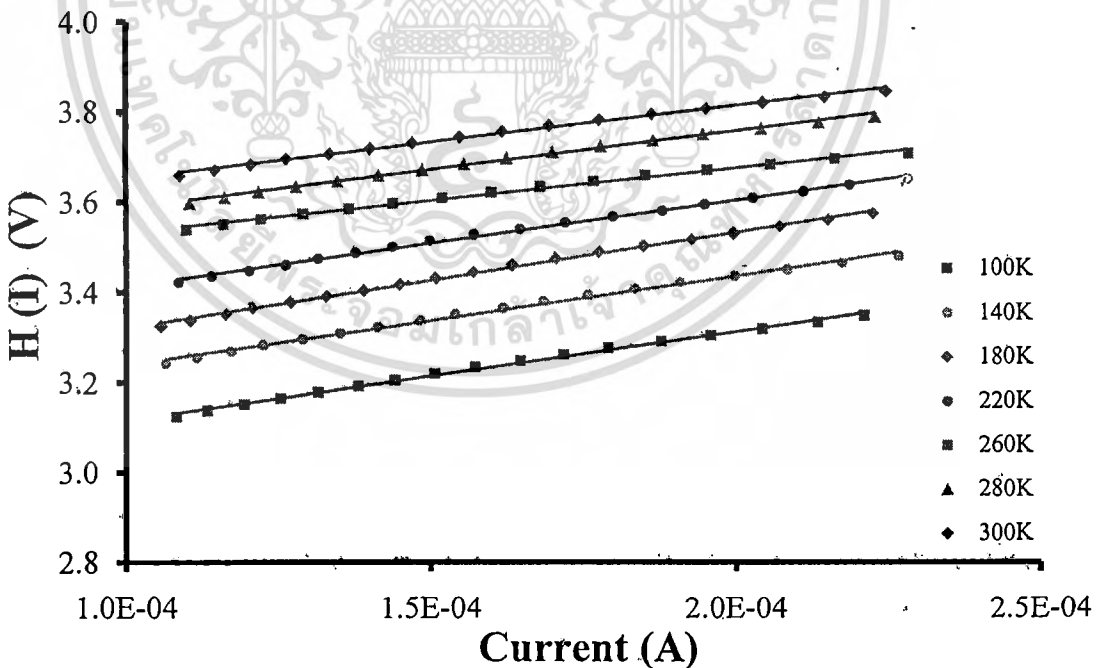
ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดย

วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุคมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังภาพที่ 4.22 ค่าแฟกเตอร์อุคมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มियोอิมิตชัน $n = \frac{q}{kT} \left(\frac{1}{\text{slope}} \right)$ คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V และที่ได้จากวิธีของชวง $n = \frac{(\text{intercept } Y) \cdot q}{kT}$ โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับมีเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุคมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มियोอิมิตชันและวิธีของชวงมีลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังภาพที่ 4.22 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบเคียงกับสมการที่ 4.14 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) จากความสัมพันธ์

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

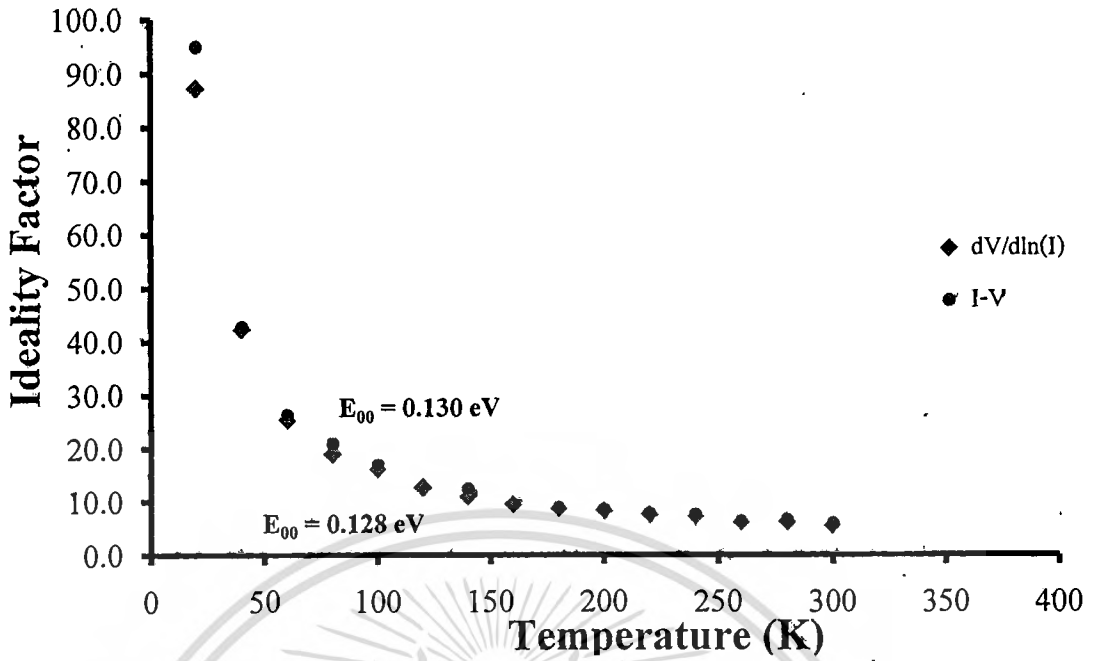
พบว่า E_{00} มีค่าเท่ากับ 0.128 และ 0.130 อิเล็กตรอน โวลต์ตามลำดับ จากทฤษฎีเทอร์มियोอิมิตชันจะได้ว่า

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

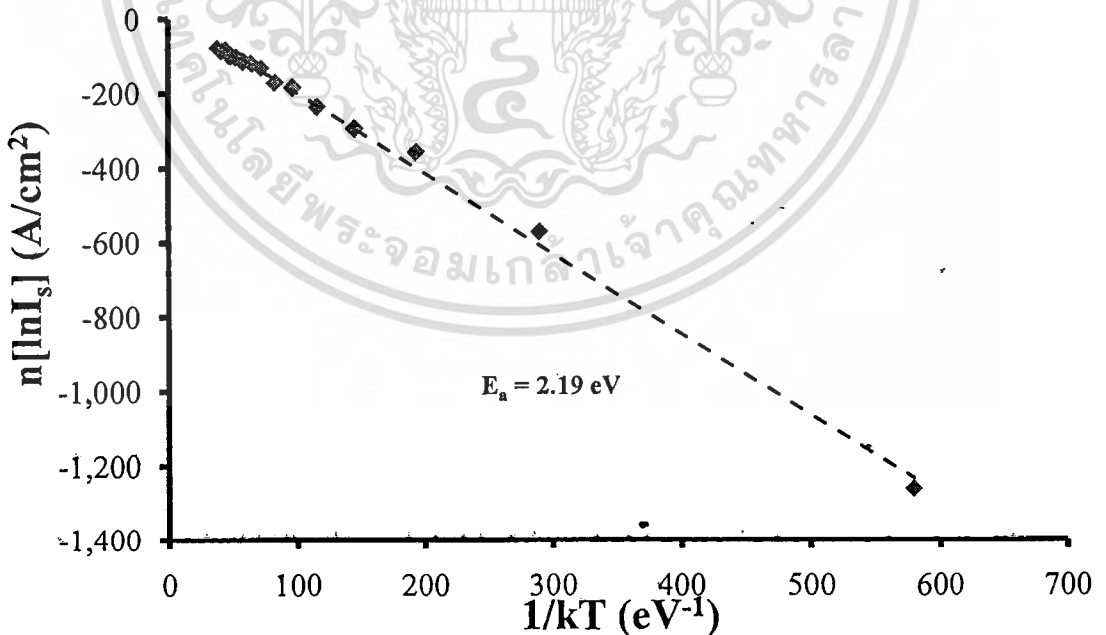
และคำนวณหาพลังงานกระตุ้นจากสมการ

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

จากภาพที่ 4.23 แสดงกราฟอาร์เรเนียสซึ่งความชันที่ได้คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.19 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CuO แสดงว่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.19 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งหมายถึงมีการเกิดชั้นอัลลอยด์ของสารประกอบ $Cd_{1-x}Cu_xO$ ขึ้นตรงบริเวณรอยต่อ และชั้นอัลลอยด์นี้มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 2.19 – 2.40 อิเล็กตรอน โวลต์และเป็นชนิดเอ็น ส่วน E_{00} ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์มาก แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ กลไกการชูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลโคเคนกว่ากลไกเทอร์มियोอิมิตชัน จากนั้นโฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อไปในบริเวณพร่องพาหะ

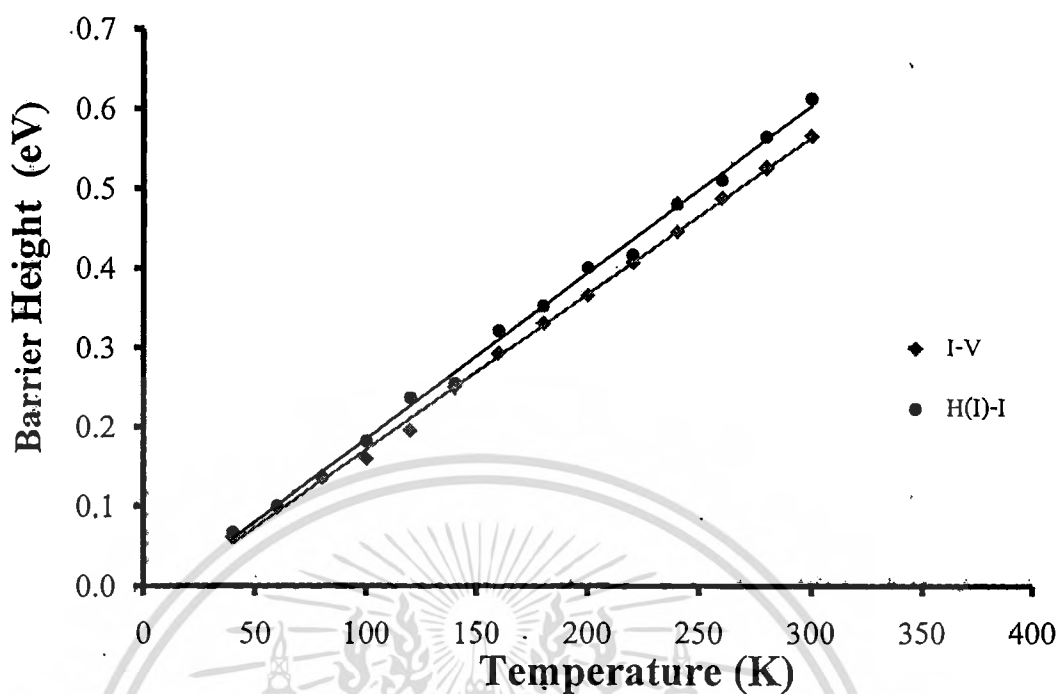


ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

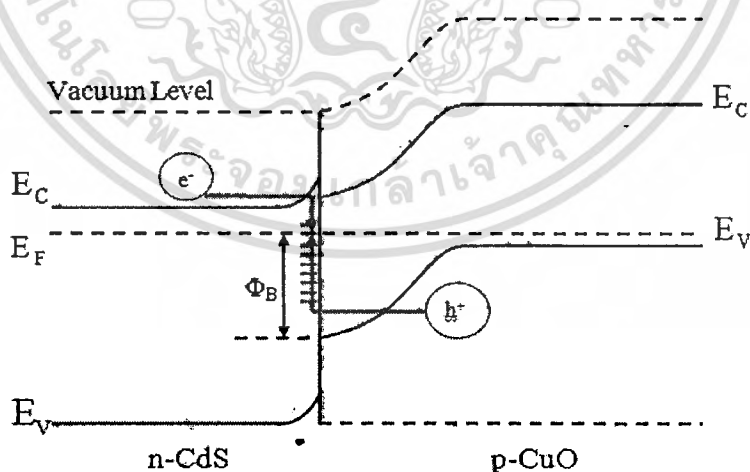


ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากการใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



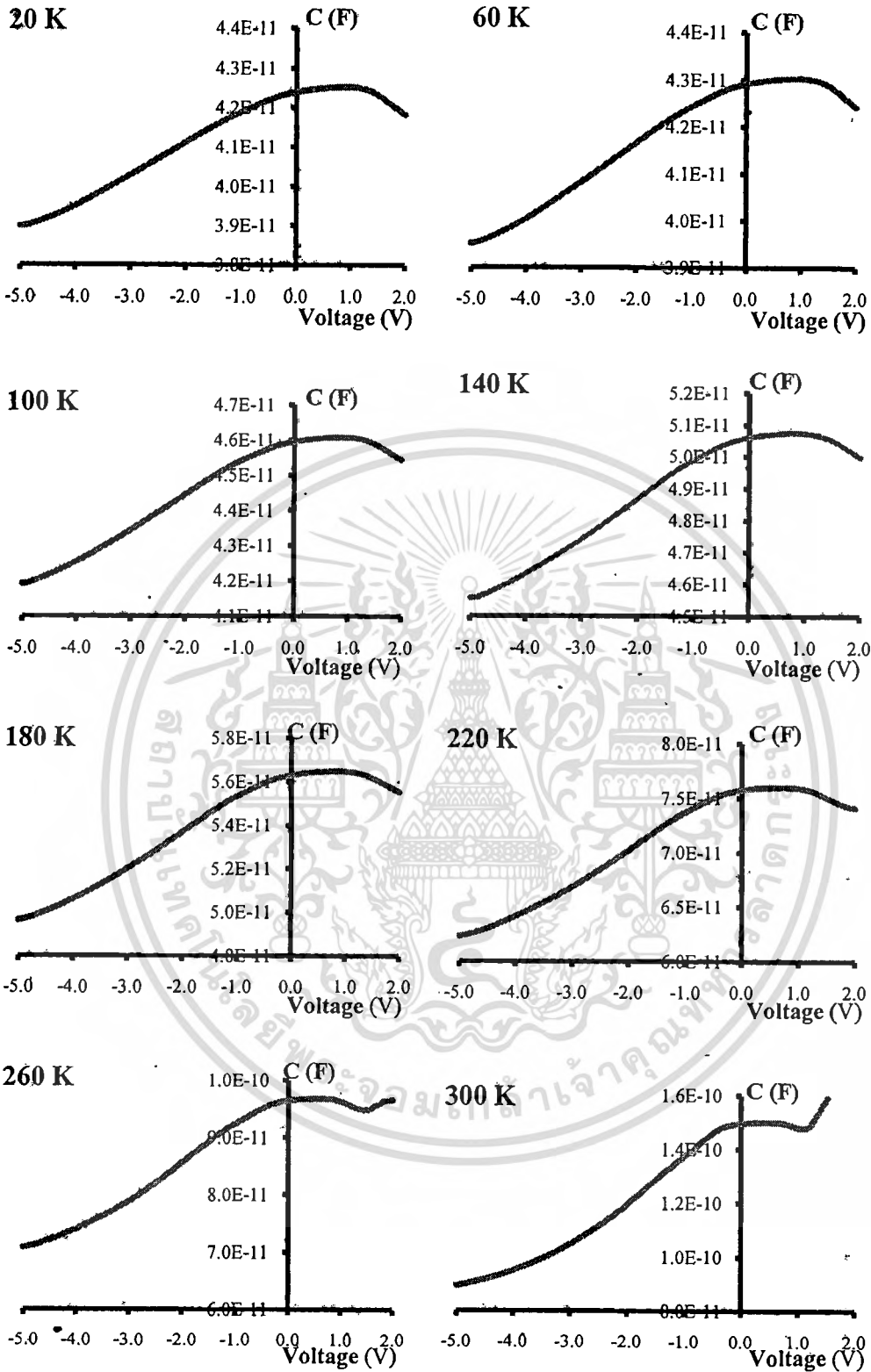
ภาพที่ 4.25 แสดงแผนภาพการขุดคูมอังก์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์สอดคล้องกับค่าคำนวณค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชันที่อุณหภูมิสูง พลังงานความร้อนจะทำให้พาหะอิสระมีพลังงานสูงขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะ โดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะ โดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้ เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุณหภูมิต่ำ (n) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันน้อยลง

4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยใช้แรงดันไบแอสในช่วง -5 ถึง 2 โวลต์ ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์และที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ แสดงดังภาพที่ 4.2 6 และภาพที่ 4.27 พบว่าค่าสูงสุดของความจุไฟฟ้าจะเลื่อนเข้าใกล้แรงดันไบแอสที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิต่ำสูงขึ้น และความจุไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอีกด้วยที่แรงดันไบแอสย้อนกลับค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปข้างหน้าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็นนั้นหายไปชั่วขณะ



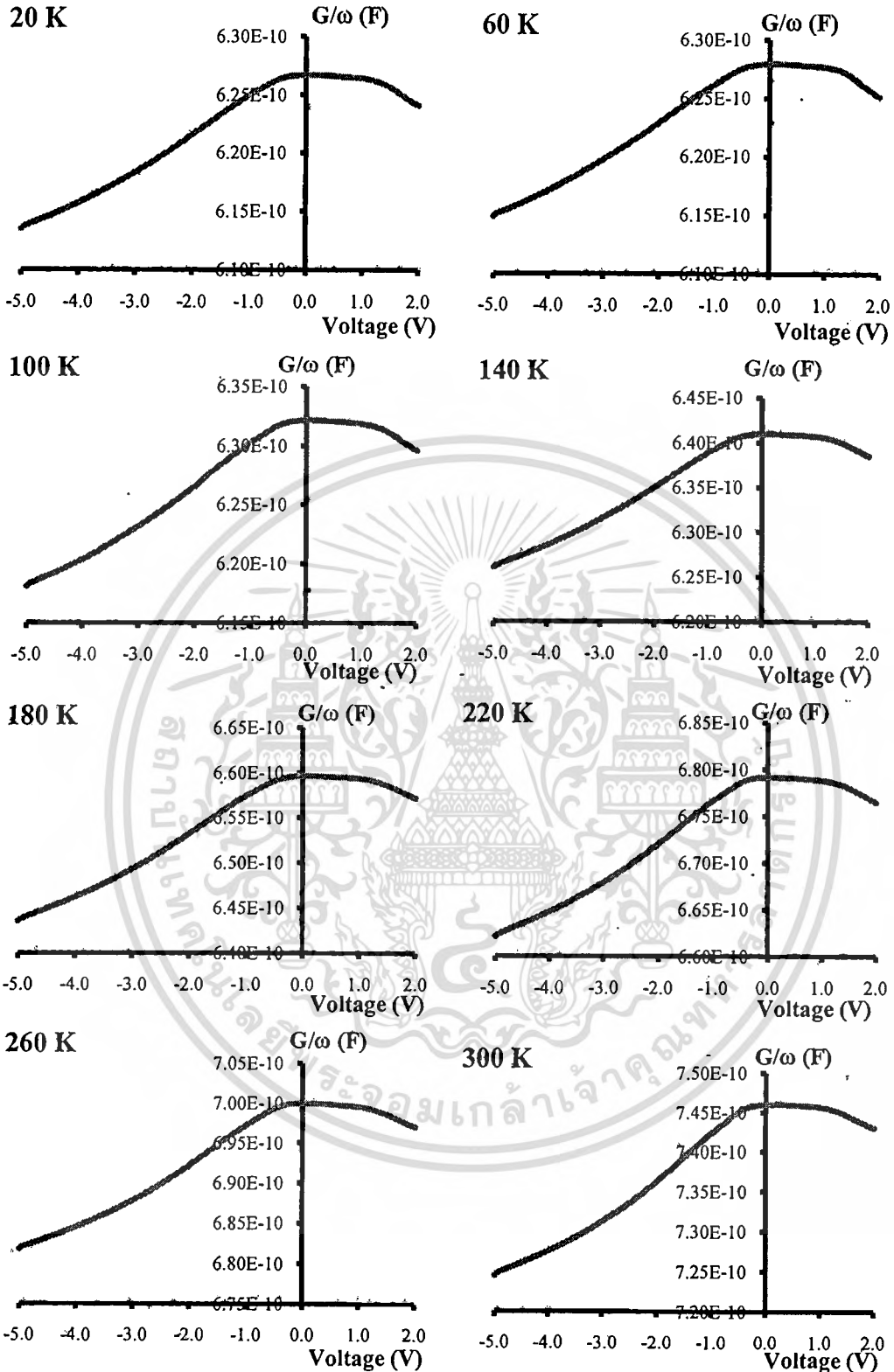
ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่

อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อ

วิธีพินธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย

ความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิพันธ์ ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของภาพที่ 4.26 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้างดภาพที่ 4.28 จะได้ความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเชิงเส้นและลากเส้นตรงมาตัดแกนแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดคือ V_i ซึ่งสามารถนำไปหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้และความชันสามารถนำมาใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อลดลง และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

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

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

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

แล้วแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) คือ

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

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้สามารถคำนวณได้จากความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของสมการที่ (4.17) คือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่วัดจากความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (Φ_{c-v}) ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้[13]

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

เมื่อ

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

$$N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (4.24)$$

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

มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ $0.165m_0$ ดังนั้น N_c ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าดังนี้คือ

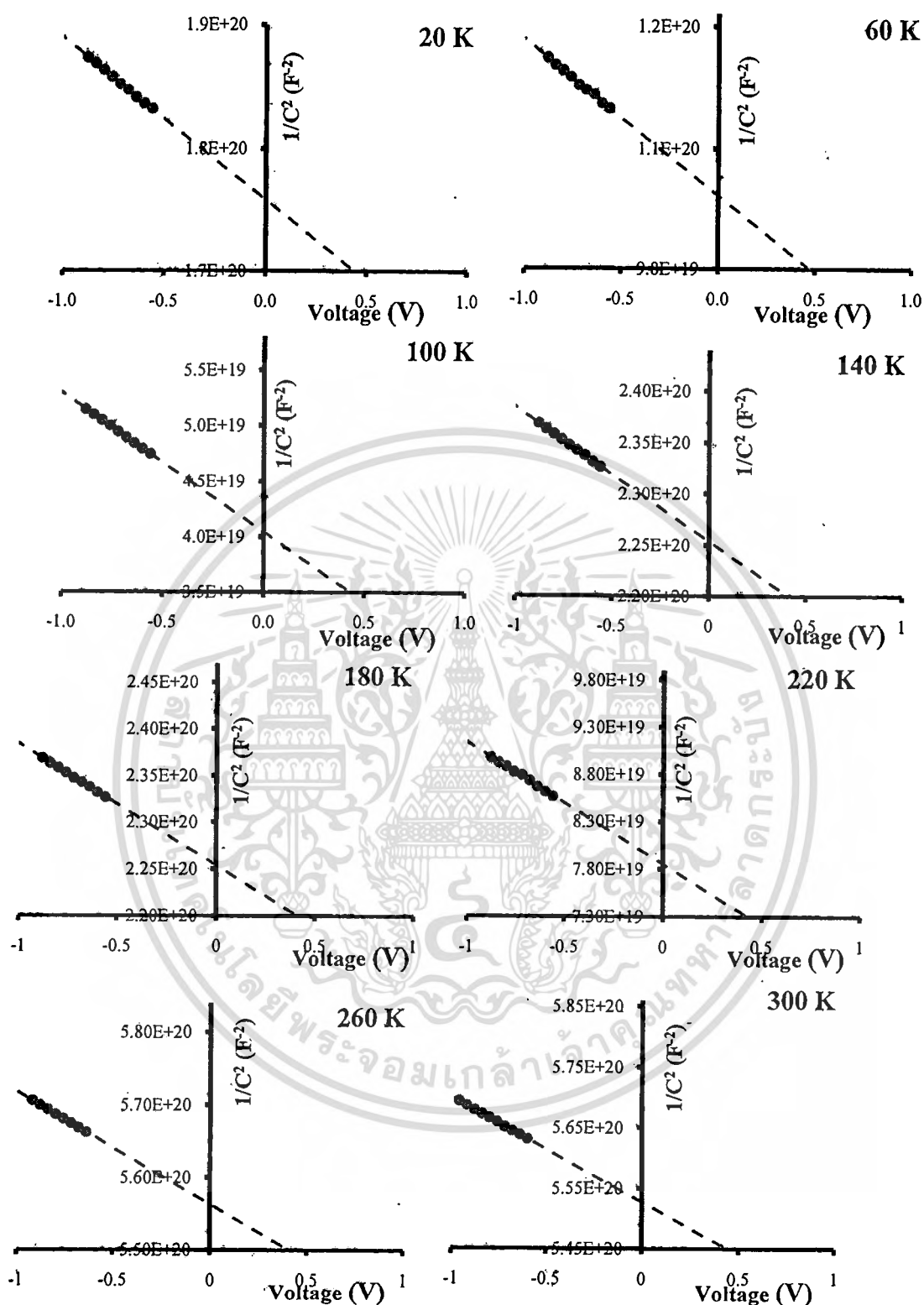
$$N_c = 3.24 \times 10^{14} T^{3/2}$$

ทั้งค่า N_d และ N_c จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

จากนั้นสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวินสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [14]

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

ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบนำ (N_c) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.30 การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ เป็นเงื่อนไขกำหนดให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบนราบซึ่งขจัดปัญหาการไกฟิลด์อิมิสชันและผลของชอตต์กีได้ รวมทั้งลดอิทธิพลของความสูงของกำแพงศักย์เอนกพันธุ์ตลอดทั่วผิวสัมผัส



ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ

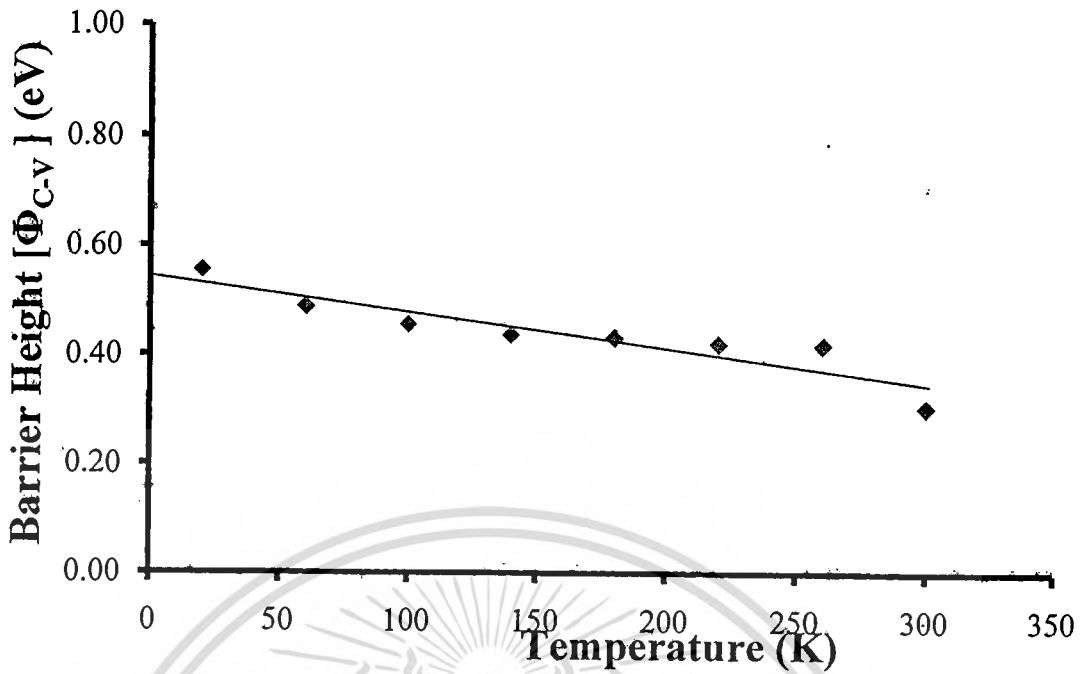
สุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

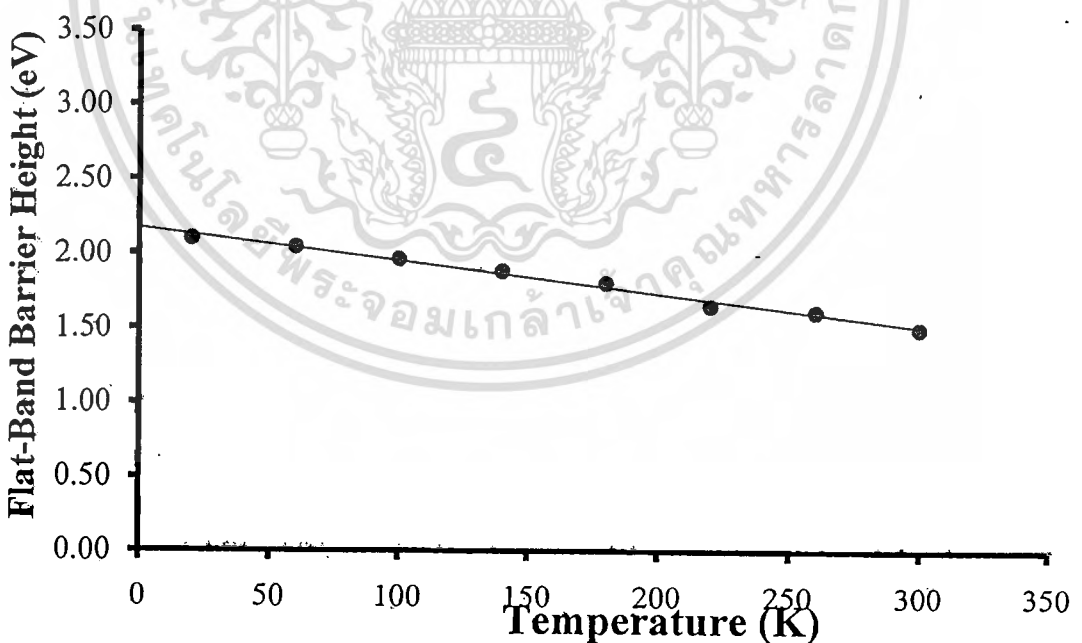
จากภาพที่ 4.28 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 0.393 โวลต์ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากการศึกษาสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน และมีความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เท่ากับ 2.45×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการทดลองทั้งหมดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) แรงดันตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_{C-V}) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ (Φ_{Br}) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินโดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

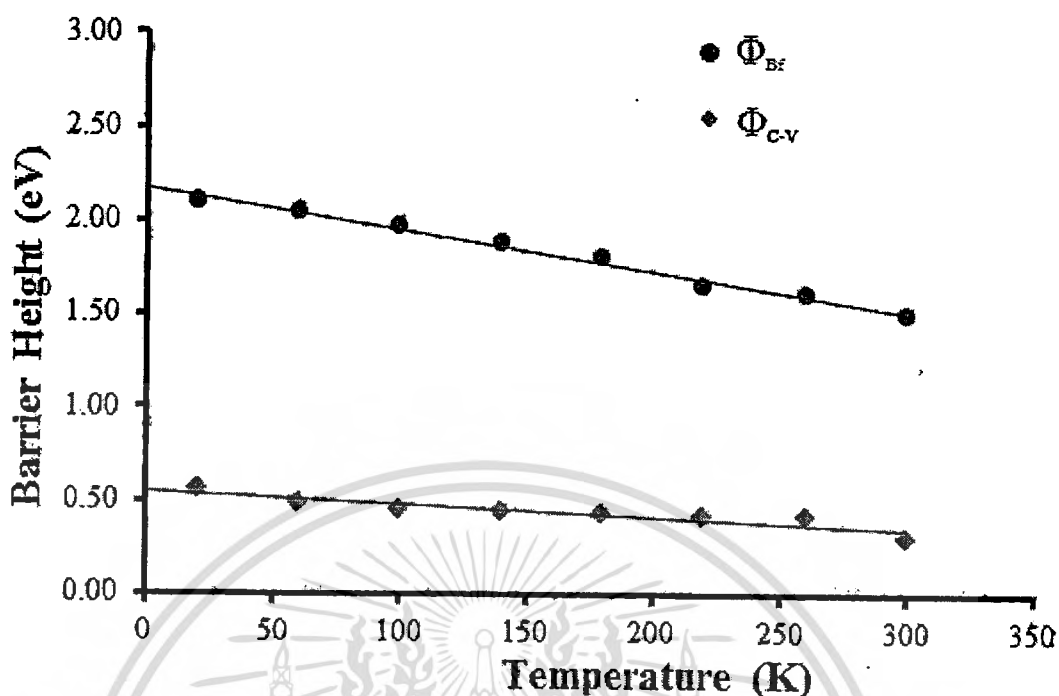


ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบกับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ (Φ_{C-V}) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ (Φ_{Br}) กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากราฟของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -2 ถึง 2 โวลต์ นั้นมีลักษณะเป็นกราฟระฆังคว่ำตามแบบพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุแบบรอยต่อพีเอ็น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้านั้นลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้นตามภาพที่ 4.33 เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้นกับดักประจุจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้น้อย ส่วนภาพที่ 4.34 นั้นจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับแรงดันซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ที่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ไปจนถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์นั้น มีลักษณะเป็นกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระฆังคว่ำแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการไบแอสตรงรอยต่อวิวิธพันธุ์จะสามารถนำกระแสได้ดีขึ้น ความนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร (R_s) จะลดลง สำหรับในขณะที่มีการไบแอสกลับทางกระแสในตัวย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรจะมีค่าลดลงตามไปด้วยดังที่แสดงในภาพที่ 4.35 อีกทั้งจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ G/ω - V จะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรอย่างมาก และในภาพที่ 4.35 จะเห็นว่าค่าความต้านทานอนุกรมายังขึ้นกับแรงดันไบแอสและความถี่ด้วย

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

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

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

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

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

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

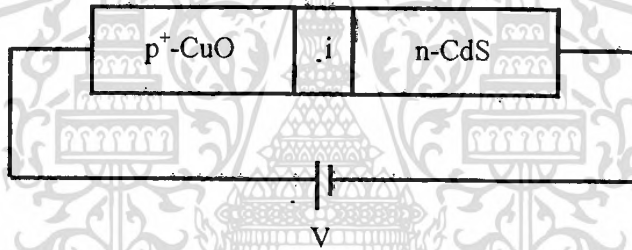
ซึ่ง $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega\tau_{it}=1.98$

และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ได้จากความสัมพันธ์

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

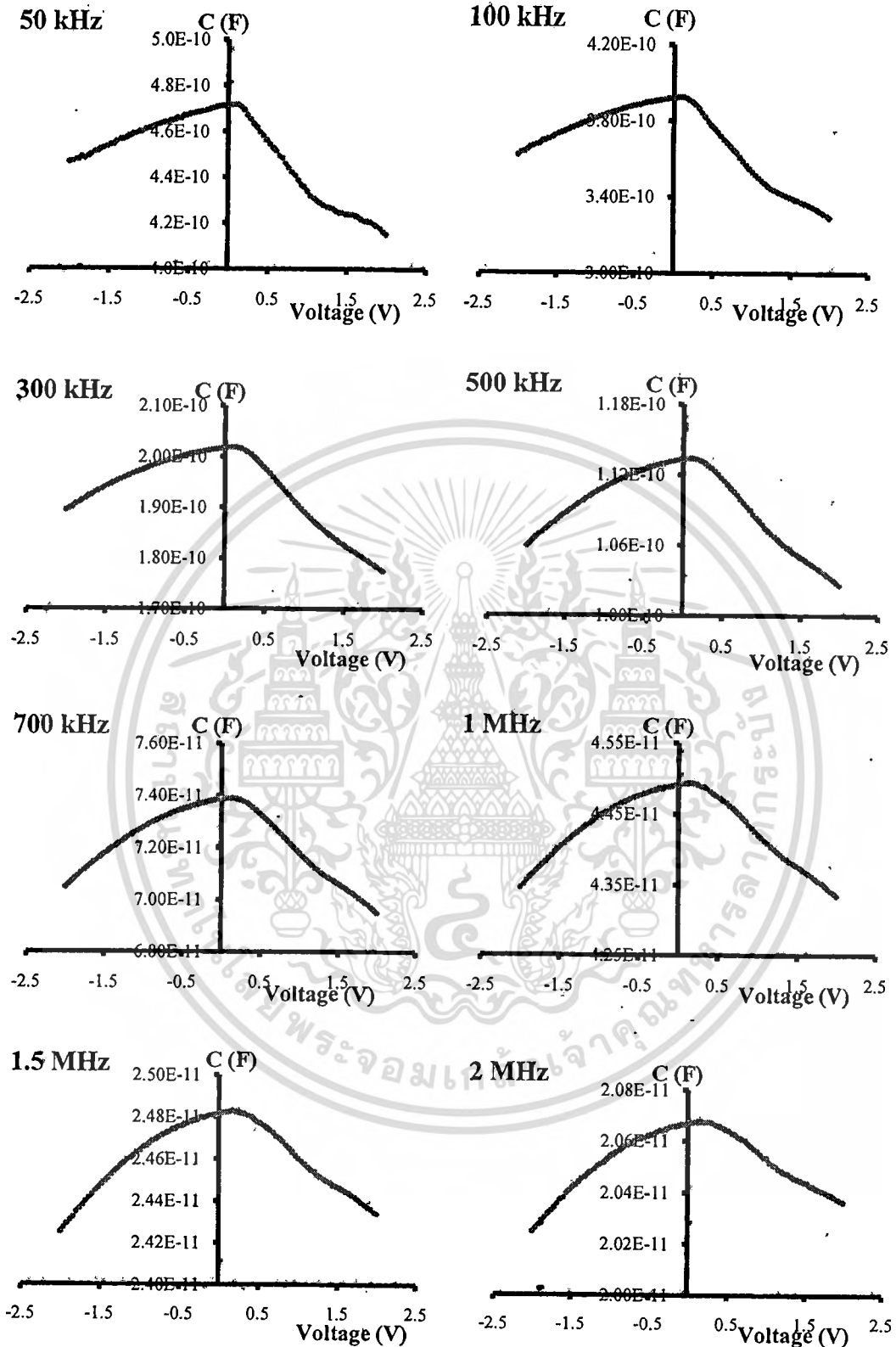
ที่ G_{acc} คือความนำไฟฟ้าในบริเวณขุมนุมาพาหะ

C_{acc} คือความจุไฟฟ้าในบริเวณขุมนุมาพาหะ



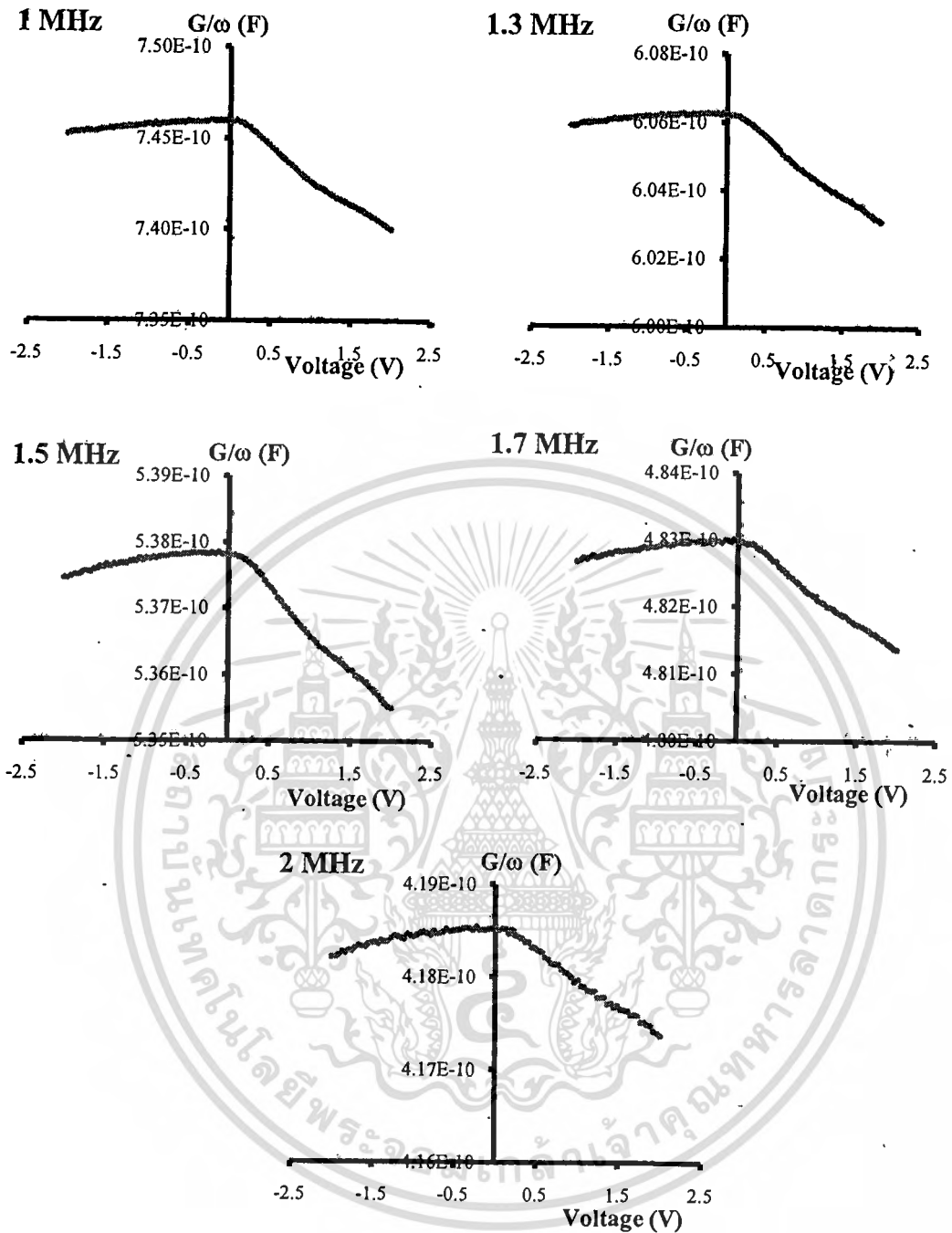
ภาพที่ 4.32 แสดงแผนภาพรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในบริเวณขุมนุมาพาหะ โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีชั้นอินทรินสิก(i) ของสารกึ่งตัวนำ CuO ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ

กรณีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในบริเวณขุมนุมาพาหะจะเกิดเมื่อแรงดันที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ p-CuO เป็นไฟบวก (+) ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับ แรงดันไฟฟ้าแสดงไว้ในภาพที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าสูงสุดจากภาพที่ 4.33 ภาพที่ 4.34 และภาพที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4.29) ค่าความต้านทานอนุกรมลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ามีก็จะลดลงด้วย

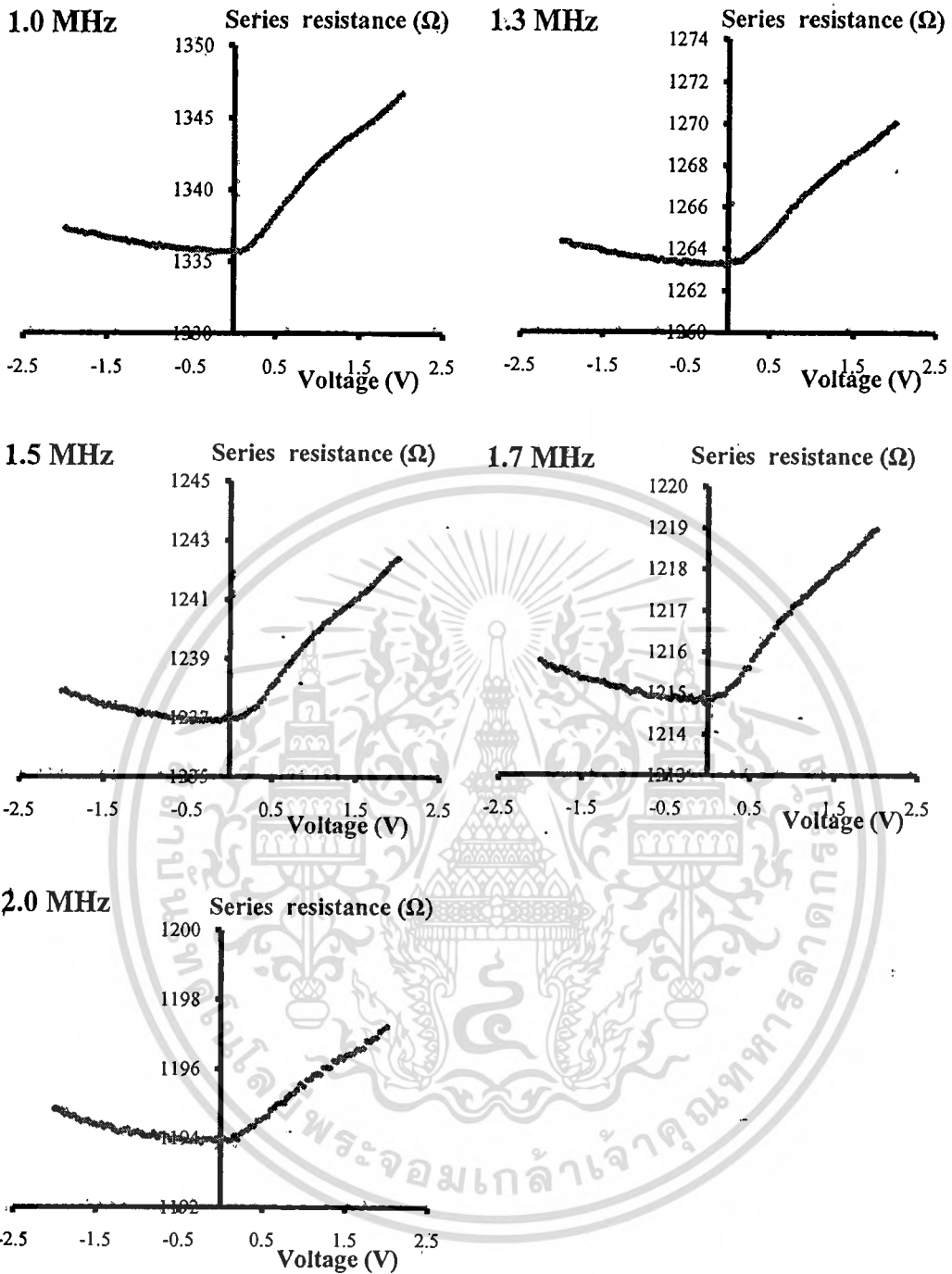


ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์และที่อุณหภูมิ 300เคลวินของรอยต่ออวิวิหพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuOซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน

ในระบอบสุญญากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า (G/ω) กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



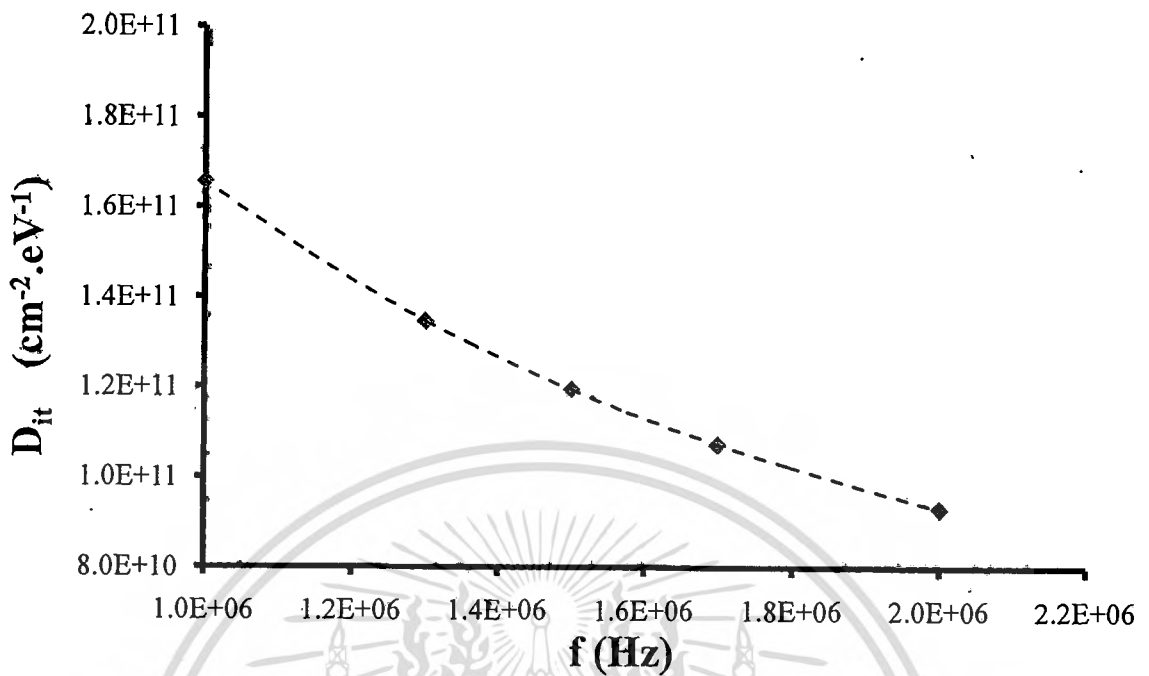
ภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์และที่อุณหภูมิ 300 เคลวินของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความหนาแน่นของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.36 นอกจากนี้ในตารางที่ 4.5 ยังแสดงค่าของค่าความจุไฟฟ้าและค่า G_m/ω สูงสุด ซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ กล่าวคือเมื่อมีค่าความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สถานะกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนอง โดยการจับและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด ดังนั้นความหนาแน่นของกับดักประจุจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) ความจุไฟฟ้าสูงสุด (C_m) ความนำไฟฟ้าสูงสุด (G_m/ω) ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และค่าความต้านทาน (R_s) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์และที่อุณหภูมิ 300 เคลวินของรอยต่อวิธีพ่นชั้นของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับความถี่ที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.38 และภาพที่ 4.44 พบว่าในกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูง ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูง พบว่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย

จากนั้นจึงทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ดังภาพที่ 4.39 ถึงภาพที่ 4.43 และความนำไฟฟ้ากับความถี่จากภาพที่ 4.45 ถึงภาพที่ 4.49 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่แรงดันศูนย์โวลต์ไปจนถึงแรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 0.5 โวลต์จะมีค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าสูงที่สุด จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าก็จะลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -0.5 โวลต์ โดยขึ้นกับสมการความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเชื่อมต่อกันว่าเมื่อมีระดับพลังงานของกับดักประจุมีเพียงค่าเดียว (single trap)

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

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

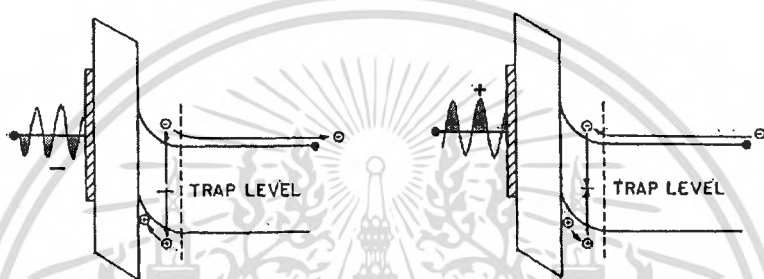
และถ้ากรณีที่เกิดกับดักประจุมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

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

เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C_{it} คือความจุไฟฟ้าของกับดักประจุ

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

พฤติกรรมการจับและคายประจุของตัวเก็บประจุภายในบริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นจะเป็นดังภาพที่ 4.37 กล่าวคือ เมื่อมีสัญญาณไฟลปที่มีค่าความถี่ต่ำเข้ามาสู่รอยต่อ แบบ MIS อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกับดักประจุจะถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกจากกับดักประจุแล้วเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะ และจะเหนี่ยวนำให้โฮลมาชุมนุมกันที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และเมื่อได้รับสัญญาณไฟบวกเข้ามาอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะจะถูกดึงเข้ามาอยู่กับดักประจุในบริเวณพร่องพาหะส่วน โฮลที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำจะถูกผลักกลับไปสู่กับดักประจุเช่นเดิม โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ไปมาอยู่เสมอเมื่อมีการจ่ายสัญญาณไฟสลับที่มีค่าความถี่ต่ำให้กับรอยต่อ



ภาพที่ 4.37 แสดงการจับและคายประจุของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ

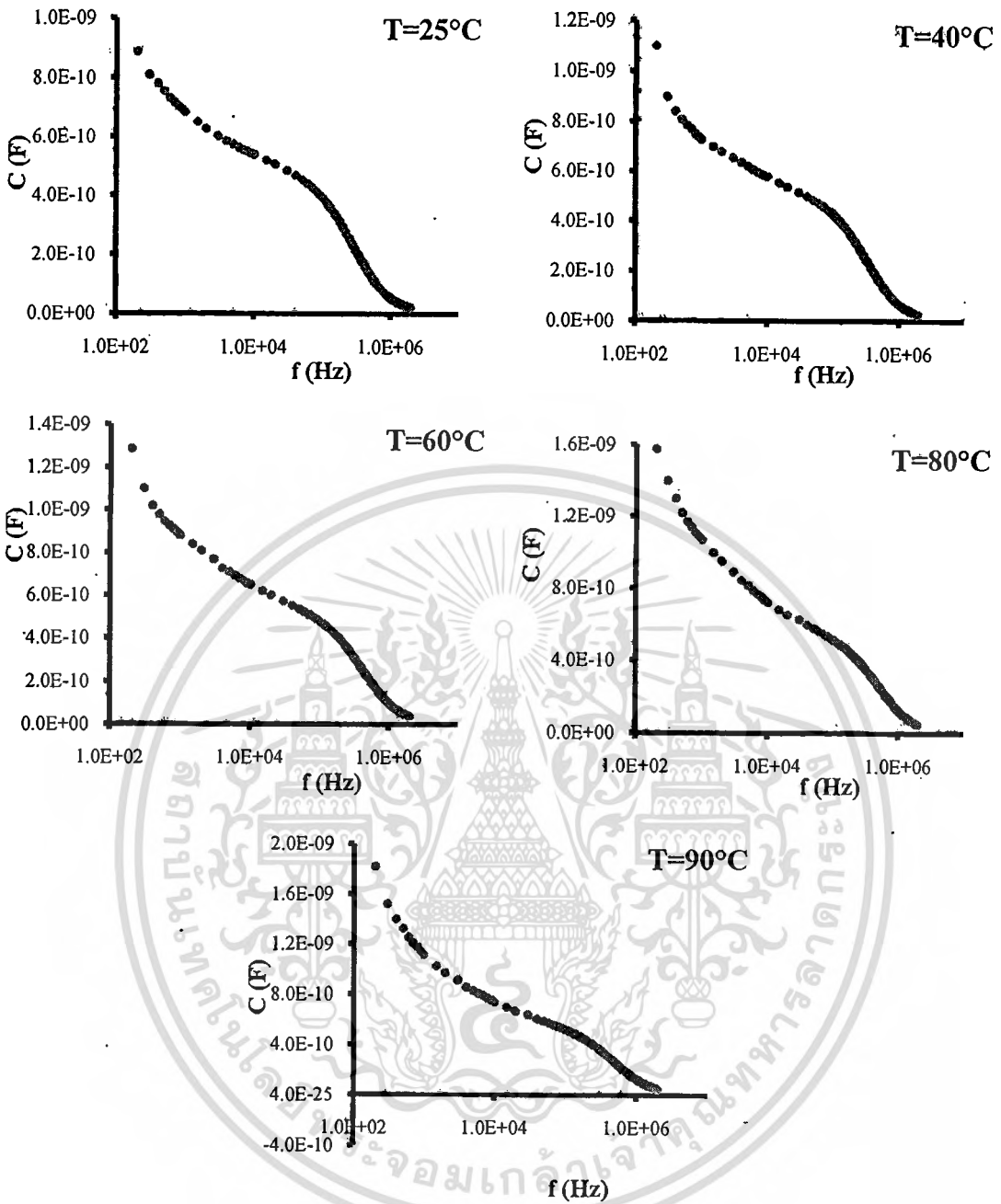
จากภาพที่ 4.44 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่พบว่าความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ จอนเซอร์ (Joncher relation) [31] คือ

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

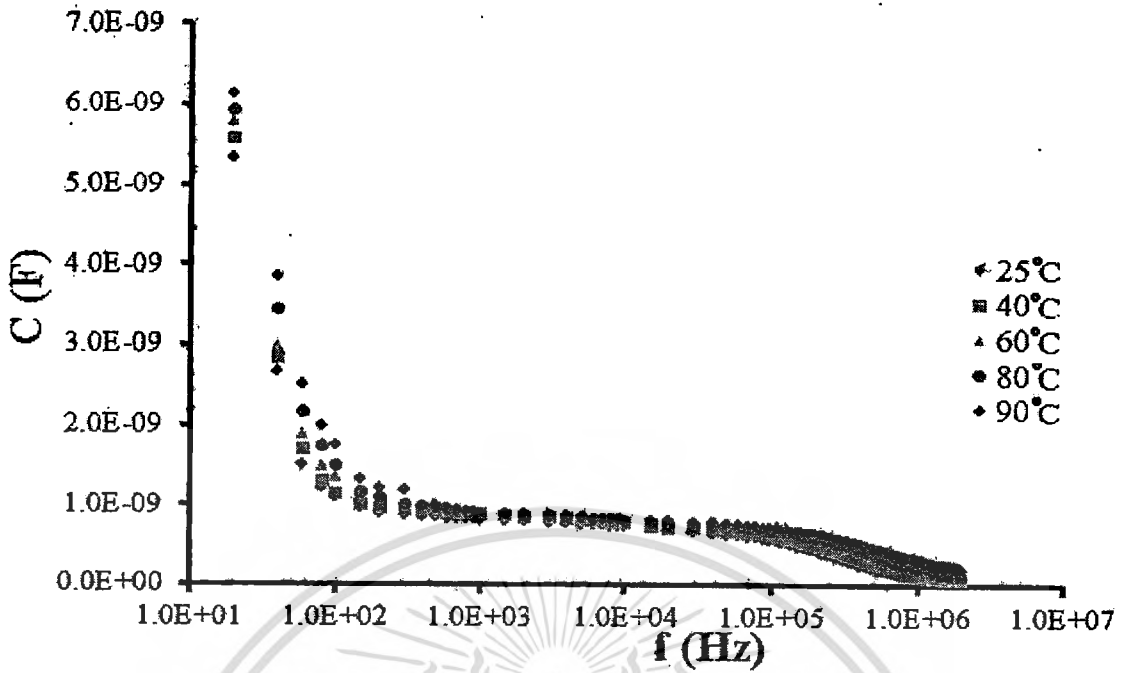
เมื่อ A คือค่าคงที่ ส่วนเลขยกกำลัง s จะมีค่าน้อยกว่า 1 และนอกจากนี้เมื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟของค่า G/ω กับความถี่ดังภาพที่ 4.50 ถึง ภาพที่ 4.54 ก็ยังคงแสดงให้เห็นช่วงของการตอบสนองของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ความถี่เป็นสองช่วงได้อย่างชัดเจน โดยค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุ (ω_0) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

การหาค่าความถี่เฉพาะ (ω_0) นอกจากความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่แล้วก็ยังสามารถหาได้หลายวิธีด้วยกัน โดยเริ่มจากการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับลอการิทึมของความถี่เชิงมุมจะทำให้ช่วงจุดเปลี่ยน โค้งของค่าความจุกลายเป็นจุดสูงสุดของภาพที่ 4.58 ถึง ภาพที่ 4.62 ซึ่งค่า ω_0 ที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 4.6

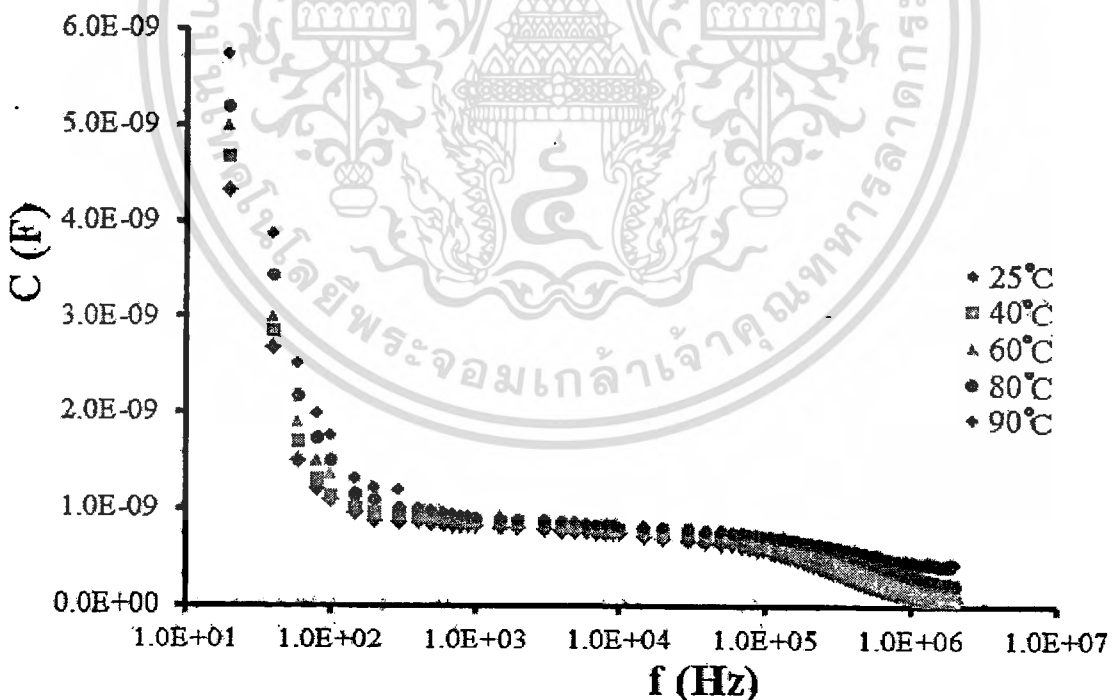
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

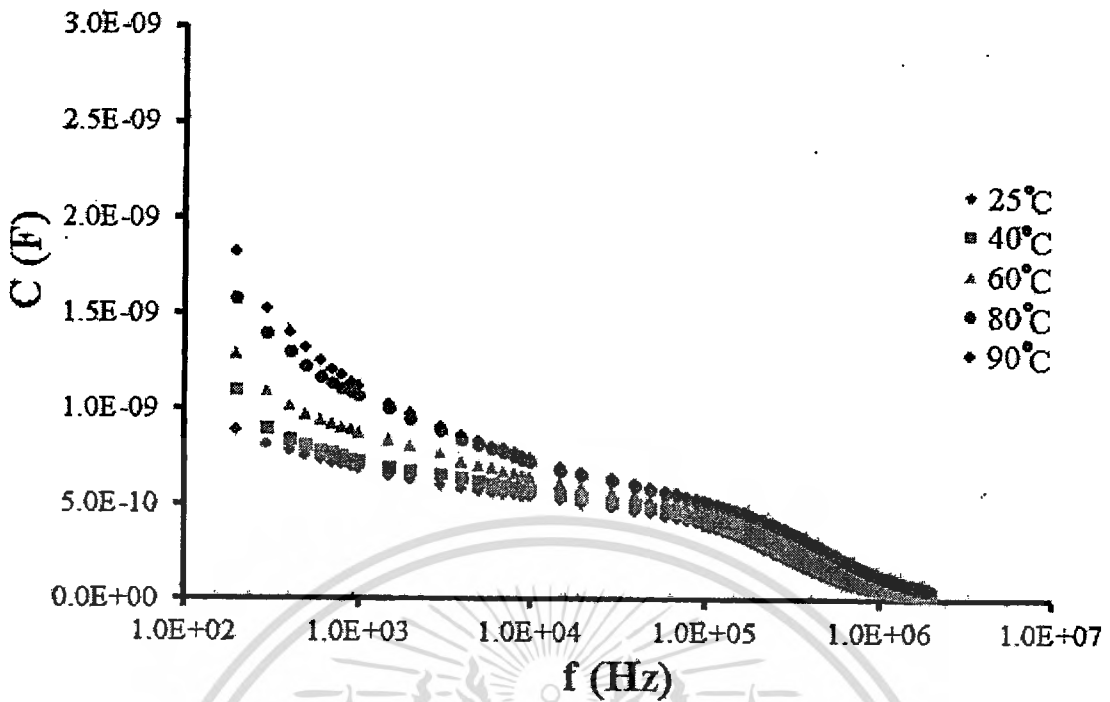


ภาพที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

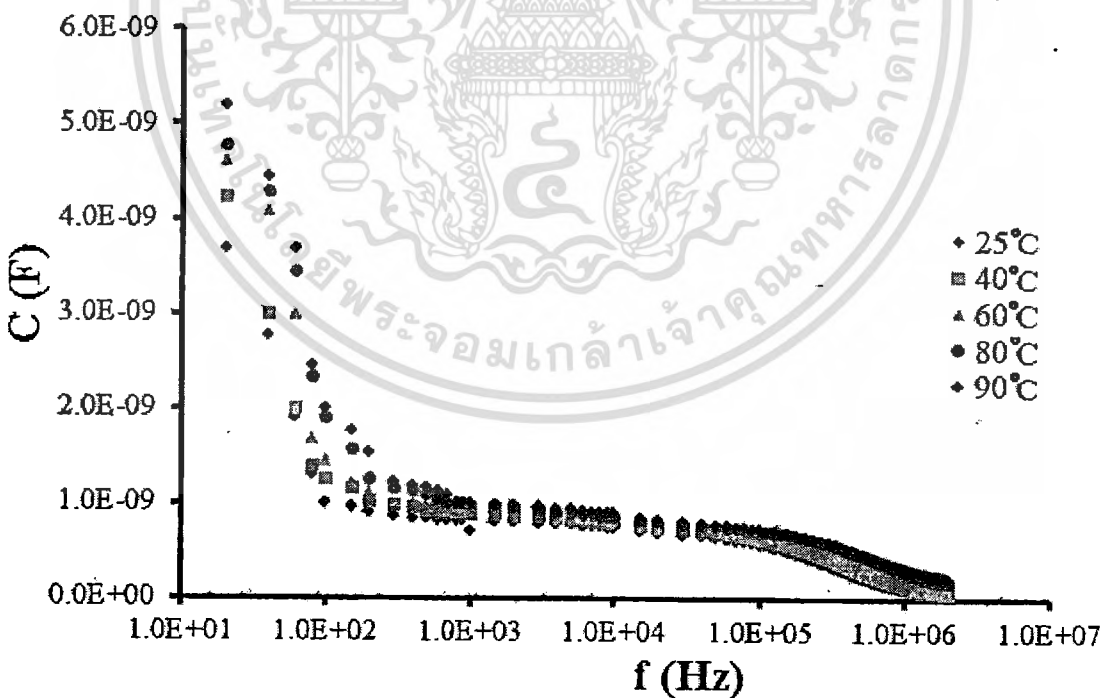


ภาพที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

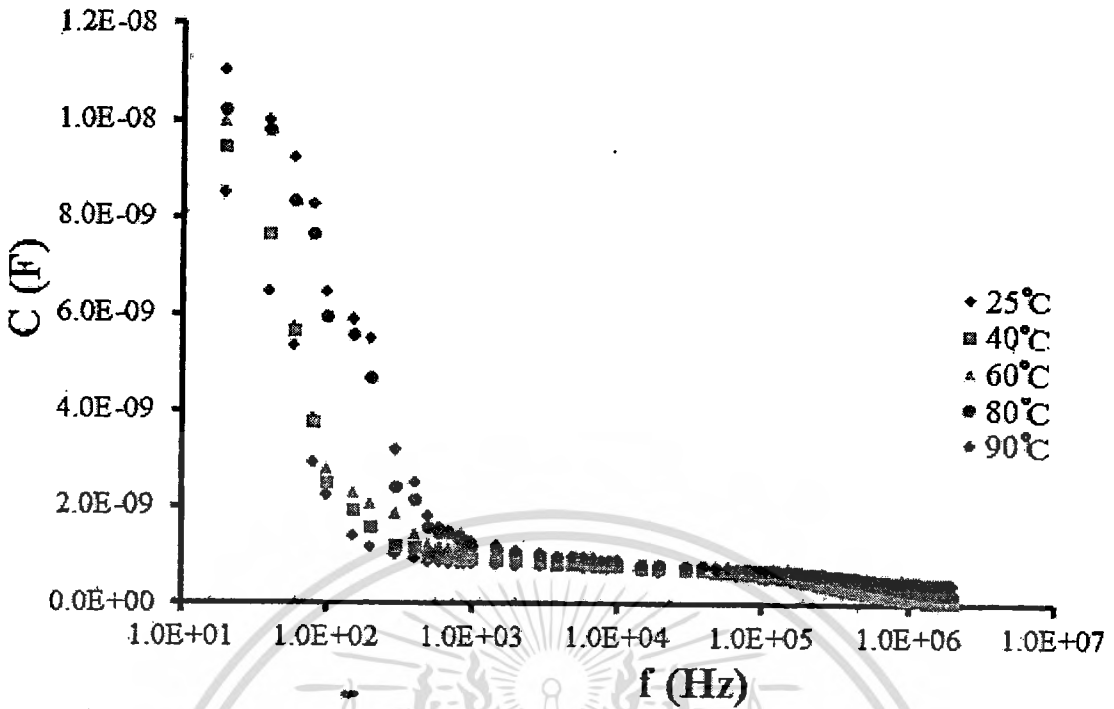
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



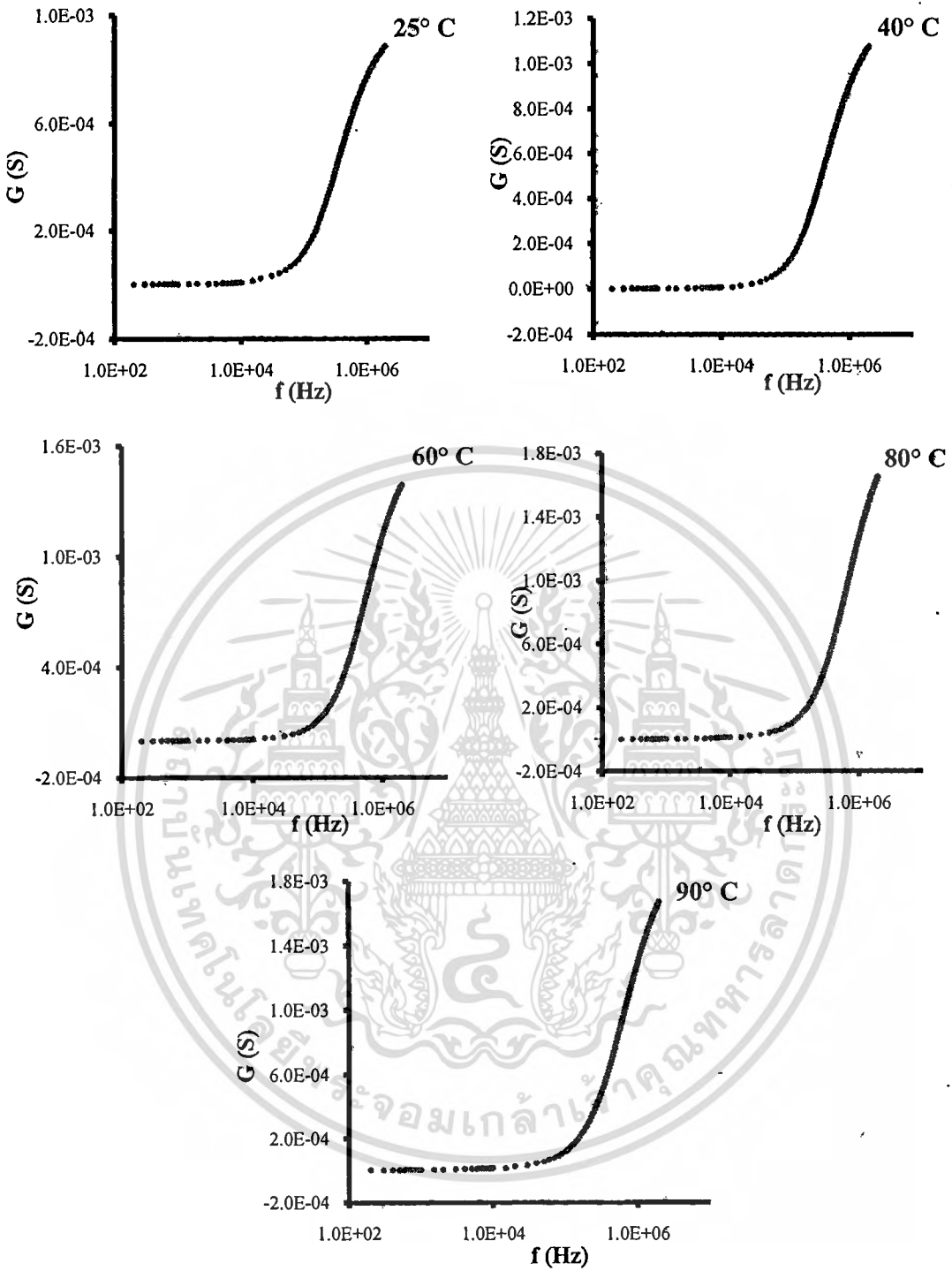
ภาพที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

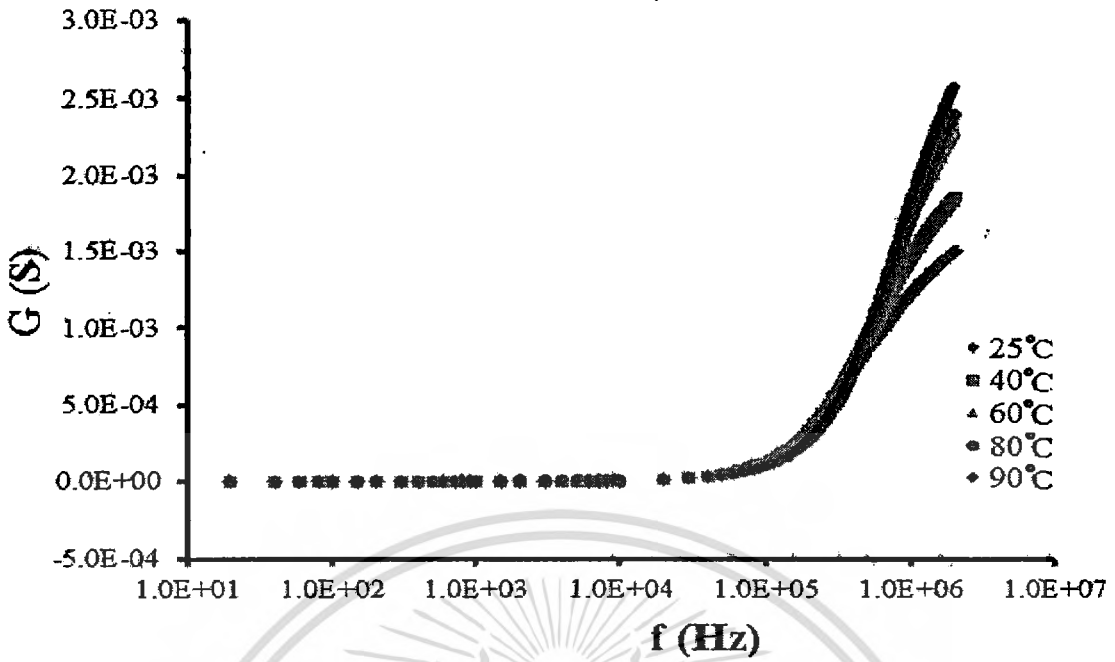


ภาพที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

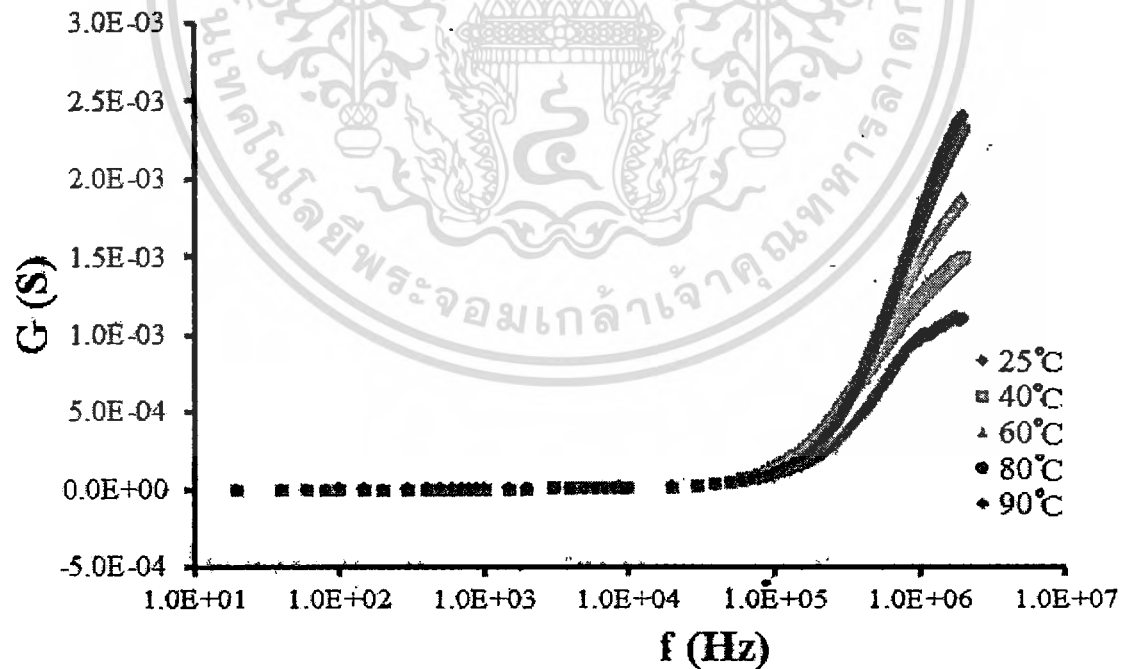


รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออิวริทพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

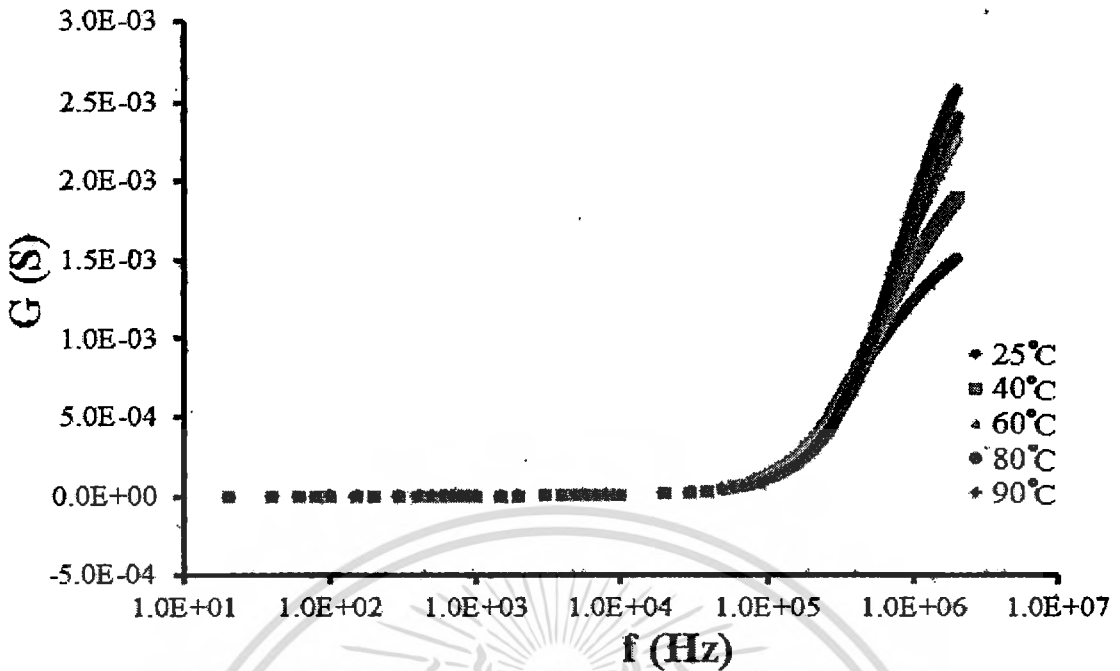
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



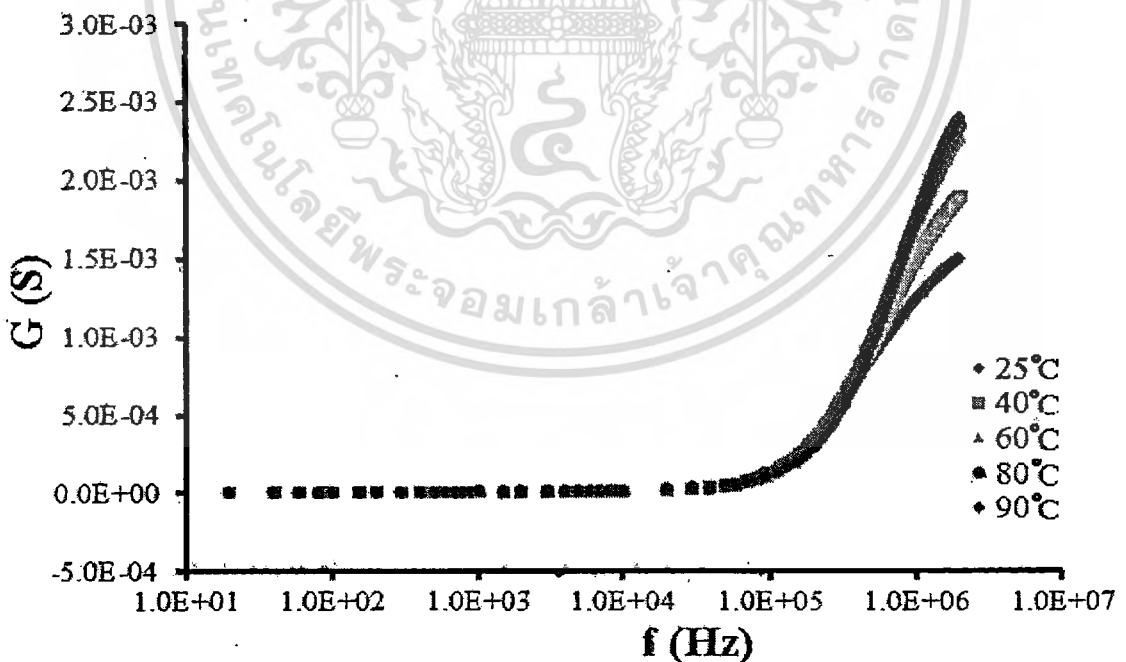
ภาพที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และ ทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และ ทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

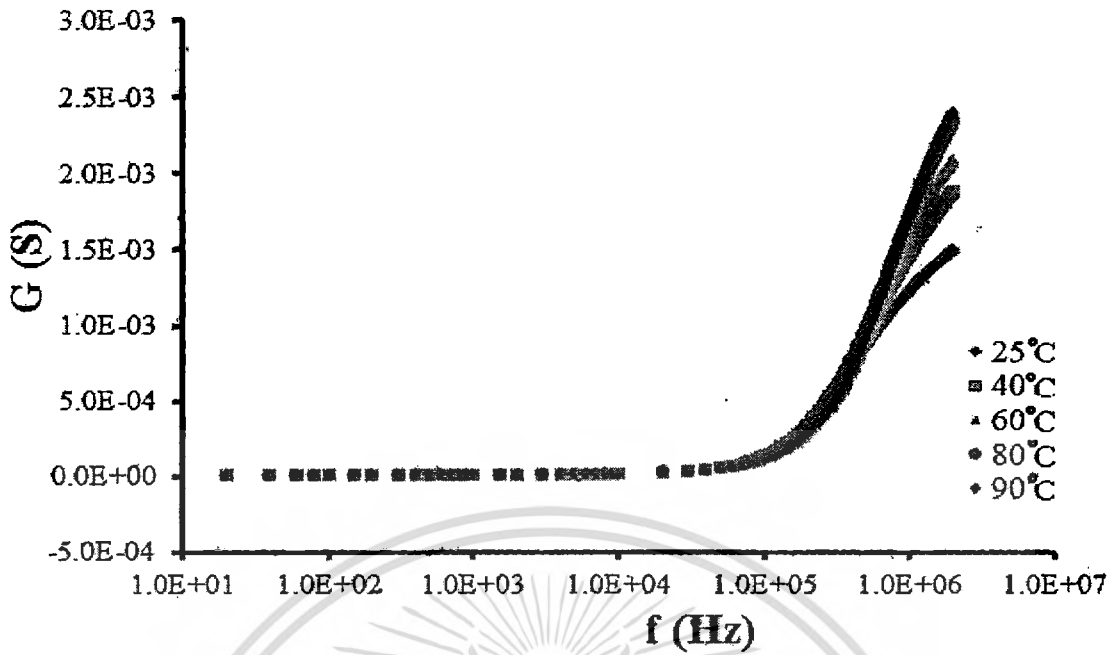


ภาพที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และ ทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำ การวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-

เอกสารนี้เป็นเอกสารของ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ดำเนินการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และ ทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์– 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่อนำเอาข้อมูลของความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาหารด้วยความถี่เชิงมุม ($2\pi f$) แล้วนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์กับความถี่ที่มีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ดังภาพที่ 4.50 ถึง ภาพที่ 4.54 จะเห็นว่ากราฟของค่า G/ω จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำในช่วงความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ส่วนในช่วงที่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์นั้นจะเป็นเส้นโค้งลงเชื่อมต่อกับหางของกราฟระฆังคว่ำ โดยจุดสูงสุดของกราฟระฆังคว่ำนั้นหมายถึงจุดที่มีค่าความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ทำให้พาหะ สามารถหลุดออกจากกับดักได้ หรือจะอธิบายได้อีกอย่างว่า ณ จุดความถี่ที่เกิดค่า G/ω สูงสุดนั้น คือความถี่ที่สอดคล้องกับพลังงานที่สัญญาณไฟสลับลูบสูญเสียไปเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุซึ่งจะนำมาใช้ในการหาความหนาแน่นของกับดักและช่วงชีวิตของพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆ ได้ซึ่งจะสัมพันธ์กับสมการที่ว่า

เมื่อกับดักประจุมีระดับพลังงานเพียงค่าเดียว (single trap)

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

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักได้จาก

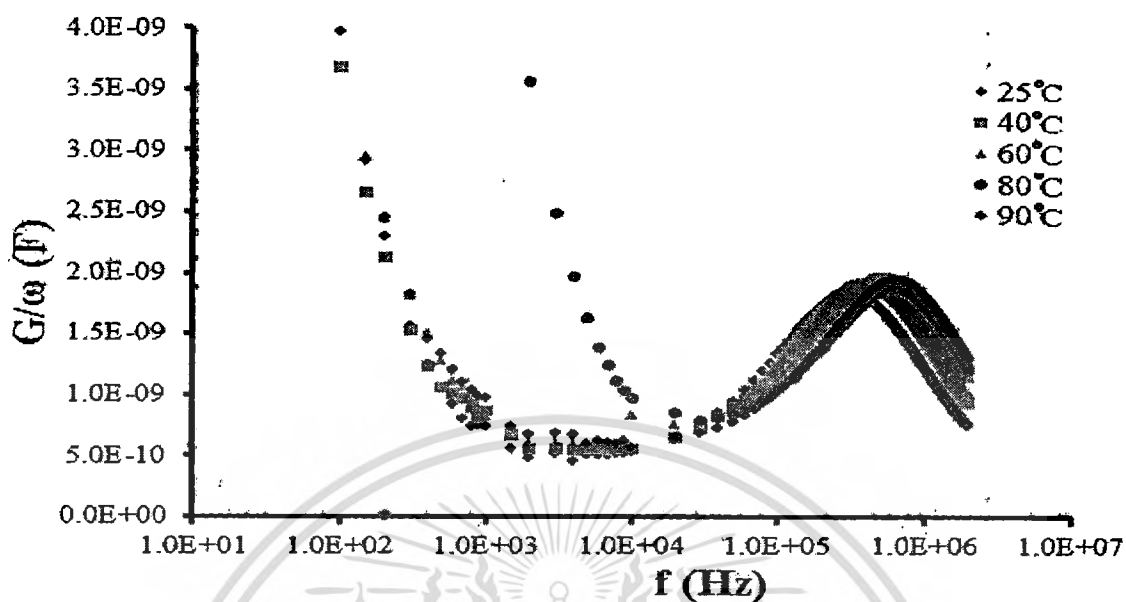
$$D_{it} = \frac{2}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (4.34)$$

และถ้ากรณีที่กับดักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

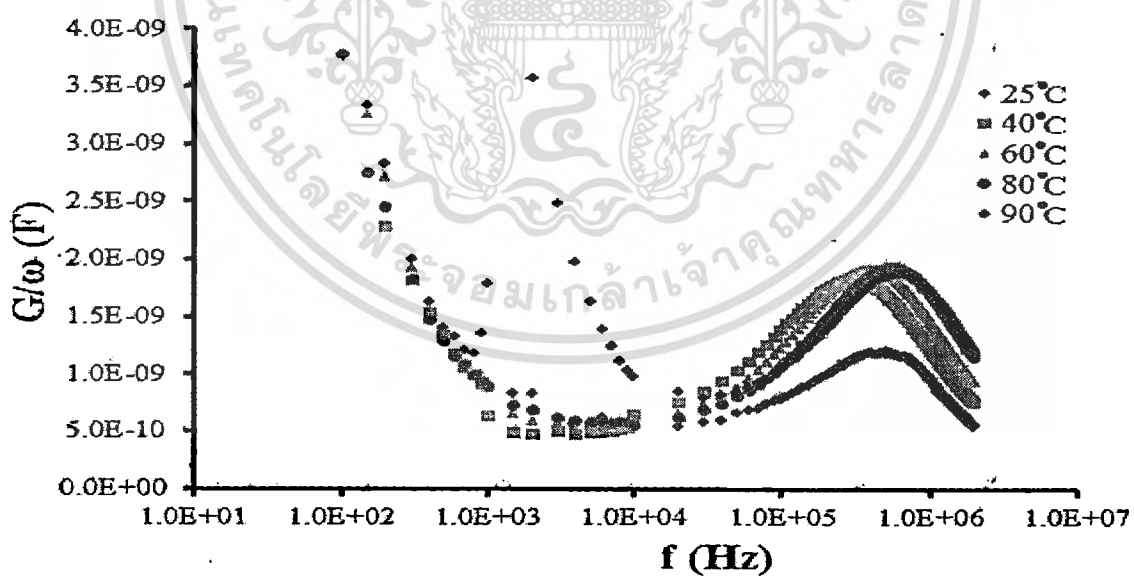
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2)}{2\omega \tau_{it}} \quad (4.35)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักได้จาก

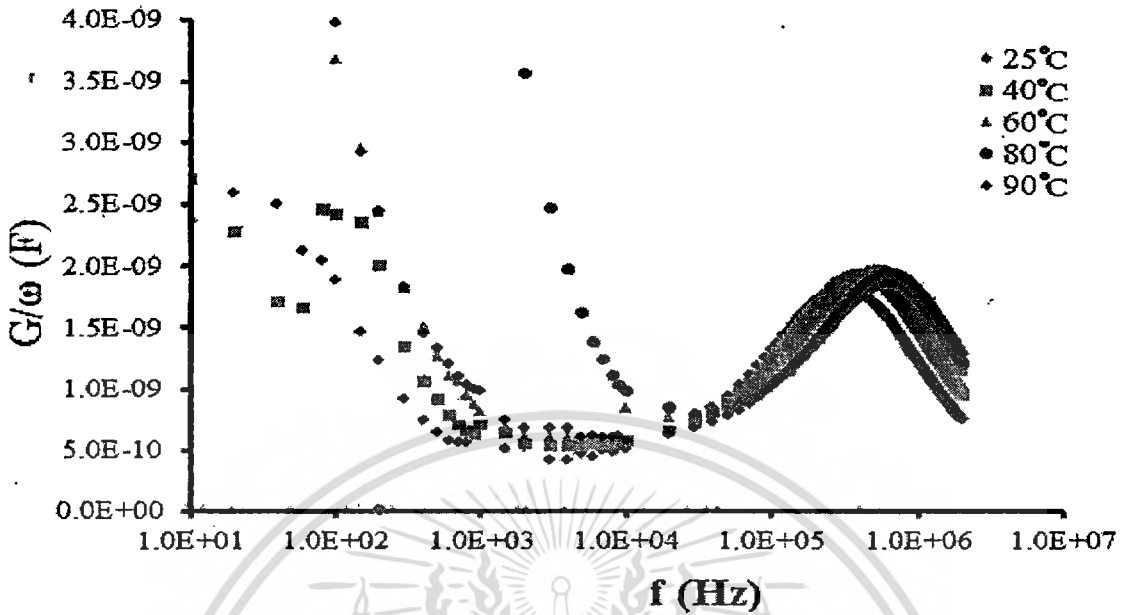
$$D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (4.36)$$



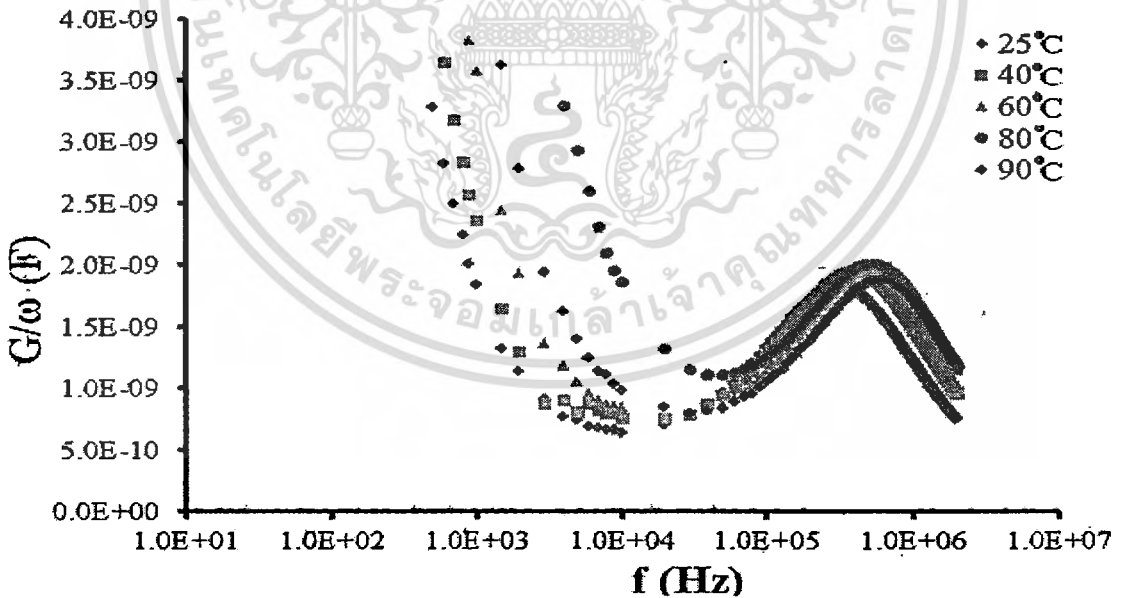
ภาพที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



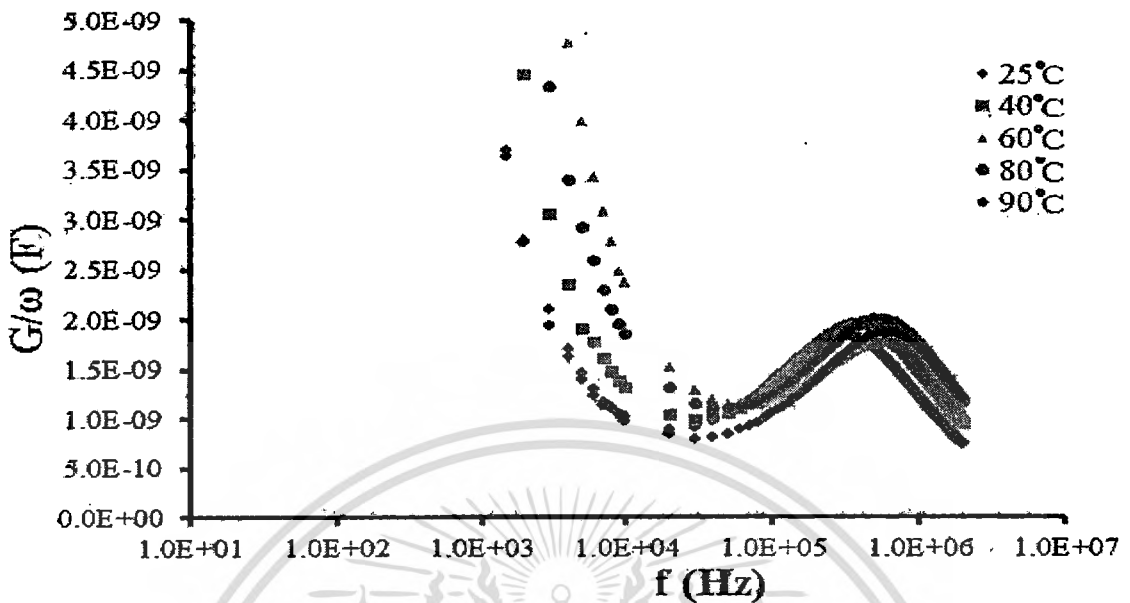
ภาพที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



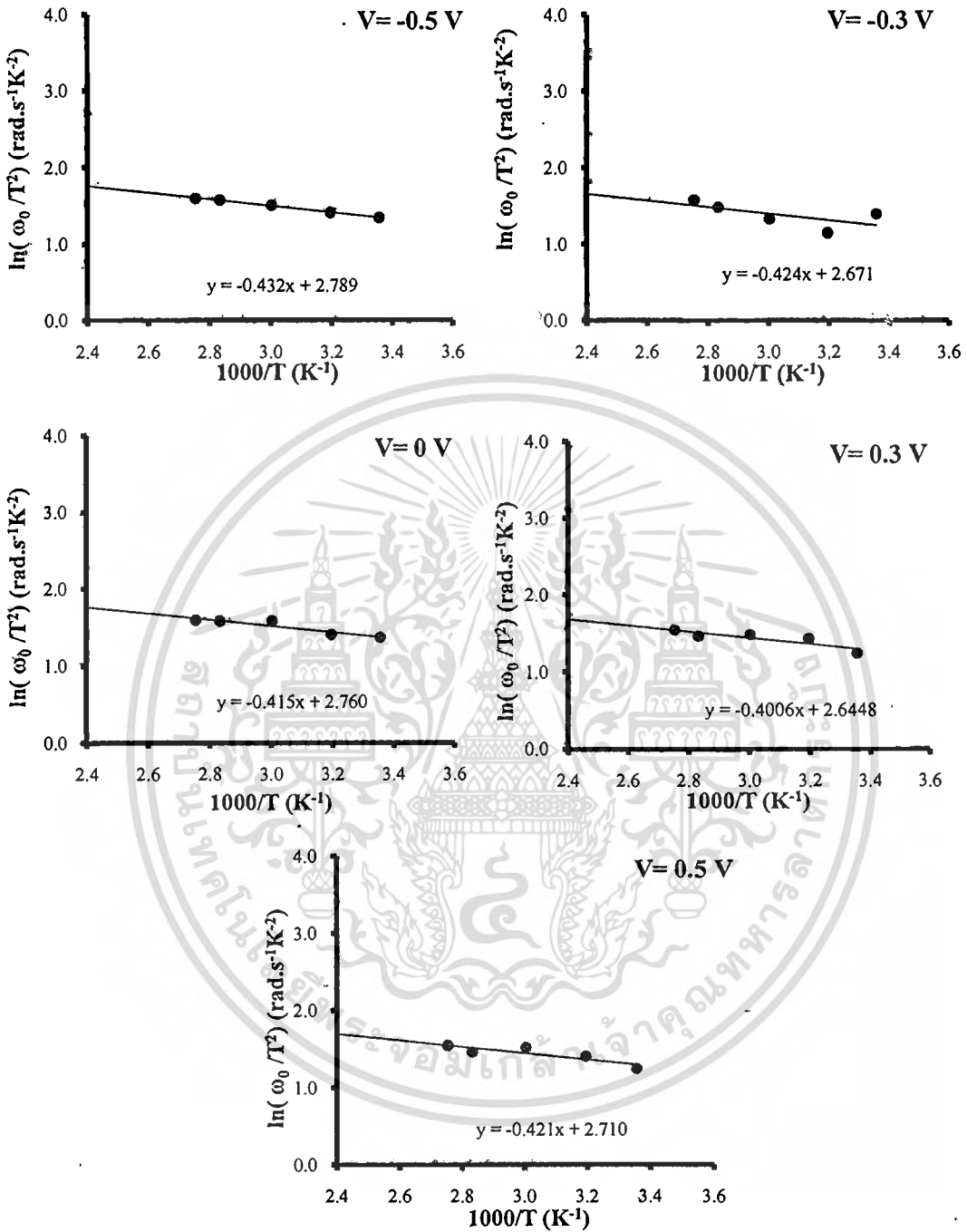
ภาพที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

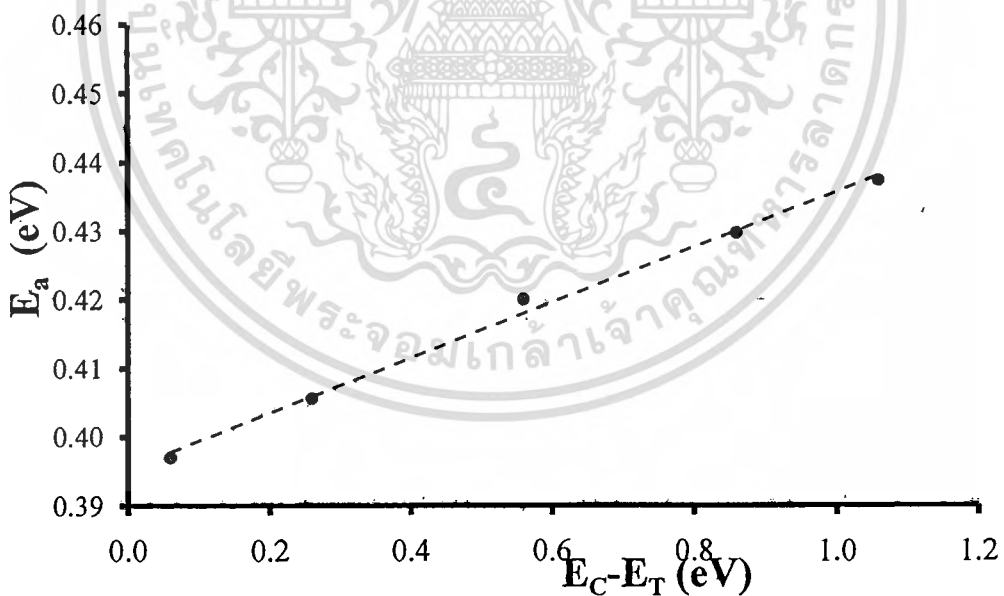


ภาพที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

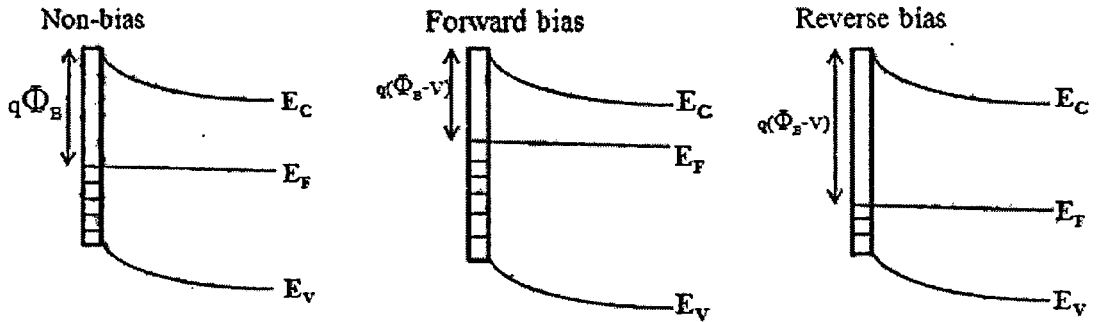
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า E_C-E_T ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่าความหนาแน่นของกับดักที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสโดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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



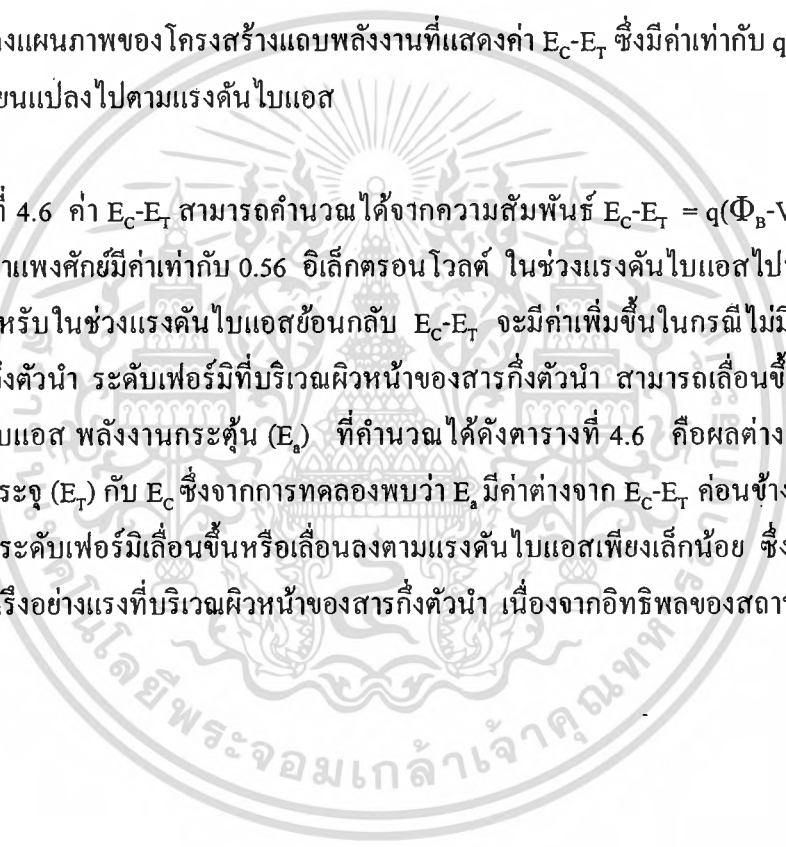
ภาพที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_a กับ E_C-E_T ที่ได้จากการหา ω_0 จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

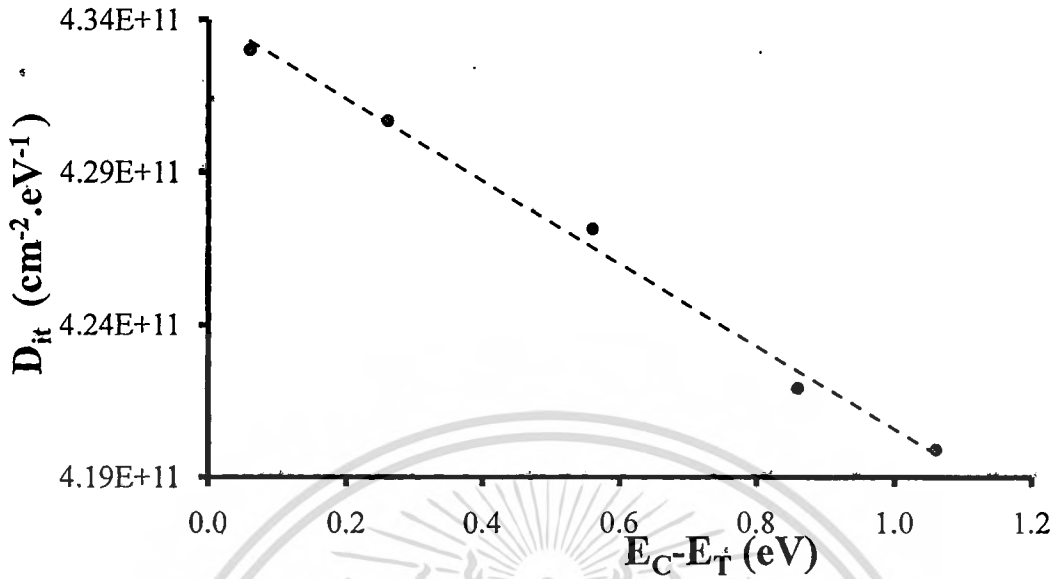
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



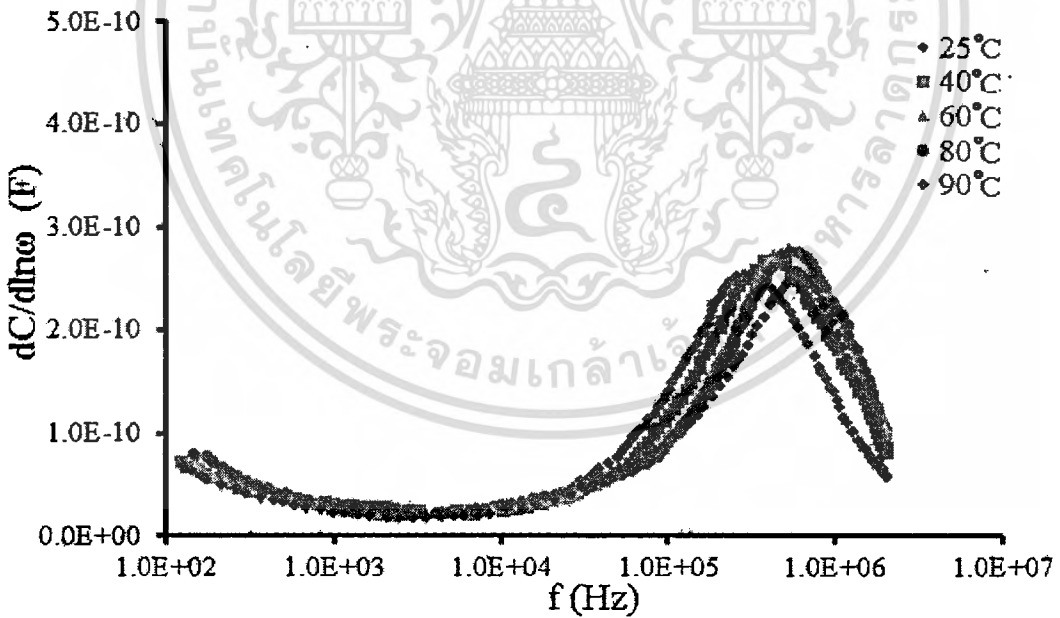
ภาพที่ 4.57 แสดงแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานที่แสดงค่า $E_C - E_T$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $q(\Phi_B - V)$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอส

จากตารางที่ 4.6 ค่า $E_C - E_T$ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $E_C - E_T = q(\Phi_B - V)$ เมื่อ Φ_B คือค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า $E_C - E_T$ จะมีค่าลดลง แต่สำหรับในช่วงแรงดันไบแอสย้อนกลับ $E_C - E_T$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีไม่มีกับดักประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ระดับเฟอร์มิที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ สามารถเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงได้ตามแรงดันไบแอส พลังงานกระตุ้น (E_g) ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.6 คือผลต่างระหว่างระดับพลังงานกับดักประจุ (E_T) กับ E_C ซึ่งจากการทดลองพบว่า E_g มีค่าต่างจาก $E_C - E_T$ ค่อนข้างมาก แสดงว่า ในความเป็นจริงระดับเฟอร์มิเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงตามแรงดันไบแอสเพียงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าระดับเฟอร์มิถูกตรึงอย่างแรงที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิทธิพลของสถานะผิวเชื่อมต่อ

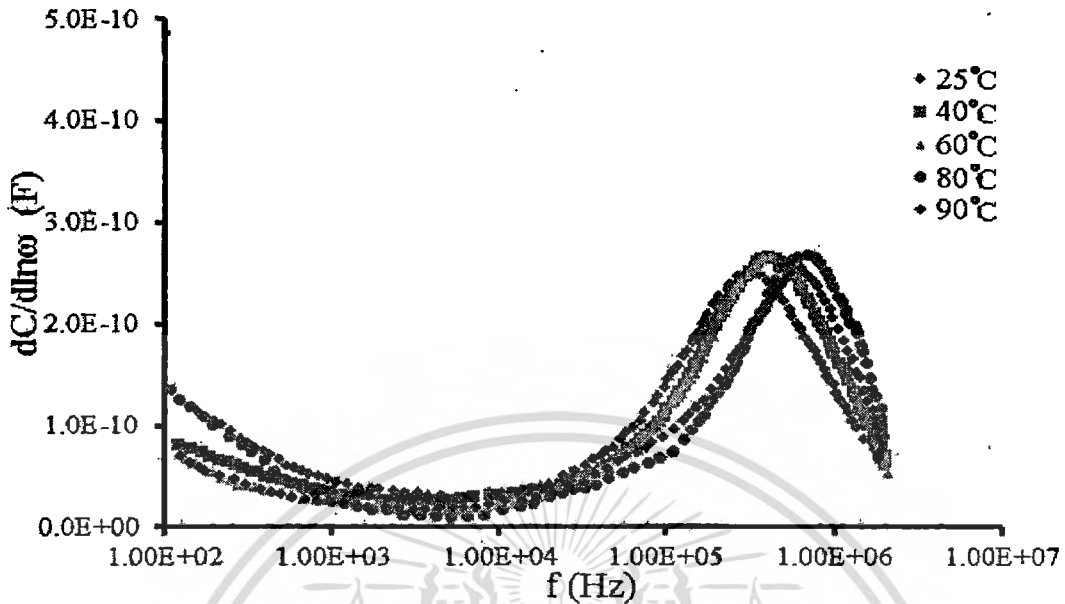




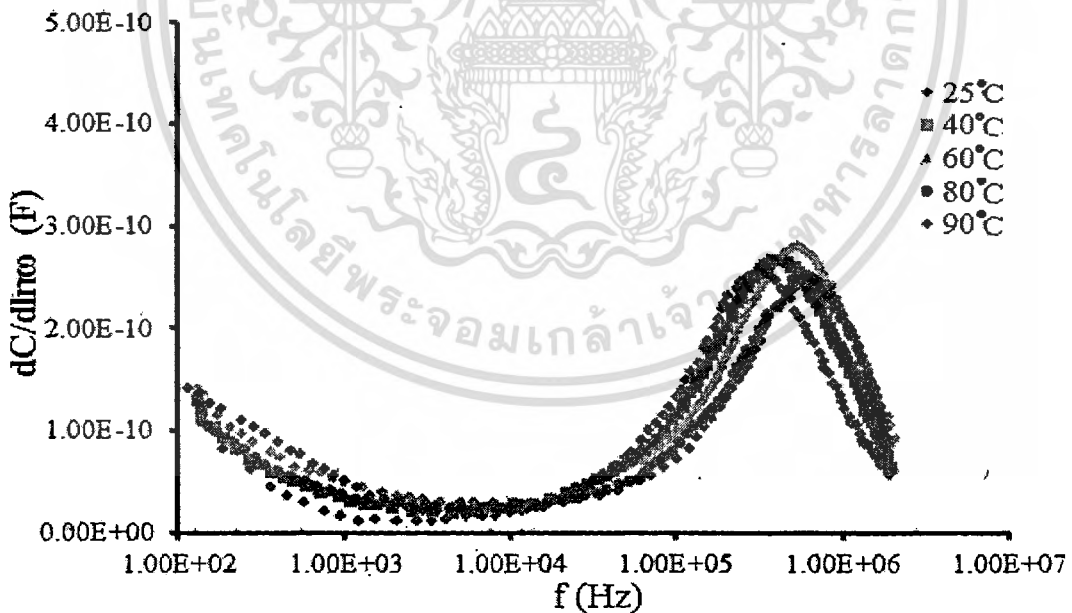
ภาพที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับ $E_C - E_T$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟ ความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



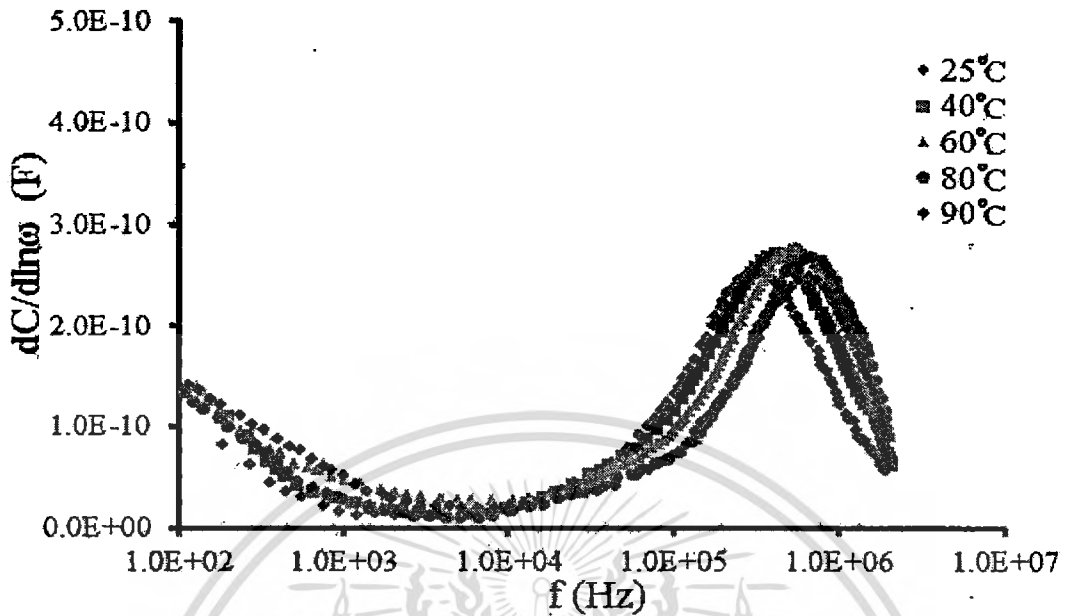
ภาพที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



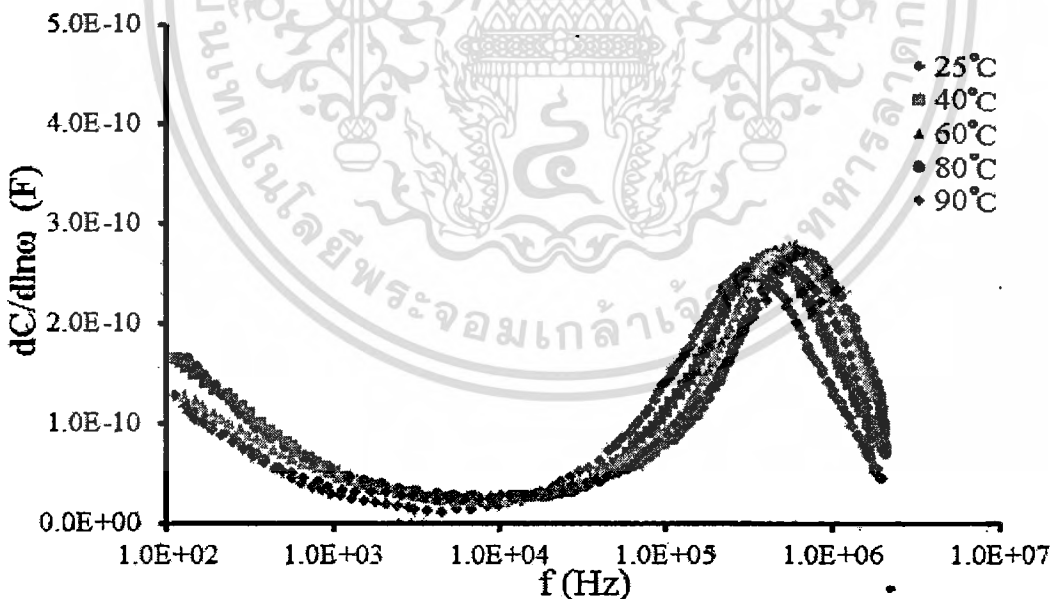
ภาพที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสโดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



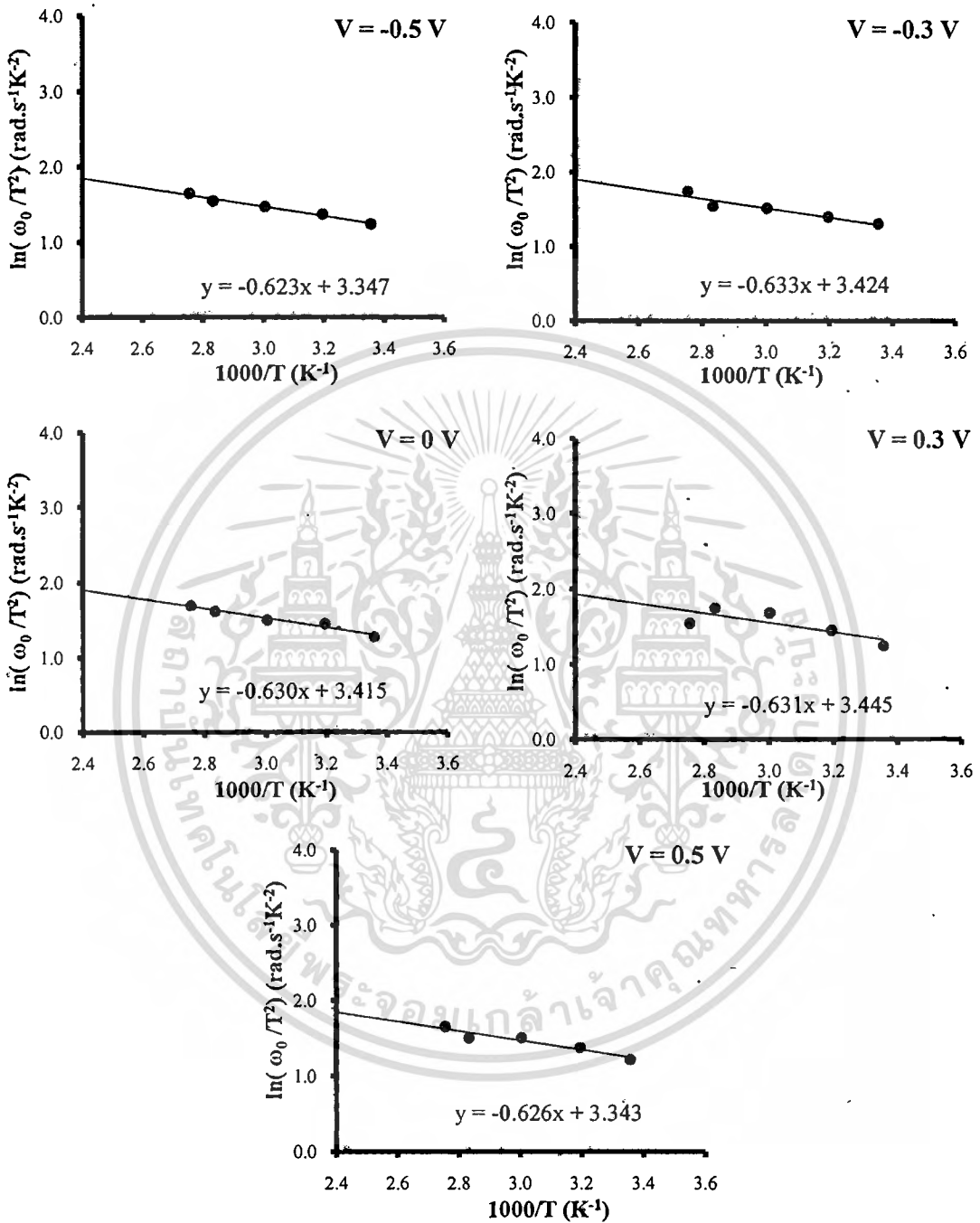
ภาพที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสโดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

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

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นจะได้ว่า

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

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.38ก.) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

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

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

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

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

เมื่อ ξ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยยิลึกตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยยิลึกตรอนของกับดักประจุ

ค่าพลังงานกระตุ้น E_a สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1,000/T$ ซึ่ง ω_0 สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น และ σ_T มีค่าใกล้เคียงกันดังที่แสดงในตารางที่ 4.7

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

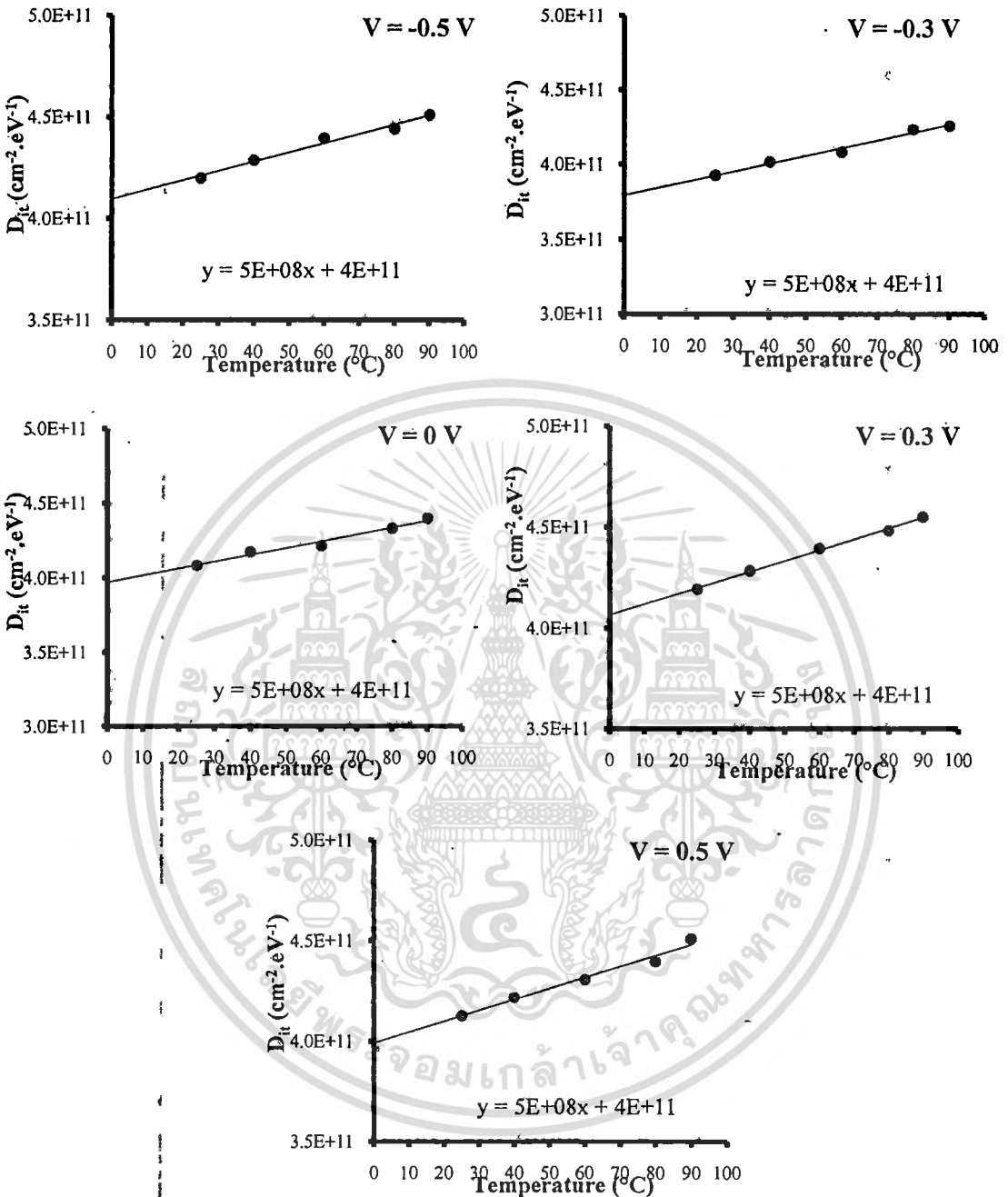
Bias Voltage (V)	T (°C)	G/ω-f				(dC/dlnω)-f				$D_{it}(\text{cm}^2 \cdot \text{eV}^{-1})$	
		ω_0 (Hz)	E_s (eV)	ξ_0 ($\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$)	σ_T (cm^2)	ω_0 (Hz)	E_s (eV)	ξ_0 ($\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$)	σ_T (cm^2)	G/ω-f	(dC/dln)-f
-0.5	25	3.38E+05				3.09E+05				4.19E+11	4.20E+11
	40	3.98E+05				4.38E+05				4.20E+11	4.29E+11
	60	5.37E+05	0.038	-16.265	4.51E-16	4.98E+05	0.055	28.440	7.90E-16	4.25E+11	4.40E+11
	80	5.97E+05				5.47E+05				4.30E+11	4.44E+11
	90	6.47E+05				5.57E+05				4.44E+11	4.51E+11
-0.3	25	3.09E+05				3.28E+05				4.20E+11	3.93E+11
	40	3.98E+05				3.98E+05				4.25E+11	4.02E+11
	60	4.18E+05	0.037	14.454	4.02E-16	5.08E+05	0.054	30.698	8.53E-16	4.32E+11	4.08E+11
	80	5.47E+05				5.57E+05				4.44E+11	4.24E+11
	90	6.37E+05				6.37E+05				4.48E+11	4.26E+11
0	25	3.18E+05				2.18E+05				4.09E+11	4.08E+11
	40	3.98E+05				4.18E+05				4.12E+11	4.17E+11
	60	5.08E+05	0.036	15.815	4.39E-16	5.97E+05	0.053	30.444	8.46E-16	4.13E+11	4.22E+11
	80	6.07E+05				6.27E+05				4.20E+11	4.33E+11
	90	6.47E+05				7.16E+05				4.28E+11	4.40E+11
0.3	25	3.09E+05				3.09E+05				3.99E+11	4.20E+11
	40	4.08E+05				4.18E+05				4.28E+11	4.29E+11
	60	4.88E+05	0.035	14.081	3.91E-16	5.97E+05	0.052	31.368	8.71E-16	4.30E+11	4.40E+11
	80	5.37E+05				6.17E+05				4.40E+11	4.49E+11
	90	6.17E+05				7.16E+05				4.41E+11	4.55E+11
0.5	25	3.09E+05				2.99E+05				4.32E+11	4.13E+11
	40	3.98E+05				3.88E+05				4.34E+11	4.22E+11
	60	5.08E+05	0.034	15.034	4.18E-16	4.98E+05	0.051	28.321	7.87E-16	4.37E+11	4.31E+11
	80	5.37E+05				5.57E+05				4.39E+11	4.40E+11
	90	6.17E+05				6.37E+05				4.41E+11	4.51E+11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Bias Voltage (V)	T (°C)	Z'-Z''			
		ω_0 (Hz)	E_g (eV)	ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_i (cm ²)
0	25	17.30	0.0489	743.370	2.06E-14
	40	21.79			
	60	30.06			
	80	31.95			
	90	33.83			

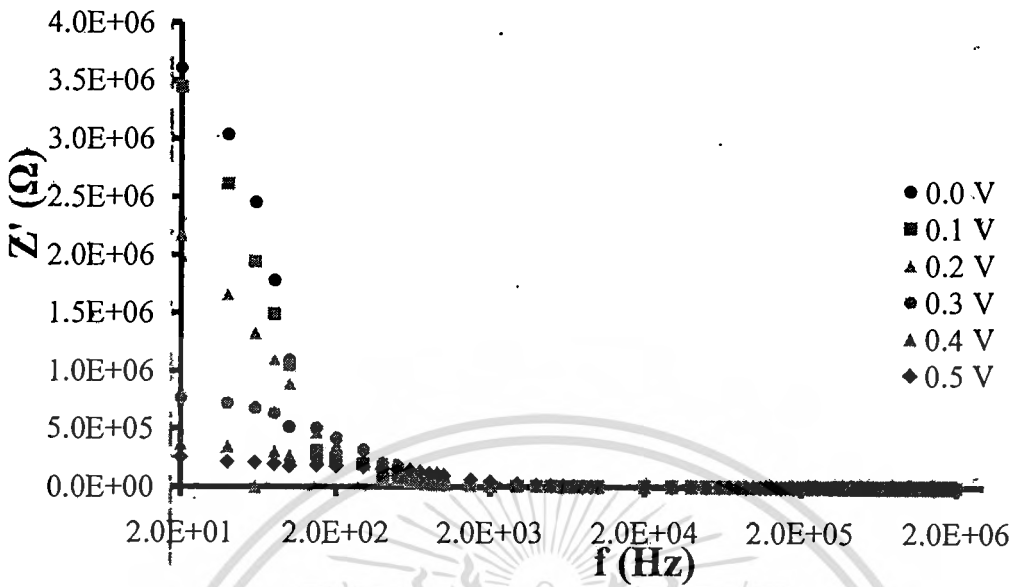
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



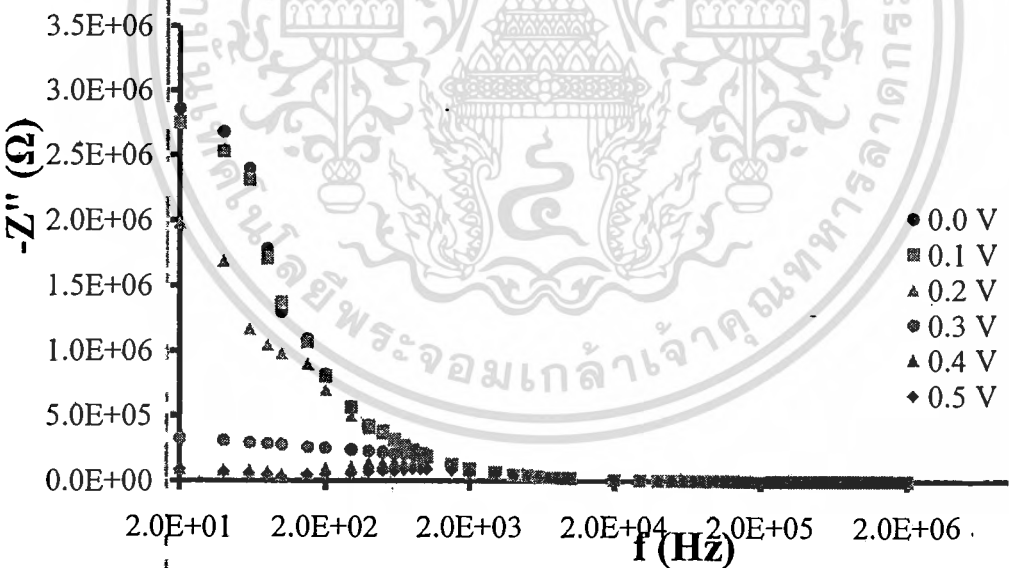
ภาพที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับอุณหภูมิที่ได้จากการหา ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ $25 - 90$ องศาเซลเซียสและทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ $- 2$ เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

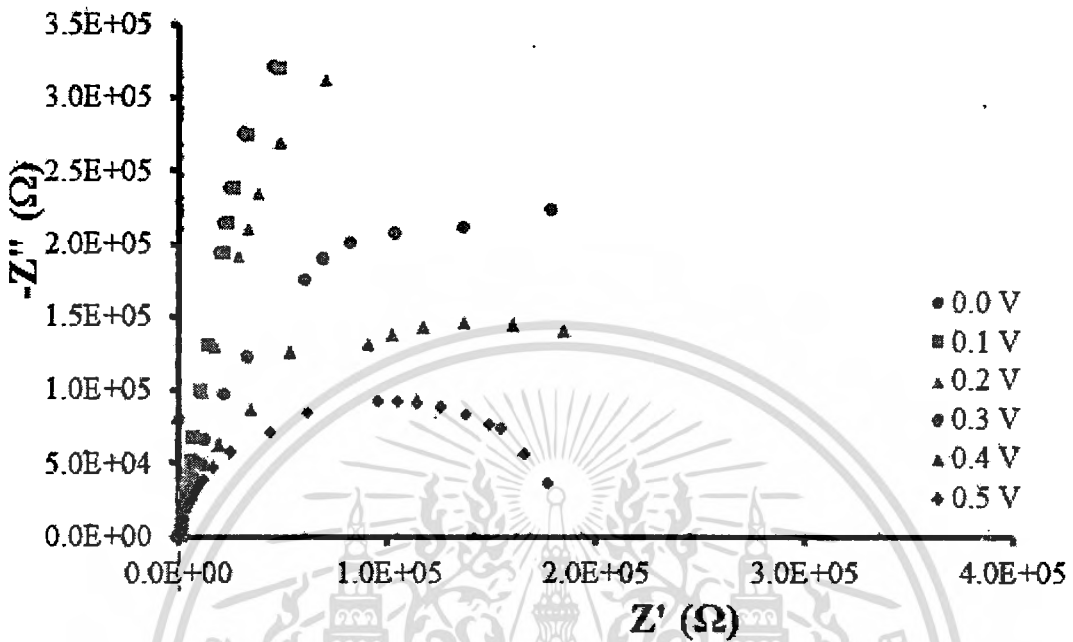
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่ทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยในภาพที่ 4.66 ได้แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่ำๆ จะเป็นช่วงที่จำนวนจริงของอิมพีแดนซ์มีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากภาพที่ 4.67 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่ำๆจะเป็นช่วงที่จำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์มีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่ำๆ จะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้น และที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าสูงๆ จะได้กราฟเป็นรูปครึ่งวงกลมดังที่แสดงในภาพที่ 4.68 จึงมีความจำเป็นในการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่จำเป็นต่อการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



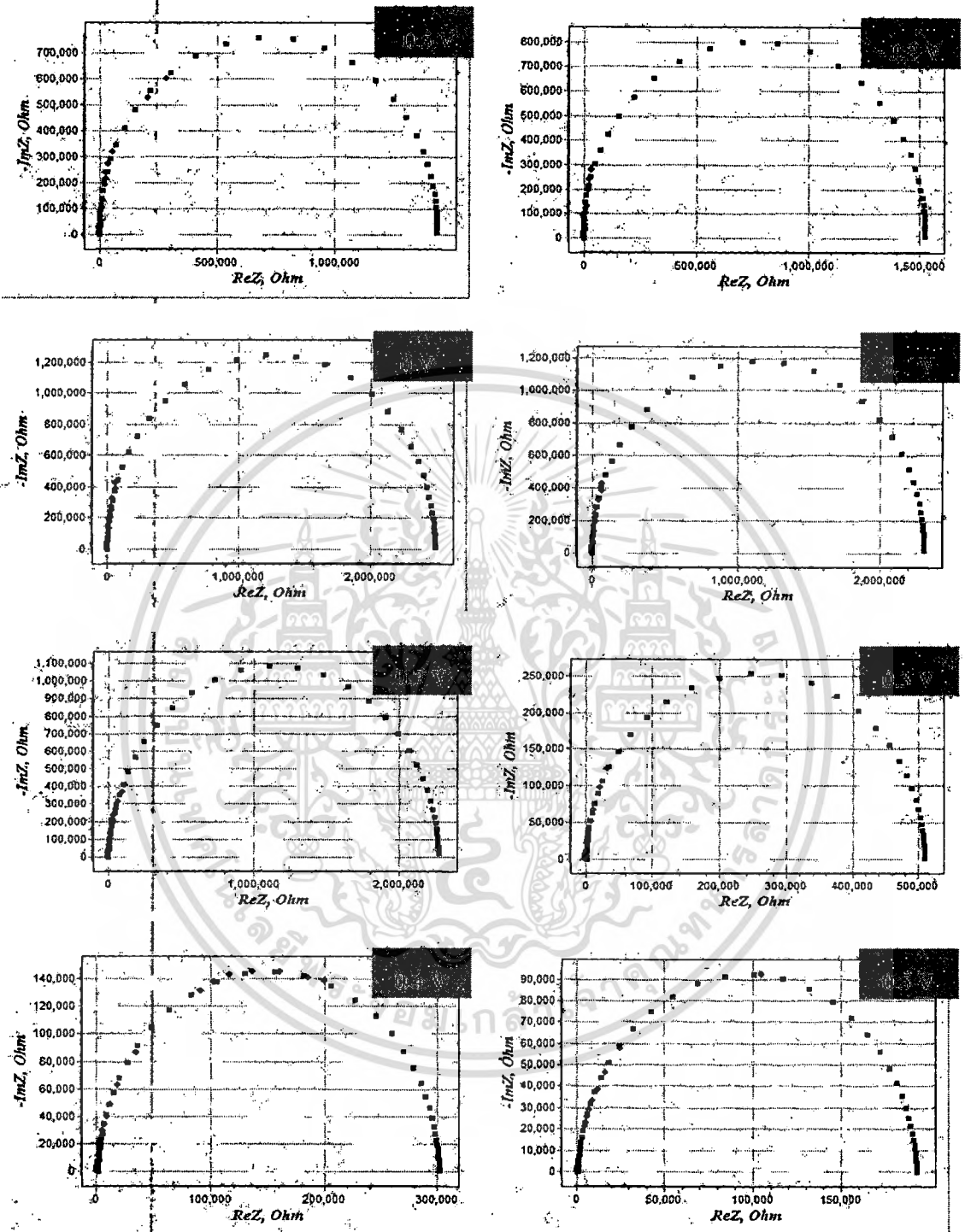
ภาพที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบโอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบโอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่แรงดันไบแอสไปหน้าในช่วง 0 – 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.69 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ -2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของ รอยต่ออิวริทพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

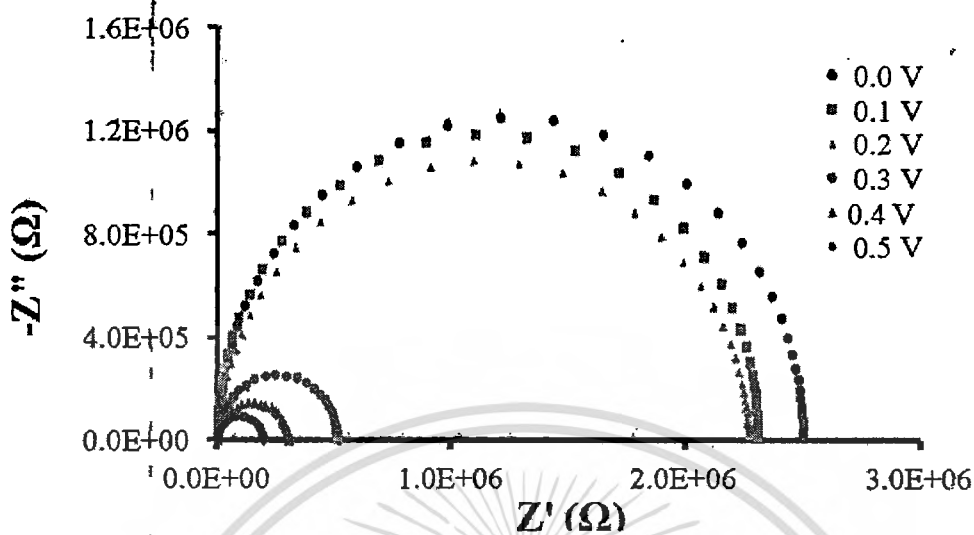
ในภาพที่ 4.69 ได้แสดงแบบจำลองของกราฟ โคล-โคล พล็อต (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก โดยจะขึ้นกับสมการ

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

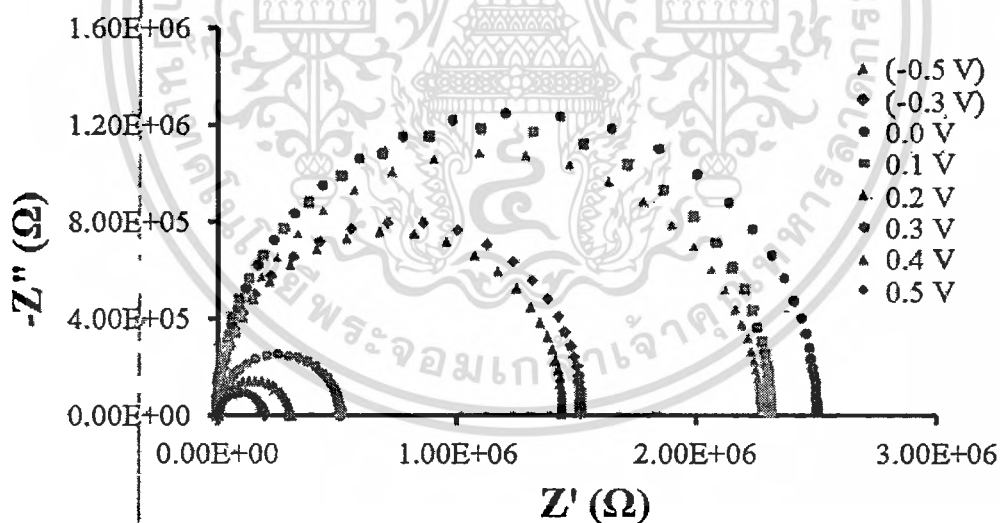
ก็จะสามารถหาค่าความจุของรอยต่อแล้วนอกจากนี้ยังหาค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดได้จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบนี้อีกด้วย และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองแบบมาพล็อตรวมกันตามภาพที่ 4.70 และภาพที่ 4.71 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่อแรงดันไบแอสไปหน้าสูงขึ้น เนื่องจากขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปหน้าให้กับไดโอดแล้วไดโอดจะนำกระแสได้มากขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ความต้านทานของไดโอดลดลง ดังนั้นทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจึงลดลง สำหรับกรณีป้อนแรงดันไบแอสกลับทางให้กับไดโอดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนไม่ได้เพิ่มขึ้นมากนัก เนื่องจากแรงดันไบแอสกลับทางไดโอดมีกระแสรั่วมาก จึงทำให้ความต้านทานของไดโอดไม่เพิ่มขึ้นมากนัก และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าเช่นกัน ส่วนในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะได้จากสมการ

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

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



ภาพที่ 4.70 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอส ไปหน้า 0 - 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์ของ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

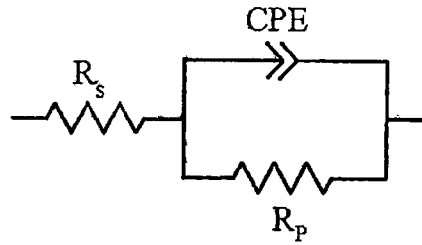


ภาพที่ 4.71 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอส -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ - 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.9 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่ แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและทำการวัดที่ ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

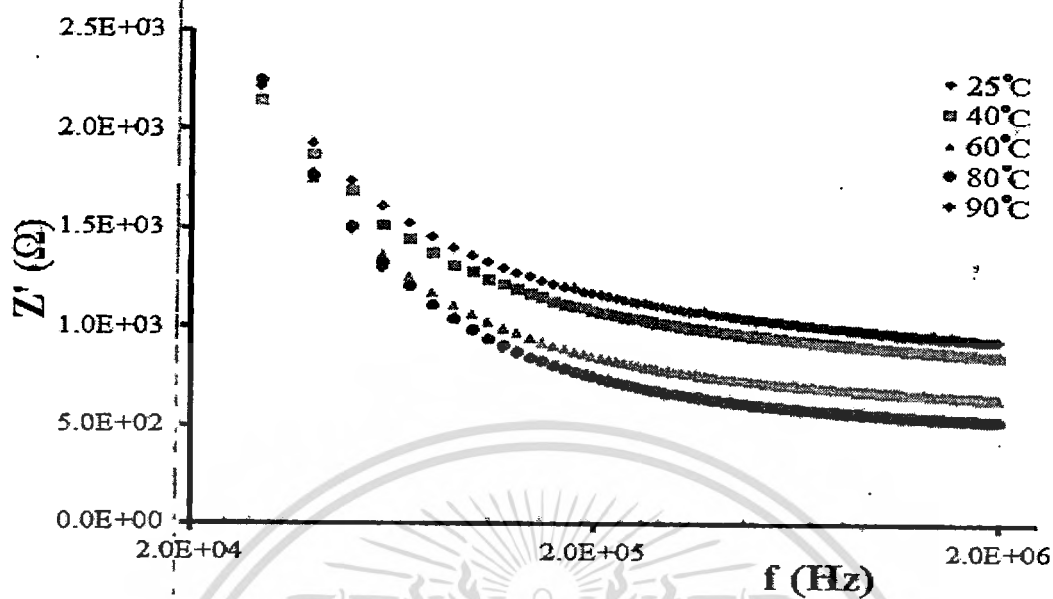
จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ เมื่อ R_p ลดลงแล้ว τ ($\tau=R_p C_p$) จะมีค่าลดลงจึงส่งผลให้ค่าความถี่เชิงมุม (ω) มีค่าสูงขึ้น



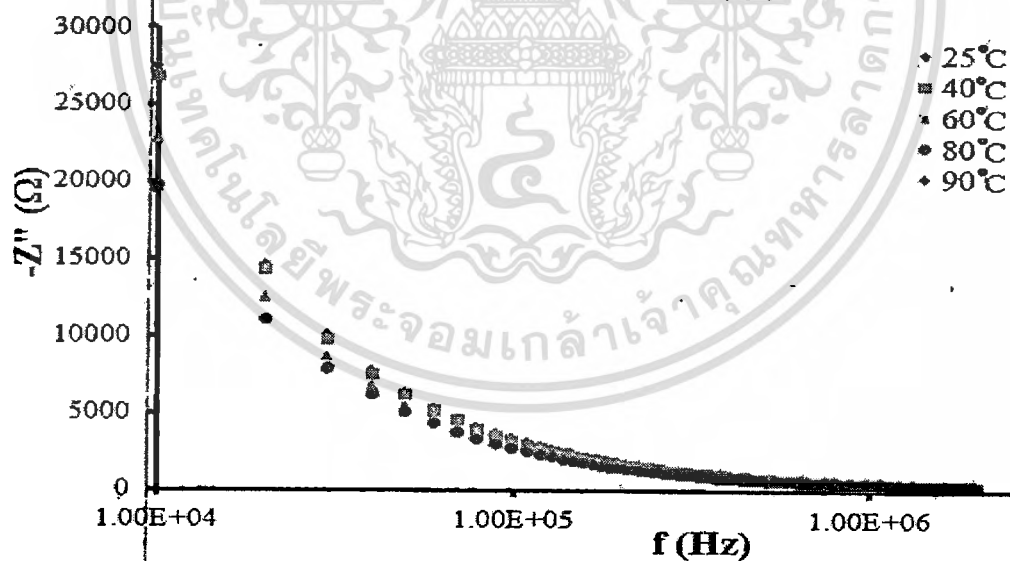
ภาพที่ 4.72 วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ รวมทั้งเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลของการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่ทำกรวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยในรูปที่ 4.73 ได้แสดงความสัมพันธ์ของส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ ในช่วงความถี่ใดๆ จะเป็นช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และในส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์นั้นจะไม่สามารถพบจุดสูงสุดของค่าจินตภาพได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นเพียงส่วนที่เป็นกราฟทางลาดลงเท่านั้นแสดงในภาพที่ 4.74

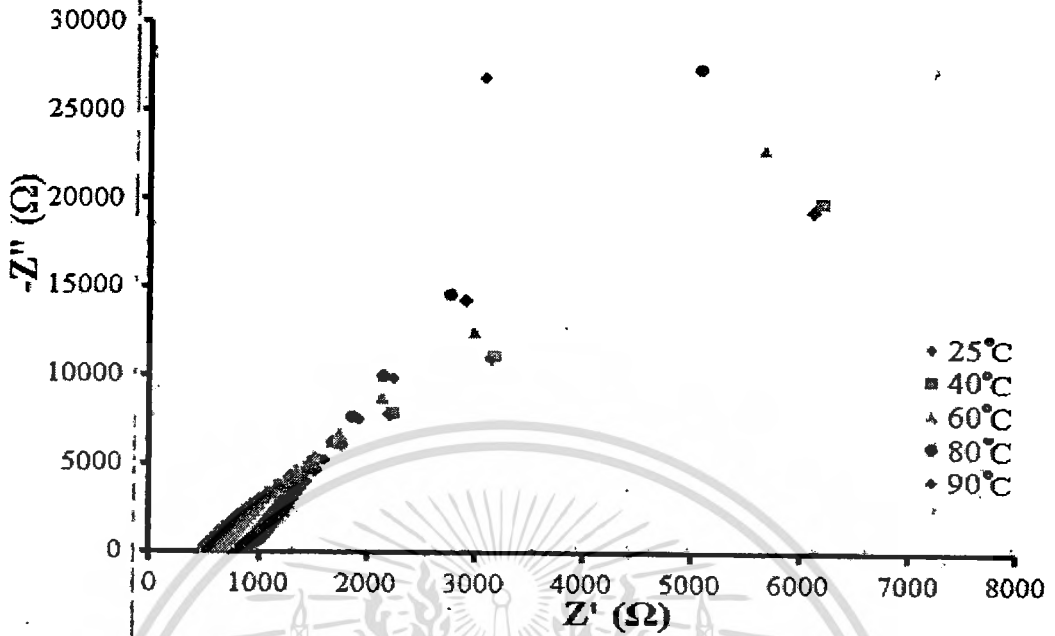
และเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ แล้วจะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้นดังที่แสดงในภาพที่ 4.75 จึงมีความจำเป็นในการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาระบบอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



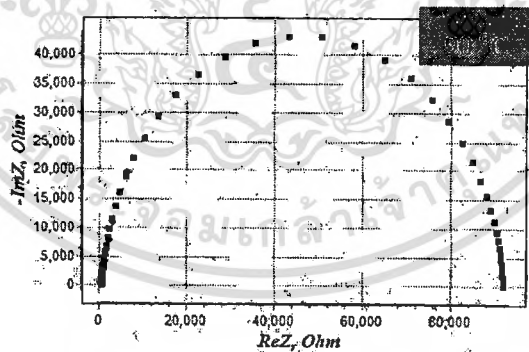
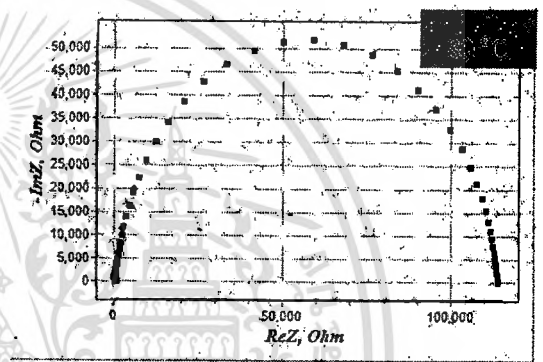
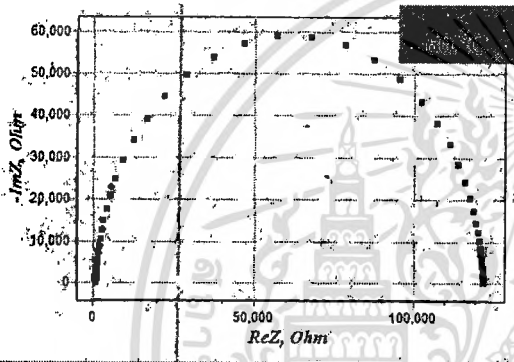
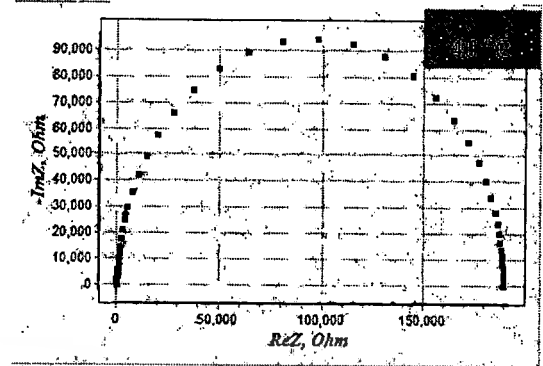
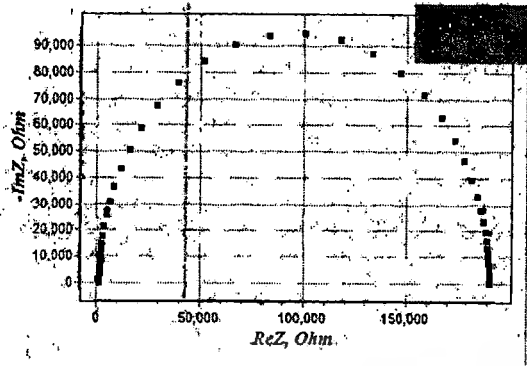
ภาพที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพ 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



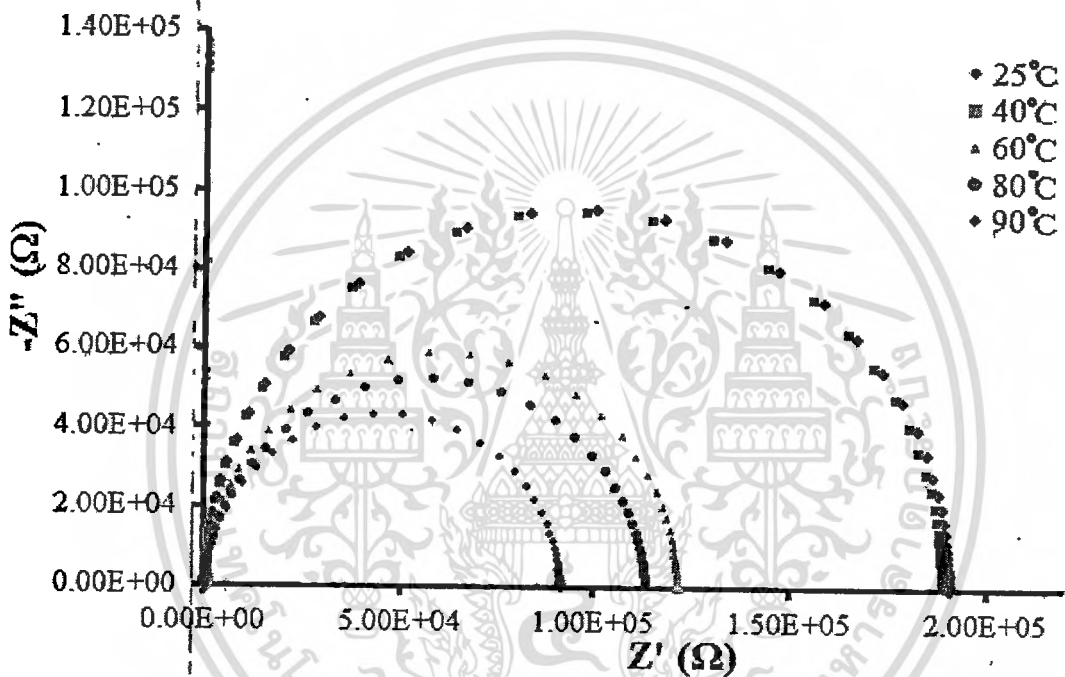
ภาพที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 4.76 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

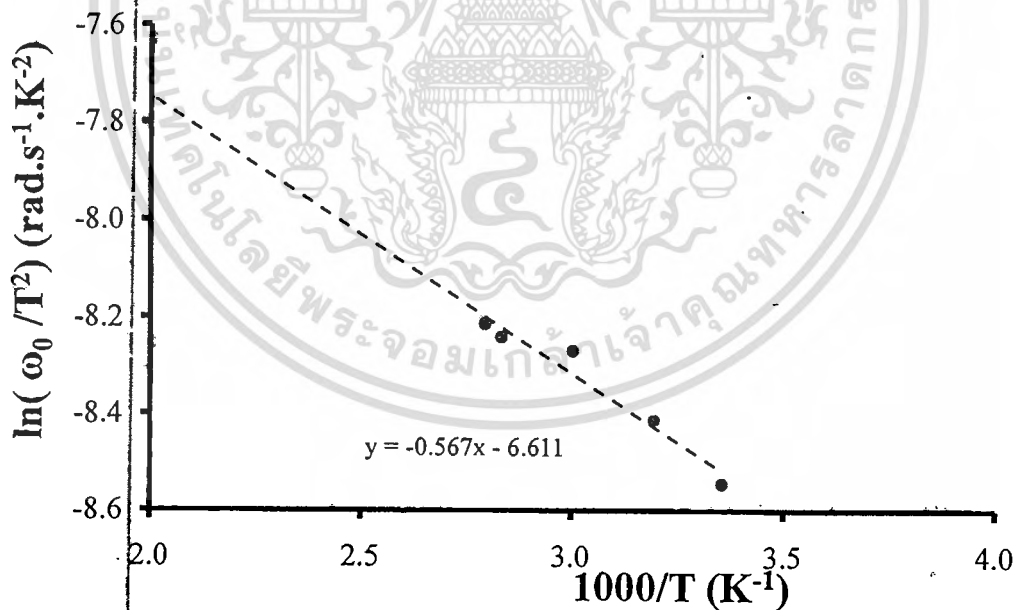
ในภาพที่ 4.76 ได้แสดงแบบจำลองของกราฟ โคล-โคล (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองค่ามาพล็อตรวมกันตามภาพที่ 4.77 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน



ภาพที่ 4.77. แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

T (°C)	T (K)	ω_0	$(\omega_0/T)^2$	$\ln(\omega_0/T^2)$	1000/T(K)	E_a (eV)
25	298.0	17.29	1.95E-04	-8.54	3.35	0.049
40	313.0	21.78	2.22E-04	-8.41	3.19	
60	333.0	30.05	2.71E-04	-8.26	3.00	
80	353.0	31.94	2.56E-04	-8.23	2.83	
85	358.0	33.82	2.64E-04	-8.21	2.79	



ภาพที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เรายังสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ตามสมการที่ (4.38ก.) และสมการ (4.38ข.) ตามที่เคยเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากวิธีการต่างๆมาสรุปตามตารางที่ 4.11 จะพบว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั้นมีความคลาดเคลื่อนมากทั้งนี้มิมีสาเหตุมาจากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั่นเอง โดยค่าของความถี่ที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นควรจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าแต่ด้วยในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีสัญญาณรบกวนอยู่มากจึงทำให้สามารถทำการวัดได้เพียงบางส่วนของกราฟอิมพีแดนซ์เท่านั้น โดยสัญญาณรบกวนดังกล่าวนี้ อาจเกิดจากกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีค่ามากกว่าหนึ่งชนิดที่สามารถตอบสนองได้ในช่วงความถี่ต่ำจึงส่งผลให้เกิดความไม่คงที่และความไม่ต่อเนื่องกันของข้อมูลที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะในช่วงบริเวณความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วง 100 เฮิร์ตซ์นั่นเอง

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

Temperature (°C)	Extracted Parameters							
	R_s	CPE			C_p	τ	$f_{(max)}$	$\omega\tau$
		R_p	P_1	n				
25	1.00E+03	1.90E+05	2.91E-07	1.000	2.91E-07	5.52E-02	2.754	0.955
40	9.80E+02	1.89E+05	2.99E-07	1.000	2.98E-07	5.62E-02	2.754	0.973
60	8.00E+02	1.21E+05	3.11E-07	0.985	2.48E-07	3.00E-02	4.786	0.902
80	7.00E+02	1.13E+05	3.46E-07	0.991	3.02E-07	3.41E-02	4.786	1.026
85	6.50E+02	9.11E+04	3.70E-07	0.991	3.23E-07	2.94E-02	5.386	0.995

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำ (N_C) ของ CdS สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

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

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

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

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

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

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

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

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

$$= 0.227 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (N_V) ของ CuO คือ

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

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

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

$$N_V = (4.83 \times 10^{15}) (300)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{7.90m_0}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 5.57 \times 10^{20} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

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

$$E_F - E_V = kT \ln \left(\frac{N_V}{N_a} \right) \quad (4.45)$$

$$= (0.0258) \ln \left(\frac{5.57 \times 10^{20}}{1 \times 10^{18}} \right)$$

$$= 0.163 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 4.20 และ 4.07 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ [34] ส่วนช่องว่างและแถบพลังงานของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 2.40 และ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ค่าออฟเซต (offset) ของแถบนำ (ΔE_C) และค่าออฟเซตของแถบนำวาเลนซ์ (ΔE_V) ของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ n-CdS/p-CuO สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ [35]

$$\Delta E_C = \chi(\text{CdS}) - \chi(\text{CuO}) \quad (4.46)$$

$$= 4.20 - 4.07 = 0.13 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\Delta E_V = E_g(\text{CdS}) - E_g(\text{CuO}) - \Delta E_C \quad (4.47)$$

$$= 2.40 - 1.35 - 0.13 = 0.92 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

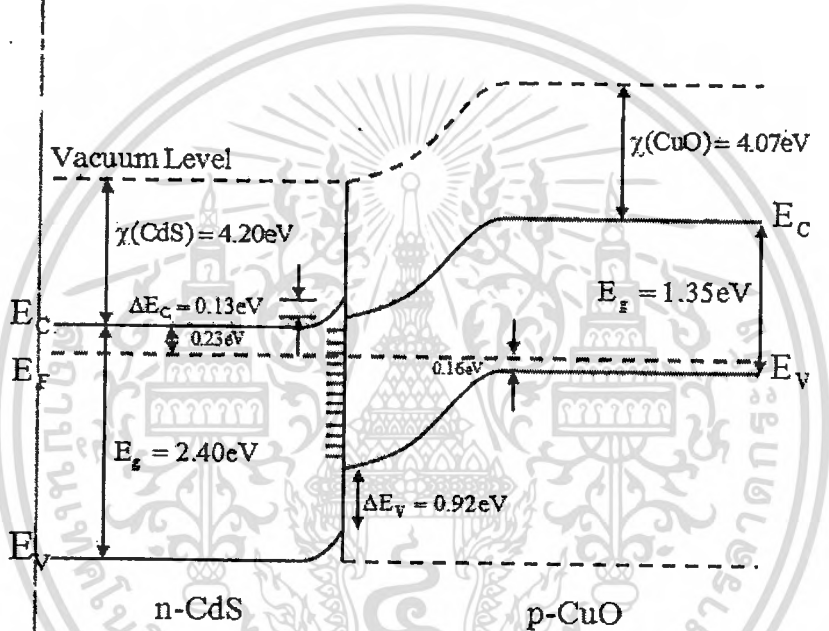
โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ n-CdS/p-CuO แสดงได้ในรูปที่ 4.79

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (built-in-potential) สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

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

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

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



ภาพที่ 4.79 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO. ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผล พร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีผิวหน้าที่เรียบสะท้อนแสงได้ดี ยึดติดแน่นดีกับแผ่นฐานรองรับและมีสีเหลืองส้มโปร่งแสง การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ผลปรากฏพบพิคการเลี้ยวเบนเด่นชัดที่สุด ที่มุม $2\theta = 26.54$ องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าเป็นระนาบ(002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาทีพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนิลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน กล่าวคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิแอนนิลที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ผลปรากฏว่ามีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 - 90 เปอร์เซ็นต์เมื่ออุณหภูมิ

แอนนูลมีค่าสูงซึ่งมีผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิแอนนูล 300 องศาเซลเซียสจะมีการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติทางสถานะของแข็งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ได้นั้นเป็นสีดำ และทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกจะเห็นว่าฟิล์มบางสีเหลืองส้มเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิก สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

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

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

สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ

20 – 300 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำพบว่าการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม(threshold voltage) อยู่ที่ประมาณ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของ CuO และของ CdS อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p⁺-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อซอดดัก์โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิต่ำพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุ ในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลการหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวานั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิต่ำลงและค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การศึกษา กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ 20 เคลวินที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.17 โวลต์ (Region I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.17 – 0.61 โวลต์ (Region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริกชั้น และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.6 โวลต์ (Region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มี การแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกชั้นและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกชั้น

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -5 ถึง 2 โวลต์ เมื่อใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V จุดตัดที่ได้จากกราฟคือ V_i ซึ่งสามารถนำไปหาแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้และความชันนั้นสามารถใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) พบว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากพารามิเตอร์ต่างๆสามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียสโดยใช้แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ

n-CdS/p-CuO เราสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ซึ่งค่า ω_0 หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ โดยที่ค่าพลังงานกระตุ้นจากกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองกรณีในแต่ละแรงดันไบแอสจะมีค่าใกล้เคียงกันเป็นวิธีการศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นพบว่าเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ค่าพลังงานกระตุ้นจะลดลง และค่าความหนาแน่นของกับดักบริเวณผิวเชื่อมต่อก็จะลดลงที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ผลการศึกษาสสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์-2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้วงจรสมมูลคิงภาพที่ 4.67 เป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอีลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนขอบของเกรน และผิวของเซรามิกที่ไม่เรียบ เป็นต้น

ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาสสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO ทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์อย่างมาก อาทิเช่น ต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม รวมทั้งรวบรวมข้อมูลที่ได้เพื่อทำความเข้าใจให้เพียงพอสำหรับทำงานวิจัย งานวิจัยเริ่มจากการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงการหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ค่าความเครียด และขนาดของเกรนจากค่า FWHM ของพีคการเลี้ยวเบน รวมทั้งโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และความสัมพันธ์ของขนาดของเกรนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอลนีส

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน และความสัมพันธ์ของช่องว่างแถบพลังงานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอลนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งมีกลไกการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน จากนั้นคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ อย่างเช่น แพลกเตอร์อุดมคติ, ความสูงกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรม และพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ทำให้ทราบการหาค่าพลังงานกระตุ้น และค่าความหนาแน่นของกับดักบริเวณผิวเชื่อมต่อ

จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ทำให้ทราบการหาค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานชั้น (R_{sh})

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยการใช้เซรามิก CuO เป็นชั้นดูดกลืนแสงไม่ปรากฏว่ามีแรงดันวงจรเปิดเกิดขึ้นขณะฉายแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจน อาจเป็นเพราะว่าชั้นฟิล์มบาง CdS ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์มีความหนามากเกินไปทำให้โฟตอนไม่สามารถเดินทางเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้ แนวทางในการพัฒนาขั้นต่อไปคือต้องประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuO เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงซึ่งจะทำให้เราสามารถลดความหนาของฟิล์มบาง CdS ลงได้อีกให้เหลืออยู่ในระดับ 100 นาโนเมตร อีกทั้งควรประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง n-CdS/p-CuO ในรูปแบบซูเปอร์สเตรต (superstrate) โดยเลือกใช้ฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:F$ เป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง ทางคณะผู้วิจัยได้เริ่มทำการประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuO โดยวิธีระเหยสารตั้งต้น CuO ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและโดยวิธีรีเอ็กทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งกำลังพัฒนาฟิล์มบาง CuO ให้มีคุณภาพดีพอที่จะประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบซูเปอร์สเตรตต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1 ชื่อบทความวิจัย “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode” Proceeding in 2014 2nd International Conference on Materials and Manufacturing Research (IMMR 2014), November 17-18, 2014, Bangkok, Thailand. โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

Abstract. In this paper, p-CuO/n-CdS heterojunction was prepared by thermal evaporating CdS thin films on CuO 1 mm thick ceramic pellet substrate. The electrical properties of p-CuO/n-CdS heterojunction were investigated by forward current–voltage–temperature (I–V–T) characteristics in the temperature range of 100-300 K. The junction barrier height, ideality factor, and the series resistance values of the diode evaluated by using thermionic emission (TE) theory and Cheung’s method are 0.566 eV, 5.535 and 618.24 Ω at 300 K, respectively. The junction barrier height, ideality factor and series resistance were found to be strong temperature dependence. In part of C-V measurements at room temperature, the obtained built-in potential value being 0.538 V is well consistent with the junction barrier height value evaluated from I-V measurements

Introduction

Cupric oxide (CuO) has been studied as a p-type semiconductor material with narrow band gap because of the natural abundance of its starting material, nontoxic nature, low cost production processing and its reasonably good electrical and optical properties [1]. Furthermore, it is attractive as a selective solar absorber since it has a high solar absorbance and a low thermal emittance. CuO has a band gap reported between 1.3 and 1.7 eV with a black color and a partial transparency in the visible range. Copper oxide has two major phase, namely, monoclinic cupric oxide (CuO) and cubic cuprous oxide (Cu₂O). Compared with Cu₂O, CuO is more stable and more easily prepared. Its band gap matches the spectrum of sun light more closely allowing it to absorb more sunlight. Thus, CuO could be a low cost alternative to silicon for solar cell

application [2]. Cadmium sulfide (CdS) is an important II-VI group chalcogenide semiconductor due to its direct band gap transition with band-gap energy of 2.42 eV at room temperature and unique electrical, optical and photoconductivity properties, supplying for wide technology applications, such as photoelectrocatalysis devices, thin film solar cells and other semiconducting devices. Heterostructures implicated two different member of II-VI compounds have received much attention. Many of the heterostructures have now become important part of electronic and optoelectronic devices, such as field effect transistors, microelectromechanical systems, gas sensors, electrochemical, magnetic storage media, nano-devices of catalysis and solar cell. The heterostructures of CuO and Cu₂O have been employed to make optoelectronic devices in some CuO based devices [3,4]. In this paper, the formation of p-CuO/n-CdS heterojunction elaborated by thermal evaporating CdS thin films on CuO ceramic substrate. We investigated I-V and C-V characteristics of p-CuO/n-CdS heterojunction for evaluating some important parameters such as junction barrier height, ideality factor and series resistance values by using thermionic emission theory and Cheung's method.

Experimental

Polycrystalline CuO powder was ground in an agate mortar thoroughly for 2 hour and then pressed into pellet form by hydrostatic pressure about 100 MPa. Then, the CuO pellet was sintered in air at 900°C for 6 h. The as-sintered CuO pellet with 10 mm in diameter and 1 mm in thickness was used as substrate for CdS thin film deposition. CdS thin films were deposited on CuO pellet substrate by thermal evaporation technique in a vacuum of 3×10^{-5} mbarr using a tungsten boat as source holder. The thickness of the CdS film using a digital quartz crystal monitoring system (FTM6) and was found to be 1,050 nm. Silver electrodes were used as electrical contacts on CdS and CuO. Crystal structure of p-CuO/n-CdS heterojunction was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker D8 Diffractometer using CuK α radiation. The current-voltage (I-V) characteristics were measured at various temperatures by using a computer interfaced Keithley 236 current/voltage source. The capacitance-voltage (C-V)

measurements were performed by using Agilent E4980A precision LCR meter at frequency 1MHz.

Results and Discussion

Fig. 1 shows The I-V characteristics of p-CuO/n-CdS heterojunction performed in temperature range 20-300 K. These I-V characteristics confirm that a p-n heterojunction diode is formed at the interface of the p-CdS thin films and n-CuO pellet. According to the thermionic emission (TE) theory, the current in Schottky diode can be expressed as [5]:

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

where q is the unit charge, n is the ideality factor, k is the Boltzmann's constant, T is the absolute temperature, and I_s is the saturation current defined by

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

where A is the device area, A^* is the Richardson's constant and Φ_b is the zero bias barrier height of the diode. The variation of $\ln I$ with V of p-CuO/n-CdS heterojunction at room temperature (Fig. 2) and at various temperatures (Fig. 3) was found to be linear suggesting that the thermionic emission is the dominant conduction mechanism at low bias voltage. The diode ideality factor 'n' was calculated from the slope of the forward bias $\ln I$ - V plot through the relation:

$$n = \left(\frac{q}{kT}\right) \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (3)$$

$n=1$ for an ideal diode. However, n has usually a value greater than unity. On the other hand, the barrier height can be obtained from the equation,

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_s}\right) \quad (4)$$

The values of the ideality factor and barrier height were found to be $n = 5.535$ and $\Phi_b = 0.566$ eV at room temperature. Fig. 4 shows $\ln I$ - $\ln V$ curve of p-CuO/n-CdS heterojunction performed at room temperature. At low bias voltage region (region I), current is linearly dependent on voltage

V exhibiting an Ohmic behavior due to its slope is nearly equal 1. On the other hand, at medium voltage region (region II), a non-linear region appears according to thermionic emission (TE) mechanism. As applied bias voltage higher than 0.59 V (region III), the strong injection of space charge limited current (SCLC), with its slope nearly 2, was observed.

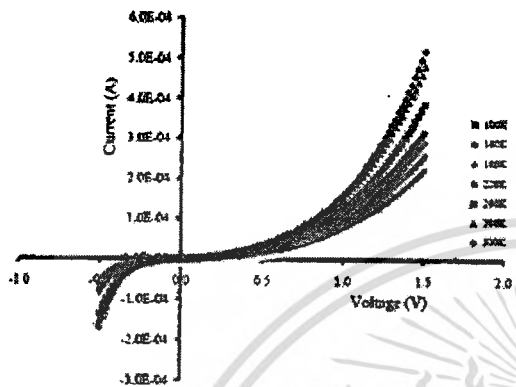


Fig. 1 Typical I-V curve of p-CuO/n-CdS heterojunction measured at various temperatures.

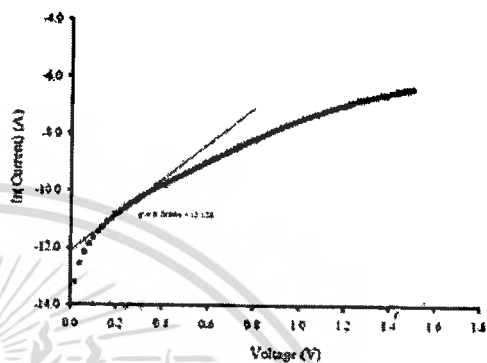


Fig. 2 lnI - V curve of p-CuO/n-CdS heterojunction measured at room temperature.

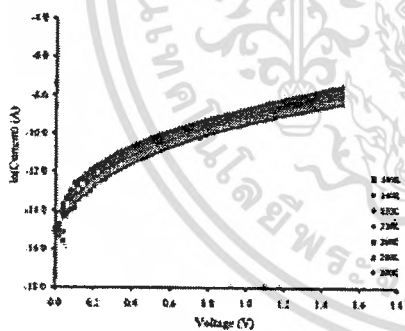


Fig. 3 lnI - V curve of p-CuO/n-CdS heterojunction measured at various temperatures.

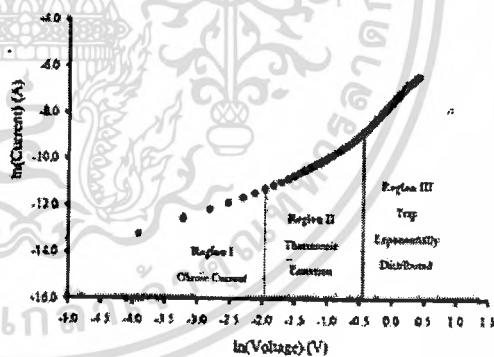


Fig. 4 lnI - lnV of p-CuO/n-CdS heterojunction measured at room temperature.

The value of R_s was calculated from the forward bias I-V data using the Cheung's method [6].

From Eq. (1), the following functions can be written as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{q} \right) + IR_s \quad (5)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (6)$$

and $H(I)$ is given as follows :

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (7)$$

where ϕ_b is the barrier height obtained from data of downward curvature region in the forward bias I-V characteristics. Experimental $dV/d(\ln I)$ -I and $H(I)$ -I plots at various temperatures are presented in Fig. 6 and 7, respectively. Eq. (5) should give a straight line for the data of downward curvature region in the forward bias I-V characteristics. Thus, a plot of $dV/d(\ln I)$ -I will give R_s as the slope and nkT/q as the y-axis intercept. Using the n value determined from Eq. (5) and the data of the downward curvature region in the forward bias I-V characteristics in Eq. (6), a plot of $H(I)$ -I will also lead to a straight line with the y-axis intercept equal to $n\phi_b$. The slope of this plot also determines R_s , which can be used to check the consistency of this approach. Furthermore, the values of R_s obtained from $dV/d(\ln I)$ -I and $H(I)$ -I plots are in good agreement with each other. This case shows the consistency of Cheung's approach. Moreover, the calculated n , ϕ_b and R_s were found to be as strongly temperature dependent. Ideality factor greater than 1 has been attributed to particular distribution of interfacial layer and interface states between CdS and CuO. As can be seen from Fig. 8, the value of ideality factor shows that there is a deviation from TE theory in the current conduction mechanism. The temperature dependence of n suggests that the current conduction mechanism is controlled by the surface states are more pronounced because of the spatial distribution of the interfacial layer of CdS and CuO.

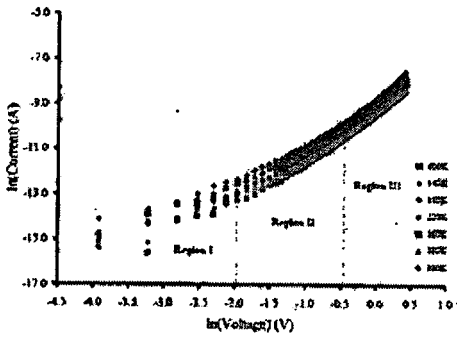


Fig. 5 $\ln I - \ln V$ of p-CuO/n-CdS

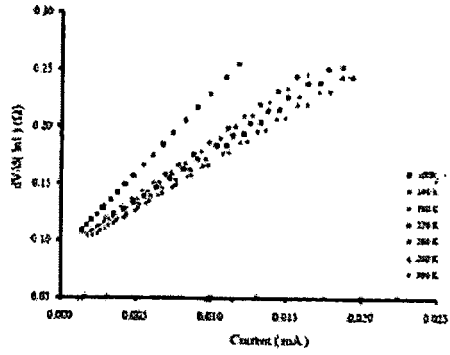


Fig. 6 $dV/d(\ln I) - I$ curves of p-CuO/n-CdS

heterojunction measured at various temperatures.

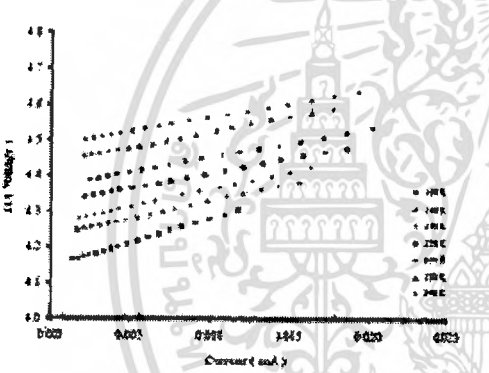


Fig. 7 $H(I) - I$ curves of p-CuO/n-CdS

heterojunction measured at various temperatures.

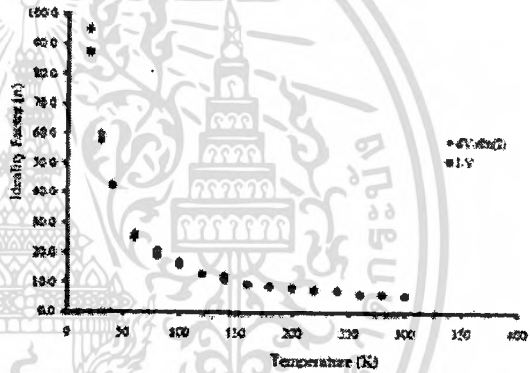


Fig. 8. The variation of n as a function of temperature p-CuO/n-CdS heterojunction.

heterojunction measured at various temperatures.

temperature p-CuO/n-CdS heterojunction.

In simple Schottky barrier theory, the capacitance of the barrier varies with applied reverse voltage V in such a way that a straight line is obtained if $1/C^2$ is plotted against V as show in Fig. 9. This relation is given by the expression;

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_s q N_d A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \tag{8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where V is applied voltage, V_{bi} is the built-in potential which is determined from the extrapolation of the linear $1/C^2$ - V plot to the V axis, A is the effective area of the diode, ϵ_s is the dielectric constant of the semiconductor ($\epsilon_s = 9.38$ for CdS) and N_D is the concentration of ionized donor. The built-in potential value being 0.538 V is well consistent with the junction barrier height value evaluated from I-V measurements. Electron concentration of CdS layer around $2.54 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ at 300 K evaluated from the slope of $1/C^2$ - V plot.

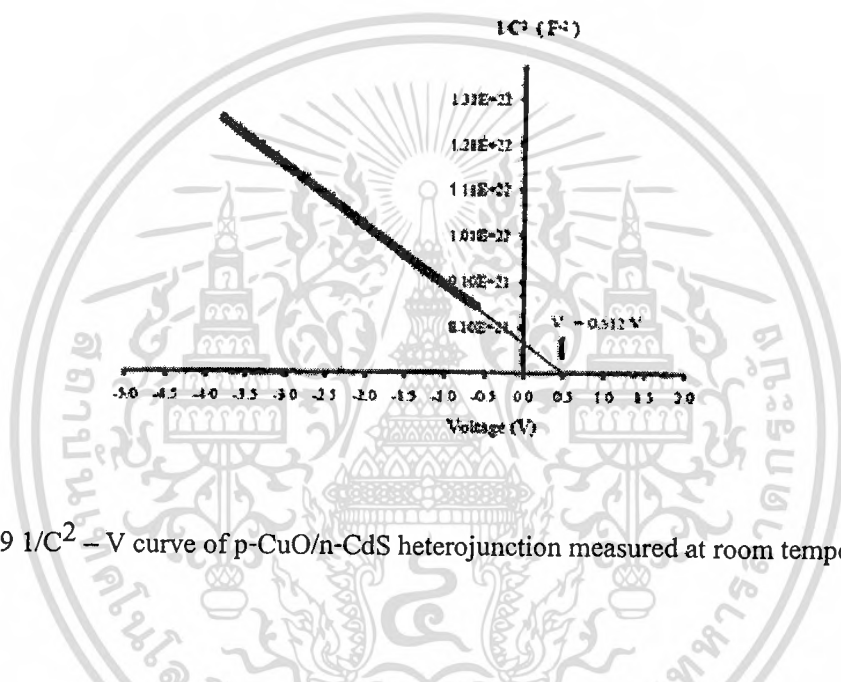


Fig. 9 $1/C^2$ - V curve of p-CuO/n-CdS heterojunction measured at room temperature.

Summary

The p-CuO/n-CdS heterojunction were prepared by thermal evaporating CdS thin films on CuO ceramic pellet substrate. The electrical conduction in the diode was explained by thermionic emission at medium voltage and by space charge limited current at high voltage. The junction barrier height, ideality factor and series resistance determined from the I-V curve was found to be 0.566 eV, 5.535 and 618.24 Ω , respectively at room temperature. The variation of junction capacitance with reverse bias voltage was studied and the built-in potential and electron concentration of CdS thin films were determined by plotting the $1/C^2$ - V graph.

Acknowledgements

This project was financially supported by KMITL under grant No. 2555-A118-0220. ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณิดุจกั้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] K. Zhang, Y. Yang, E.Y.B. Pun and R. Shen: *Nanotechnology* Vol. 21 (2010), pp. 5602-235606.
- [2] F. Gao, X.J. Liu, J.S. Zhang, M.Z. Song and N. Li: *J. App. Phys.* Vol. 111 (2012), pp.084507-1-084507-4.
- [3] A. Mittiga, E. Sslza, F. Sarto, M. Tucci and R. Vasanthi: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 88 (2006), pp. 163502-1-163502-3.
- [4] A. Zainelabdin, S. Zaman, G. Amin, O. Nur and M. Willander: *Appl. Phys. A* Vol. 108 (2012), pp. 921-928.
- [5] E.H. Rhoderick and R.H. Williams in: *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford University Press, 2nd Ed. (1988).
- [6] S.K. Cheung and N.W. Cheung: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 49 (1986), pp. 85-87.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen Aiping, Long Hua, Li Xiangcheng, Li Yuhua, Yang Guang * and Lu Peixiang, 2008. "Controlled growth and characteristics of single-phase Cu_2O and CuO films by pulsed laser deposition." *Vacuum.*, 83 : 927 – 930.
- [2] Alkoy E.M., Kellya P.J. 2005. "The structure and properties of copper oxide and copper aluminium oxide coatings prepared by pulsed magnetron sputtering of powder targets." *Vacuum.*, 79 : 221–230.
- [3] Le Chen,* Sudhakar Shet, Houwen Tang, Heli Wang, Todd Deutsch, Yanfa Yan,* John Turner and Mowafak Al-Jassim. 2010. "Electrochemical deposition of copper oxide nanowires for photoelectrochemical applications." *Journal of Materials Chemistry.*, 20 : 6962–6967.
- [4] Siripala, W. et. Al. 1995. "Spectral responses of electrodeposited cuprous oxide thin film electrodes" *J. Nath. Sci.*, 23(1) : 49 – 54.
- [5] Ezenwa I.A. et. Al. 2012. "Optical Analysis of Chemical bath Fabricated CuO Thin Films." *Research Journal of Recent Sciences.*, 1(1) : 46-50.
- [6] Poulston S., Parlett P. M., Stone P. and Bowker M., 1996. "Surface Oxidation and Reduction of CuO and Cu_2O Studied Using XPS and XAES." *SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS.*, 24 : 811-820.
- [7] Matsuzaki Kosuke., Nomura Kenji., Yanagi Hiroshi., Kamiya Toshio., and Masahiro Hirano, 2008. "Epitaxial growth of high mobility Cu_2O thin films and application to pchannel thin film transistor." *Appl. Phys. Lett.*, 93 : 202107.
- [8] Jeong SeongHo. et. al. 2010. "Thin zinc oxide and cuprous oxide films for photovoltaic applications." *J. Appl. Phys.*, 56 : 3601.
- [9] Satischandra, B. et. al. 2005. "Thin films and Heterostructures for oxide electronics." *Springer* 10 : 303 - 307.
- [10] Chavez,H., Jordan M. , McClure J.C. , Lush G. and Singn V.P. , 1997. Physical and Electrical Characterization of CdS Films Deposition by Vacuum Evaporation , Solution Growth and Spray Pyrolysis , *J.Master.Sci : Matter Elec* , 8 : 151-154.
- [11] Nicollian E.H. And Brews J.R. **MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology.** New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1982.

- [12] Schroder D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1990.
- [13] Sze S.M. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2nd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2002.
- [14] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2005.
- [15] ฐิตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [16] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [17] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [18] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [19] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [20] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

- [21] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [22] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [23] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [24] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีในเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [25] สุกฤษฎี เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [26] ฐิตกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [27] อดุลย์ หาญวังม่วง. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [28] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CdTe ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [29] ไกรศักดิ์ ยืนยง “การศึกษาข้อสัมผัสไอหุ้มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

- [30] สุริยา มีเปี่ยมสมบุรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักกัไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [31] Kórdoš, P., Stoklas, R., Gregušová, D., Gaži, Š., and Novák, J., “Trapping effects in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistor investigated by temperature dependent conductance measurements” **Applied Physics Letters**. vol.96. 2010. pp. 013505-1 – 013505-3.
- [32] Abrikosov N.Kh., Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. **Semiconducting II-VI, IV-VI, and V-VI Compounds**. New York : PLENUM PRESS. 1969. [22] Ray B. **II-VI Compounds**. Oxford : PERGAMON PRESS. 1969.
- [33] Jasennek A., Rau U., Nadenau V. and Schock H.W. “Electronic Properties of CuGaSe_2 -Based Heterojunction Solar Cells Part II Detect Spectroscopy” **J. Appl. Phys.** vol. 87. 2000. pp. 594-602.
- [34] Barsoukov E. and Macdonald J.R. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application**. 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2005.
- [35] Friesen G., Ozsar M.E. and Dunlop E.D. “Impedance Model for CdTe Solar Cells Exhibiting Constant Phase Element Behavior” **Thin Solid Films**. vol. 361-362. 2000. pp. 303-308.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 75-1546		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd S		2 θ	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		26.505	100	1	1	1
		30.699	22	2	0	0
		43.969	47	2	2	0
		52.076	33	3	1	1
		54.579	5	2	2	2
		63.832	6	4	0	0
		70.468	11	3	3	1
		72.585	5	4	2	0
		80.842	10	4	2	2
		86.902	7	5	1	1
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 5.82000 Z = 4		Mol. weight = 144.47 Volume [CD] = 197.14 Dx = 4.868 Ucor = 14.05				
ICSD COLLECTION-CODE : 031075 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 62, page 260, (1925) : Ulrich, F., Zachariasen, W.						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 80-1916 Radiation = 1.540600 Quality : Calculated						
CuO		2th	I	h	k	l
Copper Oxide		32.476	7	1	1	0
Lattice : Monoclinic		Mol. weight = 79.55				
S.G. : Cc (9)		Volume[CD]= 81.50				
a = 4.69270		Dx= 6.483				
b = 3.42830		I/Icor = 3.88				
c = 5.13700		Bata = 99.55				
a/b=1.36881		Z = 4				
c/b=1.49841		51.313	1	1	1	2
ICSD COLLECTION CODE : 069757		53.407	10	0	2	0
TEMPERATURE FACTOR : ATF		55.642	1	0	2	1
REMARKS FROM ICSD : REM TEM Mentioned.		58.250	14	2	0	2
		61.458	18	-1	1	3
		65.723	13	0	2	2
		66.144	14	-3	1	1
		67.848	8	1	1	3
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)		68.008	15	2	2	0
primary refernce:		68.789	<1	-2	2	1
*J.Phys.: Condens. Matter, volume 3 , page8173,		71.574	<1	-3	1	2
(1983):Koehler , B.U., Jansen, M.		72.320	6	3	1	1
		72.864	<1	2	2	1
		74.923	5	0	0	4
		75.129	8	-2	2	2
		79.634	<1	0	2	3
Radiation :CuKa1		80.050	2	-2	0	4
Fitter : Not specified						
Lambda : 1.54060						
d-sp : Calculated spacings						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายจิตินัย แก้วแดง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2530	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2536	ปริญญาเอก	Ph.D.	วัสดุศาสตร์	Bordeaux University I, France

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
2. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO₂ Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 781-788.
4. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 774-780.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, *Proceedings*, pp. 2078-2088.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan *Proceedings*, pp. 2070-2077.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล งามนิศย์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2531	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของแข็ง)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO_2 Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131
2. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 781-788.
4. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 774-780.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, *Proceedings*, pp. 2078-2088.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan *Proceedings*, pp. 2070-2077.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
11. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparuchikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat, "Fabrication and Characterization of Heterojunction of CdS Thin Films and CuAlO₂ Ceramic Pill Substrate" *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 22(2), 2012, pp. 125-129.
12. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, "Thermoelectric Properties of Ni-Doped CuAlO₂" *Physics Procedia*, vol.2, 2009, pp.101-106.
13. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripudhdaiwon and N. Promros "Influence of Substrate Temperature on Some Properties of Close-Spacing Thermal Evaporated CdTe Thin Films" *Advanced Materials Research*, Vol. 55-57, 2008, pp.881-884.

14. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007, Beijing, China, Proceedings, pp.1299-1302.
15. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Co-existence of F and Sb Dopant in Transparent Conducting SnO₂ Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Method" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007. Beijing, China, Proceedings, pp.1269-1274.
16. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Growth and Characterization of Co-Doped Fluorine and Antimony in Tin Oxide Thin Films Obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis" Journal of Solid Mechanics and Material Engineering, Vol. 1, No. 4, 2007, pp.592-601. (ผู้วิจัยหลัก)
17. T. Gaewdang "Investigations on Chemically Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films With Low Zn Content" Materials Letters, Vol.59, 2005 pp. 3577- 3584.
18. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Comparative Studies of Thermally Evaporated Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films Prepared by Using Different Precursors" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.694- 695.
19. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of B-Doped Cd_{0.6}Zn_{0.4}S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696- 697.
20. Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Thickness Dependence of Structural, Optical and Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand, 2004, pp.581-582.
21. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand, 2004, pp.583-584.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2529	ปริญญาโท	วท.ม.	คณิตศาสตร์ ประยุกต์	มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ
2538	ปริญญาเอก	Ph.D.	วิศวกรรมไฟฟ้า	City University London, U.K.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.
4. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2070-2077.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, C. Thaisatuen, W. Bunkua, A. Ariyaritand and T. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of CdTe Thin Films with Different Thicknesses" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 352-356.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351.
9. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang "Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films" The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200.
10. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen and T. Gaewdang "Preparation and Characterization of Cadmium Sulfide Thin Films", The 25th Congress on Science and Technology of Thailand, 1999, pp. 546-547.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ
ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8
ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2522	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
2525	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ทฤษฎี)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2532	ปริญญาเอก	Ph.D.	ฟิสิกส์นิวเคลียร์	Notre Dame University, U.S.A.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparachikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Fabrication and Characterization of Heterojunction for CdS Thin Films and CuAlO₂ Ceramic Pill Substrate" Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 22 No. 2, 2012, pp.125-129.
2. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, J. Wattananurak and C. Poo-Rakkiat "Structural and Electrical Properties of Ni-Doped CuAlO₂" International Conference on Engineering,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applied Science and Technology (ICEAST2007), November 21-23, 2007, Bangkok, Thailand, Proceedings, pp.885- 888.

4. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang “Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films” The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200.
5. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang “Crystalline Bulk Growth of Cadmium Sulfide”, The 23rd Congress on Science and Technology of Thailand. 1997, pp. 172-173.
6. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen and T. Gaewdang “Influence of Germanium on Some Properties of Indium Oxide Compounds” The 22nd Congress on Science and Technology of Thailand, 1996, pp. 142-143.
7. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen, and T. Gaewdang “The Influence of Tin on the Electrical Resistivity of Indium Oxide Ceramic Samples” The 21st Congress on Science and Technology of Thailand, 25-27 October (1995), pp. 200-201.