



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงเพื่อ
ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$

Preparation of Cu_2O Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering
Method for $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ Heterojunction Solar Cell

นายจิตินัย แก้วแดง

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีแอทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเพื่อ
ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายฐิตินัย แก้วแดง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: thitinai.ga@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางงามนิษฐ์ วงษ์เจริญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: ngamniti.wo@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในโครงการงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอะมอร์ฟัสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสและบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีแอทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่มีต่อโครงสร้างผลึกสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สำหรับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสมีขนาดของเกรน ช่องว่างแถบพลังงาน สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และสภาพคล่องพาหะเท่ากับ 127 นาโนเมตร 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ 89.4 โอห์ม-เซนติเมตร 2.39×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2.91 (เซนติเมตร)²/โวลต์-วินาที ตามลำดับ ต่อจากนั้นได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งพารามิเตอร์ของไดโอด ได้แก่ แพลกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรมที่อุณหภูมิห้อง สามารถคำนวณหาได้จากกราฟการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าภายใต้การไบแอสตรงซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.03 และ 0.75 อิเล็กตรอนโวลต์และ 1.70 กิโลโอห์มตามลำดับ สมบัติของสถานะผิวเชื่อมต่อของไดโอดดังกล่าวนี้สามารถศึกษาได้โดยการวัดลักษณะเฉพาะของความจุ-แรงดันไฟฟ้า และความนำ-แรงดันไฟฟ้า และค่า $\frac{G}{\omega}$ ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่แสดงว่าเป็นผลของการจับพาหะของสถานะผิวเชื่อมต่อ อีกทั้งความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของไดโอดนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงนั้นสามารถประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O วิธีแอทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

Research Title: Preparation of Cu₂O Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering Method for p-Cu₂O/n-Si Heterojunction Solar Cell

Researcher: Mr. Thitinai Gaewdang and Mrs. Ngamnit Wongcharoen

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

In this research, Cu₂O thin films with amorphous phase were prepared on glass and n-Si (100) substrates through reactive dc magnetron sputtering. The influence of the flow rate of O₂ on the structural, optical and electrical properties of Cu₂O films was studied. At O₂ flow rate of 0.8 sccm, the average crystal size, energy gap, resistivity, hole concentration and mobility of the Cu₂O films deposited on glass substrate are 127 nm, 2.80 eV, 89.4 Ω·cm, 2.39×10¹⁶ cm⁻³ and 2.91 cm²/(V.s), respectively. A p-Cu₂O films/n-Si (100) substrate heterojunction diode was fabricated. The diode parameters such as ideality factor, barrier height and series resistance were determined from the forward bias I-V characteristics at 300K to be 4.03, 0.75 eV and 1.70 kΩ, respectively. The interface states properties of p-Cu₂O films/n-Si (100) substrate heterojunction diode were performed using C-V and G-V characteristics. The frequency dependence of $\frac{G}{\omega}$ could be attributed to trapping states. The series resistance of the diode was observed to be decreasing with increasing frequency. The obtained results indicate that p-Cu₂O films/n-Si (100) can be used in optoelectronic device application.

Keywords: Cu₂O thin films, Reactive dc magnetron sputtering, Optical properties, Electrical properties, Photoconductivity.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสลิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu K_α 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ นายปภาวิทย์ สมตน นางสาวเมธิชา วิไล และนางสาวจรรวณ มีนาง นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายฐิตินัย แก้วแดง
นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 โครงสร้างของผลึก	6
2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	6
2.2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO	9
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	11
2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	12
2.3.2 การหาขนาดของเกรน	13
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	17
2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	18
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	19
2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	20
2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	19
2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	21
2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	22
2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 รอยต่อพี-เอ็น	31
2.7.1 บริเวณพร่องพาหะ	31
2.7.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	31
2.7.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ	37
2.7.2 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ	45
2.7.3 ความจุแพร่ซึม	48
2.8 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	51
2.8.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	52
2.8.2 กลไกการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ	53
2.9 อิทธิพลของการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	56
2.10 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	58
2.11 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	60
2.12 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ	61
2.13 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ	65
2.13.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี	65
2.14 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	67
2.14.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	67
2.14.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	68
2.14.3 กราฟของโบด	72
2.14.4 อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์	74
2.15 หลักการสปีดเตอริง	74
2.15.1 โกล์วดิสซาร์จ	75
2.15.2 สปีดเตอริง	77
2.12.2.1 ยิลด์การสปีดเตอริง	77
2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง	78
2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	79
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	82

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	88
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	88
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)	88
3.2 ขั้นตอนการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O /n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	89
3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ	89
3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	93
3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	94
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	101
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	101
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	102
3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง	102
3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	103
3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	103
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	106
4.1 ผลของอัตราการใช้ของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดดิซาร์จ	106
4.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	111

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	111
4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	112
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	112
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	113
4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	114
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	115
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	115
4.4.2 ผลการศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	120
4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	122
4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	122

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซี- แมกนีตรอนสปัตเตอริง	126
4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	134
4.5.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	136
4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์สารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	137
4.6.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	137
4.6.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	146
4.6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำp- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง	155
4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	169

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 80 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si(100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	176
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	186
5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	186
5.2 ผลการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซี-แมกนีตรอนสเปคเตอรืง	187
5.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธ-พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	187
5.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่หลายๆ ค่า เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ที่ อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	188
5.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	189
5.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำp-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง	189
5.3 ข้อเสนอแนะ	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	191
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้	191
เอกสารอ้างอิง	201
ภาคผนวก	207
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	209
ประวัตินักวิจัย	212



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
4.1 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	110
4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่บริเวณผิวน้ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	114
4.3 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	119
4.4 แสดงค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	120
4.5 ค่าความต้านทานความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	125
4.6 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	133
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้น กับ อัตราการไหลของออกซิเจนเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอทไฟลชีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	135
4.8 แสดงค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 และ 3 โวลต์	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม R_s ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	146
4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	150
4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	164
4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	174
4.13 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	180
4.14 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	182

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ	5
2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.3 แสดงการบอกชื่อออร์บิทัลต่างๆของผลึก	7
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O	9
2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	10
2.6 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO	11
2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	12
2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	13
2.9 แสดงค่า β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	14
2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.11 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	16
2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น	17
2.13 แสดงส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	19
2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	20
2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	20
2.16 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	22
2.17 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	23
2.18 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	24
2.19 แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	25
2.20 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	29
2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 แสดงรอยต่อพี-เอ็นจับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน	
ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)	
ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	
ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ	
ง. โครงสร้างแถบพลังงาน	32
2.23 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ $(\psi_{bi} - V - 2kT/q)$ สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อจับพลันในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์	36
2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2 - V$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	38
2.25 แสดงแผนภาพแถบพลังงานกับระดับพลังงานควาซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข	
ก. ไบแอสตรง	
ข. ไบแอสกลับทาง	41
2.26 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ	
ก. เงื่อนไขไบแอสตรง	
ข. เงื่อนไขไบแอสกลับทาง	43
2.27 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ	
ก. กราฟเชิงเส้น	
ข. กราฟกึ่งลอการิทึม	44
2.28 แสดงลักษณะกระแส – แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน	
ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ	
ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม	
ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง	
ง. ผลของความต้านทานอนุกรม	
จ. การแพร่ไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด – การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.29 แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง	51
2.30 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ	52
2.31 แสดงกลไกผลของการดูดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย ก. รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	54
2.32 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนัลและเมื่อผ่านการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl_2	55
2.33 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สถานะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	59
2.34 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด ก. บริเวณขุมพาหะ ข. บริเวณพร่องพาหะ ค. บริเวณชั้นกลับกลาย	60
2.35 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	61
2.36 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	63
2.37 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่างๆ ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	63
2.38 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยืดอกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	67
2.40 แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	68
2.41 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	68
2.42 แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	69
2.43 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ข,จ) และ แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ค,ฉ)	70
2.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	72
2.45 แสดงกราฟโนควิสต์ (ก) และกราฟของโบด (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	73
2.46 แสดงโครงสร้างของการโก้วคิซาร์จ	76
2.47 แสดงการเกิดสปีดเตอร์ริงที่ผิวเป้า	77
2.48 แสดงการสปีดเตอร์ริงโดยดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	78
2.49 แสดงการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	80
2.50 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	82
2.51 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	83
2.52 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1,2,4,6,8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	84
2.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่อง ฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	85
2.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{(-1/4)}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{(-1/2)}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	87
3.1 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)	91
3.2 แสดงขั้นตอนและกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA	92
3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	93
3.4 (ก.) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า (ข.) ภาพแสดงคันบังคับกับชุดเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ	95
3.5 (ก.) แสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มพัลลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวจความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มฟิวส์กระจาย) (ข.) แสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	95
3.6 (ก) แสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open (ข) แสดง speedy valve	96
3.7 (ก) แสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ (ข) แสดง power supply	97
3.8 (ก) แสดงสวิตช์ของ power supply (ข) แสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	98
3.9 แสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 (ก) แสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด	
(ข) แสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	99
3.11 แสดงภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	100
3.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีเอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	101
3.13 แสดงภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	101
3.14 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7001F	102
3.15 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100	102
3.16 แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer	103
3.17 แสดงภาพถ่ายอิล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	104
3.18 แสดงภาพถ่ายอิล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	104
3.19 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	104
3.20 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูง	105
4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ	107
4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ	108
4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	111
4.5 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่า	111
4.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	112
4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่า	113
4.8 แสดงภาพถ่ายตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่า	114
4.9 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ	115
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	115
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	116
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอร่าที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	117
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	117
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	118
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	118
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	119
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ	120
4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานของอะมอร์ฟัสของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่มีผู้รายงานไว้ (Huang, et al., 2015)	121
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	122
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	122
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	123
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	124
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	124
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	125
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	129
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	129
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	130
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	130
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	131
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	131
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)	132
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)	132
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	134
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	136
4.44 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ก) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยไม่มีการฉายแสง (ข) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้การฉายแสง	138
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง	138
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง	139
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง	139
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการแอททิฟิเคชันแมกนีตรอนสปัตเตอริง	140

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	140
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	145
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	145
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	147
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	147
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	148
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ I ที่อธิบายวิธีของช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	148
4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I โดยวิธีของช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง	149

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	152
4.58 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	152
4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	153
4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	153
4.61 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	154
4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า (C) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	155
4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า (G) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	157
4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	157
4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	159
4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	160
4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_s กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	160
4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ox} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	161
4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_n กับ ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	161
4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	168
4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ ψ_s กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง	168

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	169
4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N _{ss} กับ E _{ss} -E _v ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	170
4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	171
4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	171
4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	172
4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	172
4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริง เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	173
4.80 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	175

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	176
4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $-dC/d\ln f$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	177
4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	177
4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	178
4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	178
4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	179
4.87 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	179
4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	181

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.89 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง	184
4.90 แสดงแผนภาพการกระจายของประจุไฟฟ้าของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข	
ก. ชุมชุมพาหะ (accumulation)	
ข. พร่องพาหะ (depletion)	
ค. ชื่นกลับกลาย (inversion)	185



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบกเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 (Moller, 1993) จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดผลิตจากซิลิคอน ซิลิคอนมีสมบัติการดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

สารกึ่งตัวนำคิวปรัสออกไซด์ (cuprous oxide; Cu_2O) เป็นสารประกอบออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีความโดดเด่น กล่าวคือมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.7-2.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งขึ้นกับวิธีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง สมบัติการดูดกลืนแสงจึงสูงถึงระดับ 10^4 (เซนติเมตร) $^{-1}$ โครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีข้อดีหลายประการ กล่าวคือโลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ Cu_2O ไม่เป็นสารพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตได้ด้วยกรรมวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และสภาพคล่องของพาหะสูง ในระดับ 100 ตารางเซนติเมตร/(โวลต์.วินาที) (Wong et al., 2016) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีศักยภาพที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก (Wong et al., 2016; Chen, 2013) ตัวตรวจรู้แก๊สออกซิเจน (Praveen Janantha et al., 2009) ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Hara et al., 1998) สิ่งประดิษฐ์บันทึกข้อมูลด้วยสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Kale et al., 2003) อีกทั้ง Cu_2O ยังเป็นสารประกอบออกไซด์ต้นกำเนิดของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสเฟต CuMO_2 ($\text{M} = \text{Al, Cr, B, In, Ga}$) ซึ่งลักษณะของแถบวาเลนซ์และแถบนำเกิดจากระดับพลังงานของไอออน Cu^+ (Zhang et al., 2013)

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ Cu_2O ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส วิธีโซล-เจล วิธีออกซิเดชันจากฟิล์มบางของโลหะ Cu ด้วยความร้อน วิธีพาไอร่หะสารเคมี วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และวิธีสปีดเทอริง (Kuo et al., 2010; Jung et al., 2015) เป็นต้น

อะคิโมโตะและร่วมงาน (Akimoto et al., 2006) ได้ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง p-Cu₂O/n-ZnO เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยชั้นฟิล์มบาง Cu₂O เติริมโดยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ส่วนฟิล์มบาง ZnO เติริมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้ประสิทธิภาพประมาณ 0.4 % สมบัติการเรียงกระแสแบบไดโอดระหว่าง ZnO กับ Cu₂O ทั้งภายใต้การฉายแสงอาทิตย์เทียมและไม่ฉายแสง ขึ้นกับความดันย่อยของ O₂ ขณะทำการเคลือบฟิล์ม ในปี ค.ศ. 2006 จากการปรับแต่งรอยต่อวิวิธพันธุ์เป็น AZO/Cu₂O ได้ประสิทธิภาพเพิ่มเป็น 2 % อันเนื่องมาจาก AZO มีค่าฟังก์ชันงาน (work function) ต่ำกว่า ZnO และ AZO มีช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่า ZnO ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงสามารถตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ได้ ในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2015 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ AZO/ZnO/Cu₂O/Au มีประสิทธิภาพสูงกว่า 6 % ซึ่งสูงกว่าปี ค.ศ. 2006 ประมาณ 2 เท่า (Wong et al., 2016)

มีผู้รายงานว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si สามารถแสดงสมบัติเรียงกระแสแบบไดโอดได้ และพบว่ามีแรงดันเทิร์น ออน (turn on voltage) ประมาณ 1 โวลต์ โดยฟิล์มบาง Cu₂O เติริมโดยวิธีพาโอระเหยสารเคมี (Gupta et al., 2013) วิธีออกซิเดชันของฟิล์มบาง Cu ด้วยความร้อนอย่างฉับพลัน (Ismail, 2009) และวิธีอบสารละลายเคมี (Serin et al., 2009) แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีข้อดีหลายประการคือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางต่ำ ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบางฟิล์มบาง Cu₂O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงให้เคลือบบนแผ่นผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) เพื่อให้เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si และในเบื้องต้นจะทำการศึกษาสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si นี้ โดยการวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ เช่นกระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นในขั้นต่อไปจะเป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น แผ่นผลึกเดี่ยว n-Si มีข้อดีคือมีคุณภาพสูง มีข้อบกพร่องผลึกน้อย จัดหาได้ง่าย สามารถที่จะทำความสะอาดผิวหน้าของ Si ด้วยการกัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมี ซึ่งสามารถที่จะลดปริมาณสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface states) ที่บริเวณพร่องพาหะ (depletion region) ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ได้ดี จากนั้นจึงทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (grid) โดยวิธีพิมพ์สกรีน ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะใช้วิธีเคลือบด้วยโลหะ Al โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป้าที่เป็นโลหะทองแดงความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น อัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน ความดันบรรยากาศของห้องสุญญากาศขณะทำการสปัตเตอริง และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็นต้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.2.5 เคลือบฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงลงบนผลึกเดี่ยวของซิลิคอน (n-Si) เพื่อให้เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p- Cu_2O /n-Si โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยในเบื้องต้นตั้งเป้าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบขนาดพื้นที่ 0.5 ตารางเซนติเมตรไว้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป้าที่เป็นโลหะทองแดง ความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น อัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน ความดันบรรยากาศของห้องสุญญากาศขณะทำการสปัตเตอริง และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็นต้น
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.3.3 ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.3.6 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ต้นแบบโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า, วัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอริง ภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการวิจัย
- 1.4.2 เตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป่าที่เป็นโลหะทองแดง ความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น อัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน ความดันบรรยากาศของห้องสุญญากาศขณะทำการสปัตเตอริง และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็นต้น
- 1.4.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.4.4 ศึกษาลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1000 นาโนเมตร
- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.4.7 ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการฉายแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบางแล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 1.4.8 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ต้นแบบโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า, วัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ
- 1.4.9 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยและสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป่าที่เป็นโลหะทองแดงความบริสุทธิ์สูง ที่มีคุณภาพดี
- 1.5.2 ทำให้ได้มีโอกาสศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ ต้นแบบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบขนาดพื้นที่ 0.5 ตารางเซนติเมตรไว้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์
- 1.5.3 ได้แนวทางในการพัฒนาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2530; จูตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ดังภาพที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียม และเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สနာมแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

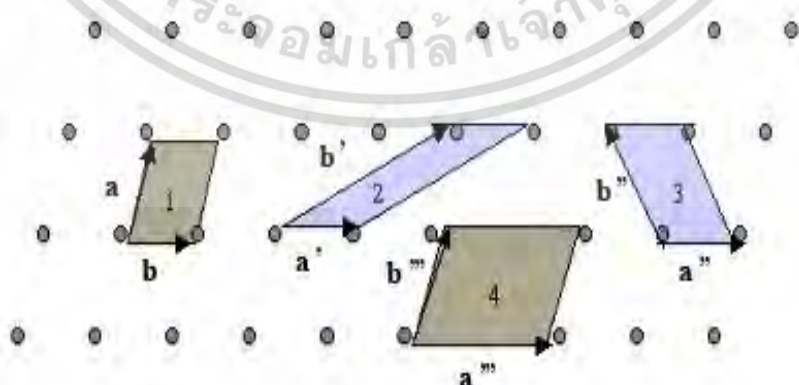
2.2 โครงสร้างของผลึก (งามนิศย์, 2530; จูตินัย, 2546; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975;)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ในโครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันไปด้วย เช่น สมบัติการทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังภาพที่ 2.2 ในระบบสองมิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1

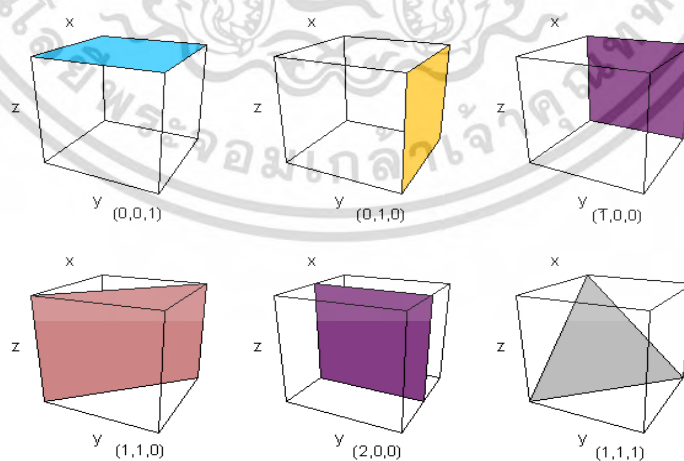


ภาพที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

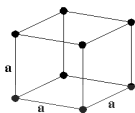
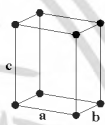
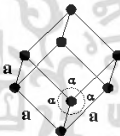
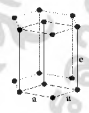
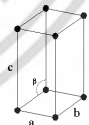
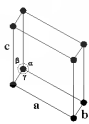
ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ $\vec{a}$, $\vec{b}$ และ $\vec{c}$ และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic),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



ภาพที่ 2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

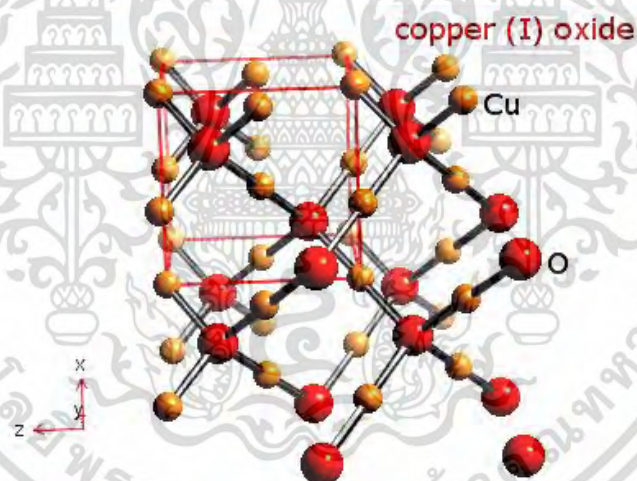
ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO (Bugarinovic, 2011; ฐิตินัย, 2556)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากชั้นแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (BCC) ของอะตอมออกซิเจนกับชั้นแลตทิซเฟสเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ของอะตอมของธาตุ Cu ชั้นแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่แลตทิซที่สองจะอยู่เอียงไปในแนวทะแยงมุมของชั้นแลตทิซแรกเป็นระยะ $1/4$ ของความยาวเส้นทะแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อราเคยนำไปใช้ทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O

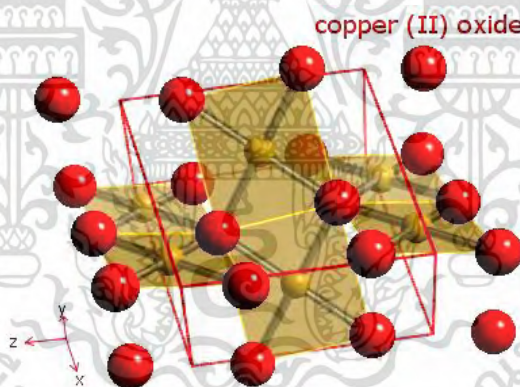
สารประกอบ CuO มีสีแดงพบได้ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO จะมีลักษณะ โคเคนเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในภาพที่ 2.4 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็ว ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

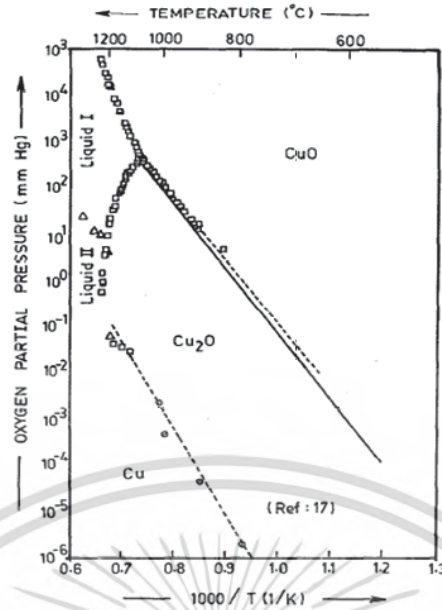
สารละลายแอมโมเนียคาร์บอเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ CuO ให้เป็นส่วนผสมทำไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจแก้สวิตช์ชนิดต่างๆ และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือ เพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)

ภาพที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu , Cu_2O และ CuO



ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO



ภาพที่ 2.6 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย, 2559; งามนิศย์, 2559; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2558; งามนิศย์, 2558)

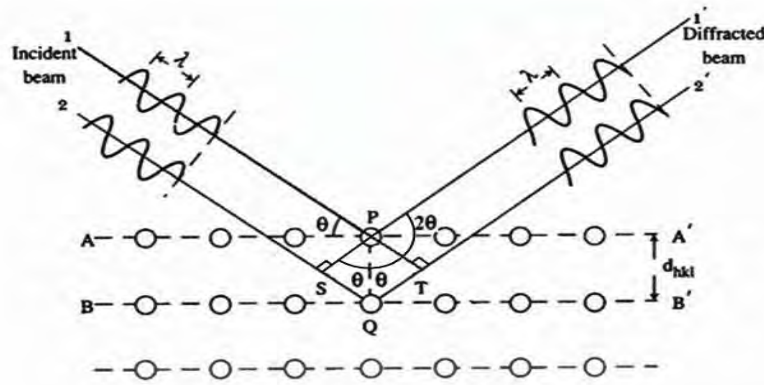
การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ในปี ค.ศ. 1912 แบรกก์ (Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	d_{hkl}	คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	θ	คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...
	2θ	คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้ว กระจ่างออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสี สะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่า ของมุมสะท้อน 2θ ดังแสดงในภาพที่ 2.7

2.3.1 การวิเคราะห์ โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่ง สำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกต ได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์ โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับ จุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

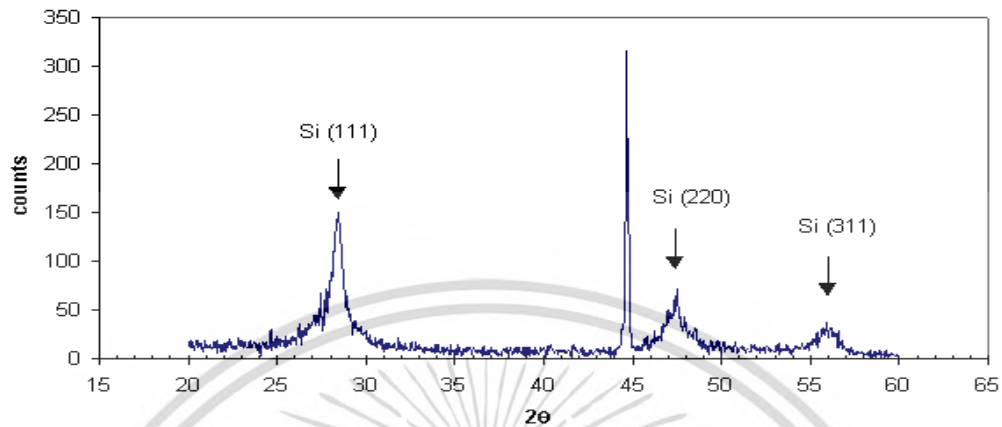
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



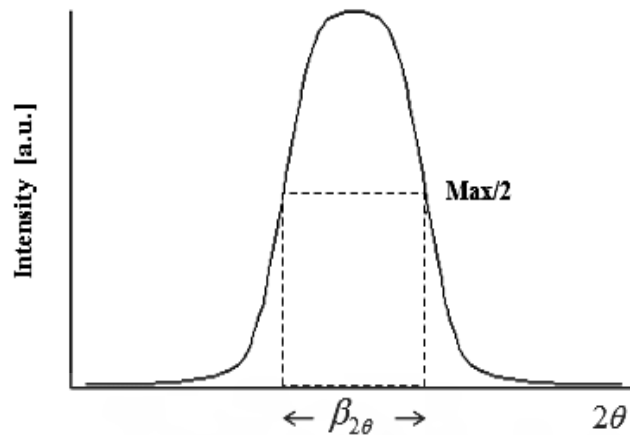
ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.3.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในภาพที่ 2.9 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด
(full width at half-maximum of the diffraction peak)

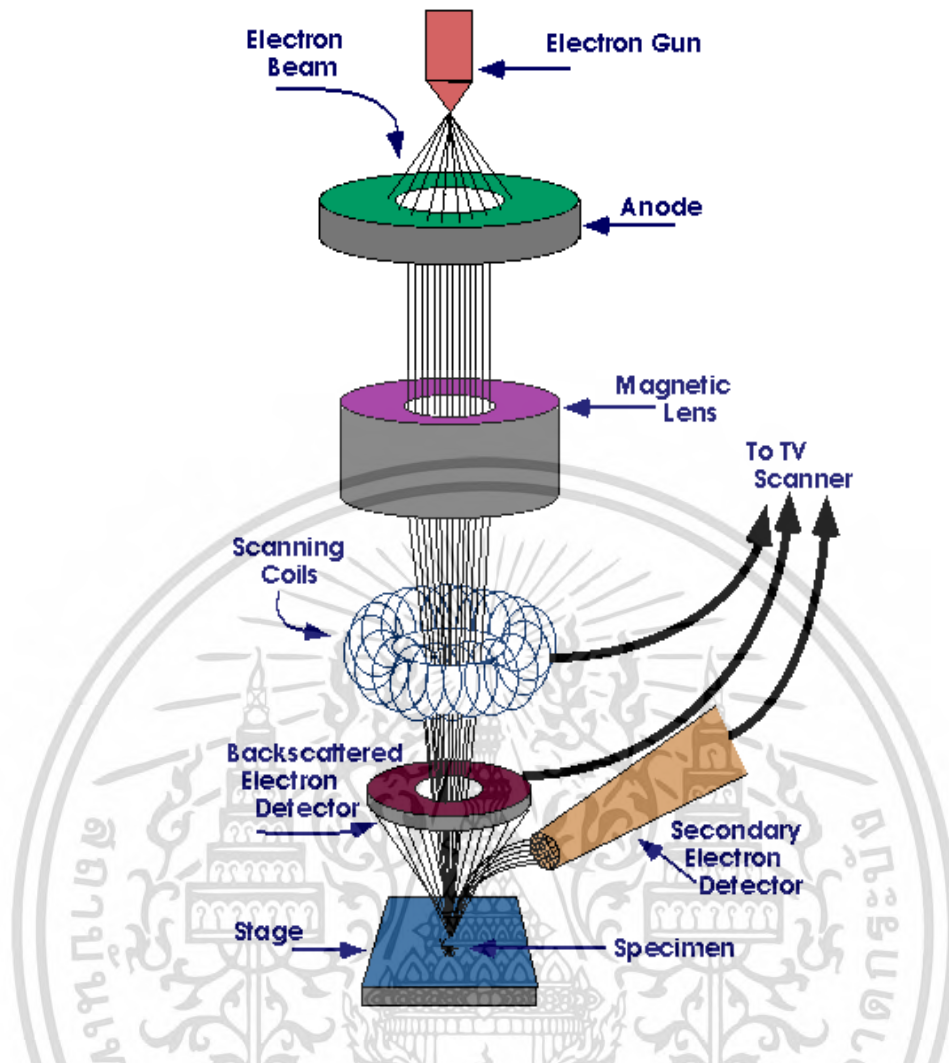


ภาพที่ 2.9 แสดงค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Kittel, 2005; จิตินัย, 2558; งามนิศย์, 2559; จิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2553)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

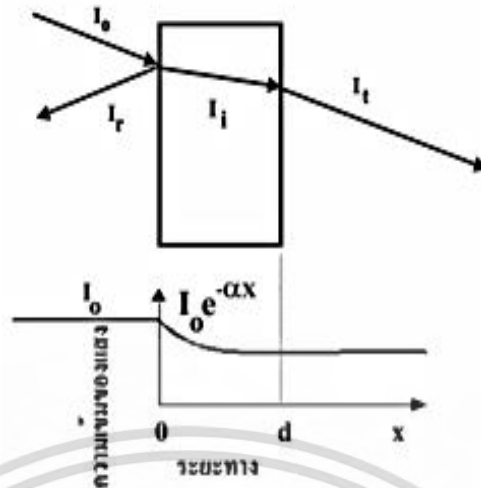
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวกซ์ เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



ภาพที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5 การส่งผ่านแสง (Kittel, 2005; งามนิษฐ์, 2559; จูตินัย, 2531; งามนิษฐ์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; จูตินัย, 2552)

การศึกษาวិธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปที่กระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง

I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)

d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.5)$$

หรือ

$$I_x = RI_0 \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.7)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_i e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

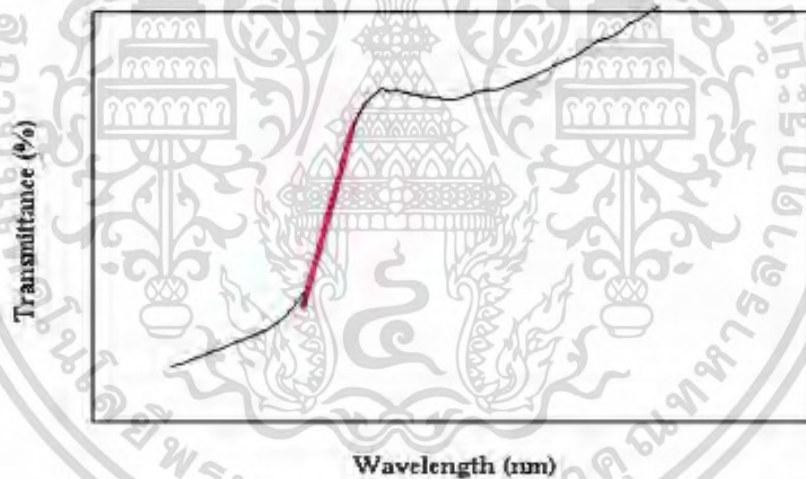
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังภาพที่ 2.12 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



ภาพที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากภาพที่ 2.12 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.12)$$

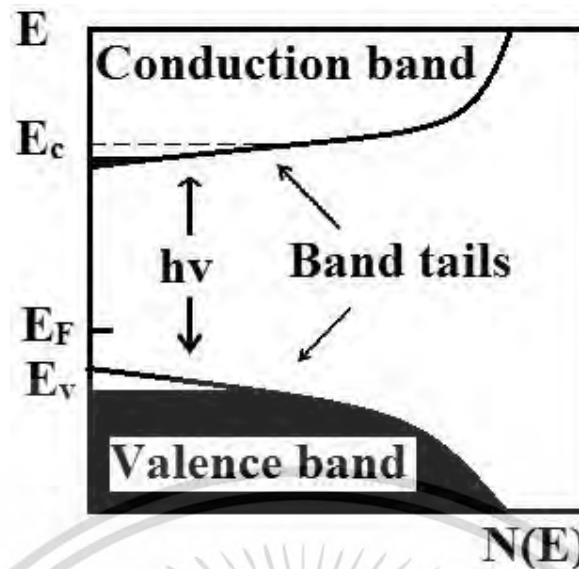
เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; จูตินัย, 2552)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้นี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[-\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.14)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าของที่ของโบลตซ์มันซ์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (จูตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิศย์, 2531; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; จูตินัย, 2552)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

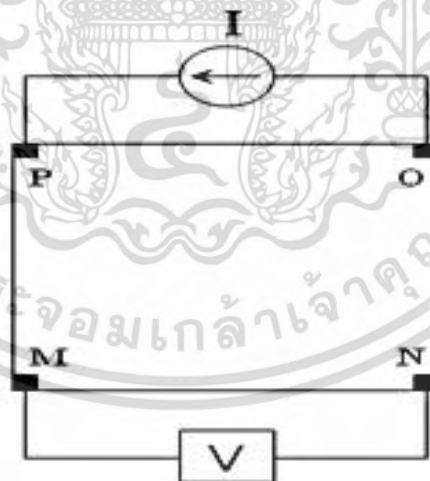
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



ภาพที่ 2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



ภาพที่ 2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.15)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.15)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.16)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.16)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.17)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.18)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.19)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

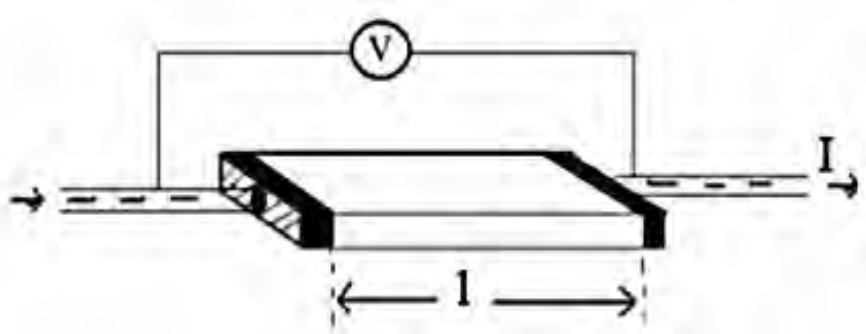
2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังภาพที่ 2.16 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าไม่เหมาะสมในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

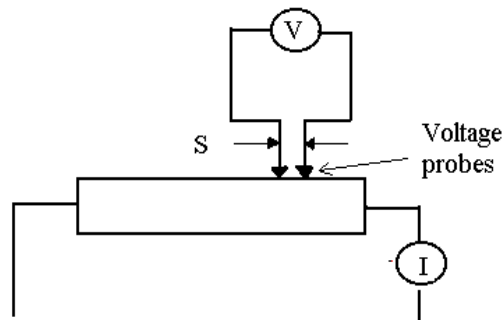
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

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

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

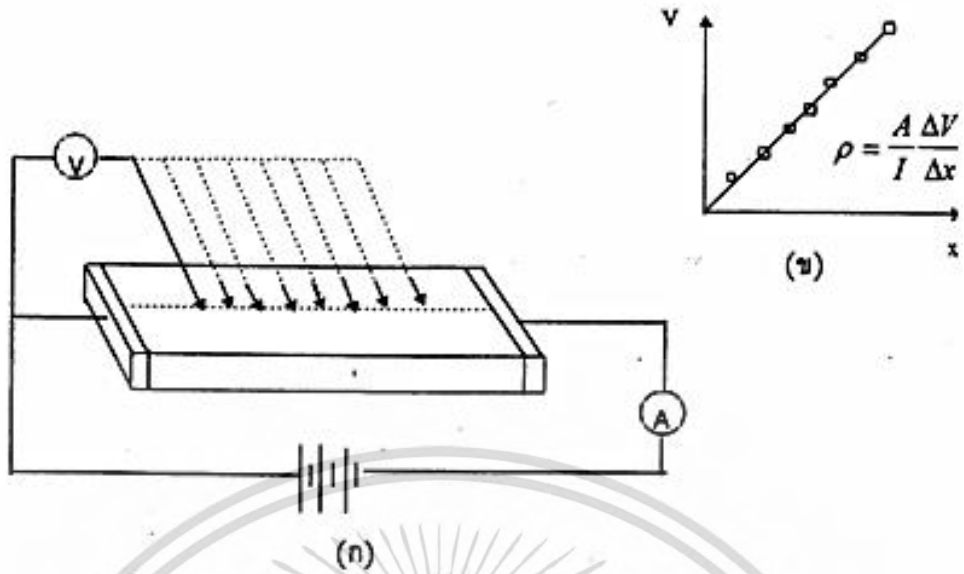
2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.19 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



ภาพที่ 2.17 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังภาพที่ 2.18 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



ภาพที่ 2.18 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.6.4 ปรัชญาการณีสอลล์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2559; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; จูตินัย, 2558)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.22)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.23)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ
 μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

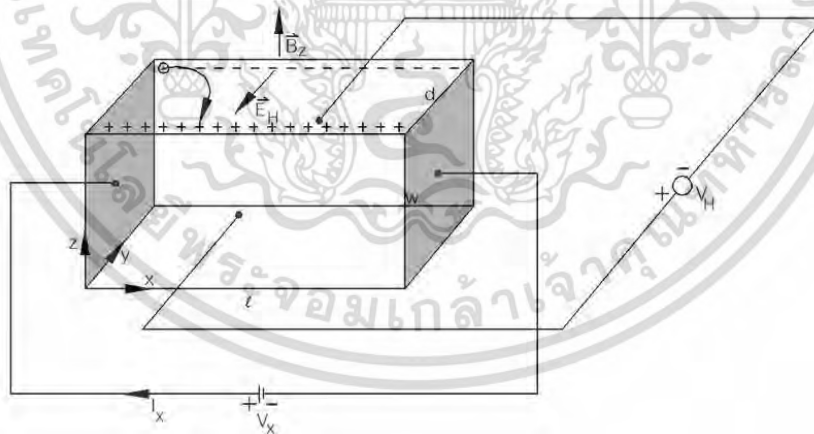
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\text{ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\text{ความหนาแน่นของโฮล} \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.26)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



ภาพที่ 2.19 แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในภาพที่ 2.19 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.28)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น
$$I_x = qn v_x (wd) \quad (2.28)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.29)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.30)$$

จากภาพที่ 2.21

$$A = w \cdot d \quad (2.31)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) และ (2.31)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.32)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.33)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ $-x$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.34)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.37) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.35)$$

เมื่อ $J_x = \frac{I_x}{wd}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.37)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy \quad (2.38)$$

$$= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_z}{d} \quad (2.39)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.40)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.41)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.42)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.43)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.44)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.45)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนซ์สัมผัสประสิทธิผลแปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.46)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.42) และ (2.43) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.47)$$

หรือ จากสมการที่ (2.42) และ (2.48)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.48)$$

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2558; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; ฐิตินัย, 2552)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

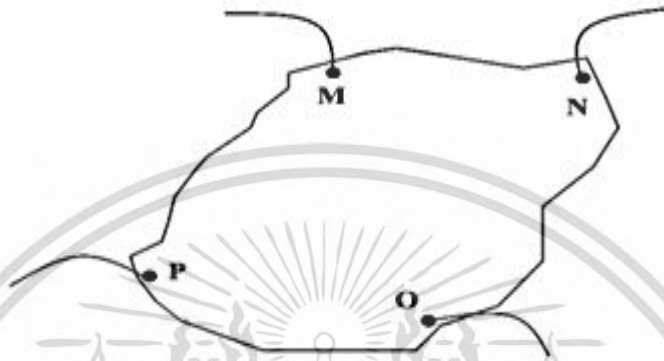
1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด

4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชั้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



ภาพที่ 2.20 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพา์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม
$$R_{\text{MNOP}} = \frac{V_{\text{NP}}}{I_{\text{MO}}} \quad (2.49)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพา์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right). \quad (2.50)$$

เมื่อ V_H คือความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

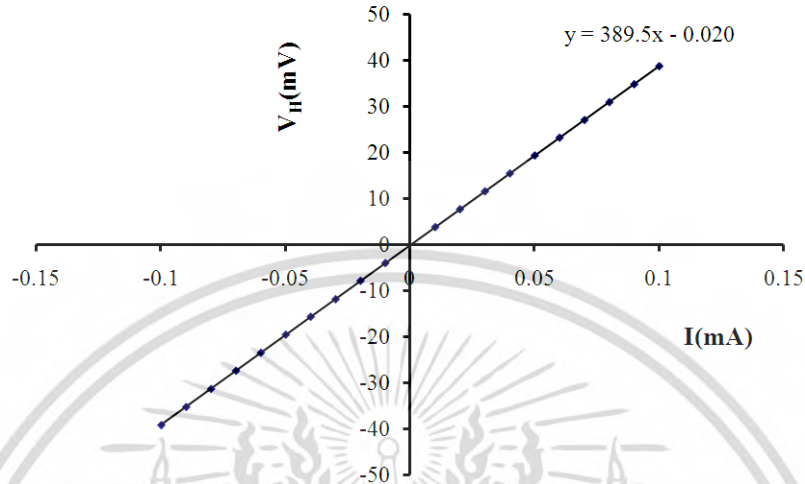
B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.50) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right). \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จาก การทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังภาพที่ 2.21 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า $R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right)$.



ภาพที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.52)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.53)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ $= 6.625 \times 10^{-34}$ จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

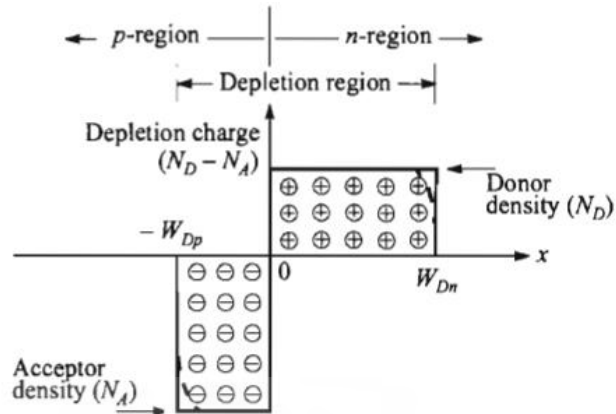
2.7 รอยต่อพี-เอ็น (จูตินัย, 2557)

รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น เป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็นได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอว์กเลย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ซาห์ (Sah), นอยซ์ (Noyce), ชอว์กเลย์ (Shockley) และมอลล์ (Moll) ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น การเกิดและการรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุที่บริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานอนุกรมเป็นต้น รอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้วโดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็นมีสมบัติการเรียงกระแส กล่าวคือยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียวซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดชนิดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อะวาลานซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาร์เรเตอร์ เป็นต้น

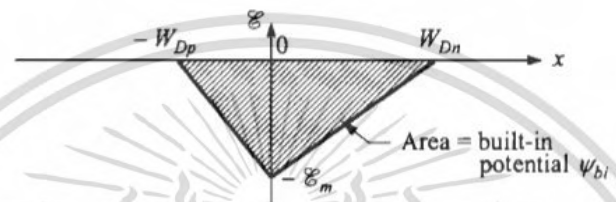
2.7.1 บริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

2.7.1.1 การเกิดรอยต่อนับพลัน (abrupt junction)

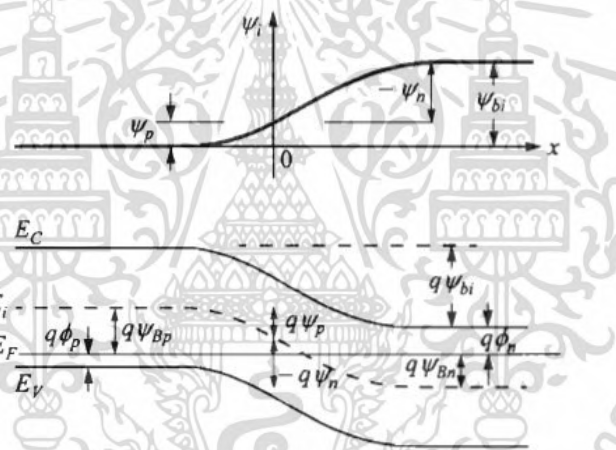
เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างนับพลันจากสารเจือผู้รับ (N_A) ไปยังสารเจือผู้ให้ (N_D) แสดงไว้ในภาพที่ 2.22 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อนับพลันโดยเฉพาอย่างยิ่ง ถ้า $N_A \gg N_D$ (หรือในทางกลับกัน) ผลที่ได้รับจากรอยต่อนับพลันทำให้เกิด p^+-n (หรือ n^+-p)



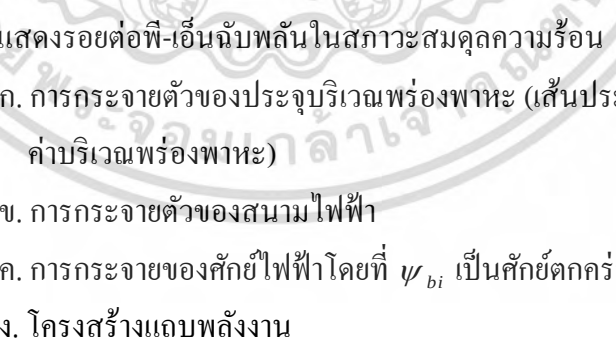
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 2.22 แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉบับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน

ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)

ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ

ง. โครงสร้างแถบพลังงาน

ก่อนอื่นต้องพิจารณาสภาวะสมดุลทางความร้อนขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอสกระแสพัลส์พาหะและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_n = 0 = q\mu_n \left(n\xi + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} \quad (2.54)$$

หรือ

$$\frac{dE_F}{dx} = 0. \quad (2.55)$$

กระแสของโฮลก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ

$$J_p = 0 = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} \quad (2.56)$$

ดังนั้นเงื่อนไขของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนสุทธิขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ จะต้องกำหนดให้ระดับพลังงานเฟอร์มิคที่ตลอด ศักย์ตกคร่อมรอยต่อหรือศักย์แพร่ซึม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 (ข), 2.22 (ค) และ 2.22 (ง) มีค่าเท่ากับ

$$q\psi_{bi} = E_g - (q\phi_n + q\phi_p) = q\psi_{Bn} + q\psi_{Bp} \quad (2.57)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (non-degenerate semiconductor)

$$\begin{aligned} \psi_{bi} &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{n_i} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{n_i} \right) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \end{aligned} \quad (2.58)$$

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

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (2.59)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละข้างของรอยต่อ ถัดไปเราจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า และการกระจายศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ โดยการประมาณว่าประจุบวกและประจุลบที่อยู่เฉพาะภายในบริเวณพร่องพาหะและจะอยู่แยกกันคนละด้านของบริเวณพร่องพาหะอิสระ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะถือว่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ประจุลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านพีจะต้องเท่ากับประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านเอ็นดังสมการ

$$N_A W_{Dp} = N_D W_{Dn} \quad (2.60)$$

จากสมการปัวซอง (equation Poisson) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = \frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_s} = \frac{q}{\varepsilon_s} [N_D^+(x) - n(x) - N_A^-(x) + p(x)] \quad (2.61)$$

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

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_A}{\varepsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.62ก.)$$

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_D}{\varepsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.62ข.)$$

สนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการรวมสมการข้างต้น (2.62ก) รวม (2.62ข) ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.22 (ข) :

$$\xi(x) = -\frac{qN_A(x+W_{Dp})}{\varepsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} \xi(x) &= -\xi_m + \frac{qN_D x}{\varepsilon_s} \\ &= -\frac{qN_D}{\varepsilon_s} (W_{Dn} - x) \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \end{aligned} \quad (2.64)$$

โดยที่ ξ_m คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ $x=0$ จะได้ว่า

$$|\xi(x)| = \frac{qN_D W_{Dn}}{\varepsilon_s} = \frac{qN_A W_{Dp}}{\varepsilon_s} \quad (2.65)$$

รวมสมการที่ (2.63) และ (2.64) อีกครั้งเพื่อหาค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้า $\psi_i(x)$ (ภาพที่ 2.22 (ค))

$$\psi_i(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} (x+W_{Dp})^2 \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.66)$$

$$\psi_i(x) = \psi_i(0) + \frac{qN_D}{\varepsilon_s} (W_{Dn} - \frac{x}{2})x \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.67)$$

ที่แต่ละด้านของบริเวณพ่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เราสามารถคำนวณได้จาก

$$\psi_p = \frac{qN_A W_{Dp}^2}{2\varepsilon_s}, \quad (2.68ก.)$$

$$\psi_p = \frac{qN_D W_{Dn}^2}{2\varepsilon_s}, \quad (2.68ข.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ψ_{bi} จะมีค่าดังนี้คือ

$$\psi_{bi} = \psi_p + |\psi_n| = \psi_i(W_{Dn}) = \frac{|\xi_m|}{2}(W_{Dp} + W_{Dn}) \quad (2.69)$$

ξ_m สามารถคำนวณได้จาก :

$$|\xi_m| = \sqrt{\frac{2qN_A\psi_p}{\epsilon_s}} = \sqrt{\frac{2qN_D\psi_n}{\epsilon_s}} \quad (2.70)$$

จากสมการที่ (2.69) และ (2.70) บริเวณพร่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

$$W_{Dp} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (2.71ก.)$$

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (2.71ข.)$$

$$W_{Dp} + W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \psi_{bi}} \quad (2.72)$$

จากสมการที่ (2.71ก.), (2.71ข.) และ (2.72) สามารถอนุมานได้ดังนี้

$$\frac{|\psi_n|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dn}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.73ก.)$$

$$\frac{|\psi_p|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dp}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.73ข.)$$

สำหรับรอยต่อฉนวนด้านใดด้านหนึ่ง ($p^+ - n, n^+ - p$) ในกรณีนี้สมการที่ (2.58) จะใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ โดยที่ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและบริเวณพร่องพาหะจะปรากฏอยู่ในบริเวณสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนน้อยๆ เมื่อลดรูปสมการที่ (2.72) จะได้

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{qN}} \quad (2.74)$$

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

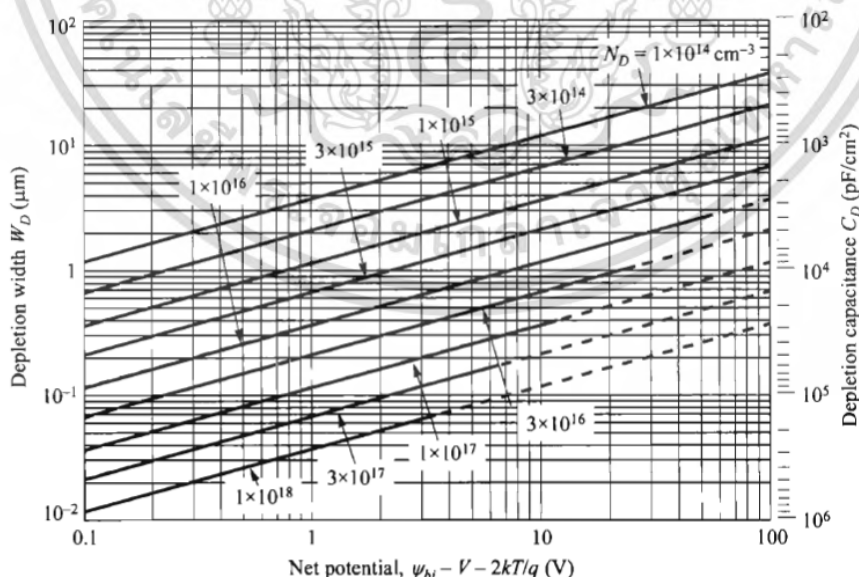
$$\psi_i(x) = |\xi_m| \left(x - \frac{x^2}{2W_D} \right) \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายดังกล่าวข้างต้นนี้อาศัยการประมาณว่าประจุบวก และประจุลบจะปรากฏอยู่เฉพาะในบริเวณพร่องพาหะเท่านั้น แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากขึ้นเราจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้างมากเพิ่มเติมเข้าไปในสมการปัวซอง เช่น ด้านพีจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx -q[N_A - p(x)]$ ส่วนด้านเอ็นจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx q[N_D - n(x)]$ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.72) โดยการแทนที่ ψ_{bi} ด้วย $(\psi_{bi} - 2kT/q)$ โดยที่ $2kT/q$ เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ไข ซึ่งเกี่ยวข้องกับส่วนหางของการกระจายของพาหะข้างมาก เช่น พาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพาหะข้างมากเป็นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่อยู่ใกล้ขอบบริเวณพร่องพาหะ โดยที่ kT/q เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะที่สถานะสมดุลความร้อน สำหรับรอยต่อฉนวนที่ด้านใดด้านหนึ่งจะเป็น

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN} \left(\psi_{bi} - \frac{2kT}{q} \right)} \quad (2.76)$$

นอกจากนี้เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับรอยต่อพี-เอ็น, ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตในรอยต่อพี-เอ็น จะเป็น $(\psi_{bi} - V)$ เมื่อ V มีค่าเป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง แทนค่า ψ_{bi} ด้วย $(\psi_{bi} - V)$ ลงในสมการที่ (2.76) จะได้ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ของรอยต่อฉนวนเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนแสดงไว้ในภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ $(\psi_{bi} - V - 2kT/q)$ สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อ

ฉนวนในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ (depletion-layer capacitance)

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

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N}{2}} \left(\psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.77)$$

ที่ V เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 จากสมการที่ (2.77) จะได้

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2}{q\epsilon_s N} \left(\psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right), \quad (2.78)$$

$$\frac{d(1/C_D^2)}{dV} = -\frac{2}{q\epsilon_s N} \quad (2.79)$$

จากสมการที่ (2.78) และ (2.79) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V (ภาพที่ 2.24) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่ $1/C^2 = 0$ จุดตัดแกน x คือ $\psi_{bi} - 2kT/q$ สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมา นอกเหนือจากที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและข้อมูลความจุ-แรงดันไฟฟ้า จะไม่เปลี่ยนแปลงตามโปรไฟล์ของสารเจือที่ระยะทางน้อยกว่าความยาวเดอบายซึ่งความยาวเดอบาย (Debye length : L_D) คือลักษณะเฉพาะของระยะทางในสารกึ่งตัวนำ มีนิยามดังนี้คือ

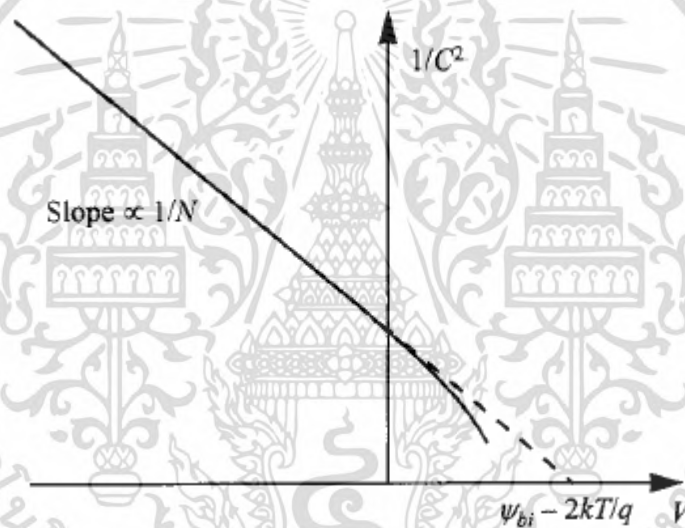
$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qN\beta_{th}}} \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$n = N_D \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\psi_i}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D + \Delta N_D - n) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \right] \\ &\approx -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \left(1 + \frac{\Delta\psi_i q}{kT} \right) \right] \approx \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s kT} \Delta\psi_i \end{aligned} \quad (2.82)$$



ภาพที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ - V ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

2.7.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

2.7.2.1 สมการของชอว์กซ์เลย์ในกรณีอุดมคติ

ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีอุดมคติจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อดังนี้คือ

1. มีการประมาณว่าบริเวณพร่องพาหะเป็นแบบฉับพลันกล่าวคือเกิดศักย์ตกคร่อมรอยต่อเนื่องจากประจุของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ และแรงดันไบแอสจะตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อนี้ ส่วนนอกบริเวณพร่องพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า

2. การประมาณแบบโบลตซ์มันน์จะยังใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การฉีดกระแสอยู่ในระดับต่ำกล่าวคือความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสที่เกิดจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ ในบริเวณพร่องพาหะ ดังนั้นประมาณกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบริเวณพร่องพาหะ

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของโบลตซ์มันน์ที่สถานะสมดุลความร้อน จะได้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (2.83ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (2.83ข.)$$

ที่สถานะสมดุลความร้อนผลลัพธ์ของ pn จากสมการข้างต้นจะเท่ากับ n_i^2 เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับรอยต่อ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของรอยต่อทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง และผลลัพธ์ของ pn ไม่เท่ากับ n_i^2 เราจึงกำหนดระดับควอซี-เฟอร์มี (quasi-Fermi) ได้ดังนี้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) \quad (2.84ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.84ข.)$$

ที่ E_{Fn} และ E_{Fp} คือ ระดับควอซี-เฟอร์มีสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.84ก.) และ (2.84ข.) เราจะได้

$$E_{Fn} = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right), \quad (2.85ก.)$$

$$E_{Fp} = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (2.85ข.)$$

ผลลัพธ์ของ pn กลายเป็น

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.86)$$

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

จากสมการที่ (2.84ก.) และความจริงที่ว่า $\xi \equiv \nabla E_i / q$ เราจะได้

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n \left(n\xi + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = \mu_n n \nabla E_i + \mu_n kT \left[\frac{n}{kT} (\nabla E_{Fn} - \nabla E_i) \right] \\ &= \mu_n n \nabla E_{Fn} \end{aligned} \quad (2.87)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (2.88)$$

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

การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ และความหนาแน่นของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสตรงและการไบแอสกลับทางแสดงในรูปที่ 2.25 ระดับ E_{Fn} และ E_{Fp} ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะดังแสดงในสมการที่ (2.85ก.) และ (2.85ข.) ในบริเวณพร่องพาหะระดับ E_{Fn} และ E_{Fp} จะยังคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะในบริเวณพร่องพาหะนี้ยังคงมีปริมาณสูงอยู่มาก อีกทั้งกระแสของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิจะต้องมีค่าน้อยลง ยิ่งไปกว่านั้นความกว้างของบริเวณพร่องพาหะสั้นกว่าระยะการแพร่ซึม ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่ลดต่ำลงในบริเวณพร่องพาหะจะไม่มีนัยสำคัญ

แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับรอยต่อจะแสดงดังสมการ

$$qV = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.89)$$

รวมสมการที่ (2.89) เข้ากับสมการที่ (2.86) เราจะได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบ ($x = -W_{DP}$) ของบริเวณพร่องพาหะในด้านพี (p-side) ดังสมการ

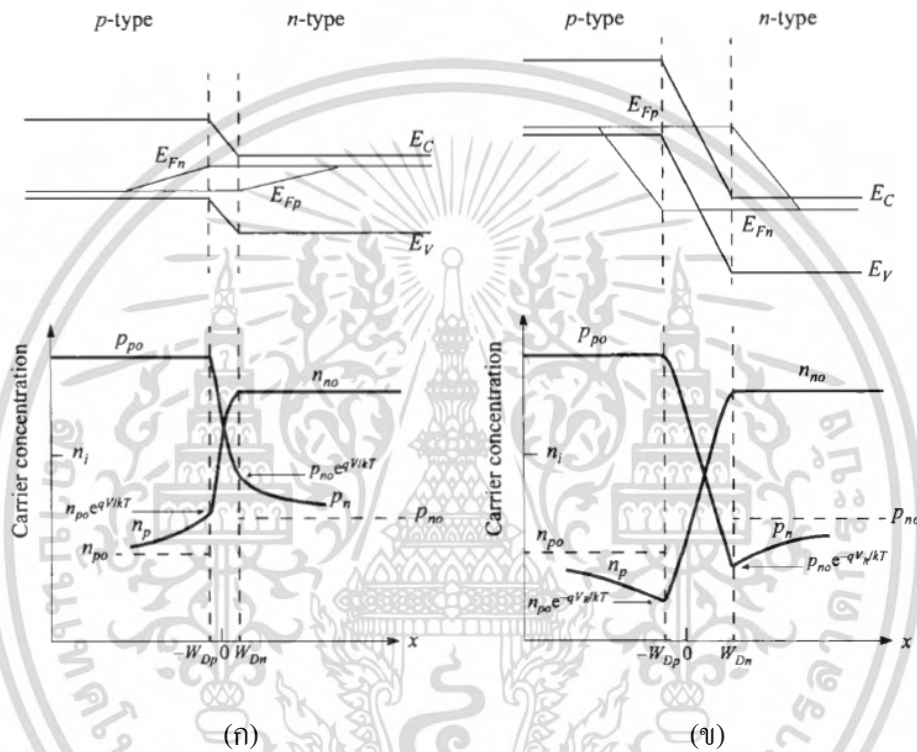
$$n_p(-W_{DP}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.90ก.)$$

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

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

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.90ข.)$$

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณิอุคมคติ



ภาพที่ 2.25 แสดงแผนภาพแถบพลังงานกับระดับพลังงานกวอไซ-เฟอร์มิสำหรับอิล็กตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข

ก. ไบแอสตรง

ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านเอ็นคือ

$$-U + \mu_n \xi \frac{dn_n}{dx} + \mu_n n_n \frac{d\xi}{dx} + D_n \frac{d^2 n_n}{dx^2} = 0 \quad (2.91ก.)$$

$$-U + \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + \mu_p p_n \frac{d\xi}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.92ข.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (2.91ก.) และ $\mu_n n_n$ คูณกับสมการที่ (2.91ข.) แล้วนำไปใช้รวมกับความสัมพัทธ์ของไอส์ไตน์ $D = (kT/q)\mu$ จะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{n_n - p_n}{(n_n/\mu_p) + (p_n/\mu_n)} \frac{\xi dp_n}{dx} + D_a \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.92)$$

ซึ่ง

$$D_a = \frac{n_n + p_n}{(n_n/D_p) + (p_n/D_n)} \quad (2.93)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะคู่ (ambipolar) คือ

$$\tau_p = \frac{p_n - p_{no}}{U} \quad (2.94)$$

จากข้อสมมติฐานการฉีดกระแสระดับต่ำ [$p_n \ll (n_n \approx n_{no})$] ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สมการที่ (2.92) ลดรูปสมการลงจะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.95)$$

ถ้าไม่คิดพจน์ $\mu_p p_n d\xi/dx$ แล้วสมการที่ (2.93) ก็เหมือนกับสมการที่ (2.91ข.) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ นอกบริเวณพร่องพาหะจะไม่มีสนามไฟฟ้า, จากสมการที่ (2.95) จะได้

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (2.96)$$

จากสมการที่ (2.96) กับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (2.90ข.) และ $p_n(x = \infty) = p_{no}$ จะได้ว่า

$$p_n(x) - p_{no} = p_{no} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) \quad (2.97)$$

ซึ่ง

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.98)$$

ที่ $x = W_{Dn}$ กระแสแพร่ซึมของโฮลคือ

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{W_{Dn}} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.99ก.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านพีคือ

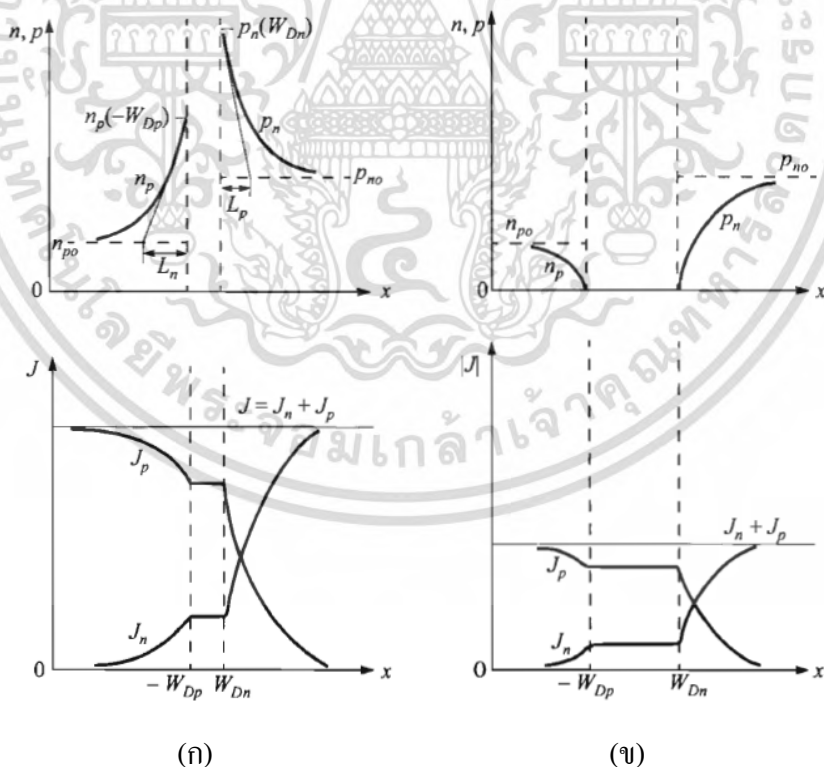
$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-W_{Dn}} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.99ข.)$$

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอสกลับทาง แสดงไว้ในภาพที่ 2.26 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวว่ากระแสโฮลจะถูกฉีดจากด้านพีไปด้านเอ็น แต่ขนาดของกระแสโฮลจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ D_p, L_p และ p_{no} ที่อยู่ในด้านเอ็น ส่วนการฉีดกระแสอิเล็กตรอนก็คล้ายคลึงกับกระแสโฮลเช่นเดียวกัน

ผลรวมของกระแสโฮลและอิเล็กตรอนได้จากการนำสมการที่ (2.99ก.) และ (2.99ข.) มารวม กันจะได้

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.100)$$

$$J_0 = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (2.101)$$



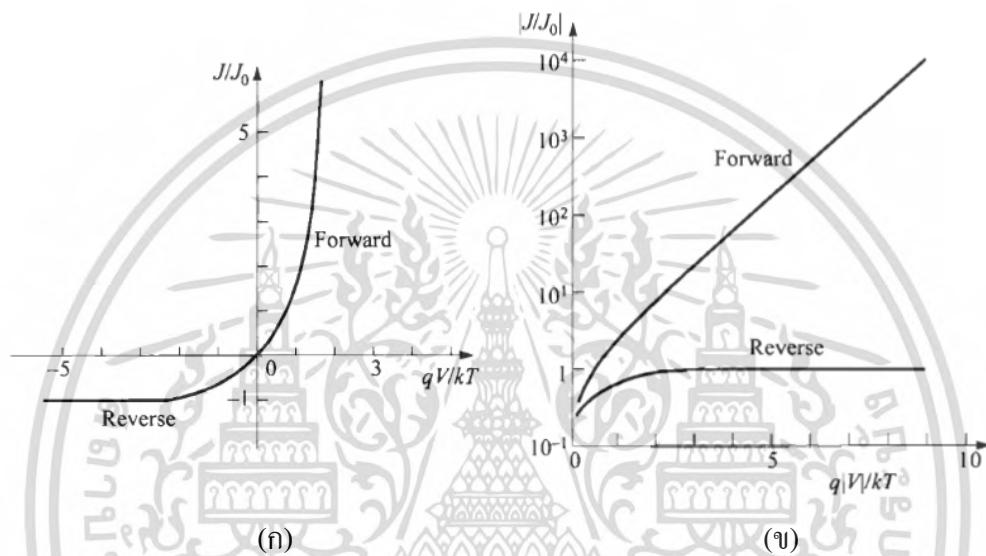
ภาพที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ

ก. เงื่อนไขไบแอสตรง

ข. เงื่อนไขไบแอสกลับทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.100) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอว์กซ์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในภาพที่ 2.27 (ก) และ 2.27 (ข) โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวกทางด้านพี) สำหรับ $V > 3kT/q$ จากภาพที่ 2.27 (ข) อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้นที่ 300 เคลวิน ที่ทุกๆ 10 มิลลิแอมป์, แรงดันจะเท่ากับ 59.5 มิลลิโวลต์ ($2.3kT/q$) ส่วนทางด้านไบแอสกลับทางกระแสอิ่มตัวที่ $-J_0$



ภาพที่ 2.27 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ

ก. กราฟเชิงเส้น

ข. กราฟกึ่งลอการิทึม

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_0 พจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (2.101) มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะพจน์ที่ 1 เท่านั้นก็เป็นการเพียงพอสำหรับกรณีรอยต่อ $p^+ - n$ 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

$$J_0 \approx \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \approx q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \propto T^{\gamma/2} \left[T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] \propto T^{(3+(\gamma/2))} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.102)$$

การขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ $T^{(3+(\gamma/2))}$ ไม่สำคัญเท่าไรนักเมื่อเทียบกับพจน์เอกซ์โพเนนเชียล ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J_0 กับ $\frac{1}{T}$ จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g และคาดว่าในขณะไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับทาง, $|J_R| \approx J_0$ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ $\exp(-E_g/kT)$ ตามอุณหภูมิ และในขณะไบแอสตรง $J_F \approx J_0 \exp(qV/kT)$ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ $\exp[-(E_g - qV)/kT]$

2.7.2 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation - recombination process)

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

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_t}{\sigma_n \exp[(E_t - E_i)/kT] + \sigma_p \exp[(E_i - E_t)/kT]} \right\} n_i \equiv - \frac{n_i}{\tau_g} \quad (2.103)$$

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

$$J_{ge} = \int_0^{W_D} q|U|dx \approx q|U|W_D \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g} \quad (2.104)$$

เมื่อ W_D คือ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิอย่างมาก แล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า n_i ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ τ_{ge} จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอส

สำหรับรอยต่อฉนวน

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/2} \quad (2.105)$$

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/3} \quad (2.106)$$

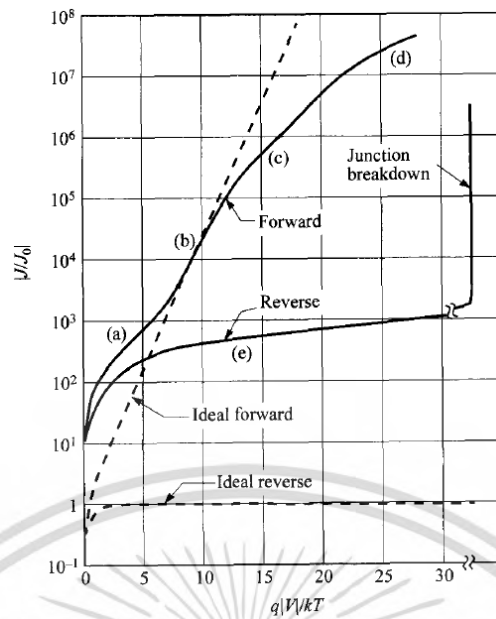
กระแสรวมขณะไบแอสกลับทาง (สำหรับ $p_{no} \gg n_{po}$ และ $|V| > 3kT/q$) สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสแพร่ซึมที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะกับกระแสที่เกิดจากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะ

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}} \quad (2.107)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ n_i มีค่ามาก (เช่น เยอรมันเนียม) กระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอคเลย์ แต่ถ้า n_i มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.28, เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่น

ภายใต้ไบแอสตรงกระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะในบริเวณพร่องพาหะเป็นกระบวนการจับพาหะผ่านกับดักประจุ เราจะได้กระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะนอกเหนือไปจากกระแสแพร่ซึม เมื่อแทนสมการที่ (2.86) ลงในสมการที่ (2.103) จะได้

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{\sigma_n \{n + n_i \exp[(E_i - E_i)/kT]\} + \sigma_p \{p + n_i \exp[(E_i - E_i)/kT]\}} \right\} \quad (2.108)$$



ภาพที่ 2.28 แสดงลักษณะกระแส – แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ

ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม

ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง

ง. ผลของความต้านทานอนุกรม

จ. การสลับไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด – การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

ภายใต้สมมติฐาน $E_t = E_i$ และ $\sigma_n = \sigma_p = \sigma$ สามารถลดรูปสมการที่ (2.108) ได้ดังนี้

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

$$= \left\{ \frac{\sigma v_{th} N_t n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n_i \left\{ \exp[(E_{Fn} - E_i)/kT] + \exp[(E_i - E_{Fp})/kT] + 2 \right\}} \right\} \quad (2.109)$$

U มีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ เมื่อ E_i อยู่ที่ระดับครึ่งทางระหว่าง E_{Fn} และ E_{Fp} ดังนั้นตัวหารของสมการที่ (2.109) กลายเป็น $2n_i [\exp(qV/2kT) + 1]$ ที่ $V > kT/q$ จะได้

$$U \approx \frac{1}{2} \sigma v_{th} N_t n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.110)$$

และ

$$J_{re} = \int_0^{w_D} qU dx \approx \frac{qW_D}{2} \sigma v_{th} N_t n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \approx \frac{qW_D n_i}{2\tau} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.111)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.111) เป็นการประมาณว่าบริเวณพ่วงพาหะเกือบทั้งหมดมีอัตราการรวมตัวของพาหะได้สูงสุด ซึ่งจะได้ค่า J_{re} สูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นสมการที่ (2.112) จะให้ผลน่าเชื่อถือมากกว่า ดังนี้ คือ

$$J_{re} = \int_0^{w_p} qUdx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kTn_i}{\tau\xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.112)$$

ที่ ξ_0 คือ สนามไฟฟ้าที่บริเวณที่มีอัตราการรวมตัวสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{qN(2\psi_B - V)}{\epsilon_s}} \quad (2.113)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะแปรตรงกับ n_i ผลรวมของกระแสไบแอสตรงสามารถหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.100) และสมการที่ (2.112) สำหรับรอยต่อ $p^+ - n$ ($p_{no} \gg n_{po}$) และ $V \gg kT/q$

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kTn_i}{\tau_p \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.114)$$

ผลการทดลองทั่วไปสามารถแสดงในรูปแบบดังนี้ คือ

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.115)$$

โดยที่แฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อมีกระบวนการรวมตัวของพาหะโดดเด่นกว่า (ภาพที่ 2.28, เส้นโค้ง (ก)) และแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีกระแสแพร่ซึมโดดเด่นกว่า (ภาพที่ 2.28, เส้นโค้ง (ข)) เมื่อกระแสของการรวมตัวของพาหะและกระแสแพร่ซึมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติจะมีค่าระหว่าง 1 และ 2

2.7.3 ความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(t) = V_0 + V_1 \exp(j\omega t) \quad (2.116)$$

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp(j\omega t) \quad (2.117)$$

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

$$Y \equiv \frac{J_1}{V_1} \equiv G_d + j\omega C_d \quad (2.118)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ขอบของบริเวณพร่องพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.90ก.) และ (2.90ข.) โดยการแทน V_0 ด้วย $V_0 + V_1 \exp(j\omega t)$

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

$$\begin{aligned} p_n(W_{Dn}) &= p_{no} \exp \left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx p_{no} \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) + \frac{p_{no} q V_1}{kT} \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \exp(j\omega t) \approx p_{no} \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) + \tilde{p}_n(t) \end{aligned} \quad (2.119)$$

ส่วนรอยต่อด้านพี (p-side) จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการ

$$n_p(W_{Dp}) \approx n_{po} \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) + n_p(t) \quad (2.120)$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.119) คือ ความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากแรงดันไบแอสตรง (V_0) ส่วนพจน์ที่สองเป็นความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าสลับ จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ที่กล่าวว่า

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial \xi}{\partial x} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (2.121)$$

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

$$j\omega \tilde{p}_n = -\frac{\tilde{p}_n}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} \quad (2.122)$$

หรือ

$$\frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} - \frac{\tilde{p}_n}{D_p \tau_p / (1 + j\omega \tau_p)} = 0 \quad (2.123)$$

สมการที่ (2.123) จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.96) ถ้ากำหนดให้ช่วงชีวิตพาหะเป็นดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p}{1 + j\omega\tau_p} \quad (2.124)$$

และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากสมการที่ (2.99) และจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

$$\begin{aligned} J &= \left(qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \exp \left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx \left(qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \right] \left[1 + \frac{qV_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \end{aligned} \quad (2.125)$$

ความหนาแน่นไฟฟ้ากระแสสลับ J_1 คือ

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

ค่า J_1 / V_1 ทั้ง G_d และ C_d สามารถหาค่าได้และพบว่าทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความถี่

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

$$G_{d0} = \frac{q}{kT} \left(\frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right) \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \quad \text{mho/cm}^2 \quad (2.126)$$

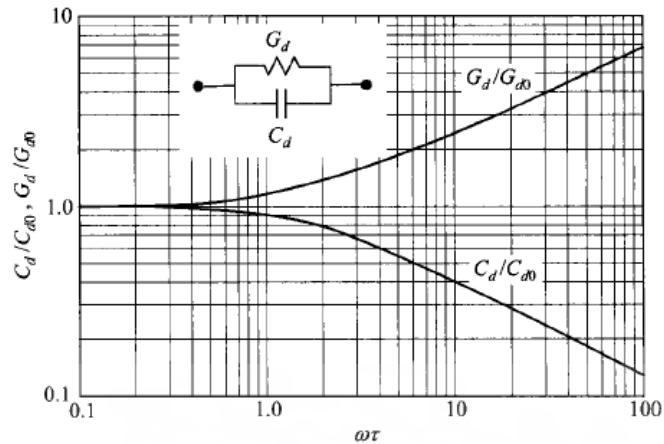
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า $\sqrt{1 + j\omega\tau} \approx (1 + 0.5j\omega\tau)$

$$C_{d0} = \frac{q^2}{2kT} (L_p p_{no} + L_n n_{po}) \exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.127)$$

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ $n^+ - p$ จะได้ว่า

$$C_{d0} = \frac{qL_n^2}{2kTD_n} J_F \quad (2.128)$$

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.29 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า $\omega\tau$



ภาพที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ของความจุประจุและค่าความนำประจุที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง

วงจรสมมูลของไฟฟ้ากระแสสลับแอดมิตแตนซ์จะแสดงไว้ในภาพที่ 2.29 ด้วย เพื่อแสดงว่าค่าความจุประจุจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความถี่สูงๆ C_d จะสัมพันธ์กับ $\omega^{-1/2}$ นอกจากนี้ความจุประจุยังแปรตามไฟฟ้ากระแสตรง $\propto \exp(qV_0/kT)$ เพราะฉะนั้น C_d จึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ และภายใต้สภาวะไบแอสตรง

2.8 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์ (จูตินย, 2557)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในภาพที่ 2.30 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสเพิ่มขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.129)$$

$$\text{เมื่อ} \quad J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.130)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไบแอสตรง

n คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

E_a คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์

J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

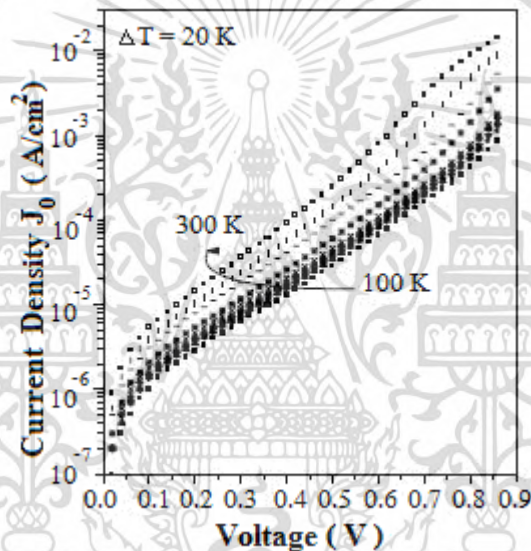
ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_v \left[\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-qV_n}{kT} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.131)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.132)$$

เมื่อ S_p คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (ϕ_b^p) คือค่าแฟกซ์ของวงกั้นโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.31



ภาพที่ 2.30 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า J_{00} นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่เกิดกลไกการขุดคูมอังก์ทะลุผ่านกำแพงศักย์) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกัปดักประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี และ $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ($\ln J_0 \propto T^{-1}$)

2.8.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอกเคิลีย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกัปดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองของ ชอกก์เลย์-ริด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง J_0 จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น $E_g/2$ สำหรับกรณีที่กักประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

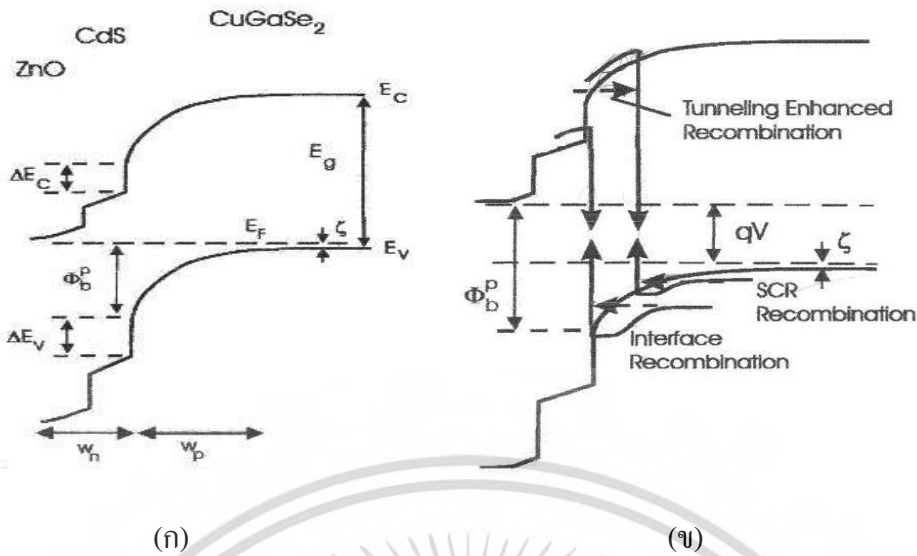
สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_A > N_D$ กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n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

2.8.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.133)$$

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะจากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำให้หน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากักประจุหลายระดับโฮลจะชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกักประจุอย่างต่อเนื่องกันจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิต่ำเล็กน้อย



ภาพที่ 2.31 แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย
 ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
 ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe₂ และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.134) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln(J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (2.134)$$

พลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพัทธ์ระหว่าง $n \ln J_0$ กับ $1/T$ พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดกลไกการนำกระแสเกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_g) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.135)$$

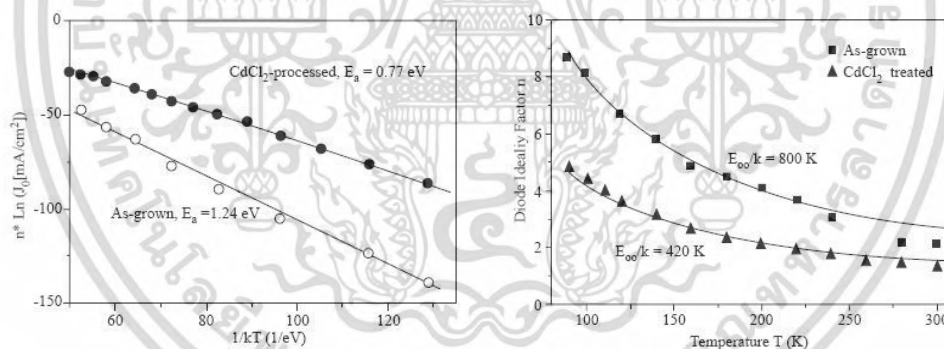
โดย E_{00} คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม E_{00} คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.136)$$

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ ϵ_s คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกัปดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง แพลกเตอร์อุดมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.137)$$

ซึ่ง kT^* คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกัปดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 2.32 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนัลและเมื่อผ่านการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl_2

2.9 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร (จูตินัย, 2557)

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \quad (2.138)$$

เมื่อ

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

และ

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

ซึ่ง N_C และ N_V คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ, E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ, n และ p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ, n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอนหรือโฮล (electron/hole cross section: $\gamma_{n/p}$) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \quad (2.139)$$

หรือ

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

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

$$\Gamma = 2(3\pi)^{1/2} \left[\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{1/2} \exp \left[\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.140)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลาดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W - x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.141)$$

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

จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน (Walter et al., 1996) การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.142)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.126) ร่วมกับสมการ (2.142) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.143)$$

ซึ่ง J_{00} จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*}\right) \quad (2.144)$$

จากสมการที่ 2.144) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ $T^* \rightarrow \infty$ กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี $E_{00} \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกคัลเล่ย์-รีด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.145)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเขียนกราฟระหว่าง V_{oc} กับ T ซึ่ง V_{oc} นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ชอกเคิลีย์-รีด-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} กับ T ในสมการ (2.145) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.130) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

2.10 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ (ฐิตินัย, 2557)

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกรไบแอตแสดงดังรูปที่ 2.33 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอตหรือไม่มีการไบแอต ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอตจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.33 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

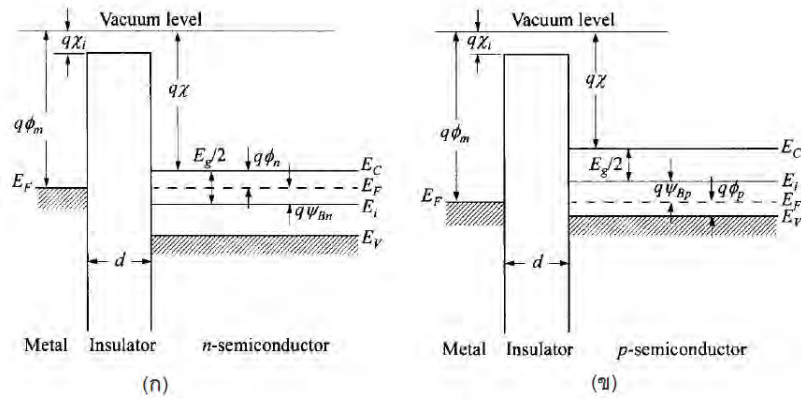
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad (2.146ก)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad (2.146ข)$$

เมื่อ χ, χ_i คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน

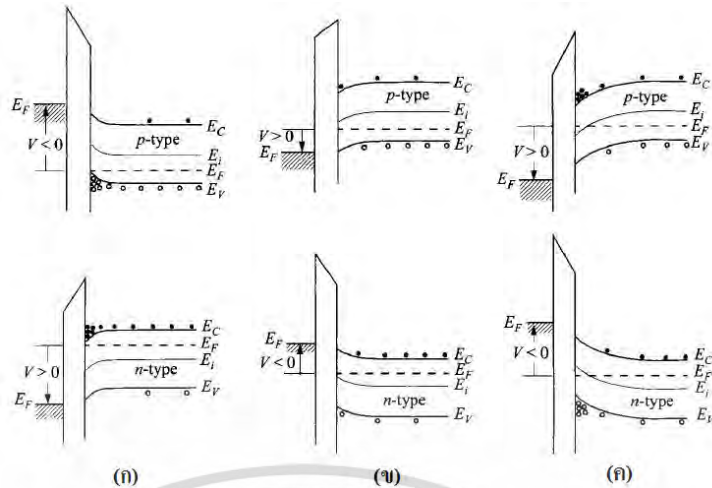


ภาพที่ 2.33 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$)

ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.34 (ก) โดย กรณีแรกตามภาพที่ 2.34 (ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วโลหะ ($V<0$) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมุกขมูกันของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมุกขมูพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ($V>0$) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าบริเวณพร่องพาหะ (depletion case) ดังภาพที่ 2.34 (ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในภาพที่ 2.34 (ค) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็นโดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)

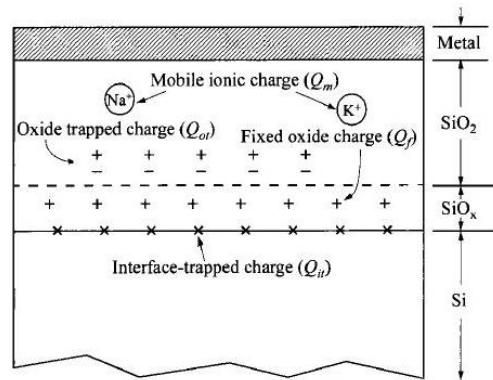


ภาพที่ 2.34 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด

- ก. บริเวณขุมประจุพาหะ
- ข. บริเวณพร่องพาหะ
- ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

2.11 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน (ฐิตินัย, 2557)

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.35 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และประจุค้างภายในกัณฑ์ (Q_{it}) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO₂ โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาดำเนินๆ ประจุ Q_{it} จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ (Q_o) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ (Q_{ot}) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



ภาพที่ 2.35 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.12 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (ฐิตินัย, 2557)

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

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

$$F_{SD}(E_t) = \left[1 - \frac{1}{1 + (1/g_D) \exp[(E_t - E_F)/kT]} \right] = \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \quad (2.147 \text{ ก})$$

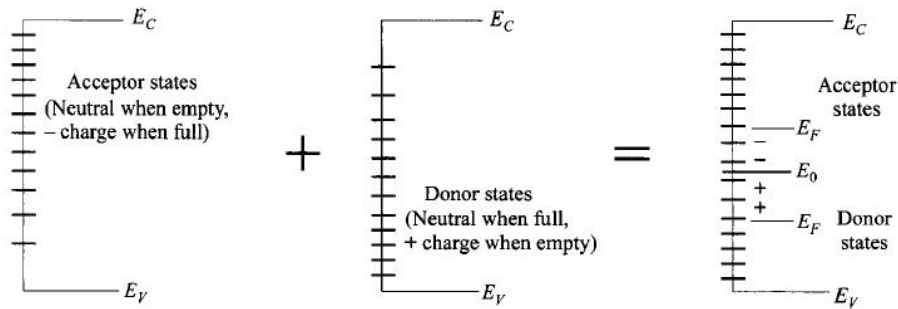
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (2.147 \text{ ข})$$

เมื่อ E_t คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

g_D คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

g_A คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



ภาพที่ 2.36 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากภาพที่ 2.36 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

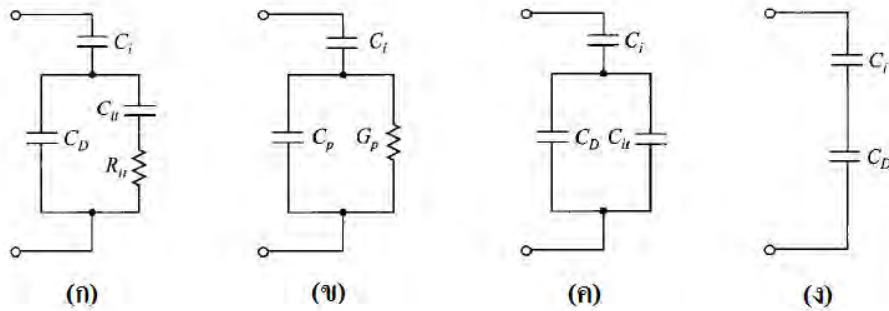
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\ &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \end{aligned} \quad (2.148)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (2.149)$$

สมการที่ (2.149) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด Q_{it} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) ที่เปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.37 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{ii} และ R_{ii} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อยู่ด้วย

ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ

ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจรรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังภาพที่ 2.37 (ก) โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ C_{ii} และ R_{ii} คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ $C_{ii}R_{ii}$ จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{it}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกันทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกันโดยที่

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.150)$$

และ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.151)$$

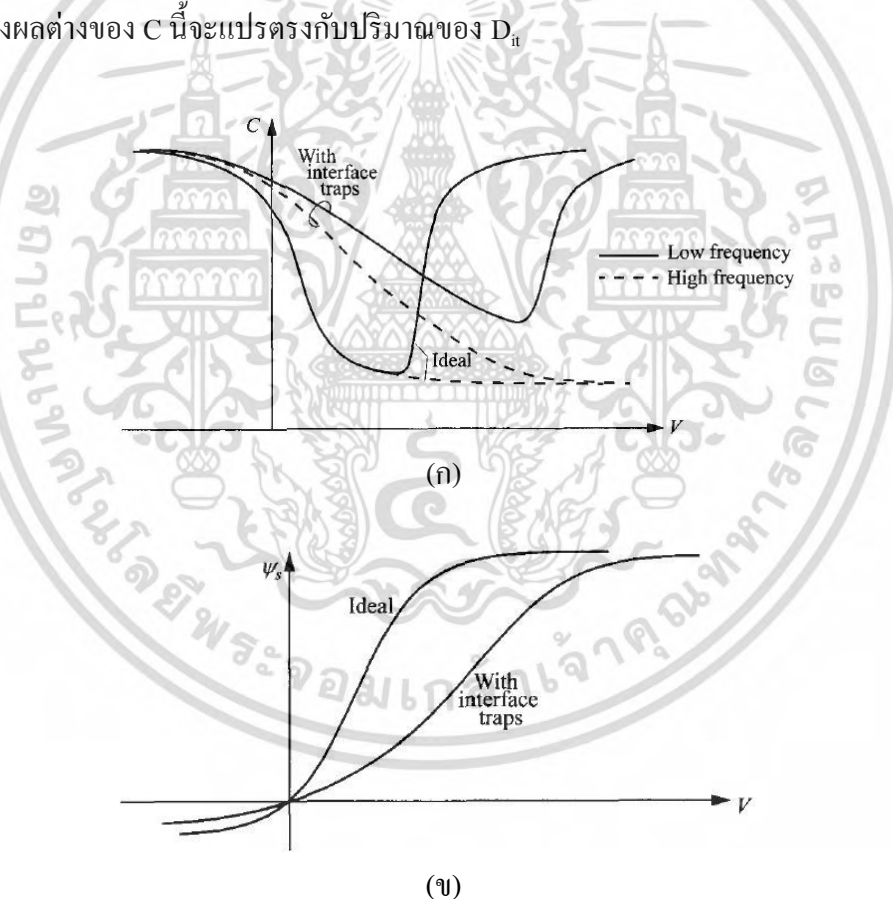
สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{ii} ของวงจรสมมูลในภาพที่ 2.37(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว C_D จะขนานกับ C_{ii} ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{ii} และ R_{ii} ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{it})}{C_i + C_D + C_{it}} \quad (2.152)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.153)$$

ภาพที่ 2.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า (ψ_s) ในภาพที่ 2.38 ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ψ_s - V สามารถนำไปคำนวณหา D_{it} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{it}



ภาพที่ 2.38 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS
ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s

2.13 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ (ฐิตินัย, 2557)

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการสื่อสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.153) และสมการที่ 2.152 จะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} C_{it} &= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D \\ &= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.154)$$

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

$$\begin{aligned} D_{it} &= \frac{C_i}{q^2} \left[\left(\frac{1}{\Delta C / C_i + C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} \right] \\ &= \frac{\Delta C}{q^2} \left[\left(1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left(1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (2.155)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกับดักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า (ΔC) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ D_{it} ได้ก็สามารถที่จะหาค่า ψ_s ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

2.13.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ความแตกต่างของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.38 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพิกัดความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในภาพที่ 2.37(ก) ความจุของฉนวน C_i ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชุมนุมพาหะอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์ สุดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น C_D ต่อขนานกันกับ $R_{it}C_{it}$ สำหรับค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ในสมการที่ (2.151) จะไม่มีพจน์ C_D ปรากฏอยู่นั้นคือ $\frac{G_p}{\omega}$ จะสัมพันธ์กับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_{in}}{G_{in}^2 + \omega^2 (C_i + C_{in})^2} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.156)$$

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

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.157)$$

โดยที่ $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.157) นี้ เป็นการหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดียว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุมักมีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q D_{it}}{2 \omega \tau_{it}} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (2.158)$$

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

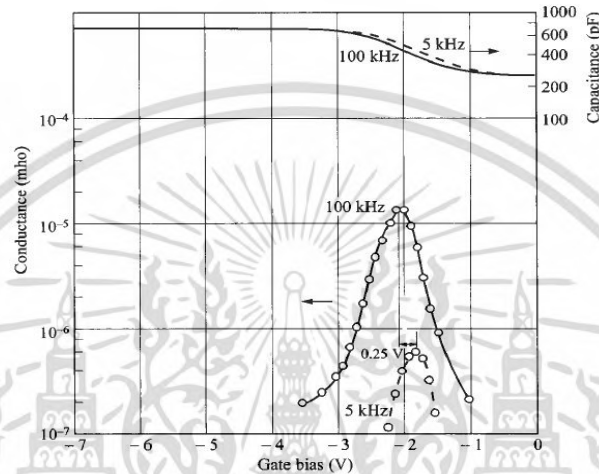
$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}}{0.402q} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.159)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{C,V})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.160)$$

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



ภาพที่ 2.39 แสดงกราฟความถี่ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS

2.14 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน (รุติณัย, 2557)

2.14.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

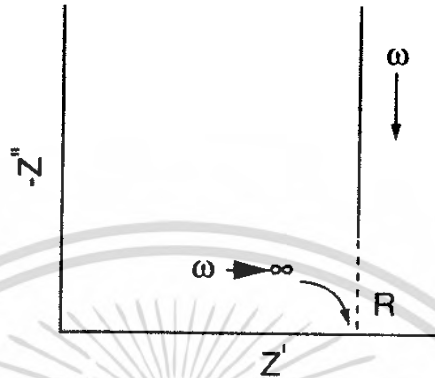
$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.161)$$

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

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.162)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R_s เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้า ไกลอนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่ค่า R_s จากกราฟของ ไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังภาพที่ 2.40



ภาพที่ 2.40 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.14.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

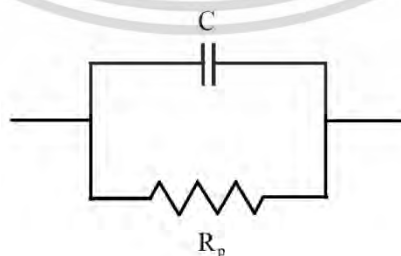
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังภาพที่ 2.41 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.163)$$

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_p$ ดังภาพที่ 2.41 ดังนั้นสมการ (2.163) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.164)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.165)$$



ภาพที่ 2.41 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกันจำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $(1 - j\omega R_p C)$

คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ (2.165) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[\frac{j\omega R_P^2 C - R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.166)$$

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

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

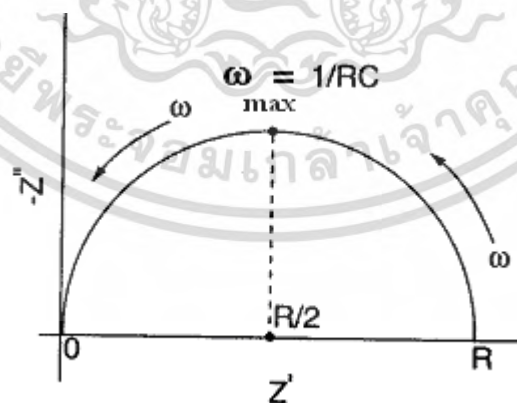
$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.167)$$

และ

$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P \left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.168)$$

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

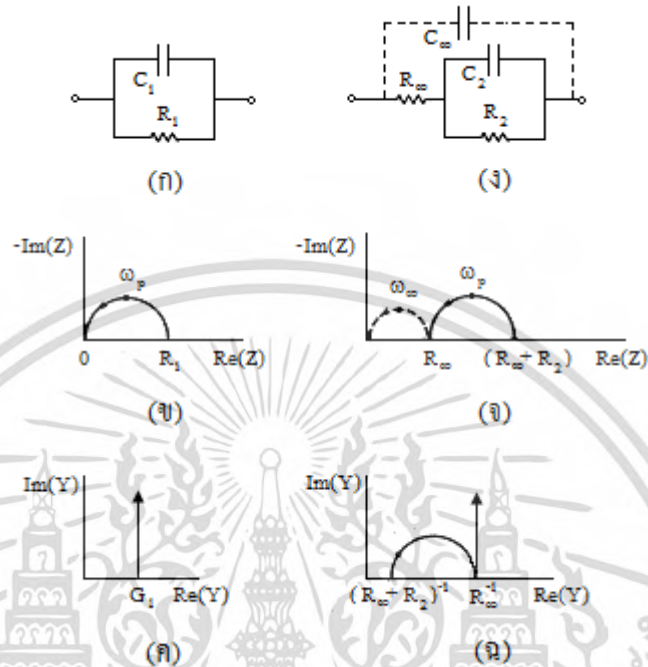
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังภาพที่ 2.42



ภาพที่ 2.42 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.43



ภาพที่ 2.43 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ข,จ) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี (ค,ฉ)

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในภาพที่ 2.43 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในภาพที่ 2.43(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 แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์ก็จะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากกรณี ที่ $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิมพีแดนซ์อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น 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 2.43(ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนภาพที่ 2.43(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไขว้ปลายภาพที่ 2.43(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 ต่อขนานของวงจรดังภาพที่ 2.43(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ($j\omega C_1$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.169)$$

กราฟของสมการที่ (2.169) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.43(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรภาพที่ 2.43(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[R_2 + R_\infty + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.170)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.170) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.43(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของภาพที่ 2.43(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.171)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.172)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในภาพที่ 2.43 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_s) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.14.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์ $Z = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.44 ดังนี้คือ

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

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

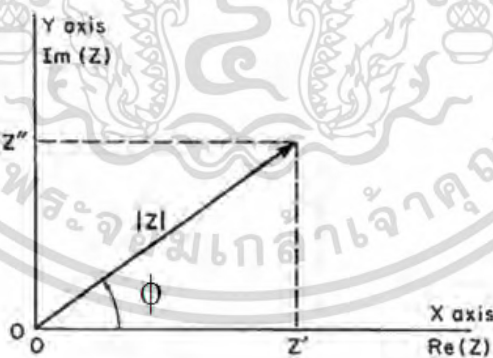
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.173)$$

$$\text{โดยที่โมดูลัสคือ} \quad |Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.174)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

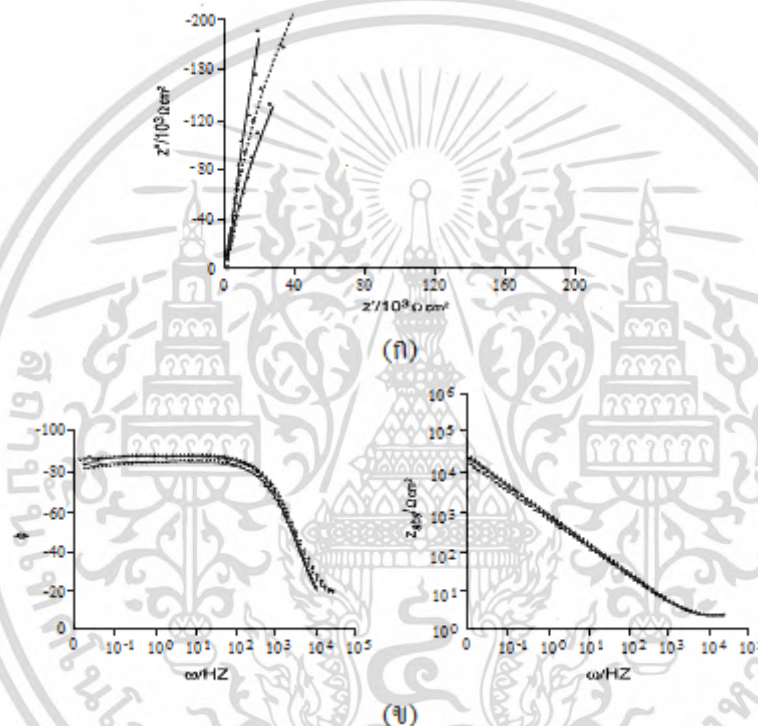
$$\text{ดังนั้น} \quad Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.175)$$



ภาพที่ 2.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังภาพที่ 2.44 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์



ภาพที่ 2.45 แสดงกราฟไนควิสต์ (ก) และกราฟของโบด (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

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

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (2.176)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$C_{dl} = \sqrt[n]{\frac{P}{R_s(n-1)}} \quad (2.177)$$

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

2.14.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ (ฐิตินัย, 2557)

พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอยต่อความต้านทานชั้นที่ และความต้านทานอนุกรมสามารถหาคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ขณะทำการวัดจะต้อง ป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกค่ากระแสสลับ จากนั้นอิมพีแดนซ์ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V \sin \omega t}{I \sin (\omega t + \phi)} = Z' - jZ'' \\ &= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \end{aligned} \quad (2.178)$$

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

G คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง $G = \frac{1}{R}$ และ ϕ คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไบแอสกับกระแสสลับ ในวงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (ฐิตินัย, 2558) R_p คือความต้านทานชั้นที่หรือความต้านทานขนาน (parallel resistor), C คือ ความจุของรอยต่อและ R_s คือ ความต้านอนุกรมของวงจร

2.15 หลักการสปีดเตอริง (สุรสิงห์, 2545; ฐิตินัย, 2558; งามนิศย์ 2558; งามนิศย์ 2560)

ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง คือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำ ความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปีดเตอริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดี ซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.15.1 โกลว์ดิซซาร์จ

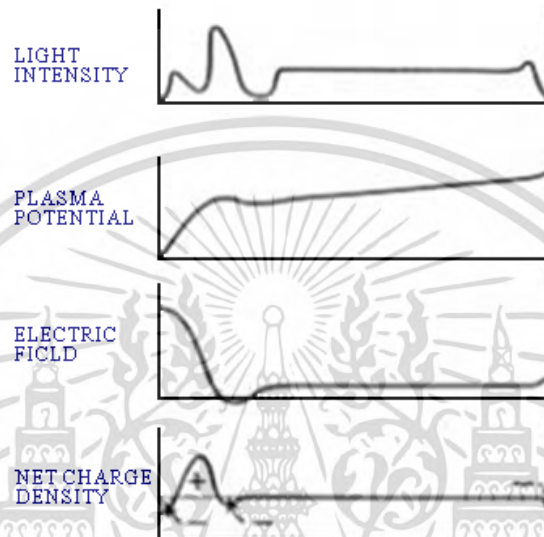
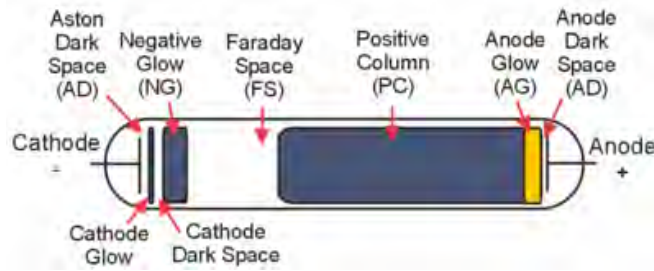
สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้ให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการ สร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact ionization) โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.179)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิซซาร์จก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสถานะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนดดังแสดงในภาพที่ 2.46



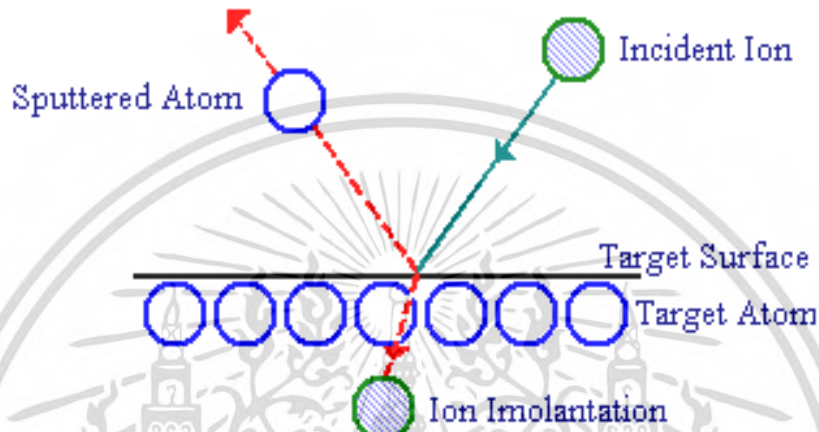
ภาพที่ 2.46 แสดงโครงสร้างของการ โกลว์ดิสชาร์จ

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของโกลว์ดิสชาร์จแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.46 การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลว์ดิสชาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2 สปีตเตอริง

สปีตเตอริง เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น (cold plasma) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้า ดังแสดงในภาพที่ 2.47



ภาพที่ 2.47 แสดงการเกิดสปีตเตอริงที่ผิวเป้า

2.15.2.1 ยึดการสปีตเตอริง (sputtering yields)

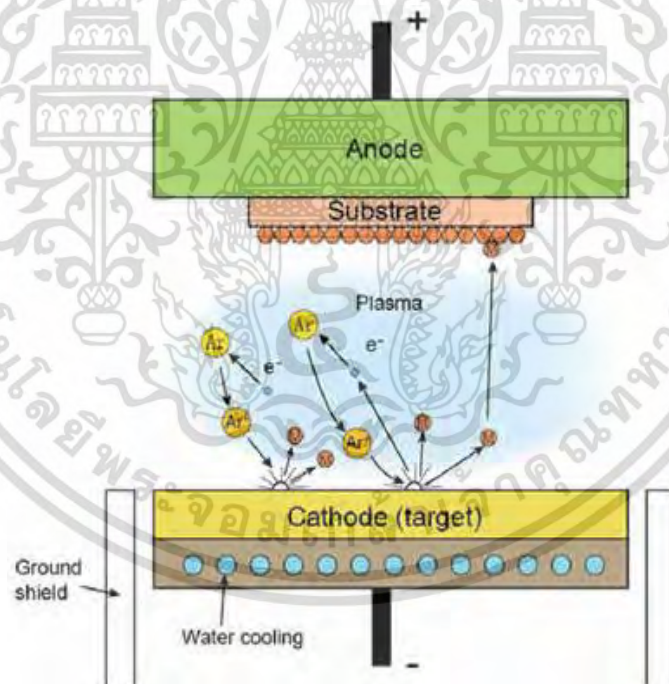
ยึดของการสปีตเตอริง นิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปีตเตอริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ (2.180) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปีตเตอริง

$$\text{ยึดของการสปีตเตอริง} = \frac{\text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า}}{\text{ไอออนที่ชนเป้า}} \quad (2.180)$$

การสปีตเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า โดยขีดเริ่มของการสปีตเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยึดของการสปีตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

2.15.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.48 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโค่งดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมา ก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



ภาพที่ 2.48 แสดงการสปีดเตอริงโดยดีซีไดโอดสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมา และมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้า และเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมายมากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_{\perp}$ ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้น ซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.181)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.182)$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก
 F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่
 จะได้ว่า

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{r} \quad (2.183)$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_{\perp}/Bq \quad (2.184)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (Larmor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากแม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อยและจาก $v = \omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

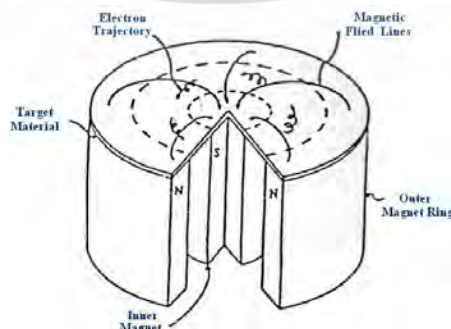
$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.185)$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.186)$$

โดย e = ประจุของอิเล็กตรอน
 m = มวลของอิเล็กตรอน
 $\vec{v}$ = ความเร็วของอิเล็กตรอน
 $\vec{E}$ = สนามไฟฟ้า
 $\vec{B}$ = สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื่อนลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในภาพที่ 2.49 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.49 แสดงการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อน

ลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นการใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \quad (2.187)$$

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|q|V}{m}} \quad (2.188)$$

แทนค่า (2.188) ลงใน (2.184) จะได้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mv}{|q|}} \quad (2.189)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์
ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{v}}{B} \quad (2.190)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสรจ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่
ตำแหน่งคัทออฟ (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสรจเมื่อความเข้ม
ของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งคัทออฟ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.101

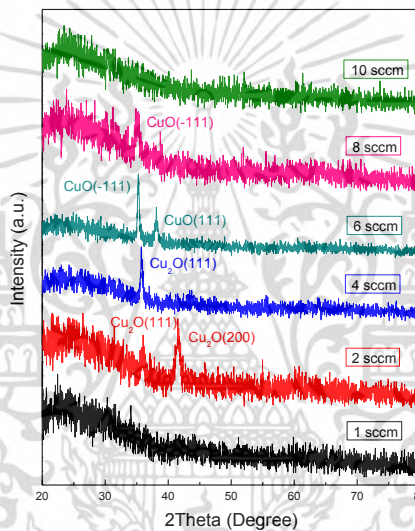
$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \quad (2.191)$$

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

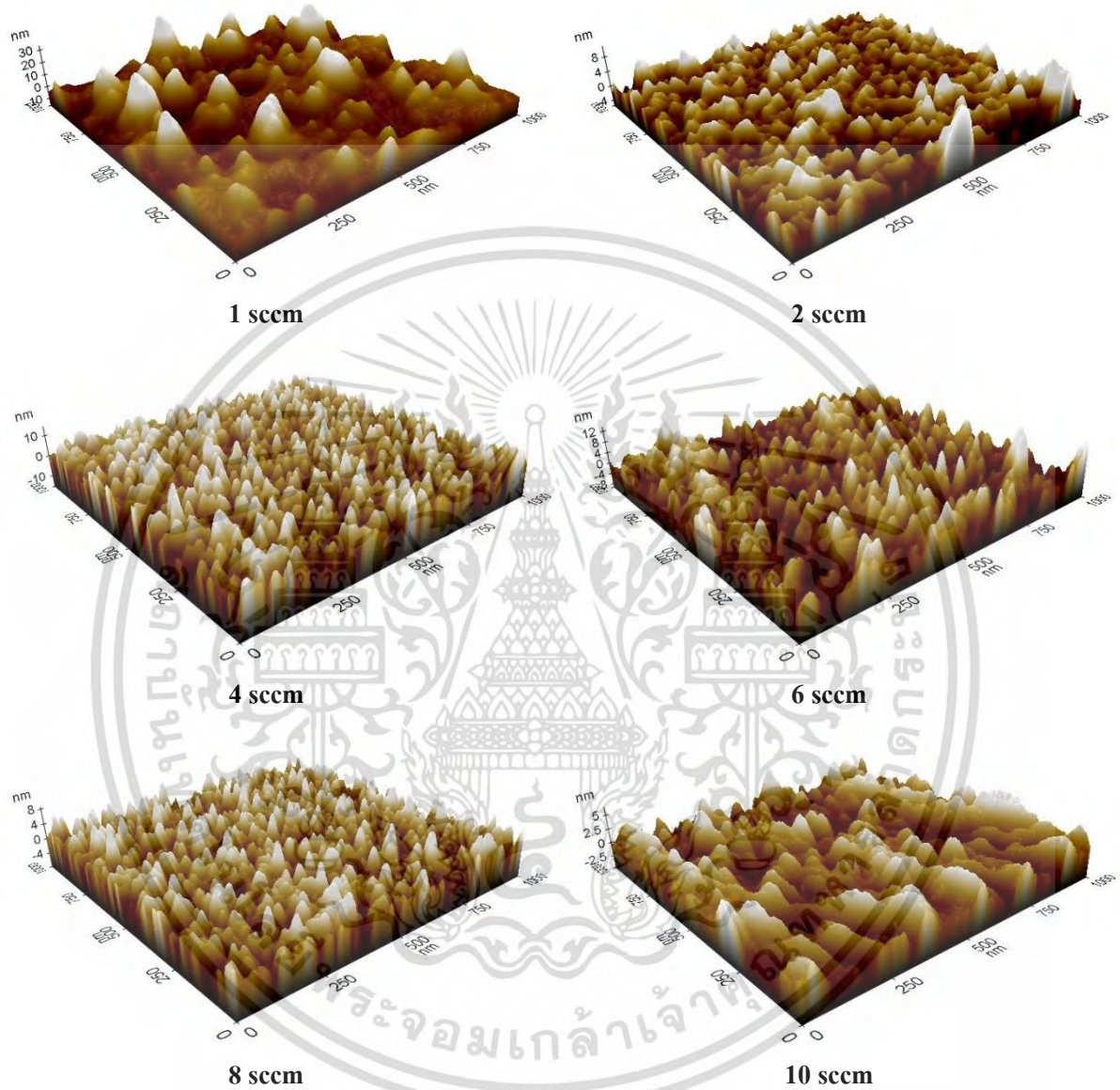
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Gaewdang et al. 2017)

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 2 และ 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก ปรากฏระนาบ (111) และ (200) ในส่วนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 6 และ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกปรากฏระนาบ (-111) และ (111) และที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส



ภาพที่ 2.50 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีโพสิชันแมกนีตรอนสเปตเตอร์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

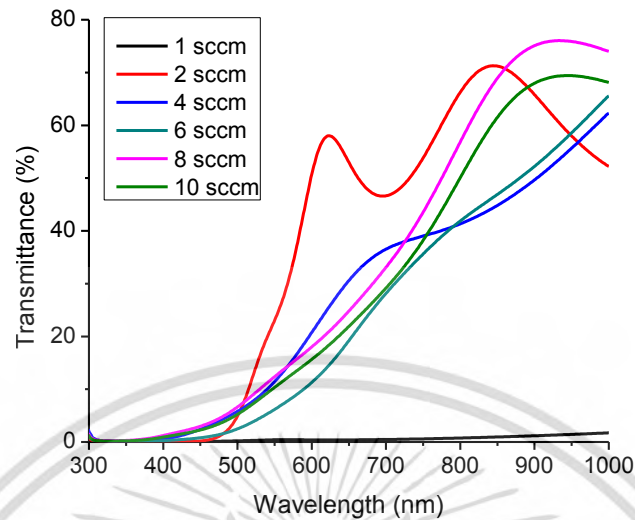
จากการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ เกรนที่พบมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันในทุกอัตราการไหลของออกซิเจน



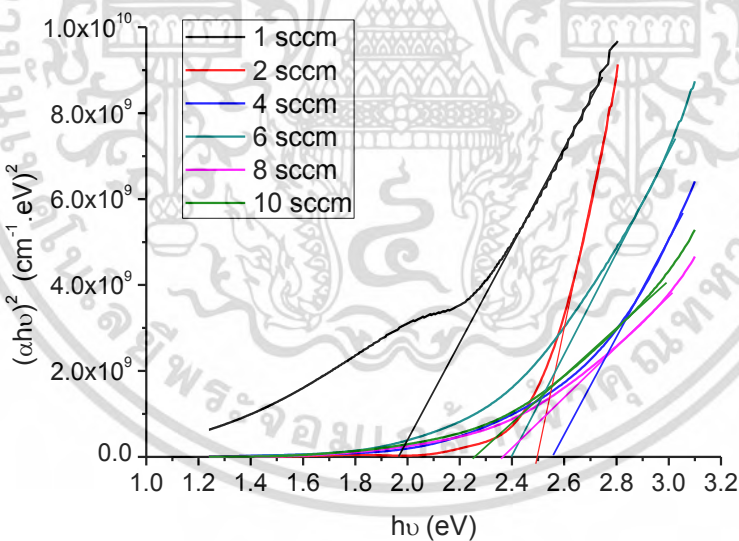
ภาพที่ 2.51 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.97, 2.50, 2.55, 2.40, 2.38 และ 2.25 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.52 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ

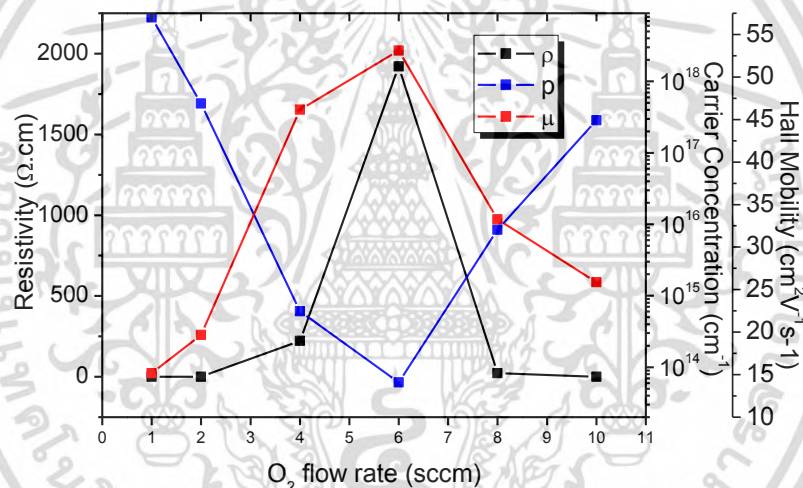


ภาพที่ 2.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1,2,4,6,8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 10^{-2} - 10^2 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.92×10^3 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง 8.46×10^{-1} โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มเดียวกันกับสภาพต้านทาน แต่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 200 องศาเซลเซียส สามารถนำมาคำนวณหาพลังงานกระตุ้น (E_g) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ โดยค่าพลังงานกระตุ้นนี้จะเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของกับดักพาหะที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์

จากการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 20 เคลวินถึง 300 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโดคังความสัมพันธ์เอกสาร์เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาได้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.192)$$

จะพบได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโดจะเกี่ยวข้องกับขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งมีกับดักพาหะและค่าความสูงของกำแพงศักย์อยู่ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าระดับพลังงานของกับดักพาหะ ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะและค่าความยาวเดอว์บาย เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกันดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (2.193)$$

เมื่อพลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน สำหรับในช่วงอุณหภูมิ 200-100 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ดังความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_{0,Mott} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^{\frac{1}{4}}\right] \quad (2.194)$$

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 100-20 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชโลฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

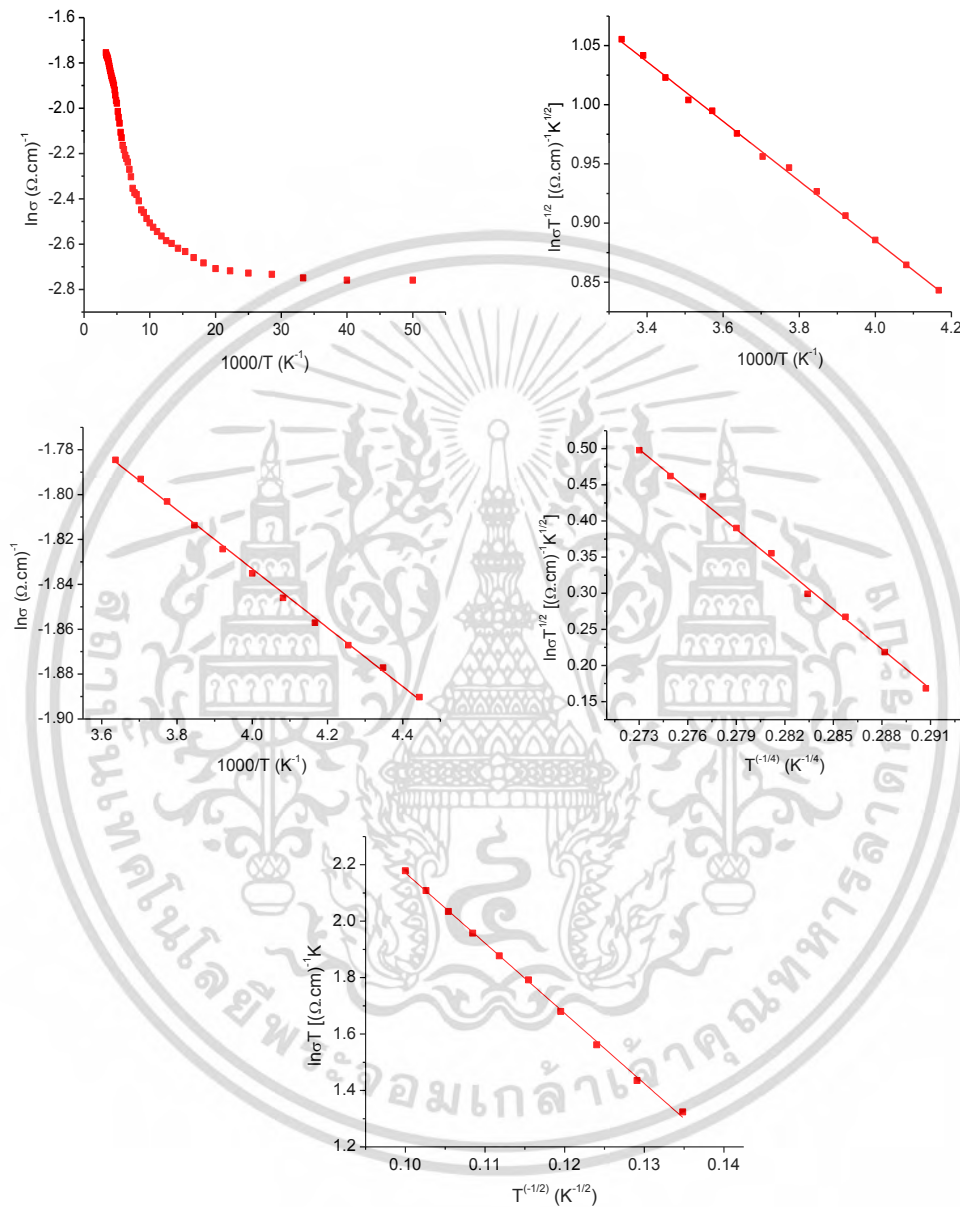
$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,ES}}{T}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (2.195)$$

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และ ช่องว่างของคูลอมบ์

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีน กระแสโฟโตชาขึ้นและกระแสโฟโตชาลงสามารถพิกกราฟได้ด้วยสมการมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตค่อนข้างยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนหลายค่า แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกประพัตต์เป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{10} - 10^{14} ต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าช่วงชีวิตลดลง และความหนาแน่นของกับดักพาหะมีค่าที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 2.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆต่อไป

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งานนิศย์, 2545; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2551; งานนิศย์, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. อะซิโตน (CH_3COOH)
2. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
3. น้ำปอดประจุ (DI water)
4. แผ่นกระจกสไลด์ 12 x 25 มิลลิเมตร
5. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
6. อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

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

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)

1. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)
3. แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สารเคมี

4.1 H_2O_2

4.2 NH_4OH

4.3 HCL

4.4 HF

4.5 KOH

4.6 IPA

4.7 น้ำป๊อดประจุ (DI Water)

4.8 น้ำยาล้างจาน

5. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร

6. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius

8. ที่ตักสาร

9. ที่คนสาร

10. แก๊สไนโตรเจน

11. เครื่องเป่าลมร้อน

12. ปากคีบ

13. เตาอบ

14. นาฬิกาจับเวลา

15. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)

3.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ตัดผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. ทำการกัดผิวหน้าบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ให้เป็นผิวพีระมิดแบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH และ IPA โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 2.1 การทำความสะอาดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วย

กระบวนการ RCA (Radio Corporation of America) ประกอบด้วยขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

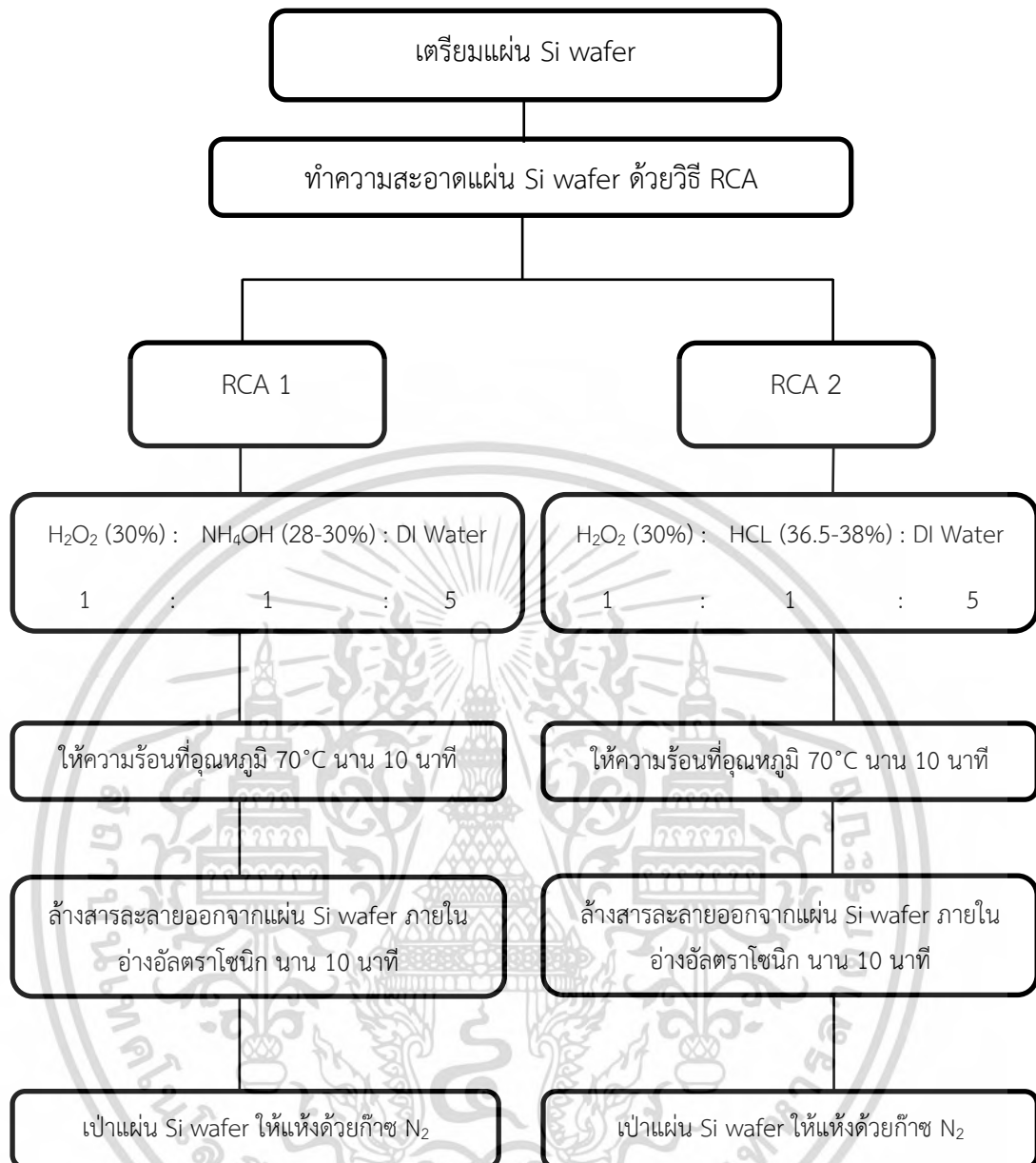
RCA 1 เพื่อกำจัดอนุภาคอินทรีย์สารออกจากผิวหน้า ต่อมาผ่านขั้นตอนกำจัดโลหะออกจากผิวหน้าด้วยกระบวนการ RCA 2 ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1

2.2 การกำจัดชั้น native oxide ด้วยการจุ่มแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ

n-Si (100) ลงไปในกรด Hydrofluoric (HF) ประมาณ 1 นาที

2.3 การกัดผิวหน้าแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) แบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบของ KOH และ IPA เพื่อให้เกิดการก่อตัวของพีระมิดที่ผิวหนาแน่นที่สุดนั้นจะต้องมีปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการสกัด ขั้นตอนของกระบวนการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) แบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH ที่เติม IPA แสดงในรูปที่ 3.2



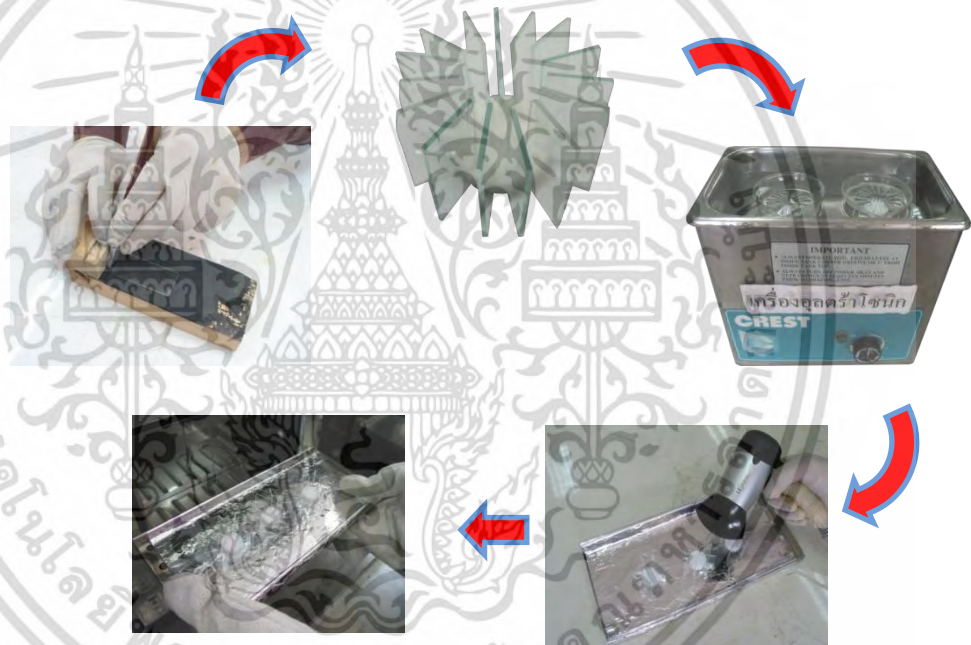


ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)



3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

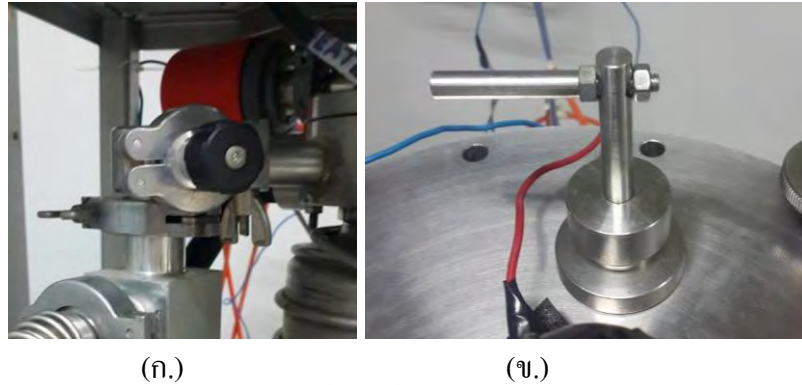
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ผู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้นเพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปั้มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับเพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชุดเตอร์และกราวด์ชิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)
8. ปิดชุดเตอร์ (กันบั้งกับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป่าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที

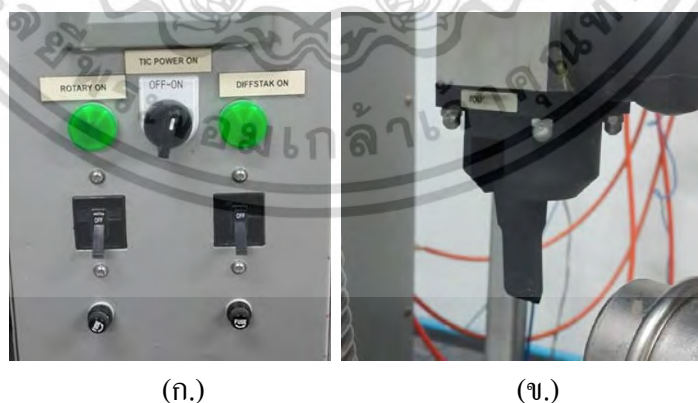
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 (ก) แสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า

(ข) แสดงคันบังคับชุดเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวก่อน Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊ม โรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน
13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับชุดลดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



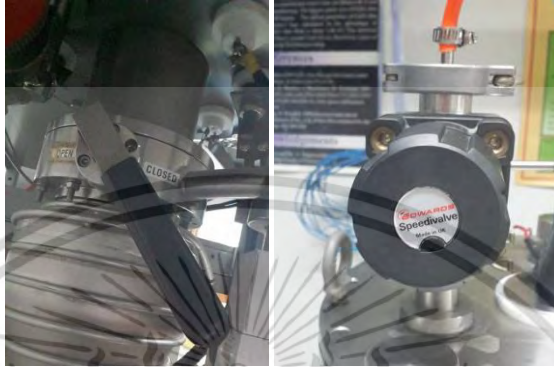
(ก.)

(ข.)

ภาพที่ 3.5 (ก.) แสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)
(ข.) แสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



(ก.)

(ข.)

ภาพที่ 3.6 (ก) แสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open

(ข) แสดง speedy valve

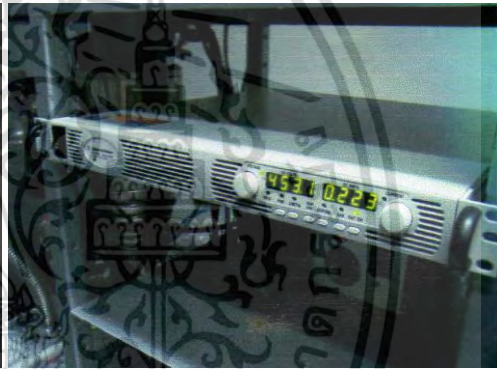
15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มปั๊มก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- ไพรานีเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิ่งเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก $10^{-3} - 10^{-6}$ ทอร์
16. การปั๊มอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุดและใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการปั๊มอาร์กอนแล้วสูบล้อออกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้
- เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิด butterfly valve และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อปั๊มอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^{-2} ทอร์
 - ปิดสปีดวาล์ว ปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศโดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปิด butterfly valve และ เปิดสปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ จนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^{-2} ทอร์
- ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 2)
- ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ จนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^{-2} ทอร์
- ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 3.7 (ก) แสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

(ข) แสดง power supply

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

1. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม out on เป็นปุ่มสื่ห่ลี่ยมเล็กๆที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

(ข.)

ภาพที่ 3.8 (ก) แสดงสวิตช์ของ power supply

(ข) แสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

18. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ช้าจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสถานะยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมามีพลังงานและสถานะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก



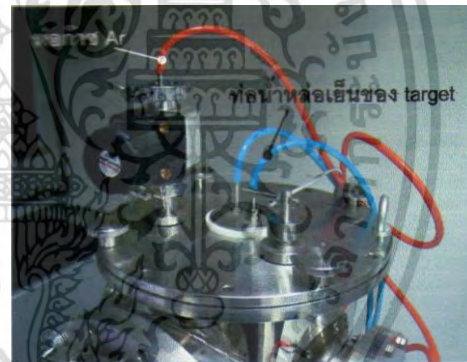
ภาพที่ 3.9 แสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 0.3 ,0.5 ,0.8 ,1.2 ,1.5 ,1.8 และ 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที
20. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสนั้นแปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.10 (ก) แสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด

(ข) แสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

21. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการ สปีดเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาดเรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสปีดเตอริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดสวิตช์เตอริงออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้



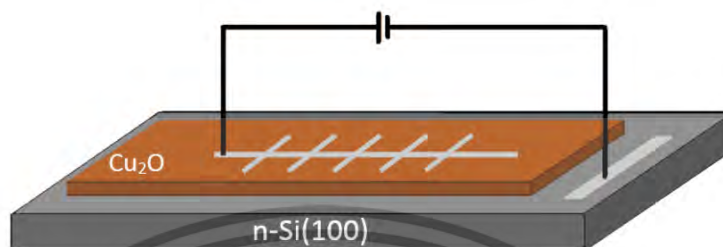
แรงดันไฟฟ้า : 360 โวลต์
 กระแส : 0.05 แอมป์
 ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ : 5×10^{-3} ทอร์
 ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร
 เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 30 นาที

ภาพที่ 3.11 แสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

22. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชุดเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสวิตช์ลิ้มเล็กทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตช์ลิ้ม
23. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูลเตอร์วาล์วและสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถึงก๊าซ
24. ปิดวาล์วผีเสื้อ (คิงคั่นโยกเข้าตัว)
25. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
26. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
27. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิตช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตหางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาน้ำจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตหางปลาออกก่อน เกลียน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมูน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาน้ำจะเด็นออกมาเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. เปิดฝาน้ำออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ(ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาน้ำ จากนั้นปิดให้เรียบร้อย



ภาพที่ 3.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}(100)$ ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2 ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-Si}(100)$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}(100)$ ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-Si}(100)$ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

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



ภาพที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

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



ภาพที่ 3.14 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7001F

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน

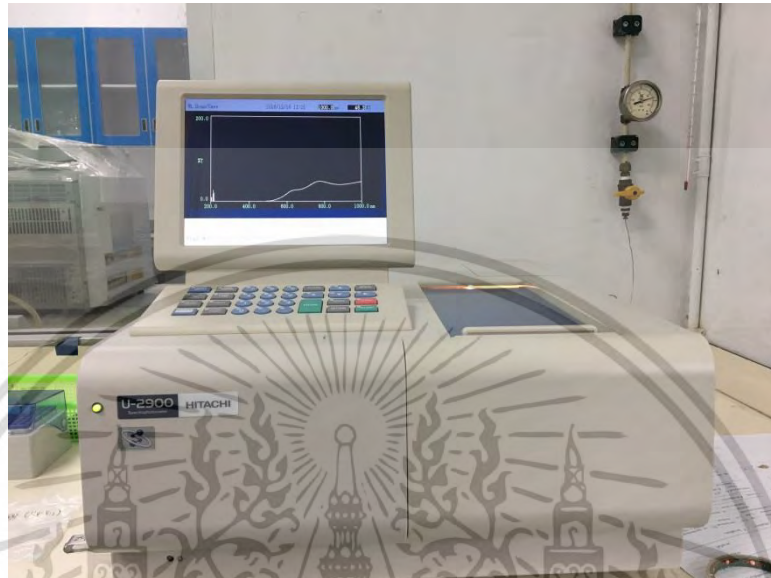


ภาพที่ 3.15 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

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



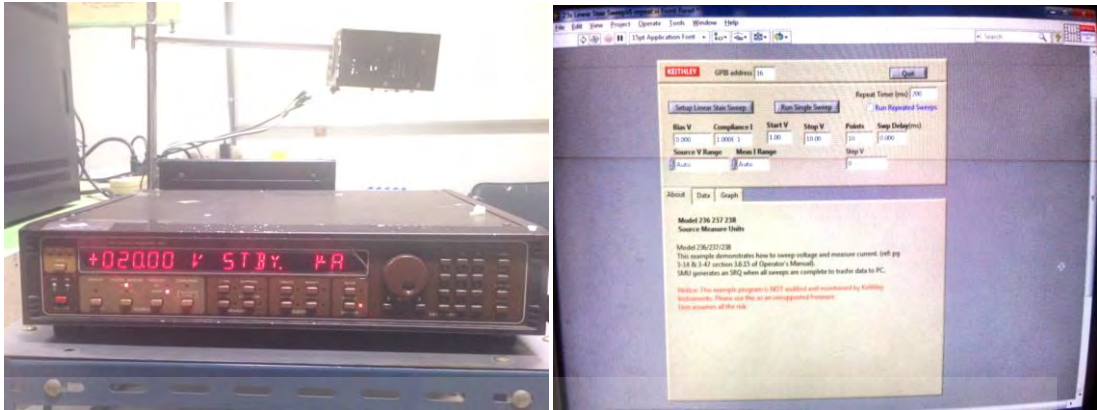
ภาพที่ 3.16 แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer

3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

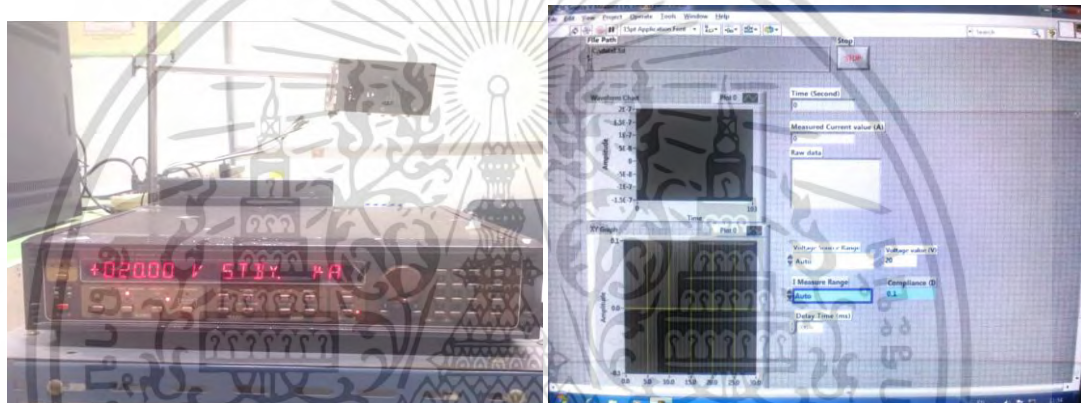
นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพังก์ชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ที่เตรียมกันได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ 20 – 300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วต่อจากนั้นจึงนำศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 แสดงภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น



ภาพที่ 3.18 แสดงภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง



ภาพที่ 3.19 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-Si}$ (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ทั้งที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์และที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-Si}$ (100) ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และต่อจากนั้นจึงเขียนแผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100)

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการไหลของไอ

ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป่าทองแดงความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 630 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไอปฏิกิริยา บั้มสุญญากาศประกอบไปด้วยปั๊มแพร่ไอน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 9 เซนติเมตร ความดันพื้นฐานเท่ากับ 3.0×10^{-5} ทอร์ เริ่มทำการทดลองโดยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันของห้องสุญญากาศที่อ่านได้จากเกจพิรานี (Pirani gauge) ในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวบน อ่านได้เท่ากับ 2.3×10^{-1} ทอร์ ส่วนความดันที่อ่านได้จากเกจเพนนิ่ง (Penning gauge) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวล่าง อ่านได้เท่ากับ 3.0×10^{-3} ทอร์ ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึง 225 โวลต์ การไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

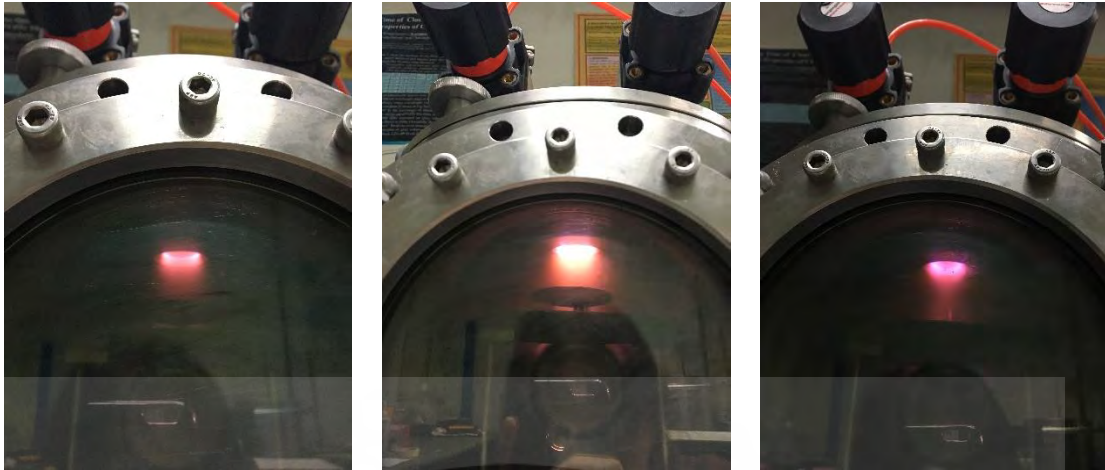
ดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสชาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทลายทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 225 โวลต์ เป็น 300 โวลต์ เพื่อทำการเคลื่อนฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการ โกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ

เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงต่อไปอีก พบว่าถ้าพลาสมาจะเร็วเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพื่อให้พลาสมาพอจะโตขึ้นและการโกลวดิสชาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จต่อไปอีก สีของการโกลวดิสชาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโกลวดิสชาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ถ้าพลาสมาจะโตขึ้นและยืดออกมากขึ้น) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโกลวดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ar flow rate = 50 sccm

Voltage = 228 V

Ar flow rate = 50 sccm

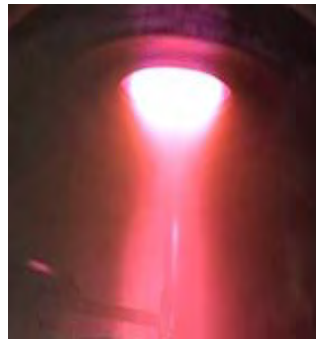
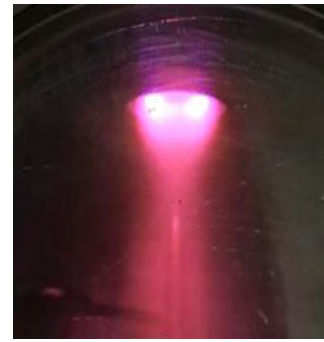
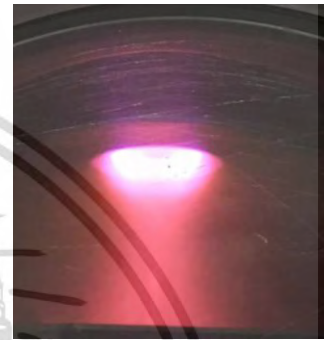
Voltage = 300 V

Ar flow rate = 1.2 sccm

Voltage = 370 V

ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะเริ่มจากการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ ให้กับขั้วคาโทดจนกระทั่งถึง 225 โวลต์สภาพโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จขึ้น จนได้ความดันความดันที่อ่านโดยเกจพิราณี 4.0×10^{-3} - 6.0×10^{-3} ทอร์ ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะแสดงตามตารางที่ 4.1 และสภาพโกลวดิสชาร์จที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ จะแสดงตามภาพที่ 4.3

O₂ flow rate = 0.3 sccmO₂ flow rate = 0.5 sccmO₂ flow rate = 0.8 sccmO₂ flow rate = 1.2 sccmO₂ flow rate = 1.5 sccmO₂ flow rate = 1.8 sccm

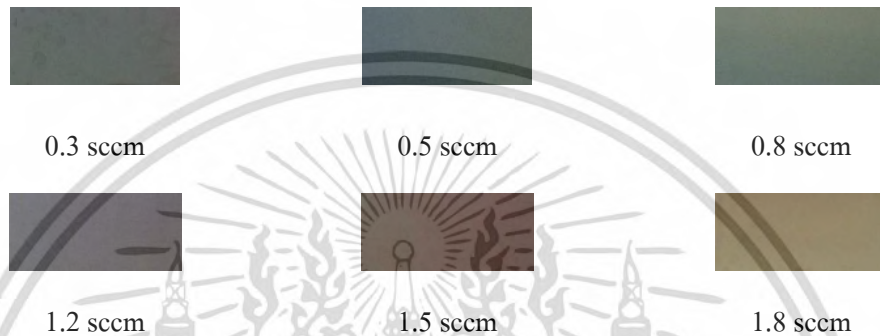
ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิซาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Sputtering Conditions						Film Characteristics
	Argon flow rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering time (min)	
0.3	6.0	บน = 4.2×10^{-3} ล่าง = 1.2×10^{-4}	370.0	0.021	7.7	40	ฟิล์มสีน้ำตาล เข้มออกดำ
0.5	10.0	บน = 5.4×10^{-3} ล่าง = 1.5×10^{-4}	370.0	0.019	7.0	40	ฟิล์มสีน้ำตาล เข้มออกดำ
0.8	8.0	บน = 4.3×10^{-3} ล่าง = 1.2×10^{-4}	370.0	0.016	5.9	40	ฟิล์มน้ำตาล เข้ม
1.2	6.0	บน = 3.8×10^{-3} ล่าง = 1.2×10^{-4}	370.0	0.033	12.2	40	ฟิล์มสีน้ำตาล เข้ม
1.5	5.8	บน = 3.1×10^{-3} ล่าง = 9.7×10^{-5}	370.0	0.030	11.1	40	ฟิล์มสีน้ำตาล ออกแดง
1.6	6.0	บน = 4.2×10^{-3} ล่าง = 1.1×10^{-5}	370.0	0.034	12.6	40	ฟิล์มสีน้ำตาล ออกเหลือง

4.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



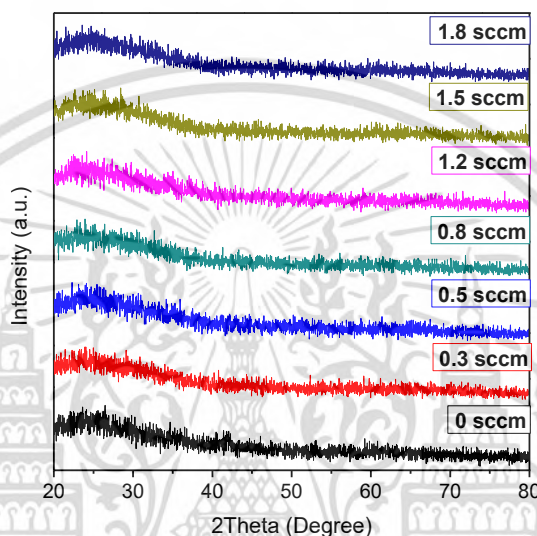
ภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



ภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

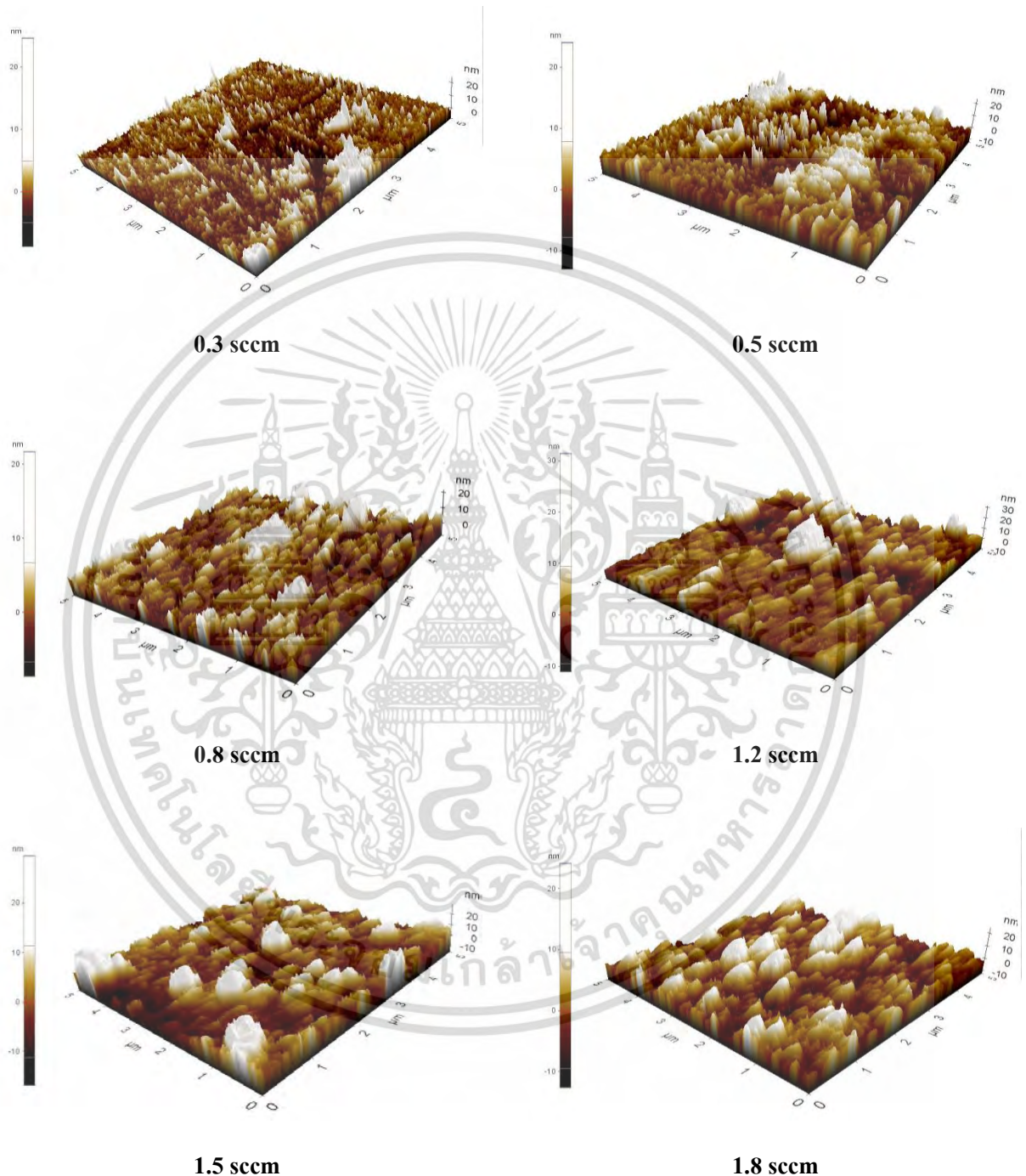
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะแสดงดังรูปที่ 4.6 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนที่ทุกอัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีแสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



ภาพที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	Grain Size (nm)	Roughness(nm)
0.3	49.0	2.510
0.5	98.0	3.983
0.8	127.0	3.408
1.2	176.0	4.836
1.5	146.0	5.754
1.8	166.0	4.829

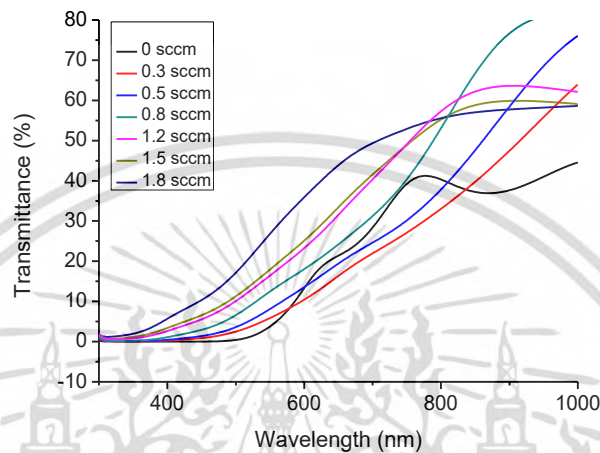
4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si (100)}$ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง



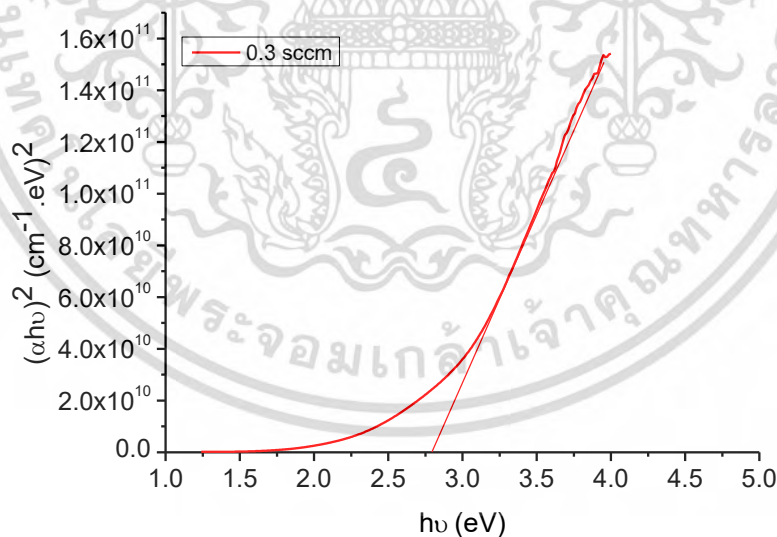
ภาพที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง

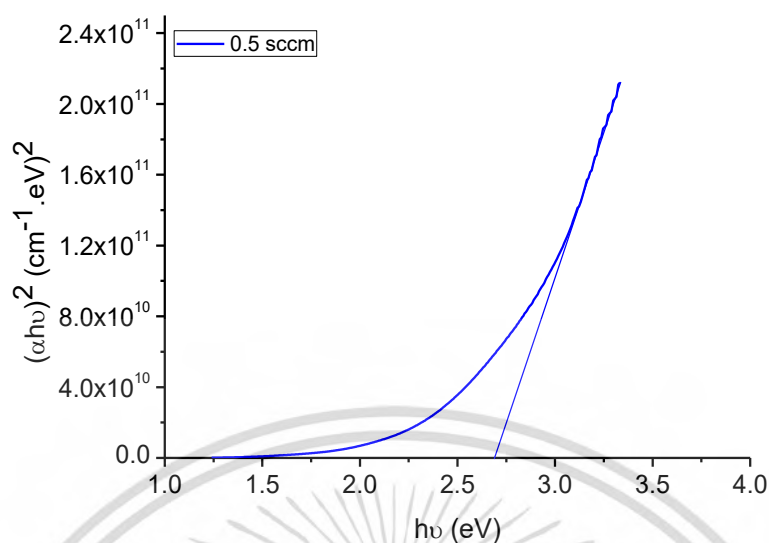
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง



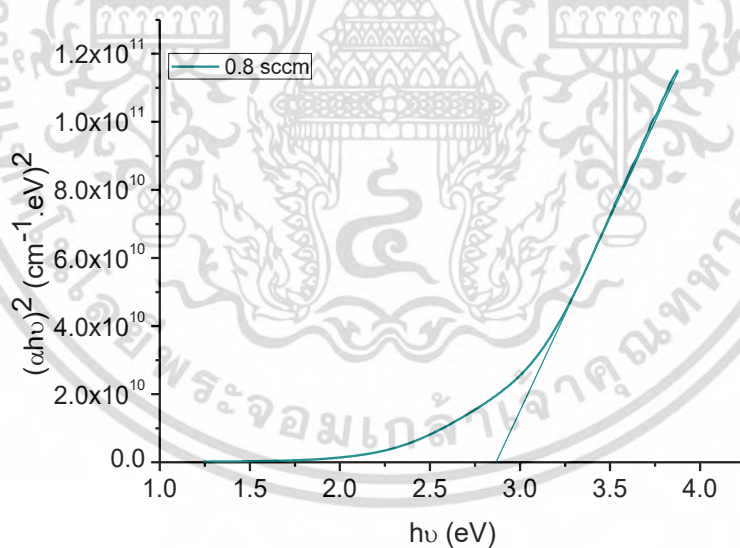
ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

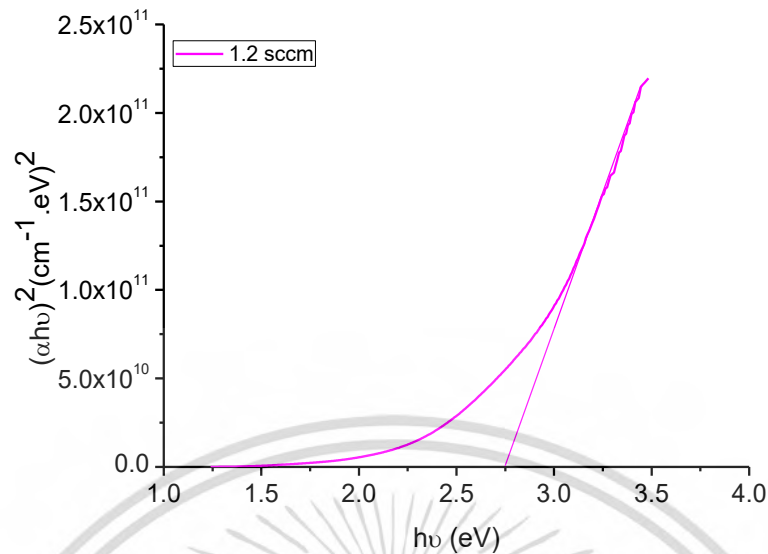


ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

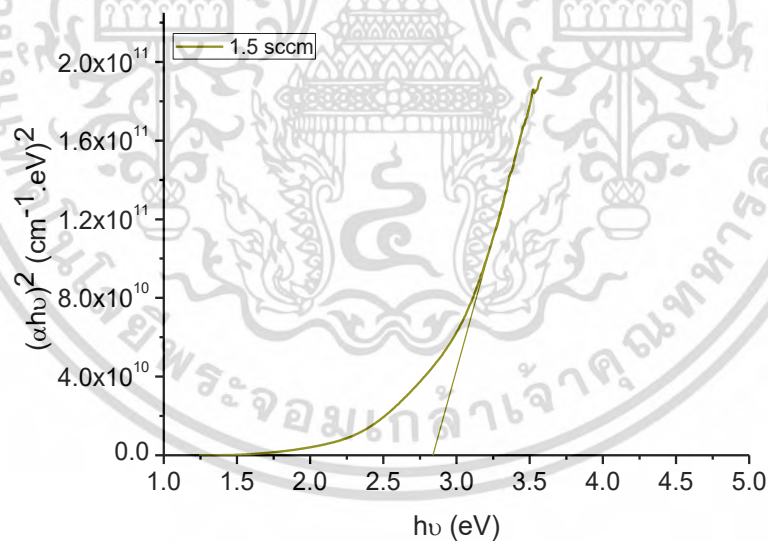


ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

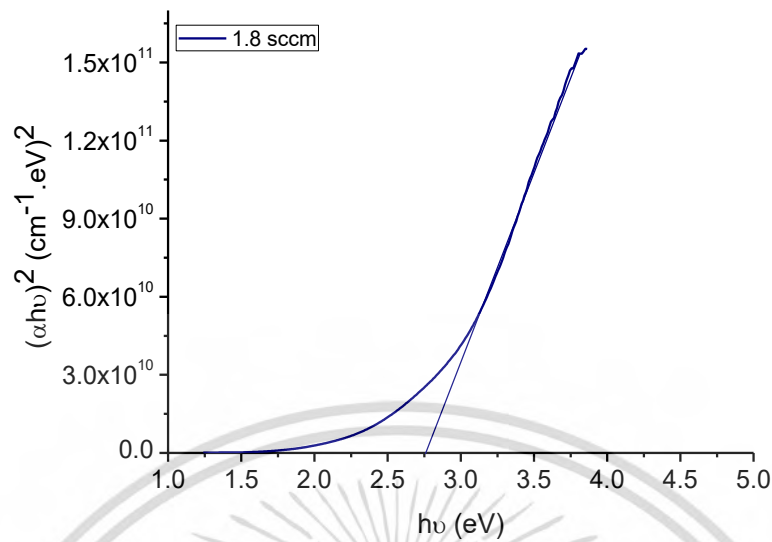


ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

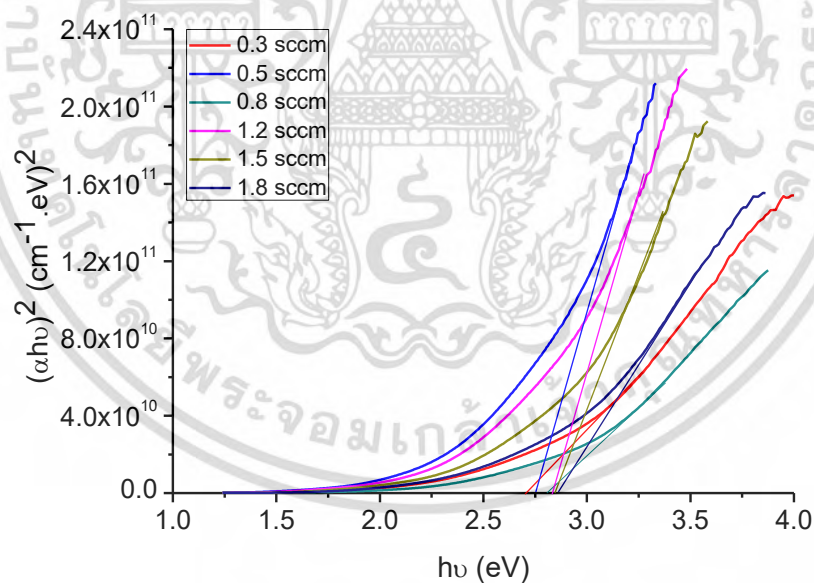


ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



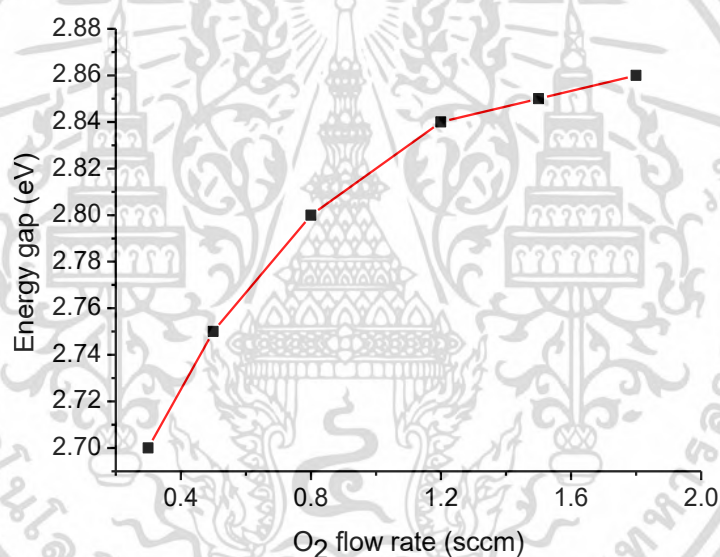
ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

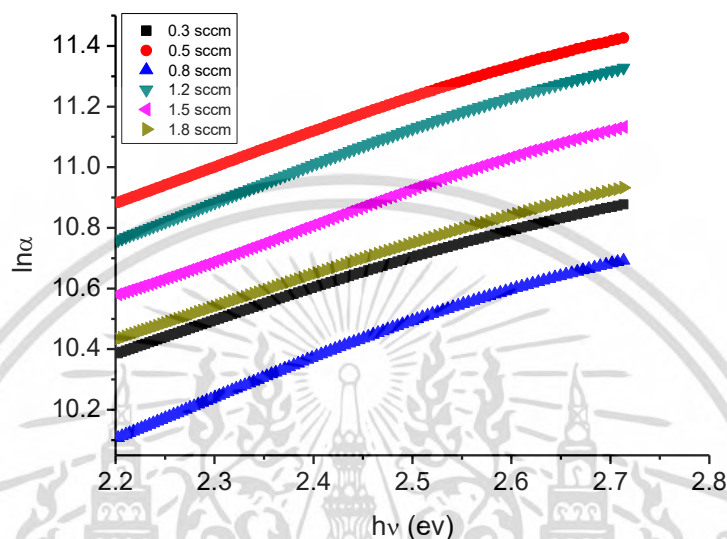
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O_2 flow rate (sccm)	Energy Gap (eV)
0.3	2.70
0.5	2.75
0.8	2.80
1.2	2.84
1.5	2.85
1.8	2.86



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

4.4.2 ผลการศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง



ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O_2 flow rate (sccm)	E_t (eV^{-1})
0.3	1.0204
0.5	0.9174
0.8	0.8547
1.2	0.8771
1.5	0.8928
1.8	1.0101

จากภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) สามารถนำไปหาค่า E_t ได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_t}\right) \quad (4.1)$$

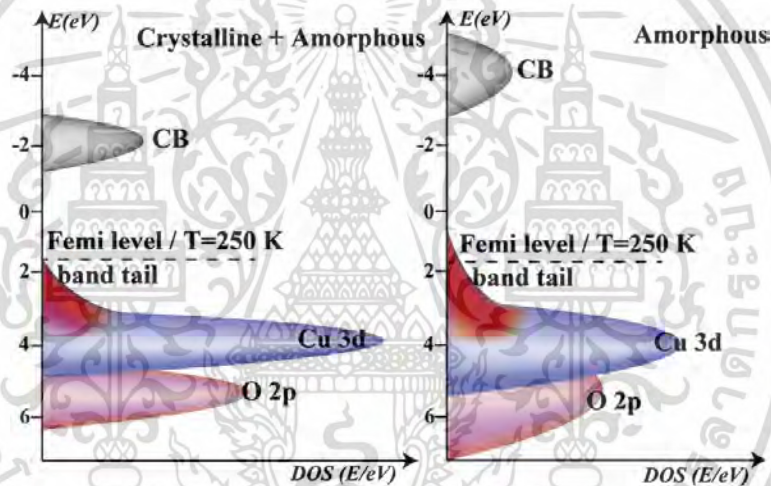
$$\ln\alpha = \frac{h\nu}{E_t} + \ln\alpha_0 \quad (4.2)$$

ค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) หาได้จากค่าความชันของกราฟในภาพที่ 4.18

ดังนั้น

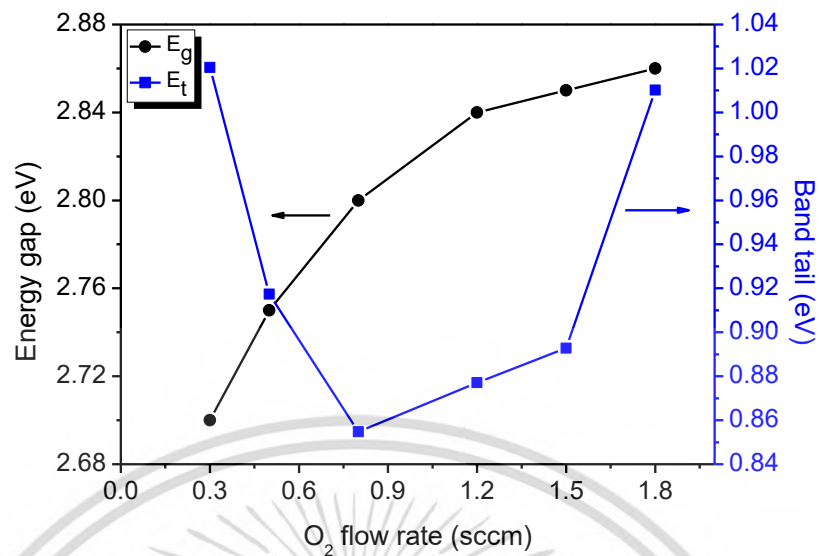
$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_t}$$

$$E_t = \frac{1}{\text{Slope}}$$



ภาพที่ 4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานของอะมอร์ฟัสของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่มีผู้รายงานไว้ (Huang et al., 2015)

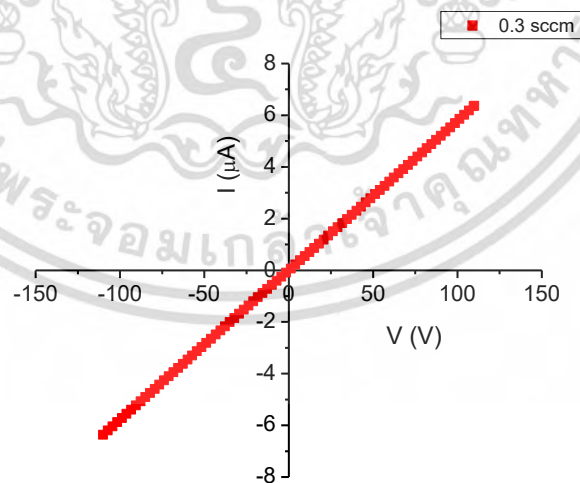
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

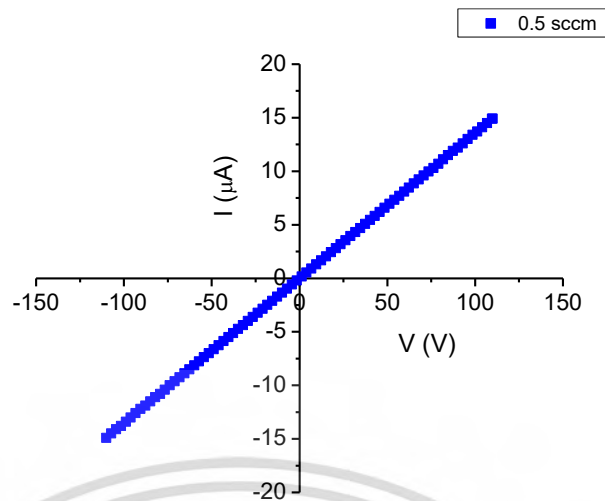
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์

4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์

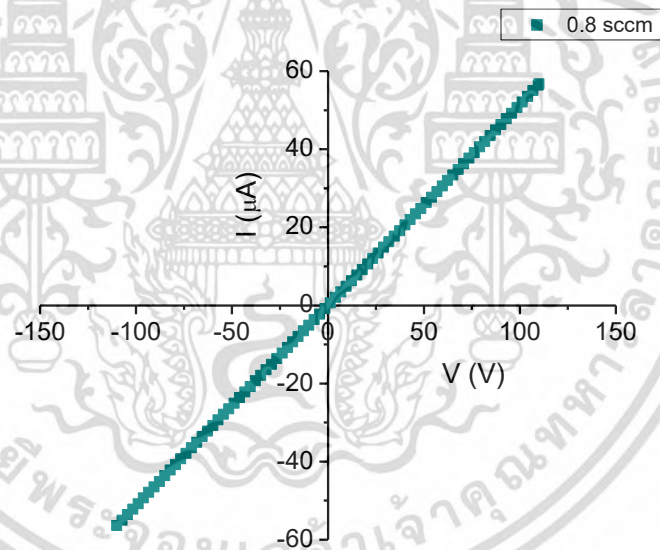


ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

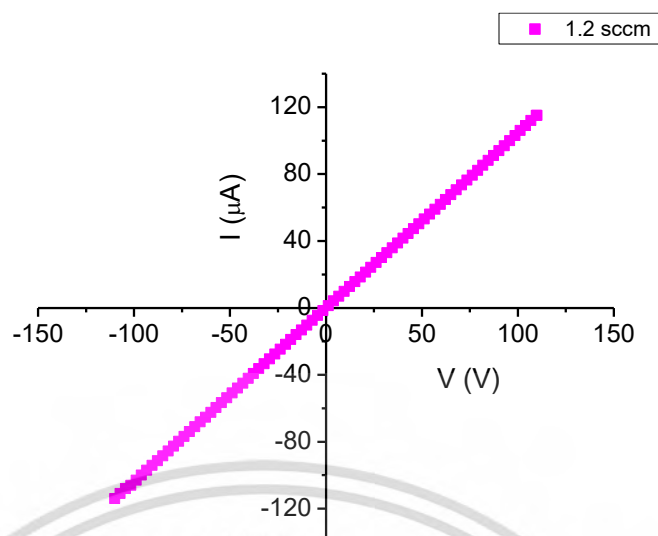


ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

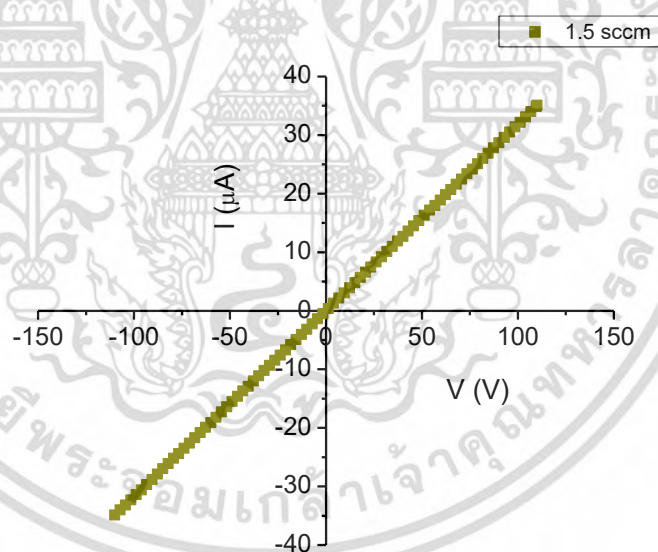


ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

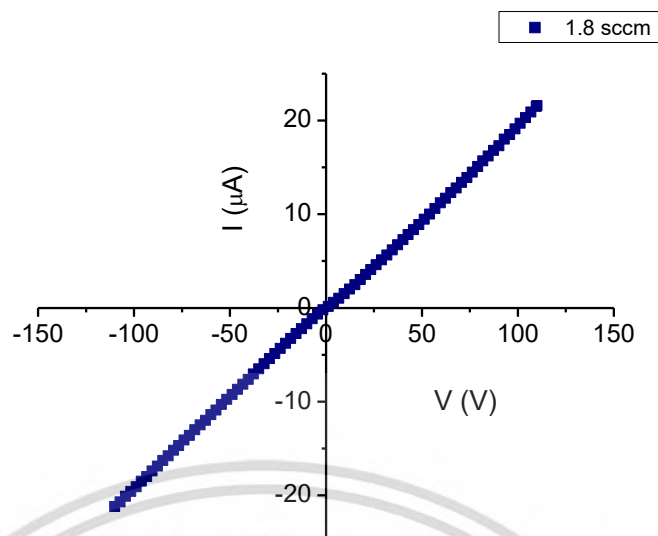


ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



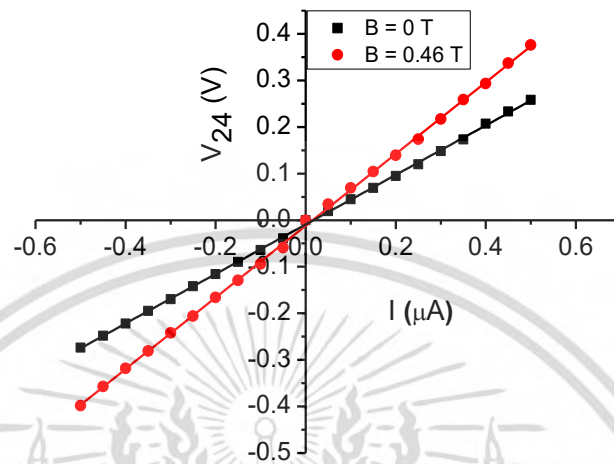
ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากภาพที่ 4.21-4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีจะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทาน (resistance) ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) และ สภาพนำไฟฟ้า (resistivity)

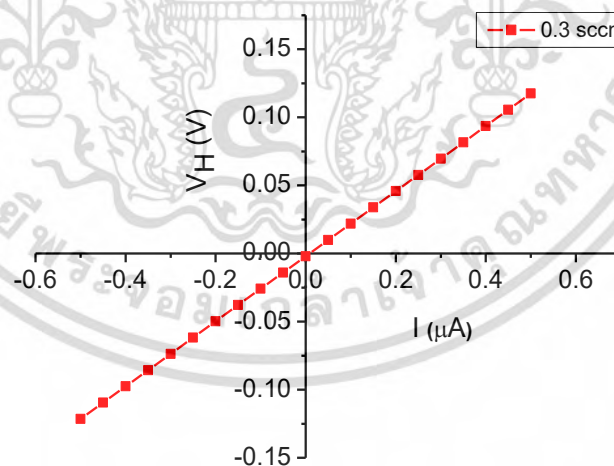
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Resistance (Ω)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega.\text{cm}$)
0.3	17.32×10^6	51.96×10^6	2.59×10^3
0.5	7.38×10^6	22.14×10^6	1.10×10^3
0.8	1.94×10^6	5.84×10^6	2.92×10^2
1.2	0.96×10^6	2.88×10^6	1.44×10^2
1.5	3.14×10^6	9.43×10^6	4.71×10^2
1.8	5.22×10^6	15.66×10^6	7.83×10^2

4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของแผ่นลึ่กเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสซึ่งเตรียมโดยวิธีแอตที่ฟิซึแมกนีตรอนสปัตเตอริง

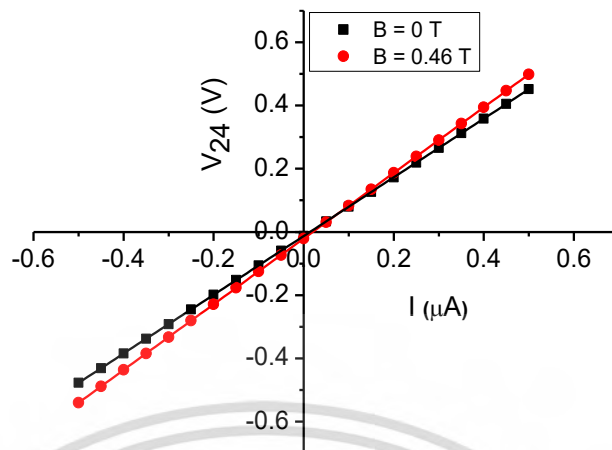


ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

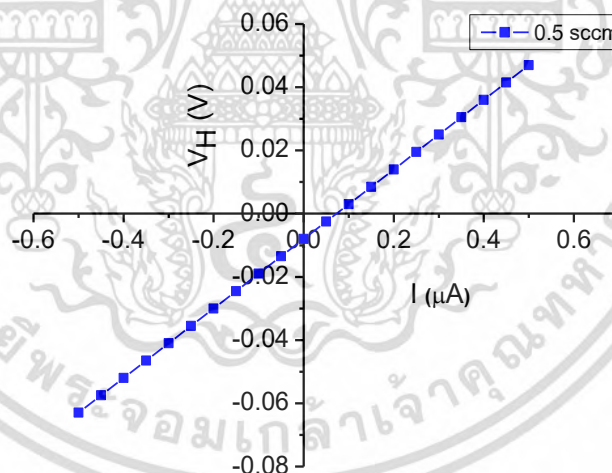


ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

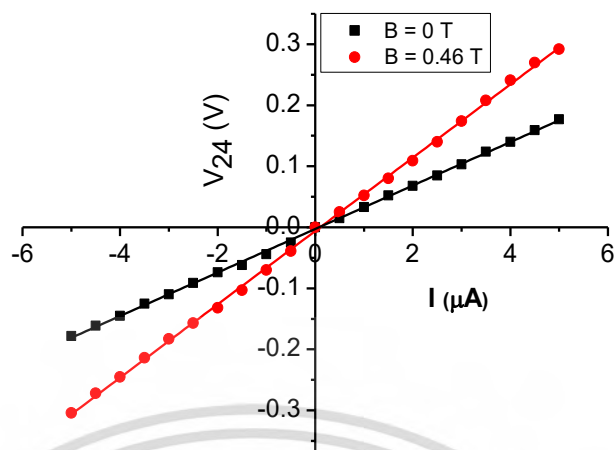


ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

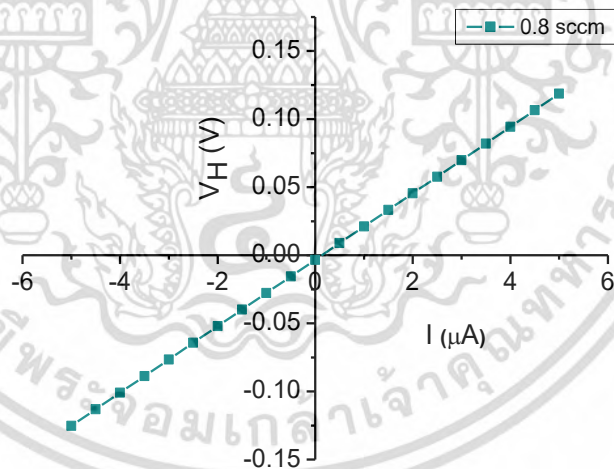


ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

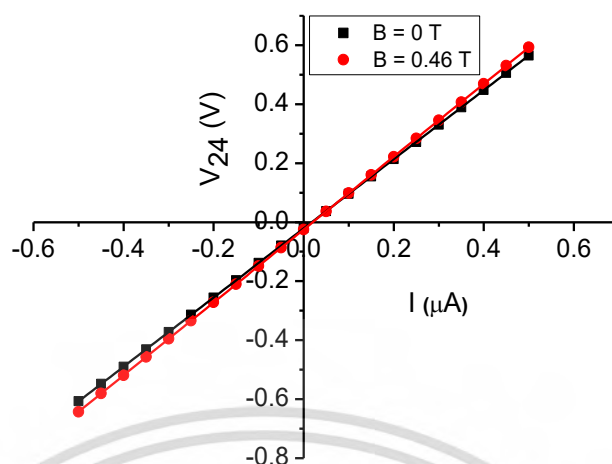


ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

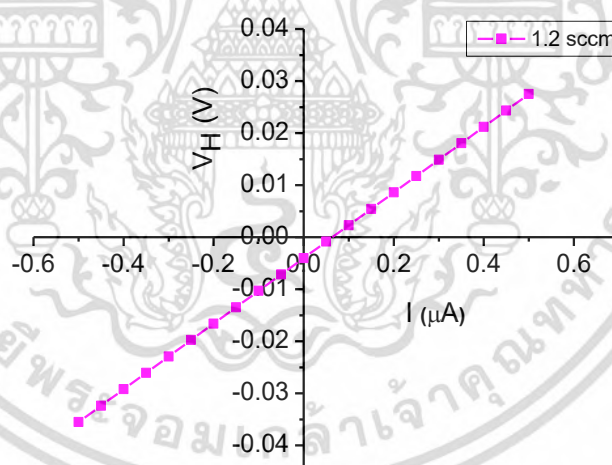


ภาพที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

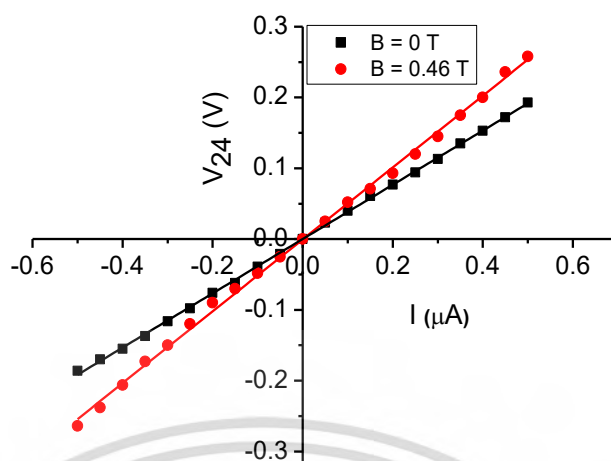


ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

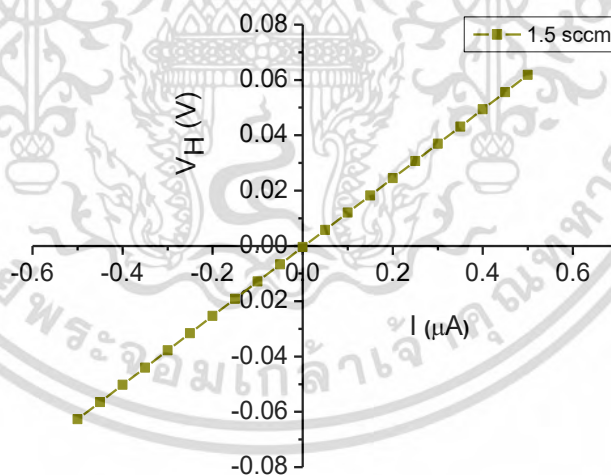


ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

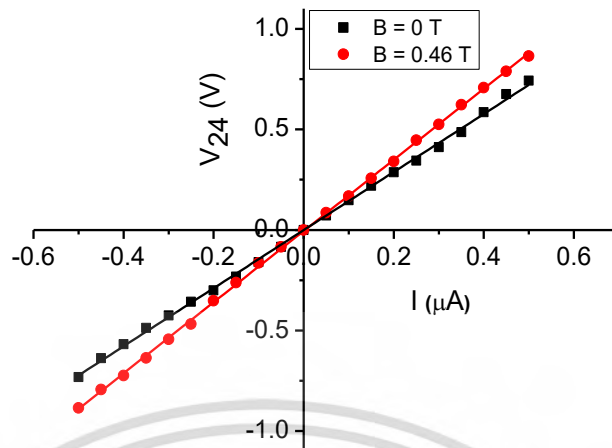


ภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

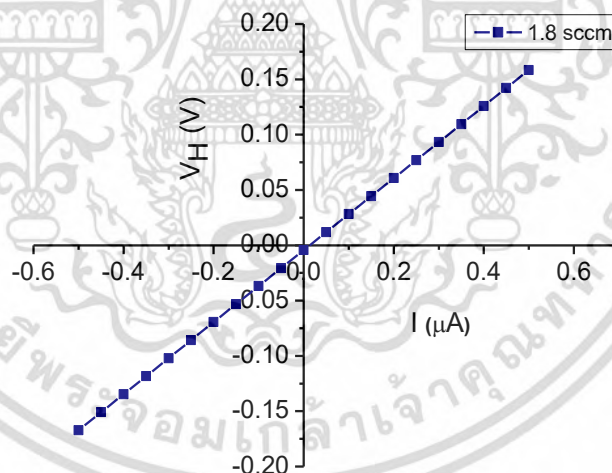


ภาพที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

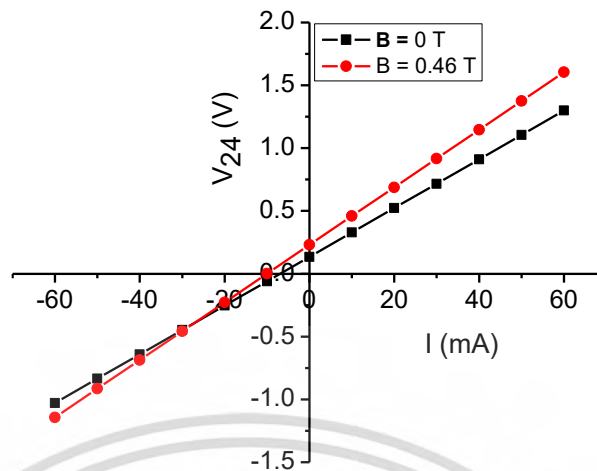


ภาพที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

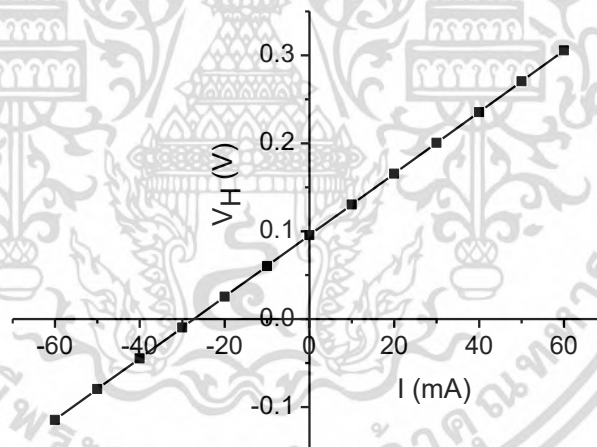


ภาพที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)



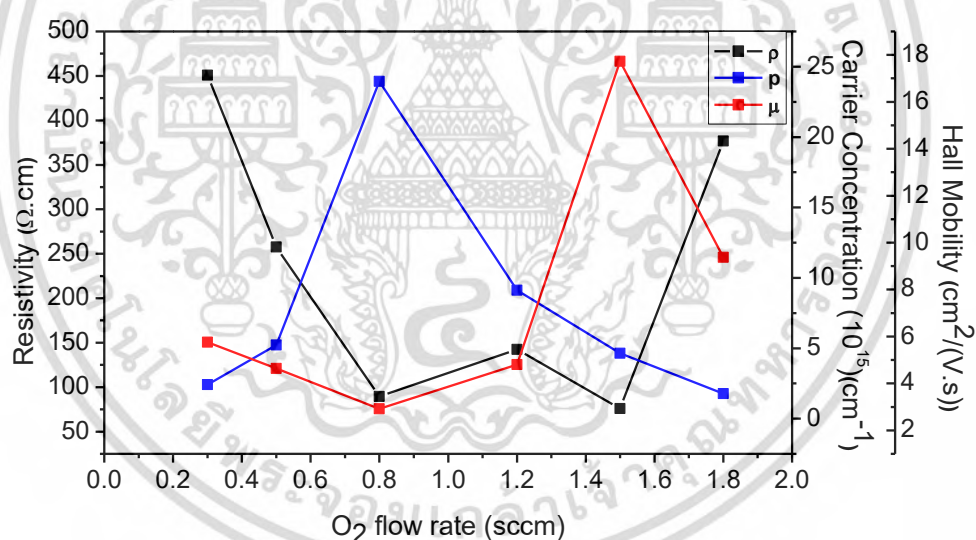
ภาพที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)

จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของผลึกเดี่ยว n-Si พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าคงที่ของฮอลล์ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60×10^2 โอห์ม·เซนติเมตร 3.80 ลูกบาศก์ตารางเซนติเมตร/คูลอมบ์ 1.64×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและ 0.0237 (เซนติเมตร)²/(โวลต์·วินาที) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

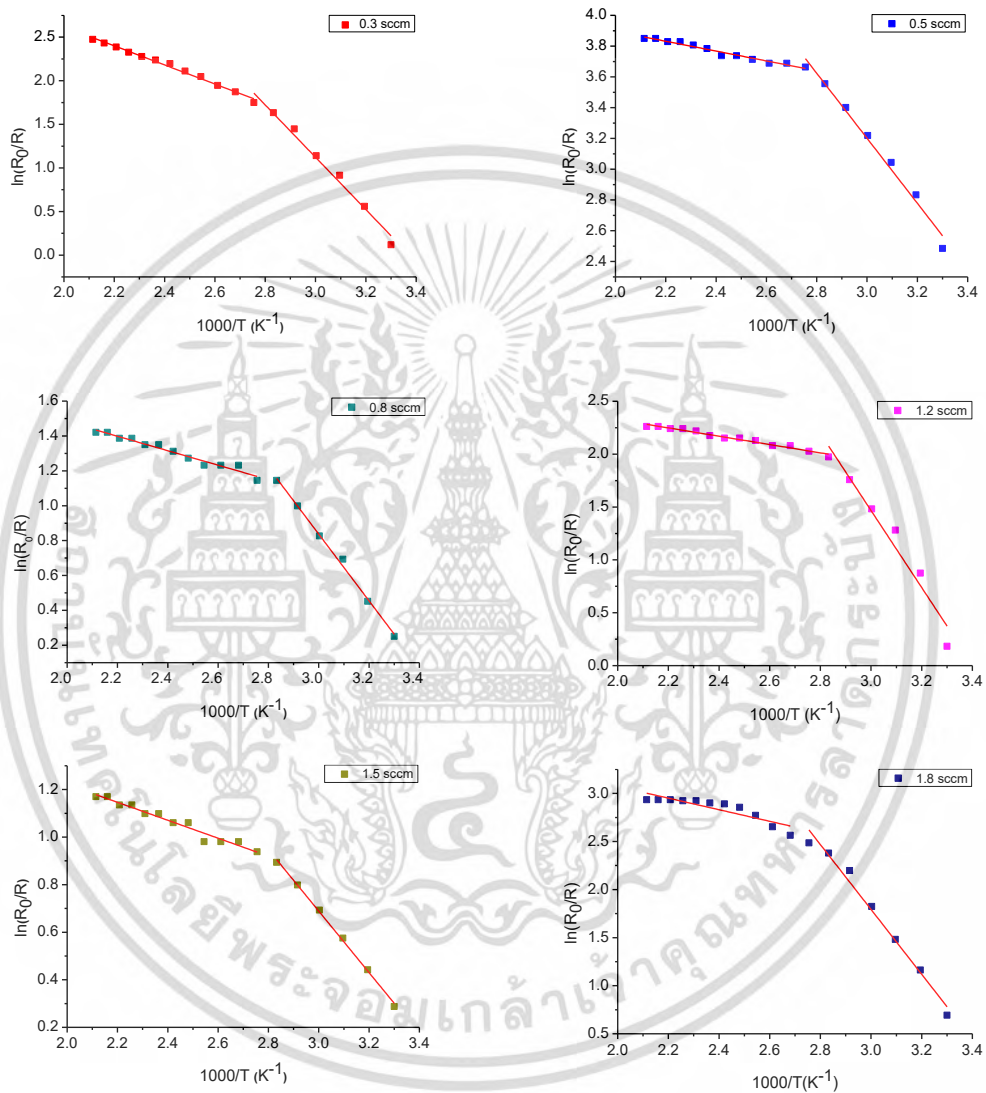
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

O ₂ flow rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega.\text{cm}$)	Hall Constant (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V.s})$)
0.3	9.01×10^6	4.50×10^2	2.59×10^3	2.40×10^{15}	5.76
0.5	5.14×10^6	2.57×10^2	1.19×10^3	5.22×10^{15}	4.64
0.8	1.78×10^6	8.94×10^1	2.60×10^2	2.39×10^{16}	2.91
1.2	2.84×10^6	1.42×10^2	6.84×10^2	9.12×10^{15}	4.80
1.5	1.52×10^6	7.60×10^1	1.34×10^3	4.63×10^{15}	17.73
1.8	7.53×10^6	3.76×10^2	3.53×10^3	1.76×10^{15}	9.37



ภาพที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอตที่ฟิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอตที่ฟิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้น กับ อัตราการไหลของออกซิเจน เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพอกซีฟีดซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

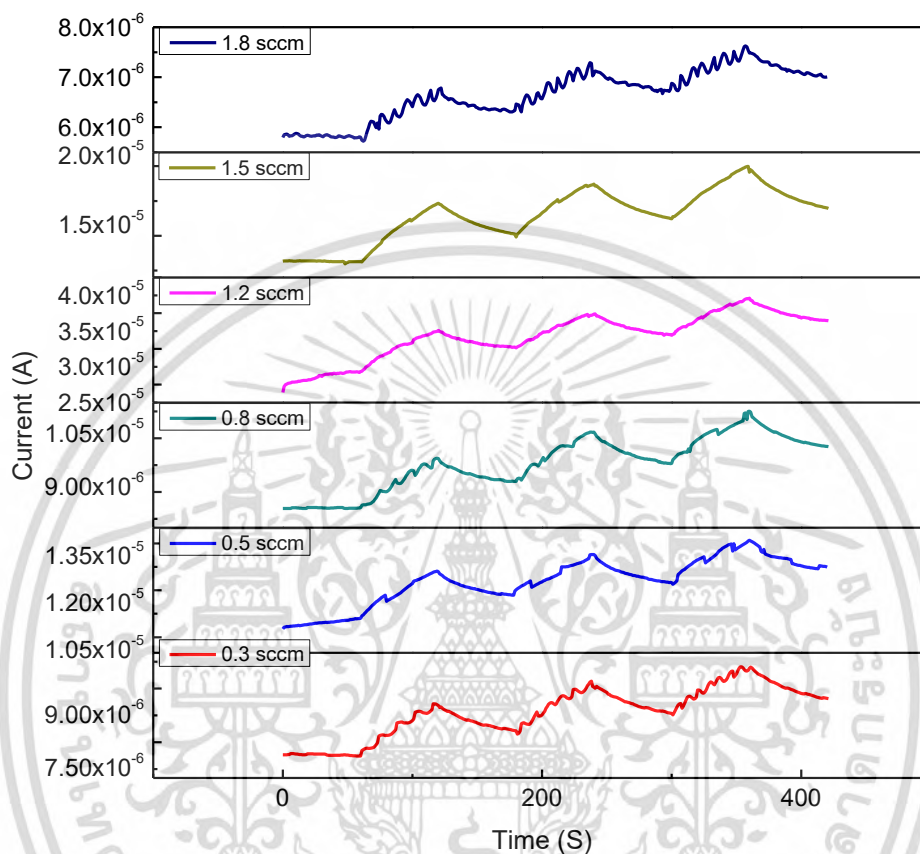
Oxygen Flow Rate (sccm)	Activation Energy I (meV)	Activation Energy II (meV)
0.3	94.44	257.88
0.5	27.60	181.98
0.8	36.22	164.73
1.2	33.63	313.95
1.5	31.91	111.26
1.8	51.75	290.66

จากภาพที่ 4.42 และตารางที่ 4.7 เป็นผลที่ได้จากการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จะมีสองค่าซึ่งจะเป็นค่ากำพวดศักย์ที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของค่ากำพวดศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งอธิบายได้จากสมการ

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำพวดศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

4.5.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



ภาพที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของ อะตอมผู้รับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ เป็นต้น

4.6.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง แสดงในรูปที่ 4.44 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไปโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.7 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ในรูปที่ 4.46 พบว่ากลไกการนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กลไก คือ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ตามลำดับ รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln V$ กับ V ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าความสูงของกำแพงศักย์ สำหรับค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีการของชวง แสดงยังตารางที่ 4.9



(ก)

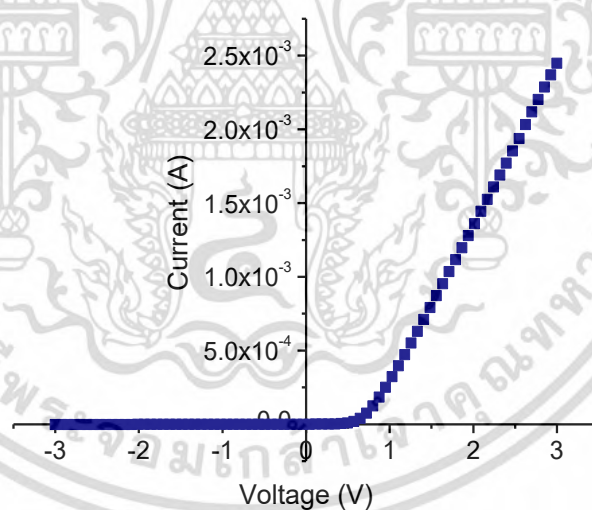


(ข)

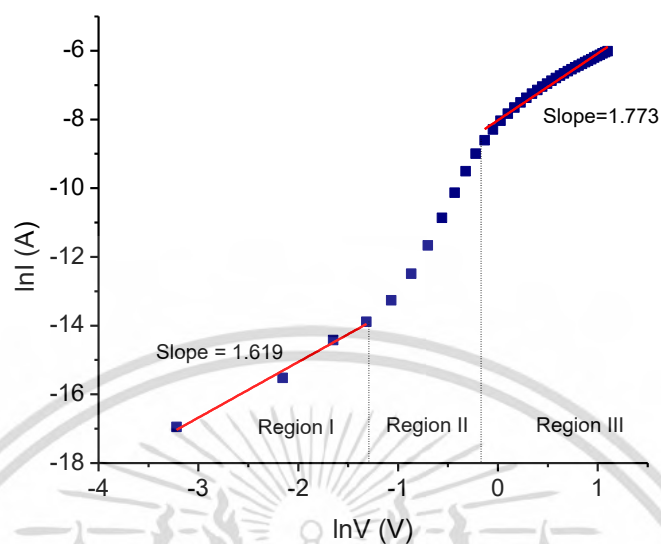
ภาพที่ 4.44 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

(ก) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยไม่มีการฉายแสง

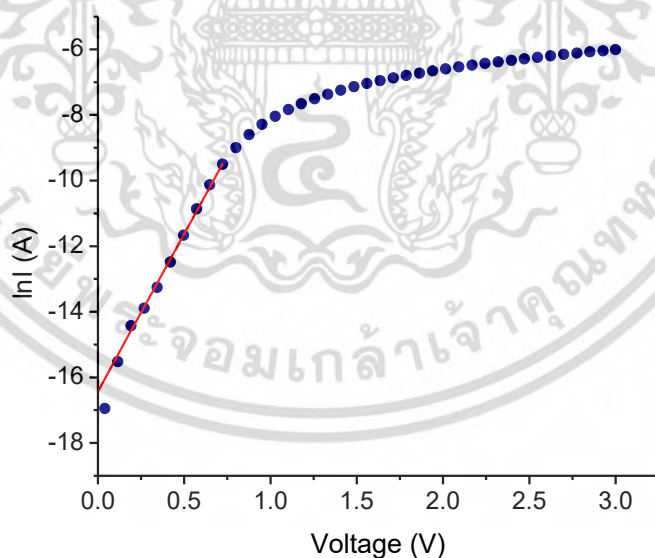
(ข) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้การฉายแสง



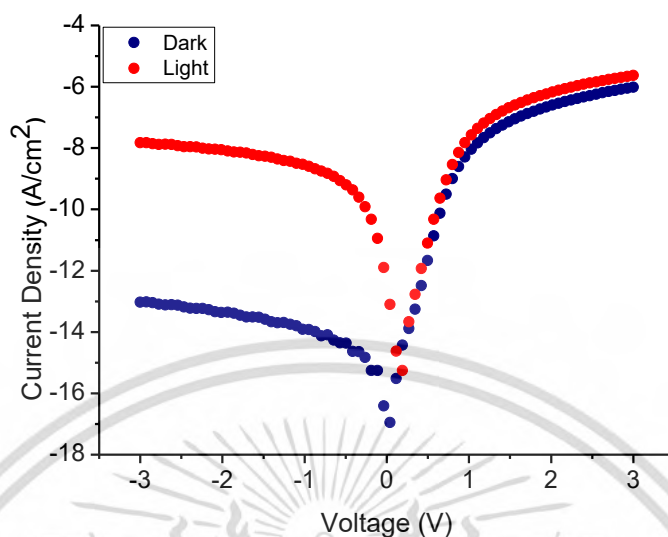
ภาพที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วง แรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



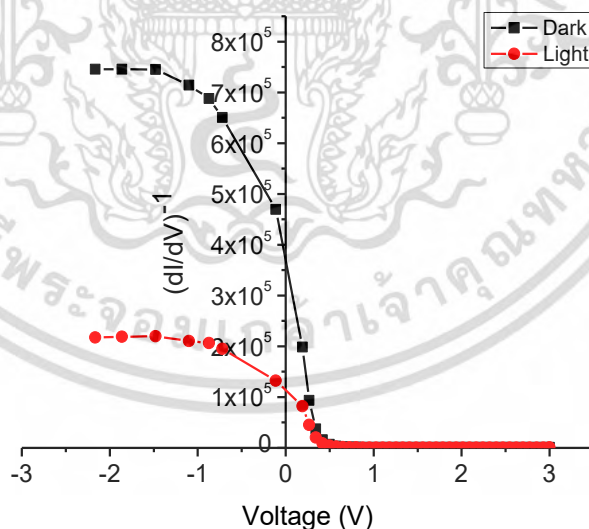
ภาพที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง



ภาพที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง



ภาพที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อ ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

แฟกเตอร์เรียงกระแส (Rectifier Factor, RF) คืออัตราส่วนระหว่างกระแสไบแอสตรงต่อกระแสไบแอสย้อนกลับดังความสัมพันธ์

$$RF = \frac{I_F}{I_R} \quad (4.3)$$

ค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์จะแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 และ 3 โวลต์

Condition	Current		RF
	I _R (A)	I _F (A)	
Dark	2.19×10 ⁻⁶	2.45×10 ⁻³	1.12×10 ³
Illumination	4.00×10 ⁻⁴	3.59×10 ⁻³	8.98

จากภาพที่ 4.46 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของกระแส (lnI) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส (lnI) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน (lnV) ดังภาพที่ 4.46 ดังสมการ

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \quad (4.5)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกมิสชันตัดแกน ค่า $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ (4.5) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

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

ค่าความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_B) ของสมการที่ (4.6) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ $A *$ เท่ากับ 40.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.7)$$

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) - 1 \right\} \quad (4.8)$$

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.9)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.8) อีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น

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

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.8) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) \quad (4.11)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ ค่า $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.11) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.12)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ดังภาพที่ 4.47 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร (R_s) และจุดตัดแกนของค่า $dV/d\ln I$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.11) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า $H(I)$ ดังนี้

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) \quad (4.13)$$

แล้วสมการที่ (4.13) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B - IR_S \quad (4.14)$$

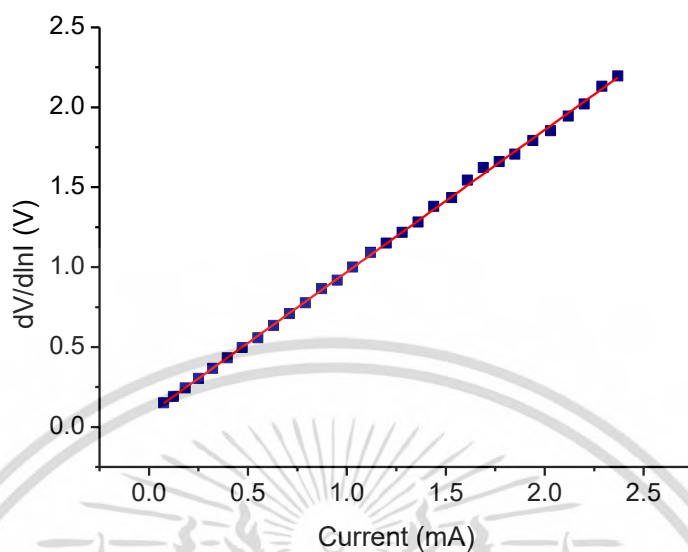
เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังภาพที่ 4.48 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพง ศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า ($n\phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของ กราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า $H(I)$ นั่นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับ ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.12) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

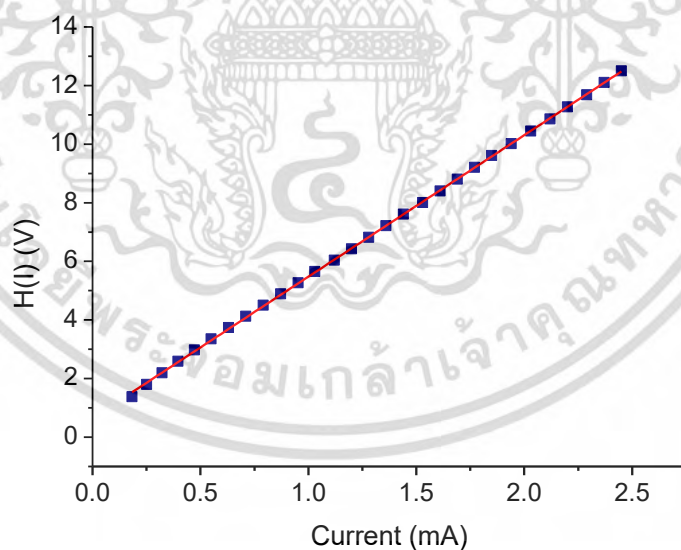
$$I = kV^m \quad (4.15)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.16)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุ ค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชล์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎ ของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักพาหะมีระดับพลังงาน ต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองที่แรงดันต่ำกว่า 0.25 โวลต์ ความ ชัน m มีค่าเท่ากับ 1.619 ส่วนแรงดันสูงกว่า 1.2 โวลต์ ความชันมีค่าเท่ากับ 1.773 แสดงว่าในเนื้อสาร n-Si มีกับดักพาหะเพียงระดับเดียว



ภาพที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dI กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

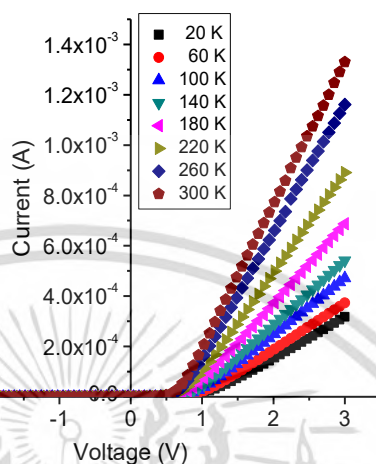
ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (Φ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม R_s ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Sample	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height Φ_{B0} (eV)		Series Resistance (R_s)(k Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)-I]	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)-I]
Cu ₂ O/Si	7.69×10^{-8}	4.34	2.31	0.75	0.81	1.68	1.74

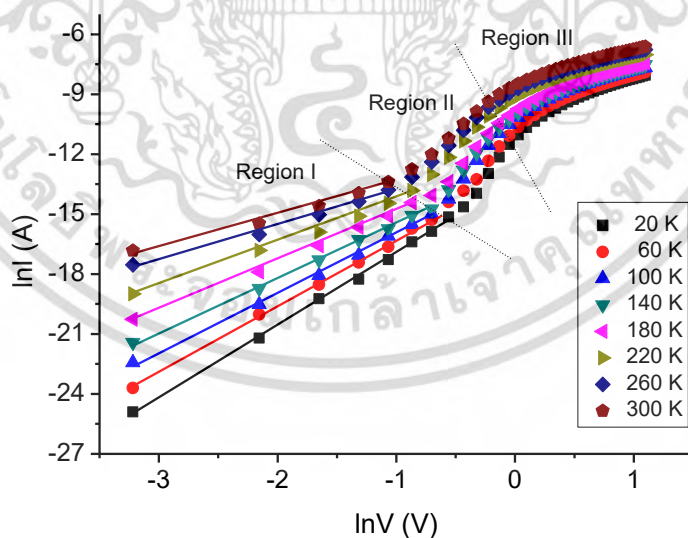
4.6.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังภาพที่ 4.49 และ ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ lnV โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสามช่วง กล่าวคือ Region I และ Region III เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) และที่กับดักพาหะในเนื้อสาร n-Si ตามลำดับ ส่วน Region II เป็นกลไกการนำกระแสชนิดเทอร์มออิเล็กทริกและสามารถหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ V เพื่อนำไปเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะวิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดม

คดี ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.10

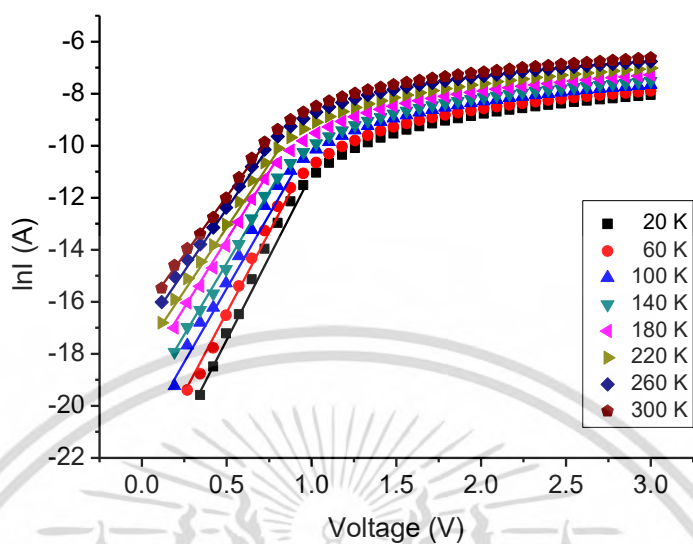


ภาพที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

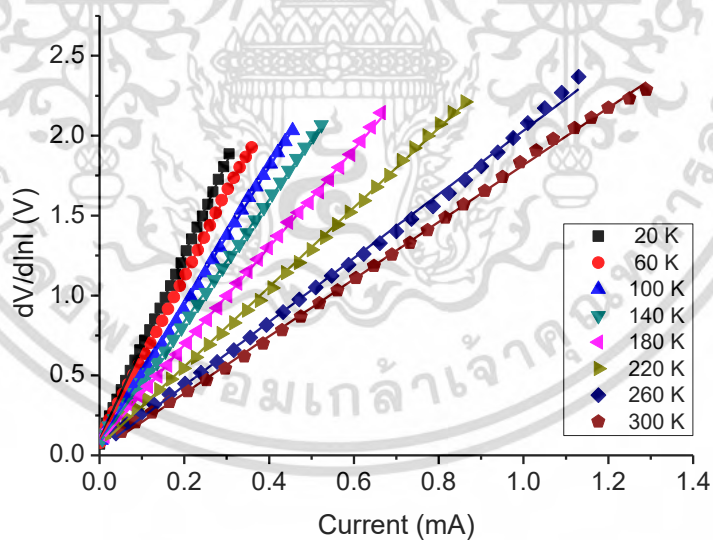


ภาพที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

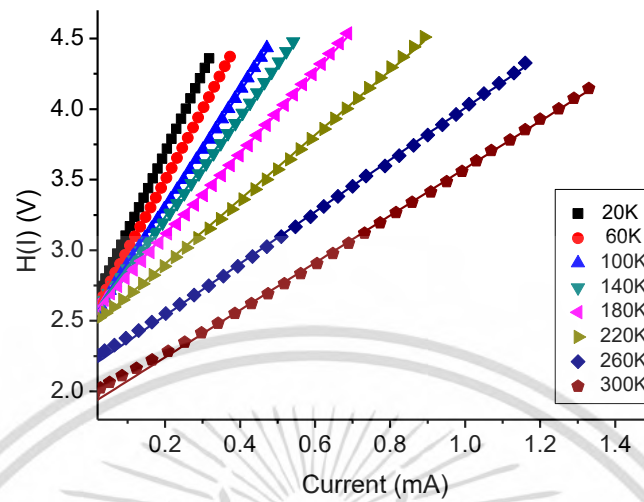
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟฟิซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



ภาพที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ I ที่อธิบายวิธีของช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟฟิซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



ภาพที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I โดยวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

Temperature (K)	Saturation Current (I_s)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance ($k\Omega$)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$[dV/d(\ln I)-1]$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$[dV/d(\ln I)-1]$
20	2.66×10^{-11}	41.08	52.17	0.054	0.049	5.630	5.831
40	6.87×10^{-11}	22.07	23.18	0.109	0.106	5.536	5.687
60	7.75×10^{-11}	14.19	15.45	0.168	0.161	5.007	5.185
80	5.13×10^{-10}	12.16	11.59	0.215	0.213	4.443	4.644
100	6.72×10^{-10}	9.62	9.27	0.270	0.267	4.118	4.303
120	8.98×10^{-10}	8.13	7.72	0.325	0.322	3.839	4.005
140	1.67×10^{-9}	7.32	6.62	0.376	0.375	3.632	3.798
160	2.72×10^{-9}	6.56	5.79	0.426	0.427	3.335	3.486
180	5.71×10^{-9}	6.12	5.28	0.472	0.473	2.935	3.051
200	1.00×10^{-8}	5.68	4.63	0.518	0.526	2.648	2.764
220	1.87×10^{-8}	5.40	4.21	0.562	0.571	2.338	2.461
240	3.45×10^{-8}	5.16	3.86	0.604	0.613	2.019	2.107
260	4.76×10^{-8}	4.87	3.12	0.651	0.688	1.852	1.960
280	6.17×10^{-8}	4.59	2.89	0.698	0.738	1.706	1.779
300	7.69×10^{-8}	4.34	2.31	0.746	0.815	1.687	1.743

ตารางที่ 4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากผลการทดลองตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอัมตวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของ ชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 4.57

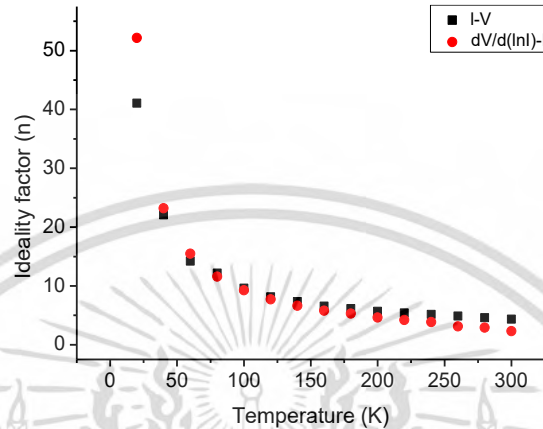
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I - \ln V$ ที่อุณหภูมิห้อง ความชัน (m) ของ Region I และ Region III มีค่าเท่ากับ 1.619 และ 1.773 ตามลำดับ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวิน เป็น 20 เคลวิน ค่าความชันของ Region I จะเพิ่มขึ้นจาก 1.488 เป็น 3.535 และความชันของ Region III จะเพิ่มขึ้นจาก 1.773 เป็น 2.553 แสดงว่าในเนื้อสาร n-Si มีกับดักพาหะเพียงระดับเดียว ส่วนใน Region I กับดักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งเป็นคุณสมบัติของสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state)

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังภาพที่ 4.59 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน

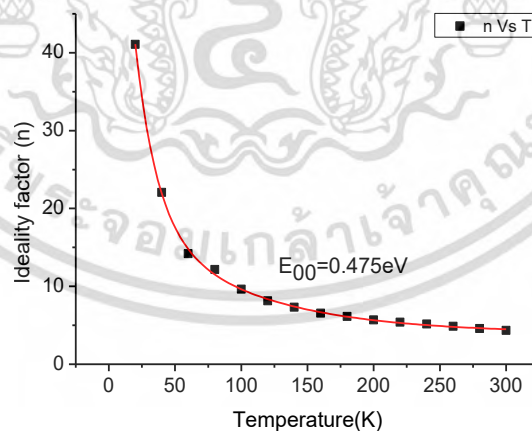
การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ชอตต์ก็มาคำนวณหาตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปข้างหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิจะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมิอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.58 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่

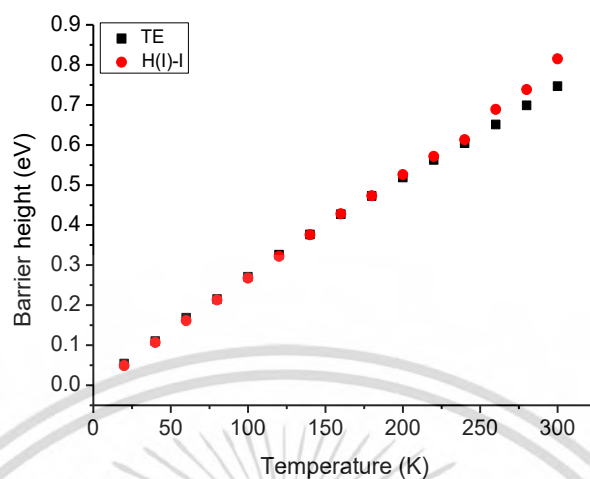
(freeze – out – carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ $p^+ - n$ ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



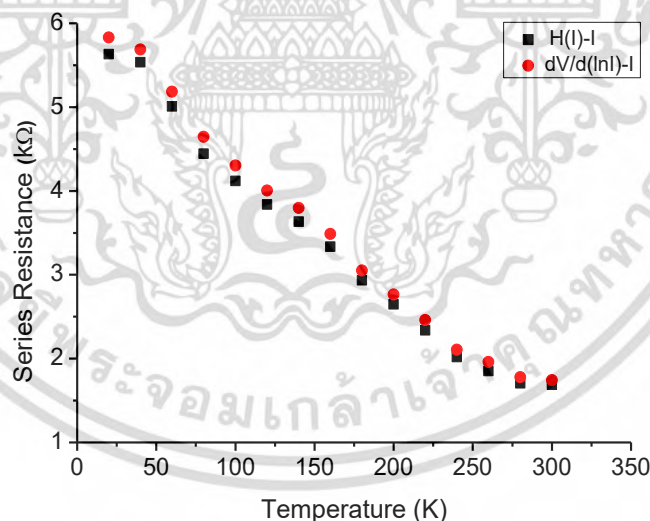
ภาพที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



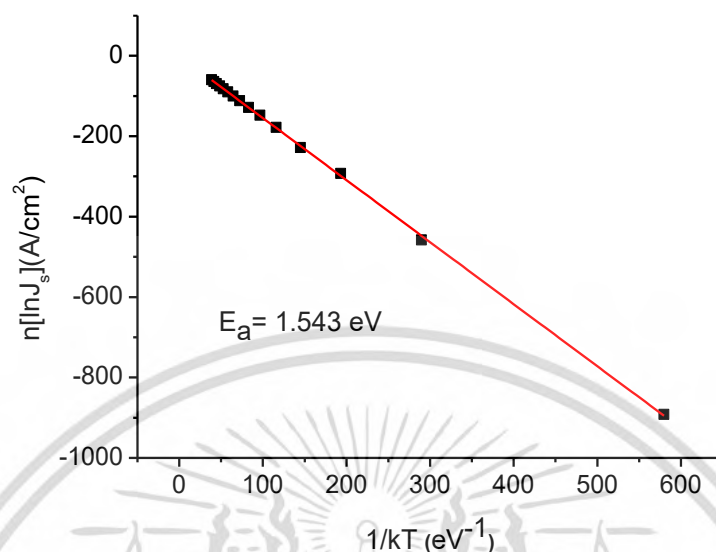
ภาพที่ 4.58 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง



ภาพที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง



ภาพที่ 4.61 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln(J_s)$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์

จากภาพที่ 4.58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิสามารถนำไปหาค่า E_{00} ได้จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.17)$$

โดย E_{00} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการดูดโมเมนต์ผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากภาพที่ 4.58 จากกลไกเทอร์มอลอิเล็กชันมีค่าเท่ากับ 0.475 อิเล็กตรอน โวลต์

จากค่าความชันของกราฟในภาพที่ 4.61 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.17)

$$n \ln(J_s) = -E_a \left(\frac{1}{kT} \right) + n \ln(J_0) \quad (4.18)$$

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของกราฟในภาพที่ 4.61

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

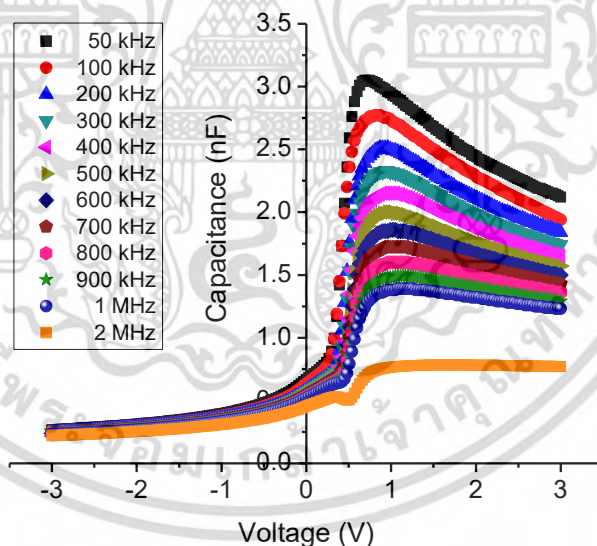
$$E_a = 1.543 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

จากค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.543 อิเล็กตรอน โวลต์

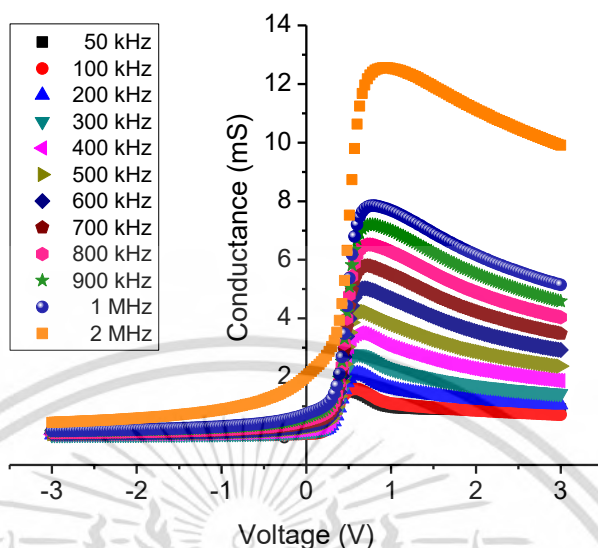
4.6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่

อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) แสดงได้ดังภาพที่ 4.62 พบว่าที่แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น

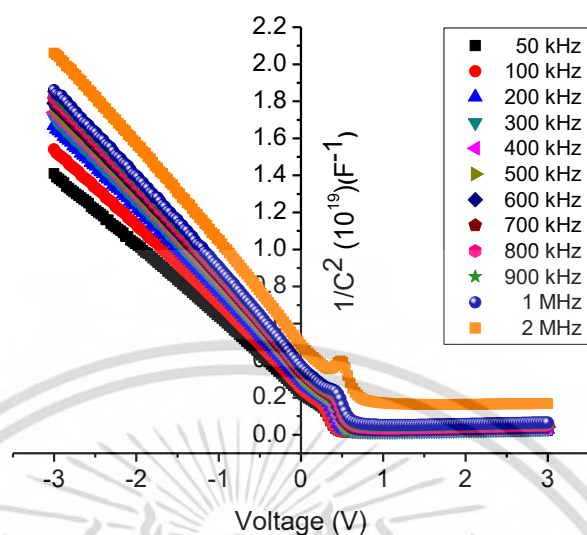


ภาพที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

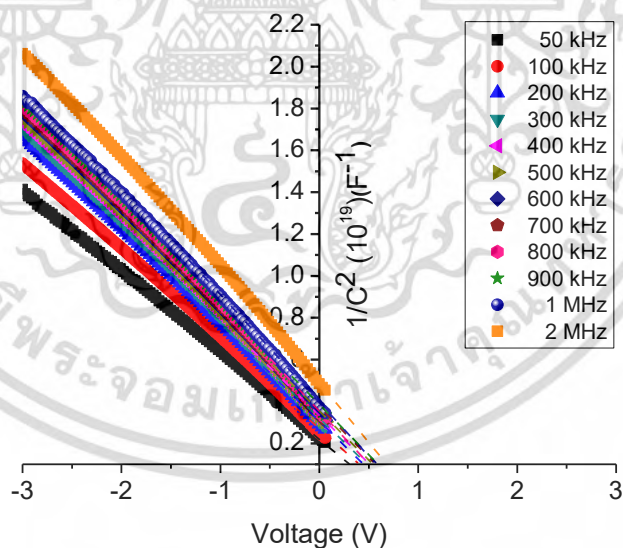


ภาพที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

สำหรับกรณีไบแอสตรง โดยเฉพาะที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความจุมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงที่ แสดงว่าตรงบริเวณผิวรอยต่อมีชั้นฉนวนไฟฟ้าเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นบางๆของ SiO₂ ขณะที่ทำการสเป็คเตอรืงเพื่อเตรียมฟิล์มบาง Cu₂O เคลือบบน n-Si (100) ดังนั้นที่แรงดันไบแอสตรงจะก่อให้เกิดเงื่อนไขสะสมพาหะ (accumulation condition) ของรอยต่อแบบ MOS ส่วนแรงดันไบแอสกลับทางจะก่อให้เกิดเงื่อนไขชั้นกลับกลาย (inversion condition) ศักย์ดักคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของพาหะอิสระใน n-Si สามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4.65



ภาพที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

สำหรับการหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state density, D_{it}) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันไฟฟ้า (C-V) และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (G-V) ที่ความถี่ค่าต่างๆ แต่เนื่องจากมีผลของความต้านทานอนุกรม (R_s) มาเกี่ยวข้องอย่างไรก็ตามค่า R_s นี้เปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังสมการ

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.19)$$

ค่าความจุของชั้นบางๆ ของ SiO_2 ที่ได้แก้ไขผลของ R_s แล้วจะเป็นดังนี้คือ

$$C_{ox} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.20)$$

ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องแล้วจะเป็น C_{ADJ} และ G_{ADJ} ดังความสัมพันธ์

$$C_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.21)$$

$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.22)$$

เมื่อ

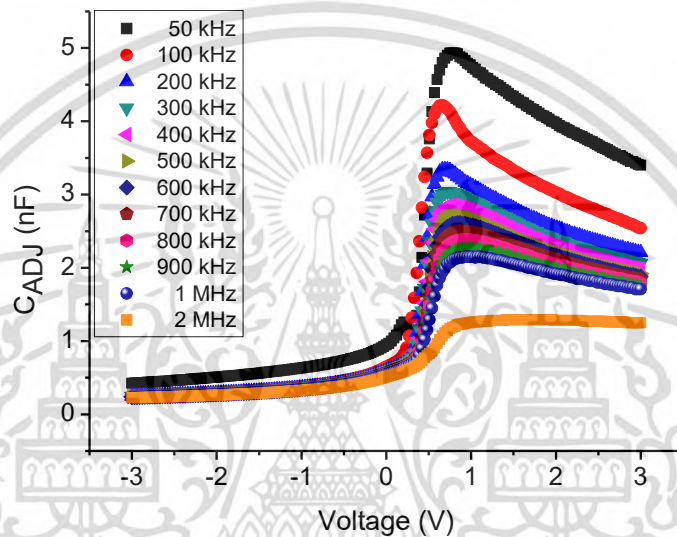
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s$$

พิกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{ADJ} กับ V จะแสดงถึงค่าสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

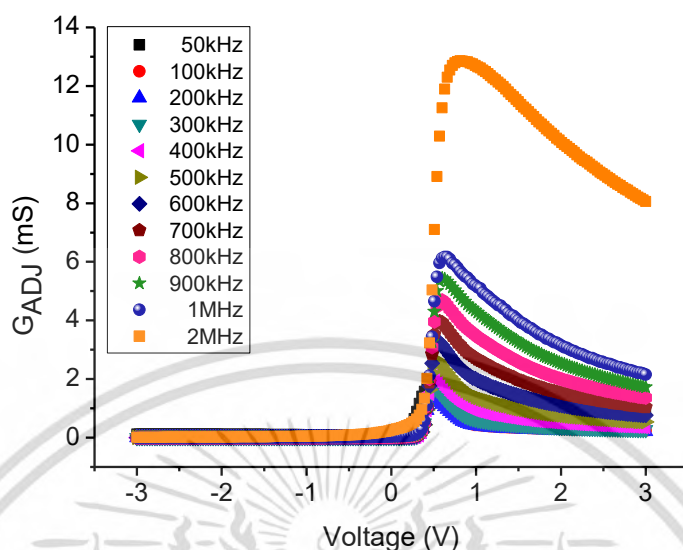
$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{(G_{max}/\omega)}{(G_{max}/\omega)^2 C_{ox}^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2} \right] \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

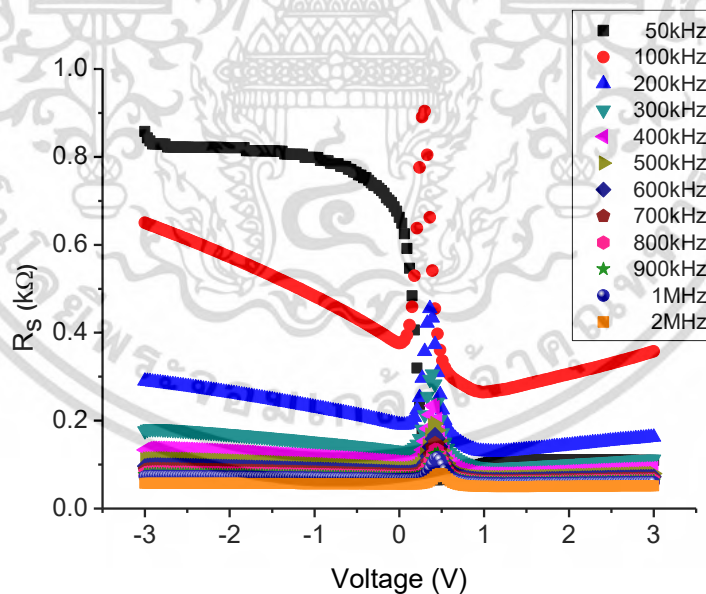
จากผลการทดลองพบว่า D_{it} มีค่าสูงสุดประมาณ 6.5×10^{12} ต่ออิเล็กตรอนโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานไว้ แต่ข้อน่าสังเกตคือการกระจายของค่า D_{it} ที่ค่าความถี่ต่างๆ คล้ายๆ กับกราฟระฆังคว่ำ โดยมีแบนด์วิดท์ (band width) ประมาณ 8×10^3 เฮิร์ตซ์ จึงสันนิษฐานว่าเป็นกับดักพาหะชนิดเดี่ยว (single trap) ที่เกิดขึ้นในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อ



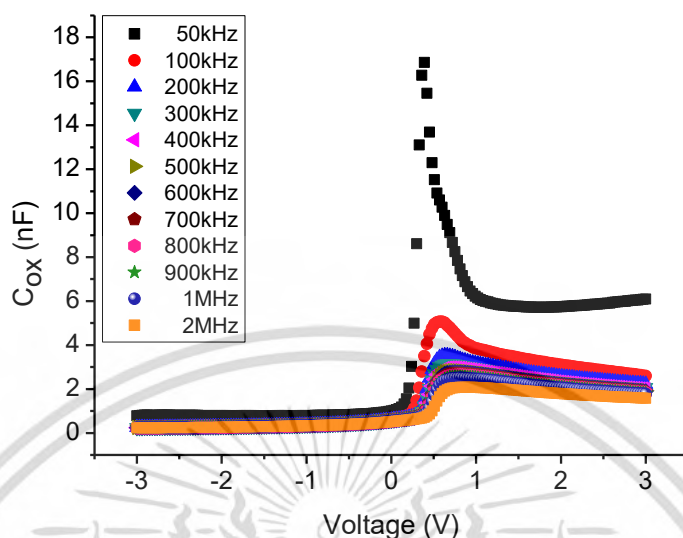
ภาพที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



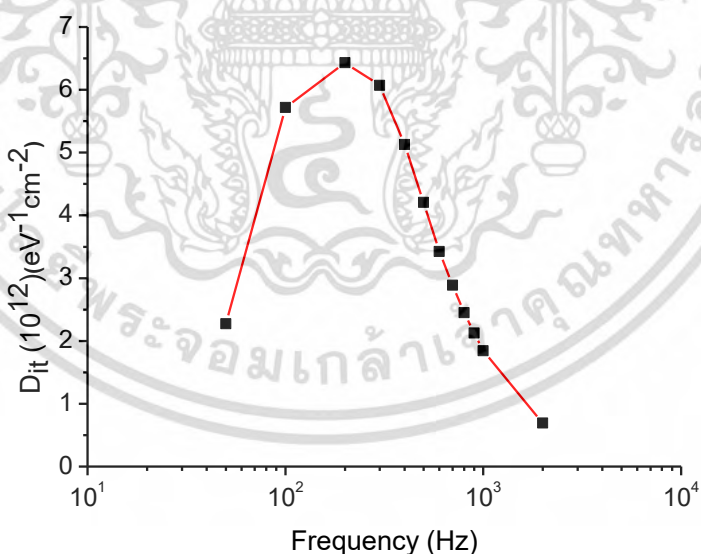
ภาพที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_s กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ox} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับ ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากสมการความสัมพันธ์ของรอยต่อ p^+-n จะได้ว่า

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

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

ซึ่งค่า N_D คือ ความหนาแน่นของพาหะอิสระของ n -Si

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ คือ

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

กำแพงศักย์ คือ

$$\Phi_B (C - V) = V_{bi} + E_F - \Delta\Phi_b \quad (4.26)$$

ระดับพลังงานเฟอร์มี คือ

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.27)$$

ความหนาแน่นของสถานะยังผล คือ

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.28)$$

โดยที่ $m_e^*(Si) = 0.19m_0$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของขอตตัก คือ

$$\Delta\Phi = \left[\frac{qE_m}{4\epsilon_s \pi} \right] \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อขอตักคือ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (4.30)$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ คือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (4.31)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง คือ

$$\Psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s} \quad (4.32)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำ n-Si พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณเป็นดังนี้

$$N_C = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_V = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$m_e^* = 0.19m_0$$

$$\hat{I}_r = 11.7$$

$$\chi = 4.05 \text{ eV}$$

$$v_{th} = 2.3 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Frequency (kHz)	V _i (V)	N _D (cm ⁻³)	E _F (eV)	ΔΦ _b (eV)	Φ _B (C-V) (eV)	W _D (cm)	Ψ _s (eV)
50	0.38	6.22×10 ¹⁴	0.277	0.010	0.673	9.17×10 ⁻⁵	0.406
100	0.40	5.69×10 ¹⁴	0.279	0.010	0.695	9.81×10 ⁻⁵	0.426
200	0.51	5.33×10 ¹⁴	0.281	0.011	0.806	1.14×10 ⁻⁴	0.536
300	0.61	5.24×10 ¹⁴	0.282	0.011	0.906	1.25×10 ⁻⁴	0.636
400	0.63	5.16×10 ¹⁴	0.282	0.011	0.927	1.28×10 ⁻⁴	0.656
500	0.64	5.09×10 ¹⁴	0.282	0.011	0.937	1.30×10 ⁻⁴	0.666
600	0.65	5.05×10 ¹⁴	0.283	0.011	0.947	1.31×10 ⁻⁴	0.676
700	0.66	5.01×10 ¹⁴	0.283	0.011	0.957	1.33×10 ⁻⁴	0.686
800	0.67	4.99×10 ¹⁴	0.283	0.011	0.968	1.34×10 ⁻⁴	0.696
900	0.69	4.95×10 ¹⁴	0.283	0.011	0.988	1.36×10 ⁻⁴	0.716
1000	0.70	4.92×10 ¹⁴	0.283	0.011	0.998	1.38×10 ⁻⁴	0.726
2000	0.80	4.62×10 ¹⁴	0.285	0.012	1.099	1.52×10 ⁻⁴	0.826

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4.11

ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ หาได้จากสมการ

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

ดังนั้น

$$N_d = \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(11.7 \times 8.85 \times 10^{-14})(\pi \times 0.15^2)^2 (3.91 \times 10^{18})}$$

จะได้

$$N_d = 6.21 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

ระดับพลังงานเฟอร์มิ หาได้จากสมการ

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right)$$

ดังนั้น

$$E_F = \frac{(1.38 \times 10^{-23})(300)}{(1.6 \times 10^{-19})} \ln \left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{6.21 \times 10^{14}} \right)$$

จะได้

$$E_F = 0.277 \text{ eV}$$

ความสูงกำแพงศักย์ หาได้จากสมการ

$$\Phi_B (C-V) = V_{bi} + E_f - \Delta\Phi_B$$

ดังนั้น

$$\Phi_B (C-V) = 0.4058 + 0.2772 - 0.0102$$

จะได้

$$\Phi_B(C-V) = 0.6728 \text{ eV}$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อชอตต์กี หาได้จากสมการ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$E_m = \left[\frac{2(1.6 \times 10^{-19})(6.21 \times 10^{14})(0.38)}{(1.03 \times 10^{-12})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$E_m = 8.57 \times 10^3 \text{ F/C}$$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของชอตต์กี หาได้จากสมการ

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{(1.6 \times 10^{-19})(8.57 \times 10^3)}{4\pi(1.0 \times 10^{-12})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$\Delta\Phi_B = 0.010 \text{ eV}$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ หาได้จากสมการ

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

ดังนั้น

$$W_D = \sqrt{\frac{2(1.03 \times 10^{-12})(0.4058 - 0)}{(1.6 \times 10^{-19})(6.21 \times 10^{14})}}$$

จะได้

$$W_D = 9.17 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

ศักย์ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง Cu_2O หาได้จากสมการ

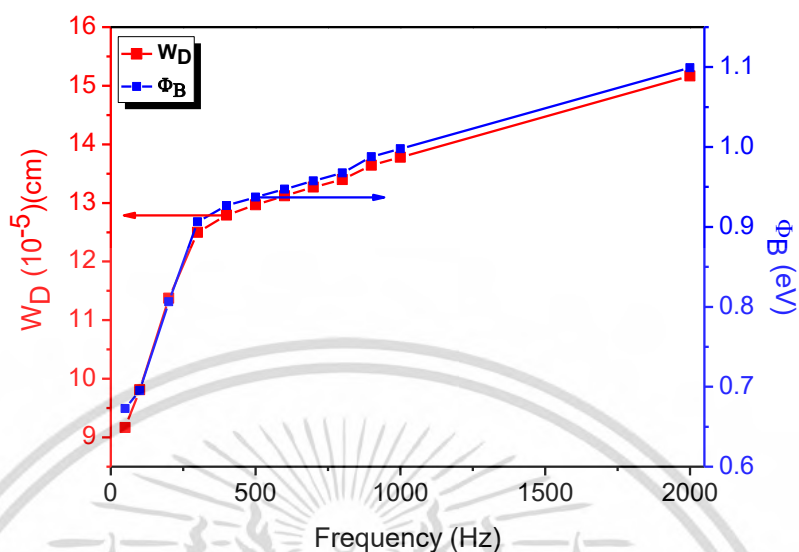
$$\psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s}$$

ดังนั้น

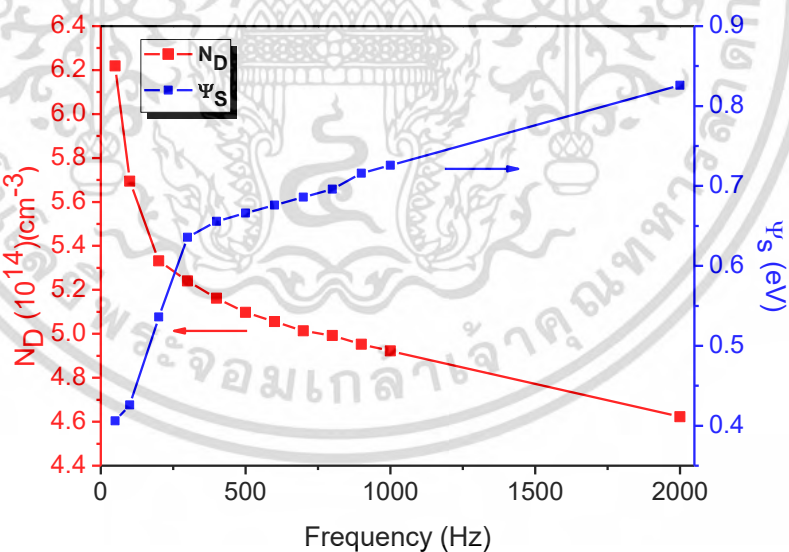
$$\psi_s = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(6.21 \times 10^{14})(9.17 \times 10^{-5})^2}{2(1.03 \times 10^{-12})}$$

จะได้

$$\psi_s = 0.406 \text{ eV}$$

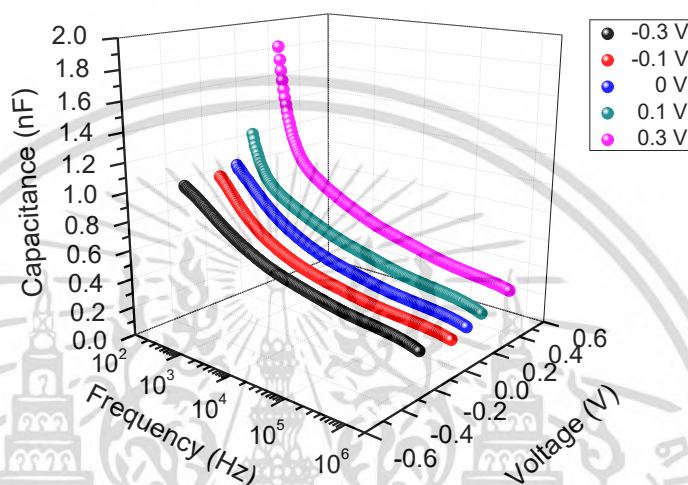


ภาพที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วัฏพจน์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดี ซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ ψ_s กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วัฏพจน์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดี ซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

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

$$C = C_D + C_{ss} \quad (4.33)$$

เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

C_{ss} คือ ความจุไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อ

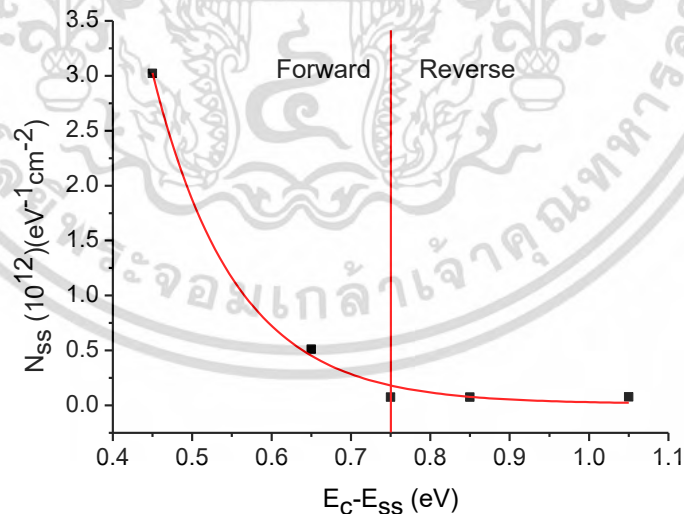
อย่างไรก็ตาม สถานะผิวเชื่อมต่อจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูง ดังนั้น ความจุไฟฟ้ารวม (C) คือ

$$C = C_D \quad (4.34)$$

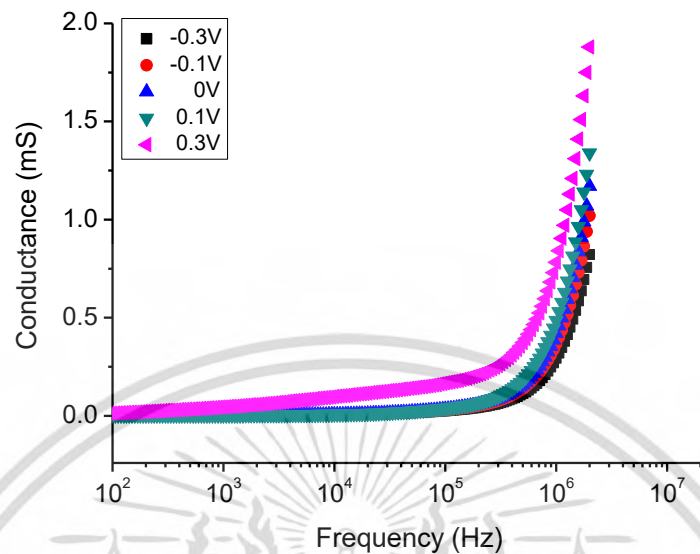
ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (N_{ss}) ที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ คือ

$$N_{ss} = \frac{C_{ss}}{qA} \quad (4.35)$$

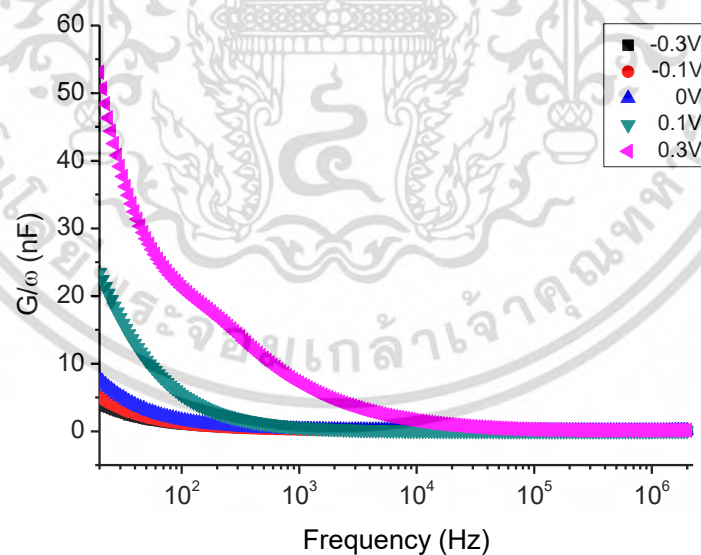
เมื่อทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นที่ขั้วสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะมีศักย์เป็นบวก (ซึ่งเป็นกรณีขุมพหุพาหะของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นเข้าใกล้ขอบล่างสุดของแถบนำของ n-Si พบว่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นออกไซด์ต่างๆจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการไบแอสกลับทาง ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะเป็นลบระดับเฟอร์มิจะเลื่อนลง (ซึ่งเป็นกรณีขึ้นกลับกลายของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) พบว่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นออกไซด์ต่างๆ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เร็วจนกระทั่งถึงค่า N_{ss} ที่สัมพันธ์กับ $E_{ss}-E_C$ จะแสดงดังภาพที่ 4.74



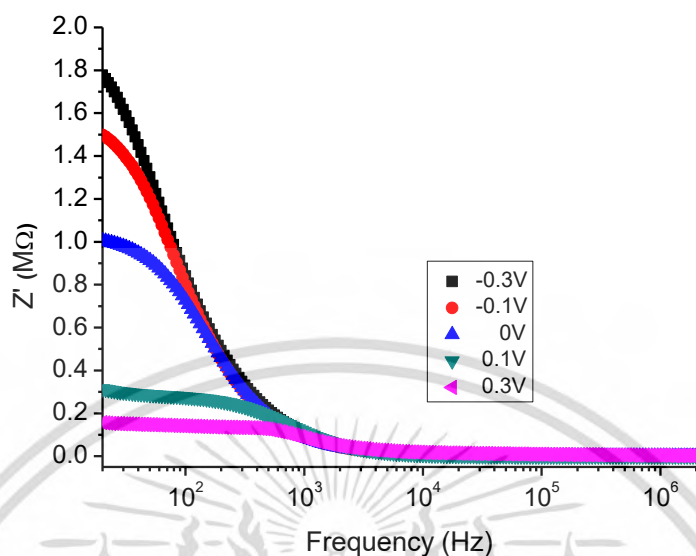
ภาพที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_{ss} กับ $E_{ss}-E_C$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



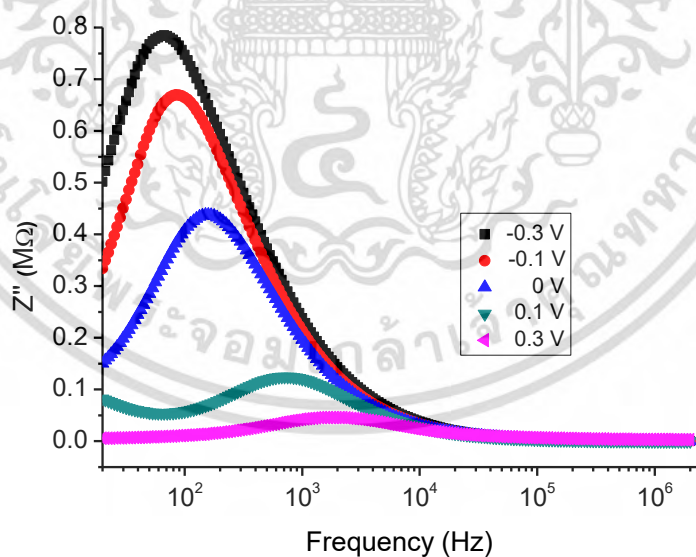
ภาพที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง



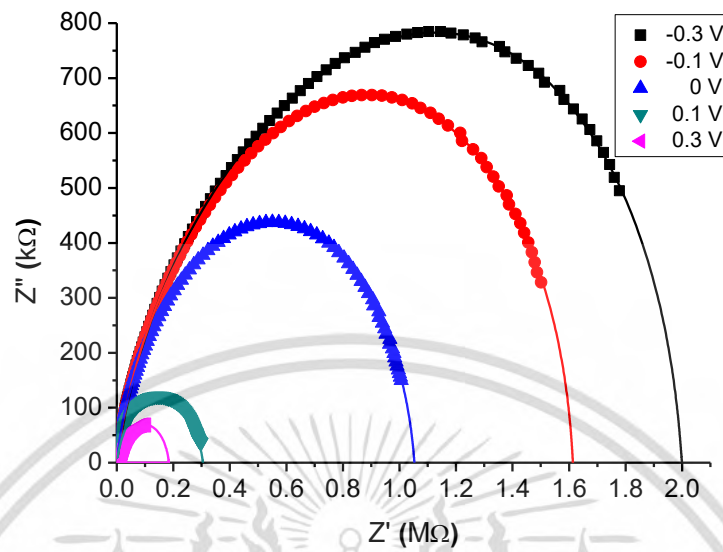
ภาพที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง



ภาพที่ 4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



ภาพที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



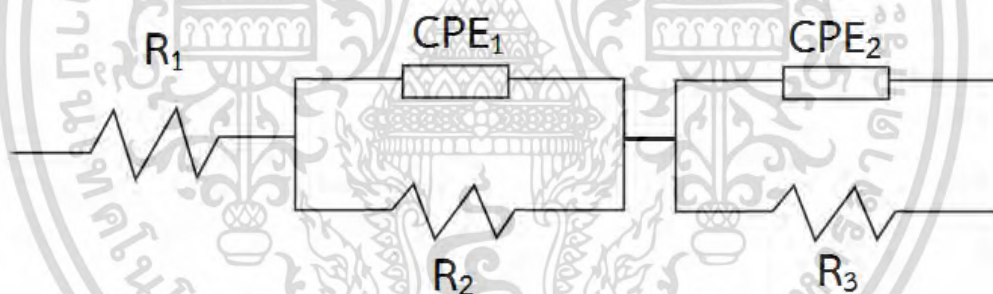
ภาพที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริง เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

Voltage (V)	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			C ₁ (F)	C ₂ (F)	τ ₁ (s)	τ ₂ (s)	F _{max} (Hz)	ω (rad/s)	ωτ
-0.3	CPE ₁	R ₁ = 1.00×10 ⁷ Ω	3.20×10 ⁻⁹	-	3.20×10 ⁻³	-	63.09	396.40	1.266
		P ₁ = 3.20×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 1.00							
	CPE ₂	R ₂ = 9.90×10 ⁷ Ω	-	9.78×10 ⁻¹⁰	-	9.68×10 ⁻⁴	-	-	-
		P ₂ = 3.78×10 ⁻⁹							
		n ₂ = 0.8051							
-0.1	CPE ₁	R ₁ = 1.00×10 ⁷ Ω	2.20×10 ⁻⁹	-	2.20×10 ⁻³	-	75.86	476.64	1.046
		P ₁ = 2.35×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.9891							
	CPE ₂	R ₂ = 6.14×10 ⁷ Ω	-	1.15×10 ⁻⁹	-	7.07×10 ⁻⁴	-	-	-
		P ₂ = 4.27×10 ⁻⁹							
		n ₂ = 0.8192							
0	CPE ₁	R ₁ = 3.64×10 ⁷ Ω	3.41×10 ⁻⁹	-	1.24×10 ⁻³	-	118.49	744.49	0.920
		P ₁ = 3.41×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 1.00							
	CPE ₂	R ₂ = 6.92×10 ⁷ Ω	-	1.10×10 ⁻⁹	-	7.62×10 ⁻⁴	-	-	-
		P ₂ = 3.72×10 ⁻⁹							
		n ₂ = 0.8302							
0.1	CPE ₁	R ₁ = 2.89×10 ⁷ Ω	1.16×10 ⁻⁹	-	3.36×10 ⁻³	-	500.00	3141.60	1.053
		P ₁ = 2.79×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.8459							
	CPE ₂	R ₂ = 2.16×10 ⁷ Ω	-	2.28×10 ⁻⁹	-	4.93×10 ⁻⁴	-	-	-
		P ₂ = 2.28×10 ⁻⁹							
		n ₂ = 1							
0.3	CPE ₁	R ₁ = 1.63×10 ⁷ Ω	6.51×10 ⁻¹⁰	-	1.06×10 ⁻⁴	-	1500.00	9424.78	0.999
		P ₁ = 1.87×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.8848							
	CPE ₂	R ₂ = 2.14×10 ⁷ Ω	-	2.31×10 ⁻⁹	-	4.94×10 ⁻⁴	-	-	-
		P ₂ = 1.94×10 ⁻⁹							
		n ₂ = 0.9820							

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริง

จากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจากการไบแอสย้อนกลับเป็นไบแอสตรงพบว่า ความจุบริเวณพ่องพาหะ (C_1) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และเวลาผ่อนคลายของพาหะในบริเวณพ่องพาหะมีค่าลดลงด้วย แสดงว่าความกว้างของบริเวณพ่องพาหะ (depletion width) มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไบแอส แต่สำหรับความจุของชั้นออกไซด์ (C_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อแรงดันดันไบแอสเพิ่มขึ้นจากการไบแอสย้อนกลับเป็นไบแอสตรง แสดงภายใต้สภาวะไบแอสตรง สิ่งประดิษฐ์จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการขมขุ่นพาหะของรอยต่อ MOS ซึ่งกับศักพาหะในชั้นออกไซด์จะจับอิเล็กตรอนได้ในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้น C_2 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น แต่ τ_2 มีค่าลดลงเนื่องจาก R_3 มีค่าลดลง

จากกราฟความสัมพันธ์ $Z'' - Z'$ จะปรากฏเป็นกราฟรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ขณะที่การไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น กราฟรูปครึ่งวงกลมจะแสดงให้เห็นสองพีกที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง ซึ่งพีกที่ความถี่ต่ำจะสัมพันธ์อยู่กับสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อขดตัก ส่วนพีกที่ความถี่สูงจะสัมพันธ์อยู่กับบริเวณพ่องพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งวงจรสมมูลสำหรับการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแสดงยังรูปที่ 4.80



ภาพที่ 4.80 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานอนุกรมที่มีผลมาจากความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งความต้านทานของผิวสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้า

CPE_1 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element) ของรอยต่อพี-เอ็น

R_2 คือ ความต้านทานชั้นของรอยต่อพี-เอ็น

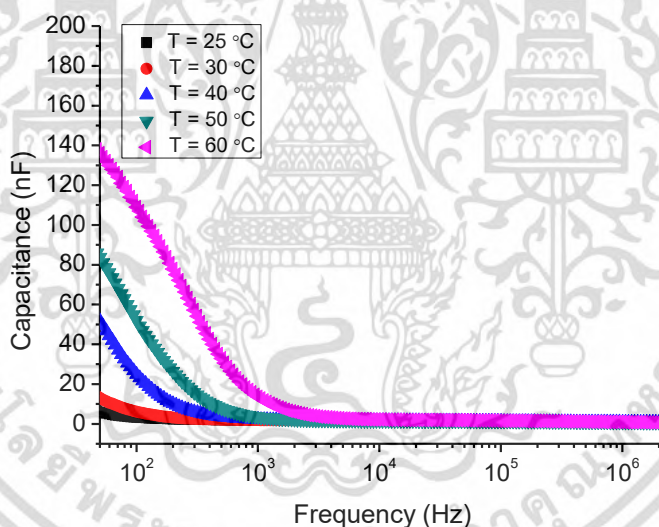
CPE_2 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ของชั้นออกไซด์

R_3 คือ ความต้านทานชั้นของชั้นออกไซด์

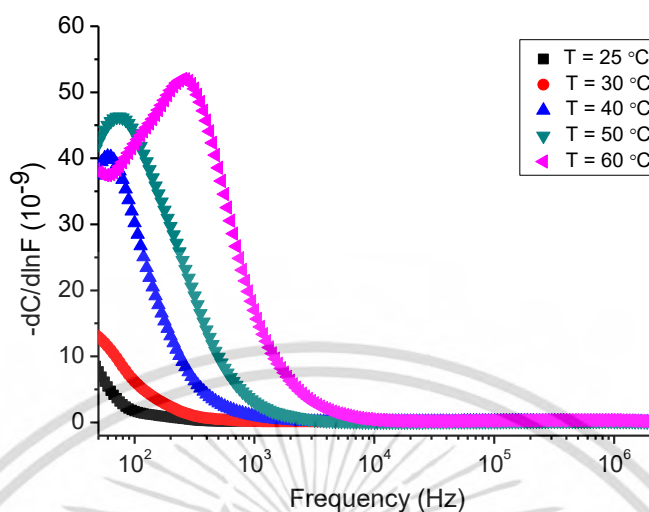
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองแบบพบว่า ที่ความถี่ต่ำกราฟของการจำลองแบบไม่แนบสนิทกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีสถานะผิวเชื่อมต่อในชั้น SiO_2 บางๆที่เกิดระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำของ Cu_2O กับ $n\text{-Si}$ (100) อีกทั้งสถานะผิวเชื่อมต่อนี้เป็นระดับพลังงานที่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกวงจรสมมูลที่ใช้จำลองแบบกับสถานะผิวเชื่อมต่อได้ ส่วนที่ความถี่สูงกราฟของการจำลองแบบแนบสนิทกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าเป็นค่าของบริเวณพร่องพาหะที่ปรากฏอยู่ในเนื้อสารของ $n\text{-Si}$ (100) ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับชั้น SiO_2 บางๆ

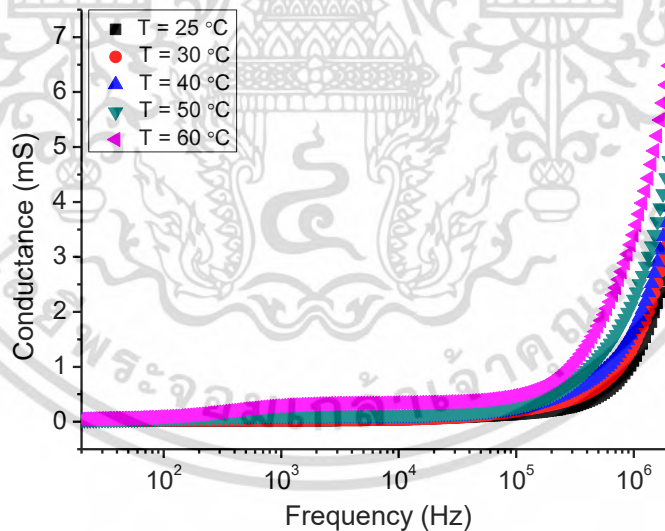
4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



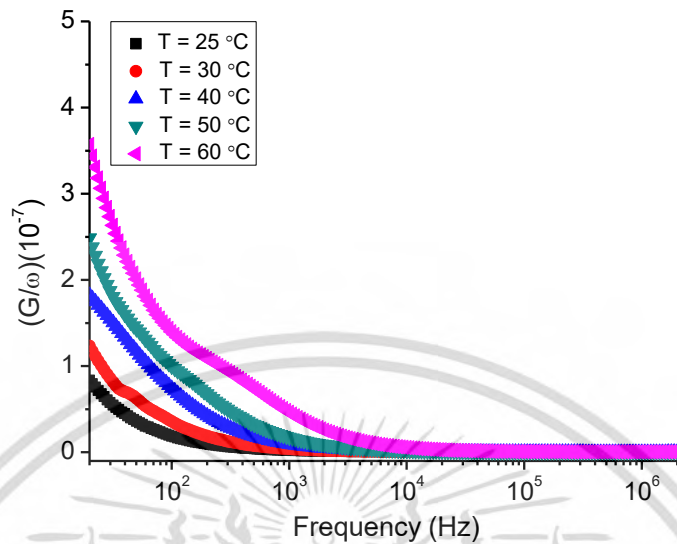
ภาพที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



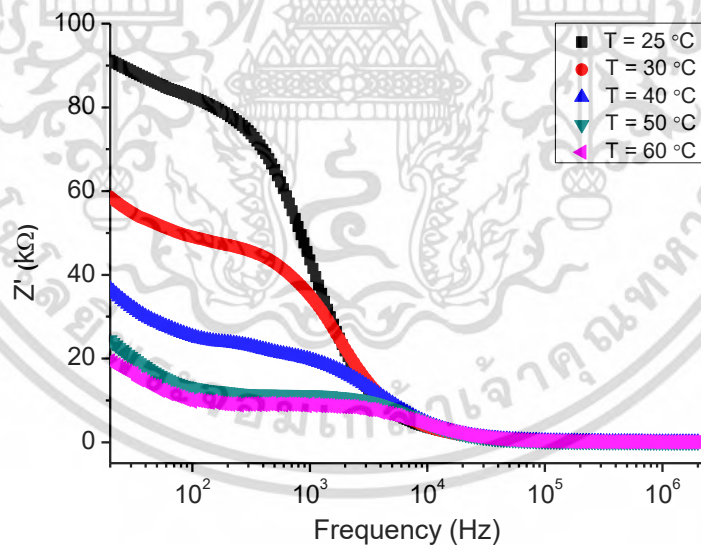
ภาพที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $-dC/d\ln F$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง



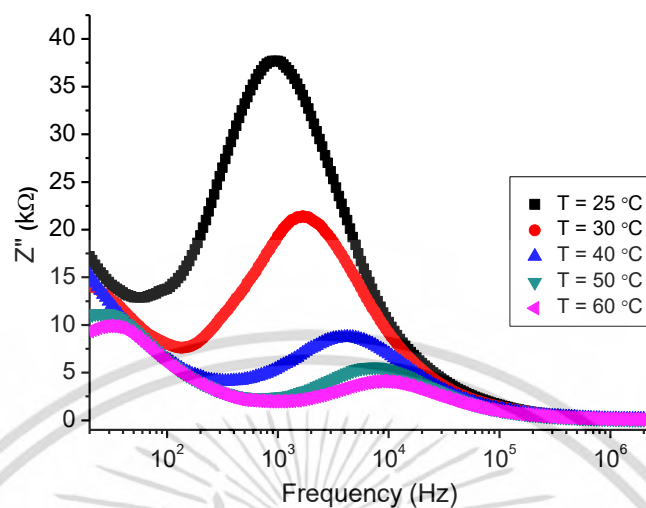
ภาพที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง



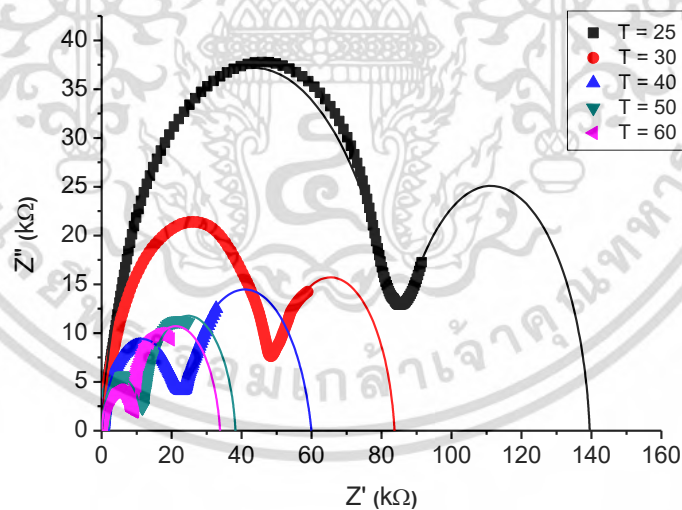
ภาพที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง



ภาพที่ 4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง



ภาพที่ 4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง



ภาพที่ 4.87 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

Temperature (°C)	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			C ₁ (F)	C ₂ (F)	τ ₁ (s)	τ ₂ (s)	F _{max} (Hz)	ω (rad/s)	ωτ
25	CPE ₁	R ₁ = 85105 Ω	1.82×10 ⁻⁹	-	1.55×10 ⁻⁴	-	1096.50	6889.51	1.068
		P ₁ = 3.82×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.9156							
	CPE ₂	R ₂ = 36878 Ω	-	4.08×10 ⁻⁷	-	1.51×10 ⁻²	10.96	68.86	1.038
		P ₂ = 4.11×10 ⁻⁷							
		n ₂ = 0.9986							
30	CPE ₁	R ₁ = 48395 Ω	1.82×10 ⁻⁹	-	8.82×10 ⁻⁵	-	1737.80	10918.92	0.962
		P ₁ = 4.47×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.9037							
	CPE ₂	R ₂ = 35162 Ω	-	3.78×10 ⁻⁷	-	1.33×10 ⁻²	12.02	75.52	1.005
		P ₂ = 5.65×10 ⁻⁷							
		n ₂ = 0.9072							
40	CPE ₁	R ₁ = 22224 Ω	1.76×10 ⁻⁹	-	3.91×10 ⁻⁴	-	4365.20	27427.36	1.072
		P ₁ = 6.52×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.8709							
	CPE ₂	R ₂ = 37680 Ω	-	3.12×10 ⁻⁷	-	1.18×10 ⁻²	14.45	90.81	1.069
		P ₂ = 6.72×10 ⁻⁷							
		n ₂ = 0.8276							
50	CPE ₁	R ₁ = 11257 Ω	1.73×10 ⁻⁹	-	1.96×10 ⁻⁴	-	8317.60	52261.02	1.023
		P ₁ = 2.71×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.9590							
	CPE ₂	R ₂ = 26996 Ω	-	2.87×10 ⁻⁷	-	7.75×10 ⁻³	19.05	119.72	0.928
		P ₂ = 4.41×10 ⁻⁷							
		n ₂ = 0.9115							
60	CPE ₁	R ₁ = 8540 Ω	1.92×10 ⁻⁹	-	1.64×10 ⁻⁴	-	9463.00	59457.78	0.975
		P ₁ = 3.37×10 ⁻⁹							
		n ₁ = 0.9490							
	CPE ₂	R ₂ = 25308 Ω	-	3.29×10 ⁻⁷	-	8.34×10 ⁻³	17.38	109.20	0.910
		P ₂ = 5.50×10 ⁻⁷							
		n ₂ = 0.8928							

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

พลังงานกระตุ้นหาได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.36)$$

จัดรูปแบบใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \xi_0 \quad (4.37)$$

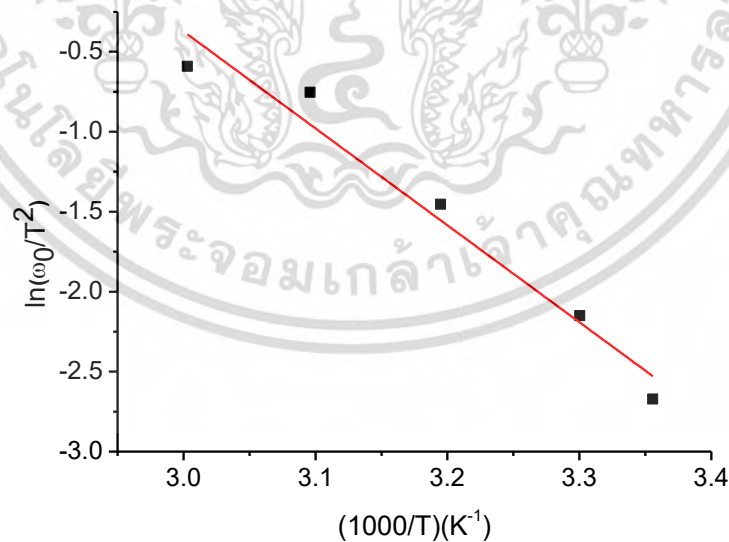
และหาค่า σ_T ได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c} \quad (4.38)$$

เมื่อ ξ_0 คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ

σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของประจุ

v_{th} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนเนื่องจากพลังงานความร้อน $= 2.30 \times 10^7$ เซนติเมตร/วินาที



ภาพที่ 4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Method	Temperature (°C)	ω_0	E_a (eV)	ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_t (cm ²)
Z'-Z''	25	-	0.523	5.375×10^7	7.803×10^{-20}
	30	-			
	40	374.916			
	50	472.005			
	60	1581.178			
	70	1774.100			
	80	2233.482			

ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct energy gap) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O มีค่าเท่ากับ 2.51 อิเล็กตรอนโวลต์ จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ได้ โดยมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) ซึ่งประมาณได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟ $1/C^2$ กับ V ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ของ Cu₂O คือ

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \\ = 4.83 \times 10^{15} T^{3/2} \left[\frac{m_h^*}{m_0} \right]^{3/2}$$

มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์ของ Cu₂O มีค่ากับ $0.34m_0$ ดังนั้น N_v ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้คือ

$$N_v = (4.83 \times 10^{15}) (300)^{3/2} \left[\frac{0.34m_0}{m_0} \right]^{3/2} \\ = 4.98 \times 10^{18} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าความหนาแน่นของโฮลในฟิล์มบาง Cu_2O มีค่าประมาณ 1×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_F - E_V &= kT \ln\left(\frac{N_V}{N_a}\right) \\ &= (0.0258) \ln\left[\frac{4.98 \times 10^{18}}{1 \times 10^{16}}\right] \\ &= 0.16 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

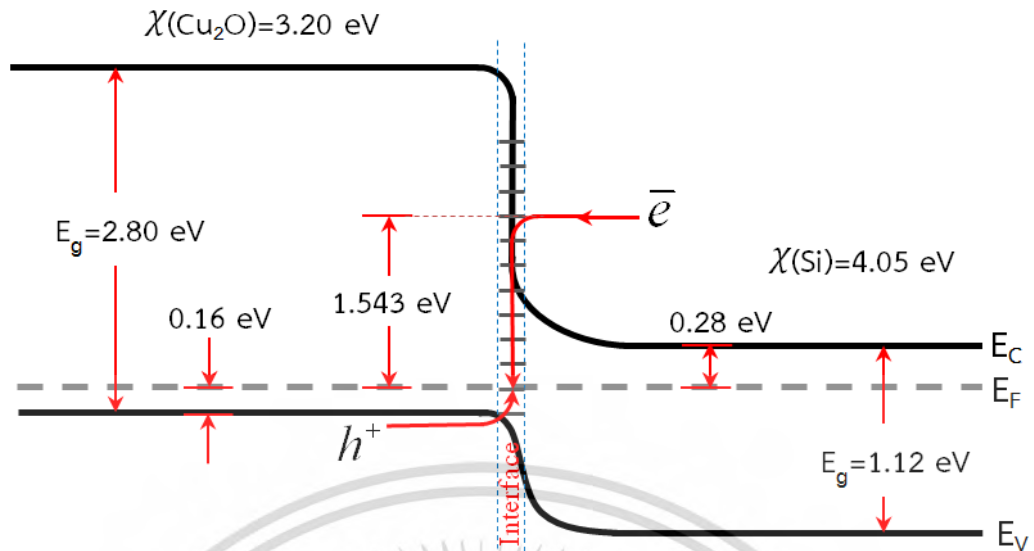
ส่วนค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำ (N_c) และในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ Si เท่ากับ 2.8×10^{19} และ 1.04×10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องของ Si สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.39)$$

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำของ n-Si มีค่าประมาณ 1.0×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิของ n-Si คือ

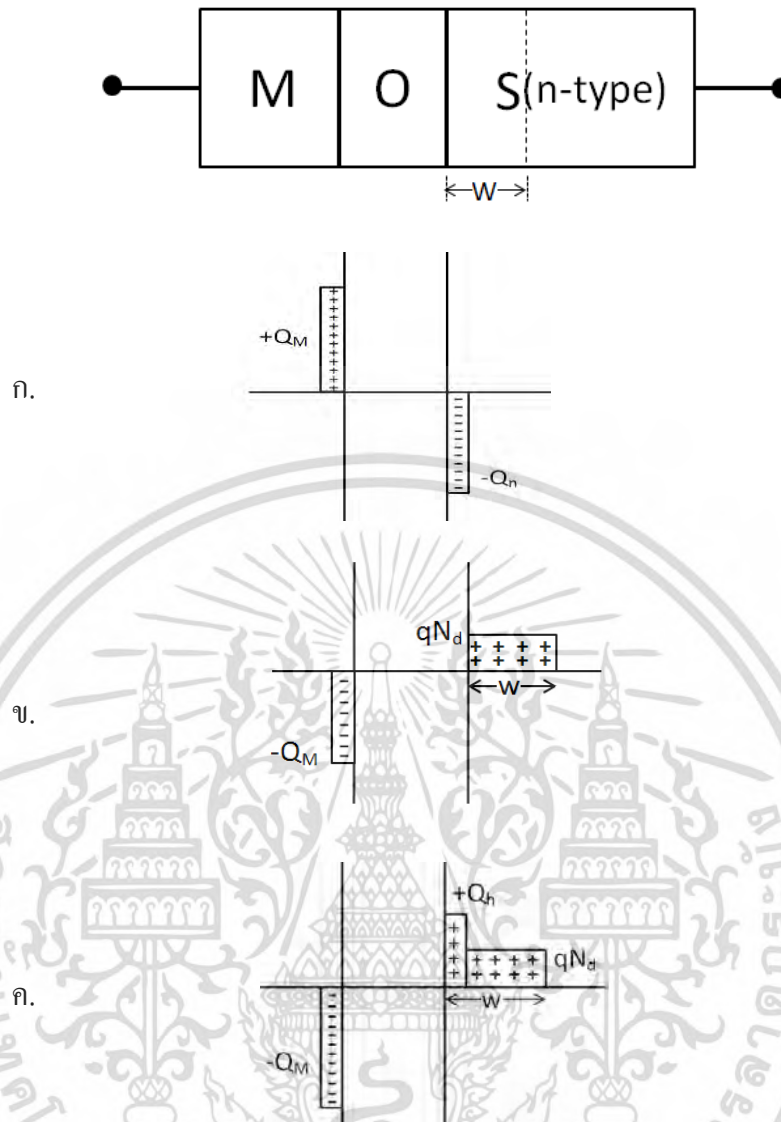
$$\begin{aligned} E_C - E_F &= (0.0258) \ln\left[\frac{2.8 \times 10^{19}}{6.21 \times 10^{14}}\right] \\ &= 0.28 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถที่จะนำไปเขียนแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง p- Cu_2O /n-Si (100) ได้ดังนี้คือ



ภาพที่ 4.89 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

จากแผนภาพแถบพลังงานพบว่าพาหะที่ไหลข้ามรอยต่อภายใต้แรงดันไบแอสตรงส่วนใหญ่เป็นกระแสโฮลซึ่งการไหลจากด้าน p-Cu₂O ผ่านกำแพงศักย์สูงประมาณ 0.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความสูงกำแพงศักย์นี้สอดคล้องดีกับศักย์ตกคร่อมรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่วัดจากวิธีความจุ-แรงดันไฟฟ้า ส่วนอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ n-Si จะแสดงปรากฏการณ์ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ แล้วเข้าร่วมตัวกับโฮลที่ระดับเฟอร์มิ โดยมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 1.543 อิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 4.90 แสดงแผนภาพการกระจายของประจุไฟฟ้าของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข

- ก. ชุมชุมพาหะ (accumulation)
- ข. พร่องพาหะ (depletion)
- ค. ชั้นกลับกลาย (inversion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลพร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไป

5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้มและมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี และสามารถประดิษฐ์เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบพีเอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O}/\text{n-Si}$ (100) ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มออกดำ มีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เตรียมขึ้นในอัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นเป็นอะมอร์ฟัส

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะของเกรนที่พบมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันในทุกอัตราการไหลของออกซิเจน

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5,

0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.70, 2.75, 2.80, 2.84, 2.85 และ 2.86 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอก-ทีพีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 10^1 - 10^2 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.601×10^1 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มที่แปรผกผันกัน โดยที่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มลดลง

5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

5.2.1 ผลการศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อ ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ทำได้โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.7 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/n-Si}$ (100) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.14 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามความสัมพันธ์ $I = kV^m$ โดยที่ m มีค่าเท่ากับ 1.619 ซึ่งเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะในชั้นออกไซด์บางๆ ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O กับ n-Si (100) ที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.14 ถึง 0.60 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.60 โวลต์ เป็นไปตามกลไกการนำไฟฟ้าชนิดถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะชนิดระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) ที่ปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เนื่องจากความชัน m มีค่าเท่ากับ 1.773 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการคา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้น ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/dlnI$ กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะได้อ่านเฟกเตอร์อุณหภูมิและค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I จะได้อ่านค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/n-Si(100)$ โดยวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ $20-300$ เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้น และ แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/n-Si(100)$ ที่ช่วงอุณหภูมิ $20-300$ เคลวิน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 เคลวิน ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ (region I) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากความชัน m มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.488 เป็น 3.535 เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวินเป็น 20 เคลวิน ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า $0.15-0.45$ โวลต์ (region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ (region III) จะเป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในชนิดระดับพลังงานเดี่ยวเนื่องจากความชัน m มีค่าเพิ่มจาก 1.773 เป็น 2.553 เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวิน เป็น 20 เคลวิน จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิมิตย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

5.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่ของหลายๆ ค่า เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/n-Si(100)$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ V_i ซึ่งก็คือ ค่าศักย์ดักคร่อมของรอยต่อ (V_{bi}) ได้ส่วนความชันของกราฟสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ได้

5.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ พบว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณ ขอบล่างของแถบนำแล้วจะค่อยๆ ลดลงที่ค่าระดับพลังงานค่าห่างจากแถบนำมากขึ้น และยังพบว่า แรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นตามค่าแรงดันที่ไบแอสที่ขั้วของสารกึ่ง ตัวนำ Cu_2O เป็นบวก (ซึ่งเป็นกรณีชุมนุมพาหะของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) และระดับเฟอร์มิจะ เลื่อนลงตามแรงดันไบแอสที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เป็นลบ (ซึ่งเป็นกรณีชั้นกลับกลายของ รอยต่อ MOS อุดมคติ) และ ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิพาดผ่านนั้นจะส่งผลให้กับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดง อิทธิพลออกมาโดยการจับพาหะที่อยู่บริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิและถ้าต้องการให้กับดักประจุที่ บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นทำการคายประจุออกมาต้องทำการป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่ เฉพาะของกับดักนั้น

จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันไบแอส -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ เพิ่มขึ้นจาก 20 เฮิร์ตซ์ เป็น 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนพิกของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมี ขนาดลดลงและเลื่อนไปทางความถี่ที่เพิ่มขึ้น จากการฟิตกราฟอิมพีแดนซ์ด้วยวงจรสมมูล RC อย่าง ง่ายจำนวน 2 อันต่อเนื่องกัน การแทนที่ความจุ (C) ด้วย CPE เหมาะสมกว่าทำให้ฟิตกราฟได้ง่าย กว่าและพบว่า CPE_1 เป็นของบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ส่วน CPE_2 เป็นของชั้น ออกไซด์ต่างๆ

5.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันอุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความถี่เฉพาะของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นจะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่า พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.523 อิเล็กตรอนโวลต์ สรุปว่าพลังงานกระตุ้นนี้คือ ระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดระดับพลังงานเดี่ยวที่ปรากฏในเนื้อสารของผลึกเดี่ยว $n\text{-Si}$ (100) พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุเท่ากับ 5.38×10^7 ต่อวินาทีต่อเซลล์

วินยกุลกำลังสองและพื้นที่ของศูนย์กลางการจับพาหะมีค่าเท่ากับ 7.80×10^{-20} ตารางเซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ควรควบคุมสะอาดทุกขั้นตอนของการทดลอง
- 5.3.2 ควรทำการทดลองให้ต่อเนื่อง จนสำเร็จทุกขั้นตอน
- 5.3.3 ควรเก็บสารตัวอย่างไว้ในหม้อดูดความชื้น ไม่ควรให้สัมผัสกับอากาศนานเกินไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1 ชื่อบทความวิจัย “Processing and Characterization of Amorphous Copper Oxide Thin Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering” ตีพิมพ์ใน Key Energy Materials โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

Abstract: In this paper, copper oxide (CuO_x) thin films with amorphous phase were prepared on glass substrates by reactive dc magnetron sputtering. The influence of the flow rate of O_2 on the structural, optical and electrical properties of the as-deposited films was systematically studied. XRD revealed that the as-deposited films remained amorphous in the whole range of adjusted oxygen flow rate. Surface morphology and nanoparticle size of the films were observed by AFM. Electrical resistivity and Hall effect measurements were performed on the films with van der Pauw configuration. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. From temperature-dependent electrical conductivity of the films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm, it was show that three types of behavior can be expected, nearest-neighbor hopping at high temperature range (200-300 K), the Mott variable range hopping at low temperature (110-190 K) and Efros-Shklovskii variable range hopping at very low temperature (65-100 K). Some important parameters corresponding to Mott-VRH and ES-VRH like density of localized states near the Fermi level ($N(E_F)$), localization length (ξ), degree of disorder (T_0), hopping distance (R) and hopping energy (W) were determined. These parameters would be helpful for optimizing the performance of photovoltaic applications.

1. Introduction

During the past decade, amorphous oxide semiconductors (AOS) have emerged as a promising candidate for the backplane technology of next generation ultra-high definition, flexible and transparent active-matrix flat-panel displays [1]. The successful implementation of n-type oxide semiconductors such as In-Ga-Zn-O into thin-film transistor (TFTs) arrays in the flat panel displays has triggered considerable interest in p-type oxide semiconductor materials [2]. It is anticipated that high performance p-type oxide semiconductors will promote a new era in the field of transparent electronics and displays by allowing the design of complementary metal oxide semiconductor (CMOS) structures with both n-type and p-type TFTs devices. Many research groups have thus been investigating various

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p-type materials in the field of oxide semiconductors. Among various p-type oxide semiconductors, CuO_x thin films have been subject of great deal of interest for various applications such as gas sensor, thin-film transistors, heterojunction diode and photovoltaic cells [2]. Two common forms of copper oxide are cuprous oxide (Cu_2O) and cupric oxide (CuO). Cu_2O and CuO belong to cubic and monoclinic structures with band gap of 2.1-2.6 eV and 1.9-2.1 eV, respectively [3]. A meta-stable copper oxide, Cu_4O_3 , which is an intermediate compound between the previous two, has also reported [4]. A variety of deposition techniques have been employed for the growth copper oxide films. Among these thin films deposition techniques, reactive magnetron sputtering is one of the industrially practiced techniques for preparing of uniform films on large area substrates with required chemical composition. The $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$, $\text{Cu}_2\text{O}+\text{CuO}$ and Cu_4O_3 phases were formed by reactive sputtering of a Cu target when the ratio of oxygen partial pressure to the total pressure increased [4]. This paper aims to prepare amorphous CuO_x thin films through reactive dc magnetron sputtering on glass substrates with different oxygen flow rates. The physical properties of the films were studied in order to find the possibility to use them in p-n junction low cost thin film solar cells.

2. Materials and Methods

CuO_x thin films were deposited by reactive dc magnetron sputtering from a high purity Cu target of 99.99% with diameter of 50 mm and thickness 3 mm. Oxygen and argon were used a reactive gas and working gas, respectively. Prior to the growth amorphous CuO_x thin films, glass substrates were first wet cleaned by acetone, isopropyl alcohol and de-ionized water. The glass substrates were subsequently backed to 100°C for 30 min to evacuate moisture. In order to study the effect of oxygen flow rate and eliminate the action of sputtering pressure, the sputtering pressure was kept at 0.73 Pa, with a variation of oxygen flow rate in the range of 0.3-1.8 sccm and an argon flow rate in the range of 12-32 sccm. A diffusion pump was used to achieve a base pressure of 6.90×10^{-3} Pa. The substrate temperature during deposition was not intentional controlled. Target to substrate distance was kept constant at 100 mm. In order to clean the Cu target and stabilized the plasma, pre-sputtering was performed while the substrate was shielded for 5 min. Then, CuO_x was formed as soon as oxygen was introduced in the chamber. Sputtering time was 30 min. The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker D 8 diffractometer using $\text{CuK}\alpha$ radiation. Surface morphology was examined by Park XE-100 AFM. The EDS spectra were recorded with a

Zeiss EVO MA 10 Scanning Electron Microscopy. Optical transmission measurements were performed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with UV-VIS double beam spectrophotometer in the wavelength range of 300-1,000 nm. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature. The temperature-dependent conductivity was measured using the two-point probe method in the temperature range 20-300 K.

3. Results and Discussion

Fig. 1 shows XRD patterns of CuO_x films grown on glass substrates as a function of oxygen flow rate $R(\text{O}_2)$. The absence of peaks in the spectrum showed that Bragg's law of diffraction was not satisfied. The observed featureless spectra of the films showed that the films are amorphous phase in the whole range of adjusted oxygen flow rate. However, they started to crystallize when oxygen flow rate beyond 2 sccm already described in our previous report [5]. AFM images of the films prepared as a function of $R(\text{O}_2)$ are shown in Fig. 2. The films formed at $R(\text{O}_2)$ of 0.3 sccm showed isolated particles with different sizes due to a low deposition rate and deficient O_2 content for reacting with Cu precursor atoms. With increasing the $R(\text{O}_2)$ from 0.3 to 1.8 sccm, the average particle size and surface roughness of the films increased from 49.4 to 166.2 nm and from 2.5 to 4.8 nm, respectively. Fig. 3 shows typical EDS spectra of the films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 0.3-1.8 sccm. It revealed that the Cu:O stoichiometric ratio was close to 1:0.5. Fig. 4 shows transmittance spectra of CuO_x films obtained from various oxygen flow rates. From the transmittance spectra, the absorption coefficient (α) was calculated using relationship of Sunds $\alpha = (1/d)\ln(1/T)$ where T is transmittance and d is film thickness. The absorption coefficient (α) and the incident photon energy ($h\nu$) according to Tauc relationship $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ where A and E_g are constant and energy gap values, respectively. The E_g can be determined by extrapolation of the linear portion of the curve to the photon energy axis. Fig. 5 shows the curve of $(\alpha h\nu)^2$ vs. photon energy ($h\nu$) of the films obtained from various oxygen flow rates. The band tail values of the films were evaluated from the plot of $\ln\alpha$ vs. photon energy ($h\nu$) (as shown in Fig. 6). The variation of E_g and band tail values as a function of $R(\text{O}_2)$ of the films, in the range 2.70-2.86 eV and 0.855-1.020 eV, respectively is shown in Fig. 7.

Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. We found that all studied films exhibited p-type conductivity. Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against $R(\text{O}_2)$ are shown in Fig. 8. Carrier concentration (n) was derived from the relation $n = 1/eR_H$ where R_H is the Hall coefficient and e is the

absolute value of the electron charge. The carrier mobility (μ) was determined using the relation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu=1/ne\rho$ where ρ is resistivity. Resistivity of the films initially decreased from 450.1 down to minimum value at 76.2 Ω .cm with $R(O_2)$ increased from 0.3 to 1.5 sccm and then increased to 376.0 Ω .cm when $R(O_2)$ further increased to 1.8 sccm. The carrier concentration increased with an increase $R(O_2)$ attain maximum value at $2.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and then dropped monotonically with an increase in $R(O_2)$. The minimum and maximum values of mobility were observed at $R(O_2)$ of 0.8 and 1.5 sccm, respectively. These results indicated that the resistivity, carrier concentration and mobility of the films were sensitive to $R(O_2)$. The films prepared at oxygen flow rate of 1.5 sccm revealed the largest mobility ($\mu_h = 15.1 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$). So, they are identified as suitable candidates for fabrication as absorber layer in solar cell devices.

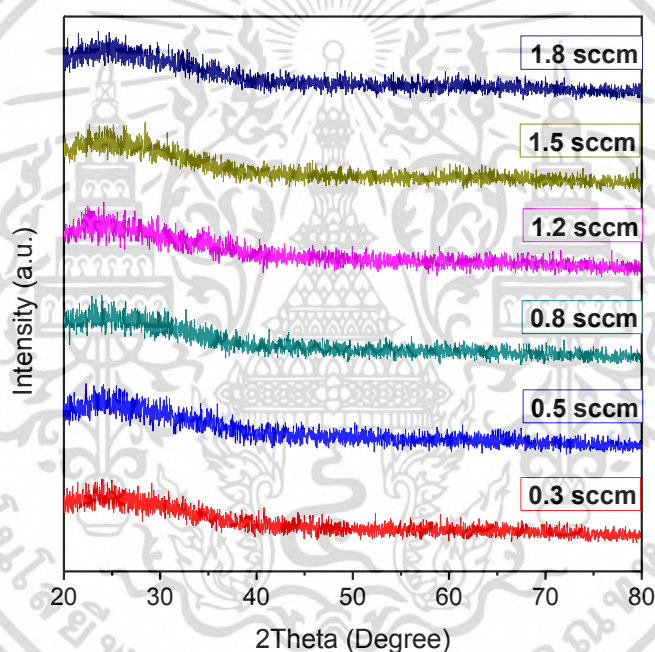


Fig. 1 XRD patterns of CuO_x films as a function of $R(O_2)$.

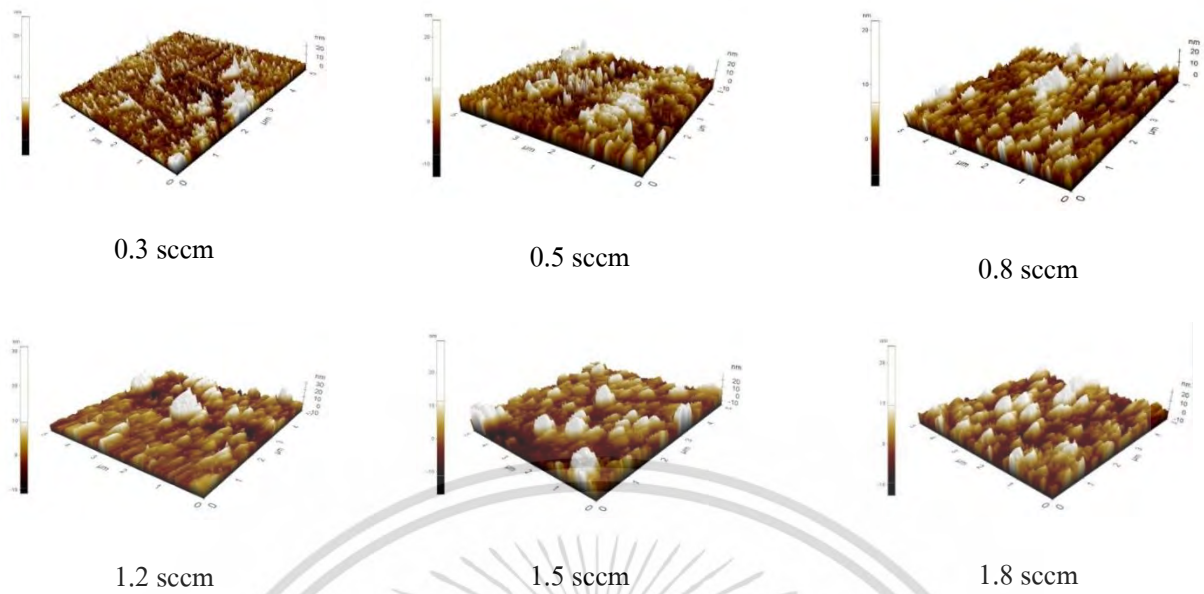


Fig. 2 AFM images of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

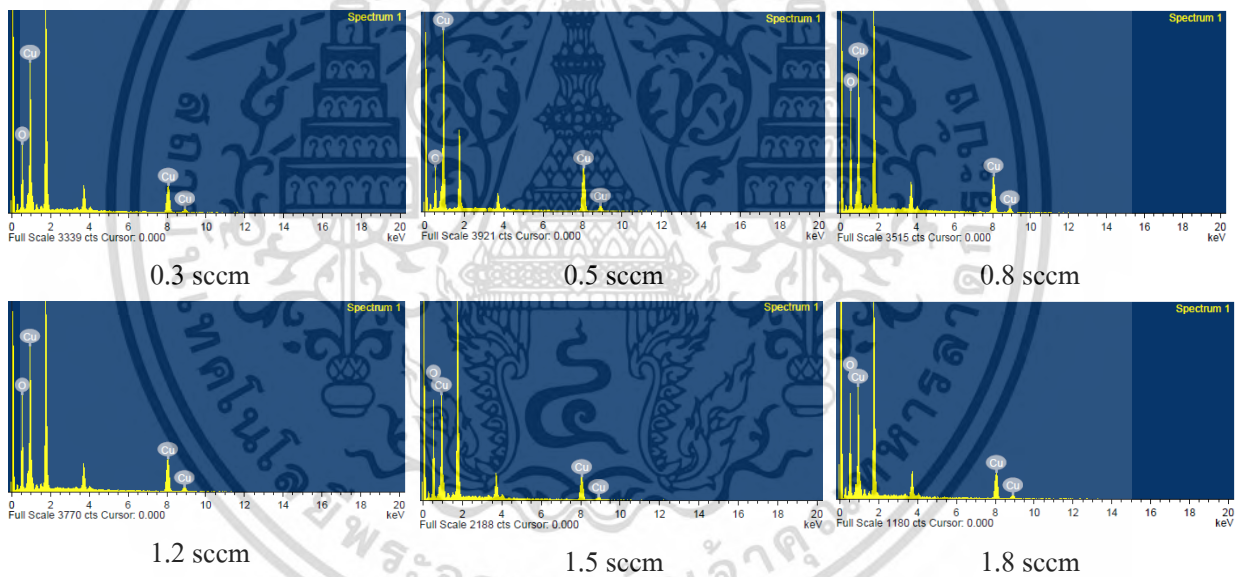


Fig. 3 EDS spectrum of CuO_x films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

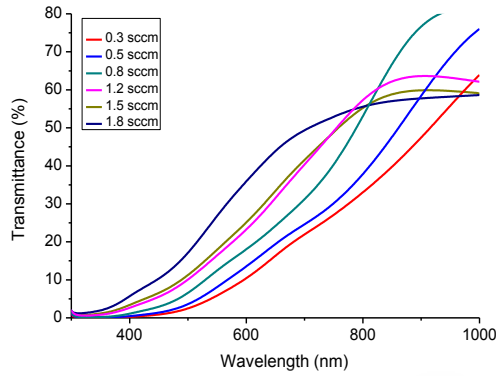


Fig. 4 Transmittance of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

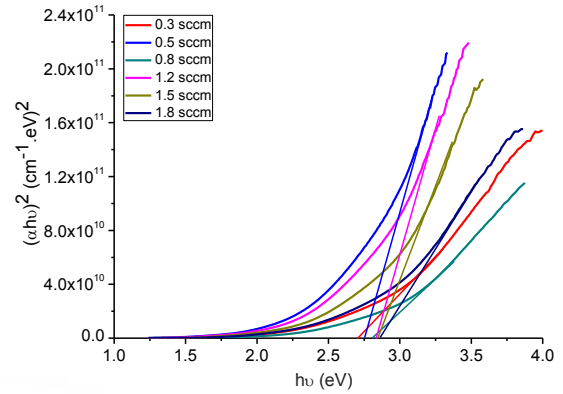


Fig. 5 $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ plot of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

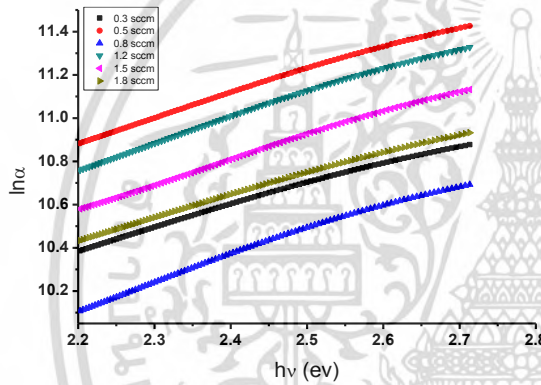


Fig. 6 $\ln\alpha$ vs. $h\nu$ plot of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

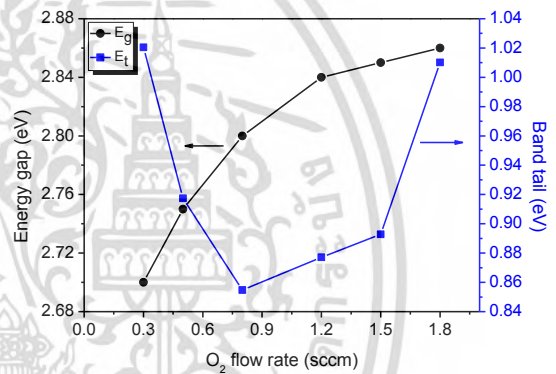


Fig. 7 Variation of E_g and band tail values of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

Photocurrent response of CuO_x films under multiple on/off white light illumination cycles was performed in ambient air and at constant bias voltage 5 V. Three repeated cycles are shown in Fig. 9, in which the photocurrent was observed to be consistent and repeatable. However, the persistent photoconductivity effect was observed in all studied films. It suggested that density of states occurred in energy gap is rather complicated.

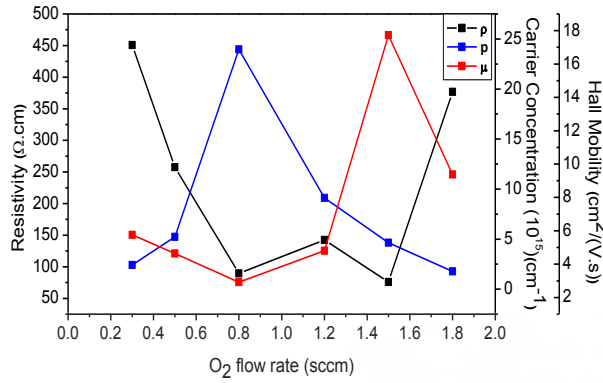


Fig. 8 Variations of ρ , p and μ of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

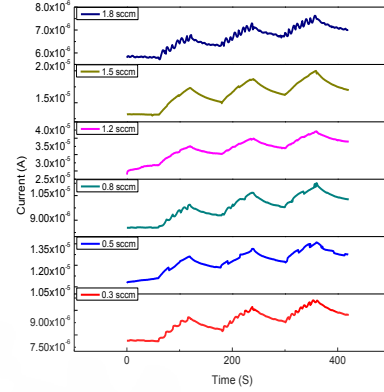


Fig. 9 Photocurrent response of CuO_x films.

Figure 10 (a) shows the Arrhenius plot of $\ln(\sigma)$ and $1000/T$ for the films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm. As seen in Figure 10(a), no single mechanism can be fitted in the whole curve of conductivity. In the high temperature range (200-300 K), holes do not have sufficient thermal energy to be excited from the acceptor levels to the valence band and the conduction in the valence band becomes less important. In this case, holes can hop between nearest-neighbor acceptors in the impurity band. The Nearest-Neighbor Hopping conduction (NNH) becomes the main conduction mechanism. The resistivity of NNH is given by [6,7]

$$\ln \sigma = -E_{\text{NNH}} / kT + \ln \sigma_{0,\text{NNH}} \quad (1)$$

where $\sigma_{0,\text{NNH}}$ is pre-exponential factor, k is Boltzmann's constant and E_{NNH} is the nearest-neighbor activation energy. As shown in Fig. 10(b), a good linear relationship can be observed in the Arrhenius plot in the high temperature range (200-300 K). The important parameters deduced from NNH mechanism were listed in Table 1: T_{cl} is the transition temperature from NNH to Mott-VRH and N_a is acceptor concentration. For low temperature range (110-190 K), the plot of $\ln(\sigma T^{1/2})$ vs $T^{-1/4}$ was found to be linear as shown in Fig. 10 (c). This suggested that the conduction is controlled by Mott variable-range hopping (Mott-VRH) instead of the NNH mechanism at high temperature. The Mott's parameters can be extracted from the relation [8]:

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = -(T_{0,\text{Mott}} / T)^{1/4} + \ln \sigma_{0,\text{Mott}} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The important parameters deduced from Mott-VRH model were tabulated in Table 2: $T_{0, \text{Mott}}$ is a characteristic temperature coefficient, $\sigma_{0, \text{Mott}}$ is pre-exponential factor, $N_0(E_F)$ is density of state at the Fermi level, $R_{\text{hop, Mott}}$ is average hopping distance, and $W_{\text{hop, Mott}}$ is average hopping energy. At very low temperature range (65-100 K), the measured data were satisfied the Efros-Shklovskii variable-range hopping (ES-VRH). In this electrical conduction mechanism region, the electron interaction caused the density of state at Fermi level is separated and became to the coulomb gap (Δ_C). The conductivity in ES-VRH model is given as [8]

$$\ln(\sigma T) = -(T_{0, \text{ES}} / T)^{1/2} + \ln \sigma_{0, \text{ES}} \quad (3)$$

Fig. 10(d) shows the plot of $\ln(\sigma T)$ vs $T^{-1/2}$. The important parameters deduced from ES-VRH model were listed in Table 3: $T_{0, \text{ES}}$ is a characteristic temperature coefficient, $\sigma_{0, \text{ES}}$ is pre-exponential factor, $R_{\text{hop, ES}}$ is average distance and $W_{\text{hop, ES}}$ is average hopping energy.

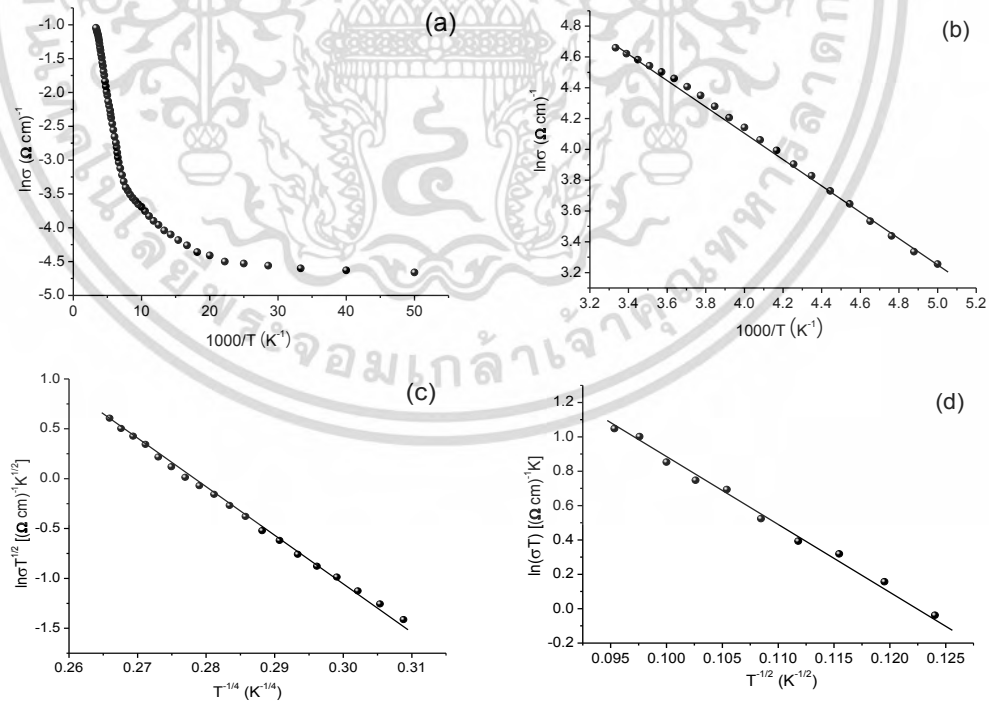


Fig. 10. $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$ plot (a) and (b), $\ln(\sigma T^{1/2})$ vs $T^{-1/4}$ plot (c), and $\ln(\sigma T)$ vs $T^{-1/2}$ plot (d) of CuO_x thin films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. NNH's parameters at high temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm)	E_{NNH} (eV)	N_a (cm ⁻³)	T_{cl} (K)
200-300	2.03×10^3	0.075	1.22×10^{20}	193.22

Table 2. Mott's parameters at low temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm)	$T_{0,Mott}$ (K)	ξ_{Mott} (nm)	$N_0(E_F)$ (cm ⁻³ ·eV ⁻¹)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$	$W_{hop,Mott}$ (meV)
110-190	4.66×10^5	4.87×10^3	0.865	8.18×10^{19}	3.78	4.37	31.06

Table 3. ES's parameters at very low temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm)	$T_{0,ES}$ (K)	$R_{hop,ES}$ (nm)	ξ_{ES} (nm)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{Mott}}$	$W_{hop,ES}$ (meV)	Δ_C (μeV)
65-100	1.02×10^2	1.41×10^3	45.90	40.80	1.12	13.60	1.46

4. Conclusion

Thin films of CuO_x semiconductor with amorphous phase were prepared on glass substrates by reactive dc magnetron sputtering with the oxygen flow rate in the range of 0.3-1.8 sccm. XRD revealed that the as-deposited films remained amorphous in the whole range of oxygen flow rate. With increasing the R(O₂) from 0.3 to 1.8 sccm, the average particle size and surface roughness of the films increased from 49.4 to 166.2 nm and from 2.5 to 4.8 nm, respectively. Energy gap value increased from 2.70 to 2.86 eV. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the oxygen flow rate increased from 0.3 to 1.8 sccm. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. The films prepared at oxygen flow rate of 1.5 sccm revealed the largest mobility value. From temperature-dependent electrical conductivity of the films prepared at $R(O_2)$ of 1.5 sccm, it was show that three types of behavior can be expected, nearest-neighbor hopping at high temperature range (200-300 K), the Mott variable range hopping at low temperature (110-190 K) and Efros-Shklovskii variable range hopping at very low temperature (65-100 K). Some important parameters corresponding to NNH, Mott-VRH and ES-VRH conduction mechanisms were determined. These parameters would be useful to achieve further optimization the performance of photovoltaic applications.

Acknowledgments

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under grant number A118-61-038.

References

- [1] Y.S. Lee, E.K.H. Yu, D.H. Shim, H.S. Kong, L. Bie, J. Kanicki, Oxygen flow effects on electrical properties, stability, and density of states of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 121101-1-121101-5.
- [2] W. Maeng, S.H. Lee, J.D. Kwon, J. Park, J.S. Park, Atomic layer deposited p-type copper oxide thin films and the associated thin film transistor properties, *Ceramics International* 42 (2016) 5517-5522.
- [3] P.K. Ooi, S.S. Ng, M.J. Abdullah, H. Abu Hassan, Z. Hassan, Effect of oxygen percentage on the growth of copper oxide thin films by reactive radio frequency sputtering, *Materials Chemistry and Physics* 140 (2013) 243-248.
- [4] J.F. Pierson, A. Thobor-Keck, A. Billard, Cuprite, Paramelaconite and tenorite films deposited by reactive magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* 210 (2013) 359-367.
- [5] T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, Influence of oxygen flow rate on structural, optical and electrical properties of copper oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering, *IOP*

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, 2560. การเตรียมฟิล์มบาง SnS ด้วยวิธีซัลโฟไรเซชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Sn ที่ได้จากการสเปกโตรเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปกโตร เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีแอคทีฟดิฟฟิวชันเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริภักย์เกียรติ. 2557. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริภักย์เกียรติ, 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2545. การเตรียมและ
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อ
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์ม
บาง $CdTe$ โดยวิธีระเหิดในระเหยประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงาน วิจัยเสนอ
ต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. การเตรียมและ
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ปริมาณสูงเพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์,
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2546.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In
โดยระเหยในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้น
ดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางคีนอกออกไซด์
ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอาบ
สารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสง อาทิตย์,
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรวิธา, 2545. การออกแบบ
และสร้างอันบาลานซ์ แมกนีตรอนคาโทดสำหรับระบบสปัตเตอร์, รายงานวิจัยเสนอต่อกองทุน
ต้นตารากรณ์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

Akimoto, K., Ishizuka, S., Yanagita, M., Nawa, Y., Paul, G.K. and Sakurai, T. 2006. "Thin Film
Deposition of Cu_2O and Applications for Solar Cells", Sol. Energy. 80: 715-722.

Banai, R.E., Lee, H., Motyka, M.A. and Hom, M.W. 2013. "Optical Properties of Sputtered SnS Thin
Films for Photovoltaic Absorbers" IEEE J. Photovoltaics. 3(3): 1084-1089.

Ghosh, B., Bhattacharjee, R., Banerjee, P. and Subrata Das S., 2011. "Structural and optoelectronic
properties of vacuum evaporated SnS thin films annealed in argon ambient". Applied Surf Sci.
257:3670-3676.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Bletskan, D.I., 2005. Phase equilibrium in binary systems $A^{IV}B^{VI}$. J. Ovonic Res. 1(5):61-69
- Burton, L.A. and Walsh, A., 2012. "Phase stability at the earth-abundant tin sulfides SnS , SnS_2 , and Sn_2S_3 ". J. Phys. Chem. C. 116:24262-24267.
- Chen, L.C. 2013. "Review of Preparation and Optoelectronic Characteristics of Cu_2O -Based Solar Cells with Nanostructure" Materials Science in Semiconductor Processing. 16: 1172-1185.
- Cheng, S. and Conibeer, G. 2011. "Physical Properties of Very Thin SnS Films Deposited by Thermal Evaporation". Thin Solid Films. 520: 837-841.
- Dhankhar, M., Singh, O.P. and Singh, V.N. 2014. "Physical Principles of Losses in Thin Film Solar Cells and Efficiency Enhancement Methods". Renewable and Sustainable Energy Reviews 40: 214-223.
- Devika, M., Reddy, N.K., Patolsky, F. and Gunasekhar, K.R. 2008. "Ohmic Contacts to SnS Films: Selection and Estimation of Thermal Stability". J. Appl. Phys. 104: 124503-1-124503-6.
- Gao, C., Shen, H. and Sun, L. 2011. "Preparation and Properties of Zincblende and Orthorombic SnS Films by Chemical Bath Deposition". Appl. Surf. Sci. 257: 6750-6755.
- Gao, C., Shen, H., Sun, L. and Shen, Z. 2011. "Chemical Bath Deposition of SnS Films With Different Crystal Structures". Mater. Lett. 65: 1413-1415.
- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors". Appl. Phys. Lett. 97, 143510-1- 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction". App. Phys. Lett. 90: 243106-1- 243106-3.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D. 2015. "Solar Cell Efficiency Tables (Version 45)". Prog. Photovolt. Res. Appl. 23(1): 1-9.
- Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors". Appl. Phys. Lett. 87: 243512-1- 243512-3.
- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers". Appl. Phys. Lett. 102: 072103-1- 072103-3.
- Gupta, N., Singh, R., Wu, F and Narayan, J. 2013. "Deposition and Characterization of Nanostructured Cu_2O Thin Film for Potential Photovoltaic Applications". J Mater. Res. 28: 1740-1746.
- Hara, M., Kondo, T., Komoda, M., Ikeda, S., Shinohara, K., Tanaka, A., Kondoa J.N. and Domen, K. 1998. " Cu_2O as a Photocatalyst for Overall Water Splitting under Visible Light Irradiation". Chemical Communications.. 3(3): 357-358.

- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. "Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors". *Appl. Phys. Lett.* 99: 113301-1-113301-3.
- Ismail, R.A. 2009. "Characteristics of p-Cu₂O/n-Si Heterojunction Photodiode made by Rapid Thermal Oxidation", *Journal of Semiconductor and Science*. 9: 51-54.
- Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Manner, R., Wischmann, W. and Powalla, M. 2011. "New World Record Efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films Solar Cells Beyond 20 %". *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 19: 894-897.
- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN". *Appl. Phys. Lett.* 68(13): 1808-1810.
- Jung, Y.S. and Kim, K.H. 2015. "Effect of Post-Annealing Treatment on the Properties of Reactive Sputtered Cuprous Oxide Thin Films". *J. Korean Phys. Soc.* 67(6): 1013-1017.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. "Optical and Electrical Properties of Cu₂ZnSnS₄ Film Prepared by Sulfurization Method". *J. Elec. Matter.* 41(8): 2204-2209.
- Kale, S.N., Ogale, S.B., Shinde, S.R., Sahasrabudhe, M., Kulkarni, V., Greene R. and Venkatesan, T. 2003. "Magnetism in Cobalt-Doped Cu₂O Thin Films Without and With Al, V, or Zn Co-dopants". *Appl. Phys. Lett.* 82: 2100-2102.
- Kittel C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Klochko, N.P., Momotenko, O.V., Tyukhov, I.I., Volkova, N.D., Kopach, V.R., Khrypunov, G.S., Lyubov, V.M. and Kirichenko, M.V. 2015. "Structure and Properties of SnS Thin Layers Obtained by Sulfurization of Electro-Deposited Tin Precursors". *Solar Energy*. 118: 117-125.
- Kuo, P.W., Hsieh, J.H., Wu, W.T. and Wu, C.H. 2010. "Optoelectronic Properties of Sputter-Deposited Cu₂O-Ag-Cu₂O Treated With Rapid Thermal Annealing". *Vacuum*. 84: 633-637.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. "Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si". *Appl. Phys. Lett.* 100: 153509-1- 153509-4.
- Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. "Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes". 102: 193511- 1193511-3.
- Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis". *J. Appl. Phys.* 113: 153709-1-153709-8.

- Miles, R.W., Ogah, E.O., Guillaume Zoppi, Forbes, I. 2009. "Thermally evaporated thin films of SnS for application in solar cell devices". *Thin Solid Films*. 517:4702-4705.
- Moller, H.J. "Semiconductors for Solar Cells", Artech House, Inc. 1993.
- Patel, M., Muhhopadhyay, I. and Ray, A. 2013. "Annealing Influence Over Structural and Optical Properties of Sprayed SnS Thin Films". *Optical Materials*. 35: 1693-1699.
- Praveen Janantha, P.A., Perera, I.N.I., Jayathilaka, K.M.D.C., Jayanetti, I.K.D.S., Dissanayaka, D.P. and Siripara, W.P. 2009. "Use of Cu₂O Microcrystalline Thin Film Semiconductors for Gas Sensing". *Proc. Tech. Sessions*, 25: 70-76.
- Reddy, V.R.M., Gedi, S., Park, C., Miles, R.W. and Ramakrishna Reddy, K.T. 2015. "Development of Sulphurized SnS Thin Films Solar Cells". *Curr. Appl. Phys.* 15: 588-598.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules". *Chin. Phys. B*. 21(3): 038104-1- 038140-7.
- Shi, C., Yang, P., Yao, M. and Chen, Z. 2013. "Preparation SnS₂ Thin Films by Close Spaced Sublimation at Different Source Temperatures". *Thin Solid Films*. 534: 28-31.
- Sinsermsuksakul, P. L., Sun, P.L., Lee, S.W., Park, H.H., Kim, S.B., Yang, C. and Gordon, R.G. 2014. "Overcoming Efficiency Limitations of SnS-Based Solar Cells". *Adv. Energy Mater.* 4: 14004961-1400491-7.
- Serin, T., Gurakar, S., Serin, N., Yildirim, N. and Ozyurt Kus, F. 2009. "Current Flow Mechanism in Cu₂O/p-Si Heterojunction Prepared by Chemical Method". *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42: 225108(1)-225108(5).
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution". *J. Appl. Phys.* 83(4): 2104-2111.
- Gaewdang, T. and Wongcharoen, Ng. 2017. "Influence of Oxygen Flow Rate on Structural, Optical and Electrical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering" *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 211, 2017, pp. 012025-1-012025-5.
- Walter, T., Herberlz, R., Muller C. and Schock H.W. 1996. "Determination of Defect Distributions from Admittance Measurements and Application to Cu(In,Ga)Se₂ Based Heterojunctions" *J. Appl. Phys.* 80(8): 4411-4420.

- Wong, T.K.S., Zhuk, S., Masudy-Panah, S. and Dalapati, G.K. 2016. "Current Status and Future Prospects of Copper Oxide Heterojunction Solar Cells". *Materials* 9: 271(1)-271(21).
- Xu, J. and Yang, Y. 2014. "Study of the Performances of SnS Heterojunction by Numerical Analysis". *Energy Conversion and Management*. 78: 260-265.
- Yanuar, H., Guastivino, F., Llinares, C., Djessas, K. and Masse, G. 2000. "SnS Thin Films Grown by Close Spaced Vapor Transport". *J. Mater. Sci. Lett.* 19: 2135-2137.
- Zhang, L., Mcmillon, L. and McNatt, J. 2013. "Gas-Dependent Bandgap and Electrical Conductivity of Cu_2O Thin Films". *Sol. Energy & Sol. Cells*. 108: 230-234.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CuO

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 80-76

Pattern : 80-76		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated																																																																																																																																																																																	
Cu O		<table><thead><tr><th>2th</th><th>I</th><th>h</th><th>k</th><th>l</th></tr></thead><tbody><tr><td>32.480</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>35.385</td><td>26</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>35.539</td><td>100</td><td>-1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>38.640</td><td>44</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>38.970</td><td>16</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>46.252</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>48.851</td><td>19</td><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>51.228</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>53.355</td><td>7</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>56.587</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>58.164</td><td>10</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>61.517</td><td>8</td><td>-1</td><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>65.662</td><td>10</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>66.340</td><td>6</td><td>-3</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>66.513</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>67.728</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>68.017</td><td>9</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>68.852</td><td><1</td><td>-2</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>71.838</td><td><1</td><td>-3</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>72.337</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>72.812</td><td><1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>74.864</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr><tr><td>75.234</td><td>4</td><td>-2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>79.559</td><td><1</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>80.264</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td><td>4</td></tr><tr><td>80.264</td><td>1</td><td>-2</td><td>0</td><td>4</td></tr><tr><td>82.545</td><td>4</td><td>-3</td><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>82.857</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>83.343</td><td><1</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>83.690</td><td>2</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>86.806</td><td>1</td><td>-2</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>86.806</td><td>1</td><td>-4</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>87.740</td><td><1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr><tr><td>89.575</td><td>1</td><td>-1</td><td>3</td><td>1</td></tr></tbody></table>					2th	I	h	k	l	32.480	6	1	1	0	35.385	26	0	0	2	35.539	100	-1	1	1	38.640	44	1	1	1	38.970	16	2	0	0	46.252	1	-1	1	2	48.851	19	-2	0	2	51.228	1	1	1	2	53.355	7	0	2	0	56.587	1	0	2	1	58.164	10	2	0	2	61.517	8	-1	1	3	65.662	10	0	2	2	66.340	6	-3	1	1	66.513	3	3	1	0	67.728	9	1	1	3	68.017	9	2	2	0	68.852	<1	-2	2	1	71.838	<1	-3	1	2	72.337	6	3	1	1	72.812	<1	2	2	1	74.864	3	0	0	4	75.234	4	-2	2	2	79.559	<1	0	2	3	80.264	1	-1	1	4	80.264	1	-2	0	4	82.545	4	-3	1	3	82.857	3	2	2	2	83.343	<1	3	1	2	83.690	2	4	0	0	86.806	1	-2	2	3	86.806	1	-4	0	2	87.740	<1	1	1	4	89.575	1	-1	3	1
2th	I	h	k	l																																																																																																																																																																																	
32.480	6	1	1	0																																																																																																																																																																																	
35.385	26	0	0	2																																																																																																																																																																																	
35.539	100	-1	1	1																																																																																																																																																																																	
38.640	44	1	1	1																																																																																																																																																																																	
38.970	16	2	0	0																																																																																																																																																																																	
46.252	1	-1	1	2																																																																																																																																																																																	
48.851	19	-2	0	2																																																																																																																																																																																	
51.228	1	1	1	2																																																																																																																																																																																	
53.355	7	0	2	0																																																																																																																																																																																	
56.587	1	0	2	1																																																																																																																																																																																	
58.164	10	2	0	2																																																																																																																																																																																	
61.517	8	-1	1	3																																																																																																																																																																																	
65.662	10	0	2	2																																																																																																																																																																																	
66.340	6	-3	1	1																																																																																																																																																																																	
66.513	3	3	1	0																																																																																																																																																																																	
67.728	9	1	1	3																																																																																																																																																																																	
68.017	9	2	2	0																																																																																																																																																																																	
68.852	<1	-2	2	1																																																																																																																																																																																	
71.838	<1	-3	1	2																																																																																																																																																																																	
72.337	6	3	1	1																																																																																																																																																																																	
72.812	<1	2	2	1																																																																																																																																																																																	
74.864	3	0	0	4																																																																																																																																																																																	
75.234	4	-2	2	2																																																																																																																																																																																	
79.559	<1	0	2	3																																																																																																																																																																																	
80.264	1	-1	1	4																																																																																																																																																																																	
80.264	1	-2	0	4																																																																																																																																																																																	
82.545	4	-3	1	3																																																																																																																																																																																	
82.857	3	2	2	2																																																																																																																																																																																	
83.343	<1	3	1	2																																																																																																																																																																																	
83.690	2	4	0	0																																																																																																																																																																																	
86.806	1	-2	2	3																																																																																																																																																																																	
86.806	1	-4	0	2																																																																																																																																																																																	
87.740	<1	1	1	4																																																																																																																																																																																	
89.575	1	-1	3	1																																																																																																																																																																																	
Copper Oxide																																																																																																																																																																																					
Lattice : Monoclinic		Mol. weight = 79.55																																																																																																																																																																																			
S.G. : C2/c (15)		Volume [CD] = 81.40																																																																																																																																																																																			
a = 4.67970		Dx = 6.491																																																																																																																																																																																			
b = 3.43140		Beta = 99.26																																																																																																																																																																																			
c = 5.13620		Z = 4																																																																																																																																																																																			
a/b = 1.36379		I/Icor = 4.98																																																																																																																																																																																			
c/b = 1.49682																																																																																																																																																																																					
ICSD COLLECTION CODE : 067850																																																																																																																																																																																					
REMARKS FROM ICSD : REM RVP.																																																																																																																																																																																					
REMARKS FROM ICSD : REM K CuO obtained from																																																																																																																																																																																					
gamma-Cu2(OH)3Cl. RM																																																																																																																																																																																					
TEMPERATURE FACTOR : ITF																																																																																																																																																																																					
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference																																																																																																																																																																																					
*Solid State Ionics, volume 63, page 442, (1993) :																																																																																																																																																																																					
Garcia-Martinez, O., Rojas, R.M., Vila, E., Martin de Vidales, J.L.																																																																																																																																																																																					
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified																																																																																																																																																																																			
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings																																																																																																																																																																																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สักฤดาเลศที่ ..2561010521... ตั้งแต่วันที่ 1 ค.ล. 2560..... ถึงวันที่ 30 มิ.ย. 2562.....

แหล่งทุน: งบประมาณเงินรายได้
ชื่อโครงการ: การเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีแอตต์เพ็ดซีแมกนีตรอนสเป็คโตรอิมพีเดียสเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวีรพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si
ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ.ดร.สุทิน แก้วแดง

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ ดอกเบี้ยรับ	งบกลาง ค่าจ้างวิทยากร	รายการจ่าย			งบลงทุน ค่าครุภัณฑ์	รวม รายจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ			ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ		
	งบประมาณที่ได้รับมอบหมาย (ตามแผน)		50,000.00									
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%)		42,500.00		42,500.00							-
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)		7,500.00		50,000.00							
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)				50,000.00							-
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 2)			26,166.50	23,833.50		-	-	16,500.00	9,666.50	-	26,166.50
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 3)			11,366.46	12,467.04		-	-	7,700.00	3,666.46	-	11,366.46
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 4)			287.00	12,180.04		-	-	-	287.00	-	287.00
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 5)			209.00	11,971.04		-	-	-	209.00	-	209.00
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 6)			8,748.20	3,222.84		-	-	4,200.00	4,548.20	-	8,748.00
	ค่าใช้สอย (ครั้งที่ 7)			3,256.00	-33.16		-	-		3,256.00	-	3,256.00
	งบประมาณคงเหลือ				0.00							
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย											
ครั้งที่ 1		เลขที่ใบเสร็จรับเงิน										
ครั้งที่ 2		เลขที่ใบเสร็จรับเงิน										
3 ม.ค. 61	ใช้ตั้งรับ 3M A (หน่วย: 1ชิ้น)	11108016006135								200.00		200.00
15 ม.ค. 61	แอร์ไลท	6057								160.00		160.00
16 ม.ค. 61	ค่าสายเคส	13906								365.00		365.00
31 ม.ค. 61	ค่าเครื่องใช้ UV-VIS-NIR	927								290.00		290.00
6 ก.พ. 61	กระดาษทราย 3M24MMX25YDS (ทพ)	11108012007120								2,050.00		2,050.00
9 ก.พ. 61	ค่าบริการ AFM	14								4,494.00		4,494.00
26 ก.พ. 61	VELJ1500 VETO หลอดไอโอดีน	15006102021								2,820.00		2,820.00
26 ก.พ. 61	ค่าเครื่องใช้ FESEM-EDS	196										
7 มี.ค. 61	ค่าบริการเคาะด้วยเทคนิค XPS	2010										
13 มี.ค. 61	หลอดไอโอดีนรุ่น ELH 120V	CS-610313-10								3,833.50		3,833.50
15 มี.ค. 61	ค่าบริการ AFM	5								2,050.00		2,050.00
24 มี.ค. 61	ถังน้ำดื่ม PET	RST180312220								195.00		195.00
31 มี.ค. 61	หลอดเบอร์ #2 PAN S 10M	606514								30.00		30.00
	ใช้คางขุด 2 ชิ้น/ชุด MATA PRO 5"	606514								99.00		99.00
	รวมครั้งที่ 2								16,500.00	9,666.50	-	26,166.50
ครั้งที่ 3		เลขที่ใบเสร็จรับเงิน										
15 พ.ค. 61	ค่าบริการเคาะด้วยเทคนิค XPS	2066										2,400.00
15 พ.ค. 61	ค่าบริการเคาะด้วยเทคนิค XPS	2067										5,300.00
5 มิ.ย. 61	ใช้ตั้งรับ 3MA	11108015007112								250.00		250.00
8 มิ.ย. 61	ปากกาเขียนสี 2 หัวสี	5000606181026537								54.00		54.00
	C275-4B โล่กันเลก	5000606181026537								94.00		94.00
	ดรัมหมึก HP 46 BK	182								780.00		780.00
	ดรัมหมึก HP 46 CO	182								390.00		390.00
	ดรัมหมึก HP 703 CO	182								350.00		350.00
	ดรัมหมึก HP 703 BK	183								350.00		350.00
	หมึกเดิม EPSON BK	183								230.00		230.00
29 มิ.ย. 61	DI WATER (แบบเดิม)	KCT 2018/06-68								1,177.86		1,177.86
	รวมครั้งที่ 3								7,700.00	3,675.86		11,375.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการรับ สัญญาเลขที่ ..2561010521... ตั้งแต่วันที่ 1 ค.ค.. 2560..... ถึงวันที่ 30 มิ.ย. 2562.....

แหล่งทุน: งบประมาณเงินรายได้

ชื่อโครงการ : การเตรียมฟิล์มบาง Cu₂O โดยวิธีสเปรย์แอตที่ฟิซีแมกนีตรอนสปีดเดอร์ เพื่อประติมากรรมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็น p-Cu₂O/n-Si

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		รายรับ	งบกลาง	รายการจ่าย			งบลงทุน	รวม
			รับ	จ่าย		งบกลาง	ค่าตอบแทน	ค่าวัสดุ	ค่าวัสดุ		
ครั้งที่ 4 1 ส.ค. 61 11 ก.ย. 61	หน้ากากอนามัย (FIDEN FACE)	เลขที่ใบเสร็จรับเงิน 063									
	พลาสติก	13208						107.00			180.00
	รวมครั้งที่ 4							107.00			180.00
ครั้งที่ 5 4 ค.ค. 61 6 พ.ย. 61	แผ่นทองA4 /P.12คละสี	เลขที่ใบเสร็จรับเงิน									
	ชุดต้นสอ0.5+*ใส่+ยางลบA	5000610181029197						80.00			80.00
	รวมครั้งที่ 5	11108016007199						129.00			129.00
ครั้งที่ 6 18 ก.พ. 62 5 มี.ค. 62	Conductive carbon paint.3/4 OZ.	เลขที่ใบเสร็จรับเงิน									
	กระดาษทราย 3M24MMx25	032916						1,027.20			1,027.20
	ยางลบ SPEED ERASER เล็ก	11108015008136						19.00			19.00
26 มี.ค. 62	ดิสก์หมึก HP 703 BK+CO	11108015008136						1,750.00			1,750.00
	ดิสก์หมึก HP 46 BK+CO	29						1,560.00			1,560.00
	ค่าบริการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS	29						4,200.00			4,200.00
ครั้งที่ 7 7 มิ.ย. 62 20 มิ.ย. 62	รวมครั้งที่ 6							4,200.00			4,200.00
	VGREASE SILICONE HIGH VACU	เลขที่ใบเสร็จรับเงิน									
	ดิสก์หมึก HP 46 CO+ BK	RE0003956						1,926.00			1,926.00
ให้หน้า	ดิสก์หมึก HP 703 BK	24						780.00			780.00
	SCOTCH เทปทากาย 24 M	5000606191036132						350.00			350.00
	C 275-48 ใสตินสกลด	5000606191036132						33.00			33.00
25 มิ.ย. 62	ฟิล์มแบบตมกิลล์หอม A	11108015008578						132.00			132.00
	รวมครั้งที่ 7							35.00			35.00
รวม											3,256.00

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ วันที่

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายฐิตินัย แก้วแดง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีจบการศึกษา	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 “Structural, Optical and Photoconductive of Thermally Evaporated $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Thin Films” CMU J. Nat. Sci., Vol. 16(4), 2017, pp. 263-273.
2. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Influence of Oxygen Flow Rate on Structural, Optical and Electrical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 211, 2017, pp. 012025-1-012025-5.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Tin Sulphide Prepared by Sulphurisation Process using Metallic Tin Film Precursor Obtained from dc Magnetron Sputtering Method” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 211, 2017, pp. 012026-1-012026-6.
4. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation of CuO Thin Films by Thermally Oxidized Metallic Cu Films for CdS/CuO Heterojunction Diode” CMU J. Nat. Sci., Vol. 16(1), 2017, pp. 63-76.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Influence of Annealing Temperature on the Properties of SnS Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation” Materials Science Forum, Vol. 890, 2017, pp. 295-298.
6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Physical Properties of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method” Materials Science Forum, Vol. 890, 2017, pp. 291-294.
7. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
8. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 6-11.
9. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Parameters and Conduction Mechanisms in CdS/CuO Thin Film Heterojunction” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 858-865.
10. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Prepared by Oxidation of Thermally Evaporated Cu Thin Films” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 866-873.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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 งามนิตย์ 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. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Structural, Optical and Photoconductive of Thermally Evaporated $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Thin Films” CMU J. Nat. Sci., Vol. 16(4), 2017, pp. 263-273.
2. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Influence of Oxygen Flow Rate on Structural, Optical and Electrical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 211, 2017, pp. 012025-1-012025-5.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Tin Sulphide Prepared by Sulphurisation Process using Metallic Tin Film Precursor Obtained from dc Magnetron Sputtering Method” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 211, 2017, pp. 012026-1-012026-6.
4. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation of CuO Thin Films by Thermally Oxidized Metallic Cu Films for CdS/CuO Heterojunction Diode” CMU J. Nat. Sci., Vol. 16(1), 2017, pp. 63-76.
5. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Influence of Annealing Temperature on the Properties of SnS Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation” Materials Science Forum, Vol. 890, 2017, pp. 295-298.
6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Physical Properties of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method” Materials Science Forum, Vol. 890, 2017, pp. 291-294.
7. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
8. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 6-11.
9. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Parameters and Conduction Mechanisms in CdS/CuO Thin Film Heterojunction” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 858-865.

10. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Prepared by Oxidation of Thermally Evaporated Cu Thin Films” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 866-873.
11. 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
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Preparation and Characterization of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) Thin Films” Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan Proceedings, pp. 2070-2077.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, “Thermoelectric Properties of Ni-Doped CuAlO₂” *Physics Procedia*, vol.2, 2009, pp.101-106.
23. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripudhchaiwon 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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)
27. 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.
28. 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.

29. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Optical and Electrical Properties of B-Doped $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method” Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696- 697.
30. 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.
31. 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.



Processing and Characterization of Amorphous Copper Oxide Thin Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering

Thitinai Gaewdang^{1,a*} and Ngamnit Wongcharoen^{1,b}

¹Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1, Soi Chalalongkrung 1, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand

^a thitinai.ga@kmitl.ac.th, ^b ngamnit.wo@kmitl.ac.th

Keywords: Amorphous copper oxide thin films, XRD, AFM, Optical properties, Hall effect

Abstract. In this paper, copper oxide (CuO_x) thin films with amorphous phase were prepared on glass substrates by reactive dc magnetron sputtering. The influence of the flow rate of O_2 on the structural, optical and electrical properties of the as-deposited films was systematically studied. XRD revealed that the as-deposited films remained amorphous in the whole range of adjusted oxygen flow rate. Surface morphology and nanoparticle size of the films were observed by AFM. Electrical resistivity and Hall effect measurements were performed on the films with van der Pauw configuration. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. From temperature-dependent electrical conductivity of the films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm, it was shown that three types of behavior can be expected, nearest-neighbor hopping at high temperature range (200-300 K), the Mott variable range hopping at low temperature (110-190 K) and Efros-Shklovskii variable range hopping at very low temperature (65-100 K). Some important parameters corresponding to Mott-VRH and ES-VRH like density of localized states near the Fermi level ($N(E_F)$), localization length (ξ), degree of disorder (T_0), hopping distance (R) and hopping energy (W) were determined. These parameters would be helpful for optimizing the performance of photovoltaic applications.

Introduction

During the past decade, amorphous oxide semiconductors (AOS) have emerged as a promising candidate for the backplane technology of next generation ultra-high definition, flexible and transparent active-matrix flat-panel displays [1]. The successful implementation of n-type oxide semiconductors such as In-Ga-Zn-O into thin-film transistor (TFTs) arrays in the flat panel displays has triggered considerable interest in p-type oxide semiconductor materials [2]. It is anticipated that high performance p-type oxide semiconductors will promote a new era in the field of transparent electronics and displays by allowing the design of complementary metal oxide semiconductor (CMOS) structures with both n-type and p-type TFTs devices. Many research groups have thus been investigating various p-type materials in the field of oxide semiconductors. Among various p-type oxide semiconductors, CuO_x thin films have been subject of great deal of interest for various applications such as gas sensor, thin-film transistors, heterojunction diode and photovoltaic cells [2]. Two common forms of copper oxide are cuprous oxide (Cu_2O) and cupric oxide (CuO). Cu_2O and CuO belong to cubic and monoclinic structures with band gap of 2.1-2.6 eV and 1.9-2.1 eV, respectively [3]. A meta-stable copper oxide, Cu_4O_3 , which is an intermediate compound between the previous two, has also reported [4]. A variety of deposition techniques have been employed for the growth copper oxide films. Among these thin films deposition techniques, reactive magnetron sputtering is one of the industrially practiced techniques for preparing of uniform films on large area substrates with required chemical composition. The $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$, $\text{Cu}_2\text{O}+\text{CuO}$ and Cu_4O_3 phases were formed by reactive sputtering of a Cu target when the ratio of oxygen partial pressure to the total pressure increased [4]. This paper aims to prepare amorphous CuO_x thin films through reactive dc magnetron sputtering on glass substrates with different oxygen flow rates. The physical properties of the films were studied in order to find the possibility to use them in p-n junction low cost thin film solar cells.

Materials and Methods

CuO_x thin films were deposited by reactive dc magnetron sputtering from a high purity Cu target of 99.99% with diameter of 50 mm and thickness 3 mm. Oxygen and argon were used a reactive gas and working gas, respectively. Prior to the growth amorphous CuO_x thin films, glass substrates were first wet cleaned by acetone, isopropyl alcohol and de-ionized water. The glass substrates were subsequently backed to 100°C for 30 min to evacuate moisture. In order to study the effect of oxygen flow rate and eliminate the action of sputtering pressure, the sputtering pressure was kept at 0.73 Pa, with a variation of oxygen flow rate in the range of 0.3-1.8 sccm and an argon flow rate in the range of 12-32 sccm. A diffusion pump was used to achieve a base pressure of 6.90×10^{-3} Pa. The substrate temperature during deposition was not intentional controlled. Target to substrate distance was kept constant at 100 mm. In order to clean the Cu target and stabilized the plasma, pre-sputtering was performed while the substrate was shielded for 5 min. Then, CuO_x was formed as soon as oxygen was introduced in the chamber. Sputtering time was 30 min. The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker D 8 diffractometer using CuK_α radiation. Surface morphology was examined by Park XE-100 AFM. The EDS spectra were recorded with a Zeiss EVO MA 10 Scanning Electron Microscopy. Optical transmission measurements were performed with UV-VIS double beam spectrophotometer in the wavelength range of 300-1,000 nm. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature. The temperature-dependent conductivity was measured using the two-point probe method in the temperature range 20-300 K.

Results and Discussion

Fig. 1 shows XRD patterns of CuO_x films grown on glass substrates as a function of oxygen flow rate R(O₂). The absence of peaks in the spectrum showed that Bragg's law of diffraction was not satisfied. The observed featureless spectra of the films showed that the films are amorphous phase in the whole range of adjusted oxygen flow rate. However, they started to crystallize when oxygen flow rate beyond 2 sccm already described in our previous report [5]. AFM images of the films prepared as a function of R(O₂) are shown in Fig. 2. The films formed at R(O₂) of 0.3 sccm showed isolated particles with different sizes due to a low deposition rate and deficient O₂ content for reacting with Cu precursor atoms. With increasing the R(O₂) from 0.3 to 1.8 sccm, the average particle size and surface roughness of the films increased from 49.4 to 166.2 nm and from 2.5 to 4.8 nm, respectively. Fig. 3 shows typical EDS spectra of the films prepared at R(O₂) of 0.3-1.8 sccm. It revealed that the Cu:O stoichiometric ratio was close to 1:0.5. Fig. 4 shows transmittance spectra of CuO_x films obtained from various oxygen flow rates. From the transmittance spectra, the absorption coefficient (α) was calculated using relationship of Sunds $\alpha = (1/d) \ln(1/T)$ where T is transmittance and d is film thickness. The absorption coefficient (α) and the incident photon energy (hv) according to Tauc relationship $(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g)$ where A and E_g are constant and energy gap values, respectively. The E_g can be determined by extrapolation of the linear portion of the curve to the photon energy axis. Fig. 5 shows the curve of $(\alpha hv)^2$ vs. photon energy (hv) of the films obtained from various oxygen flow rates. The band tail values of the films were evaluated from the plot of $\ln \alpha$ vs. photon energy (hv) (as shown in Fig. 6). The variation of E_g and band tail values as a function of R(O₂) of the films, in the range 2.70-2.86 eV and 0.855-1.020 eV, respectively is shown in Fig. 7.

Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. We found that all studied films exhibited p-type conductivity. Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against R(O₂) are shown in Fig. 8. Carrier concentration (n) was derived from the relation $n = 1/eRH$ where R_H is the Hall coefficient and e is the absolute value of the electron charge. The carrier mobility (μ) was determined using the relation $\mu = 1/nep$ where ρ is resistivity. Resistivity of the films initially decreased from 450.1 down to minimum value at 76.2 $\Omega \cdot \text{cm}$ with R(O₂) increased from 0.3 to 1.5 sccm and then increased to

376.0 $\Omega\cdot\text{cm}$ when $R(\text{O}_2)$ further increased to 1.8 sccm. The carrier concentration increased with an increase $R(\text{O}_2)$ attain maximum value at $2.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and then dropped monotonically with an increase in $R(\text{O}_2)$. The minimum and maximum values of mobility were observed at $R(\text{O}_2)$ of 0.8 and 1.5 sccm, respectively. These results indicated that the resistivity, carrier concentration and mobility of the films were sensitive to $R(\text{O}_2)$. The films prepared at oxygen flow rate of 1.5 sccm revealed the largest mobility ($\mu_h = 15.1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$). So, they are identified as suitable candidates for fabrication as absorber layer in solar cell devices.

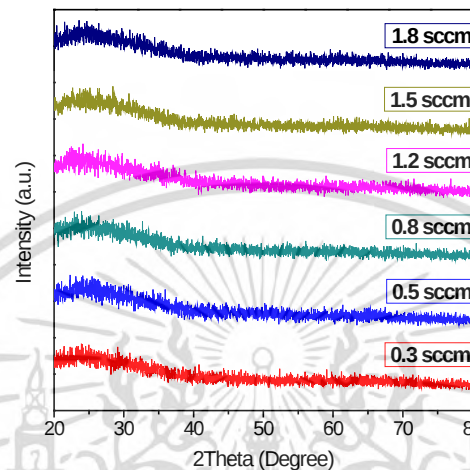


Fig. 1. XRD patterns of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

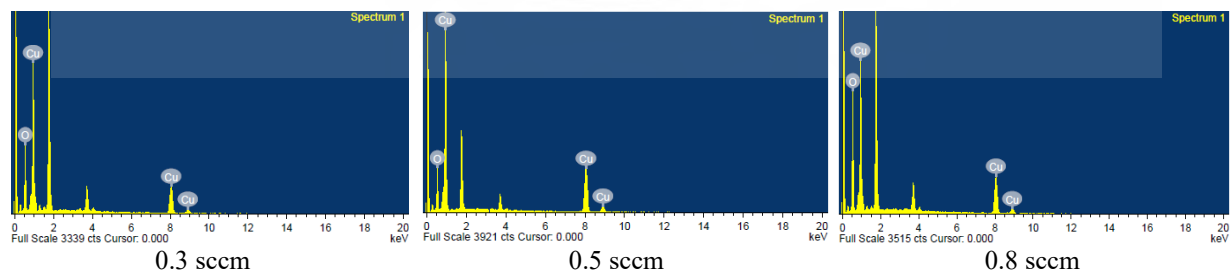


Fig. 2. AFM images of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

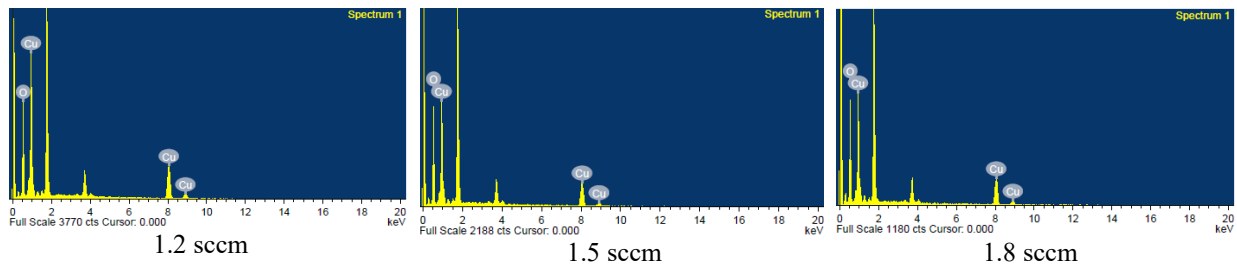


Fig. 3. EDS spectra of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

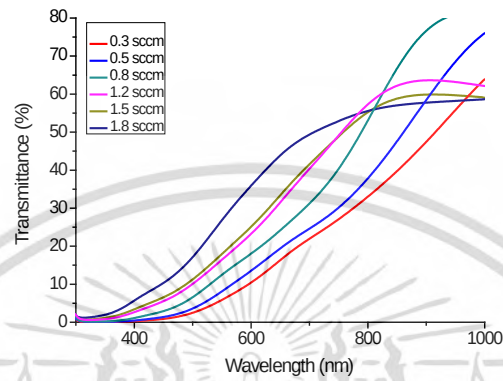


Fig. 4. Transmittance of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

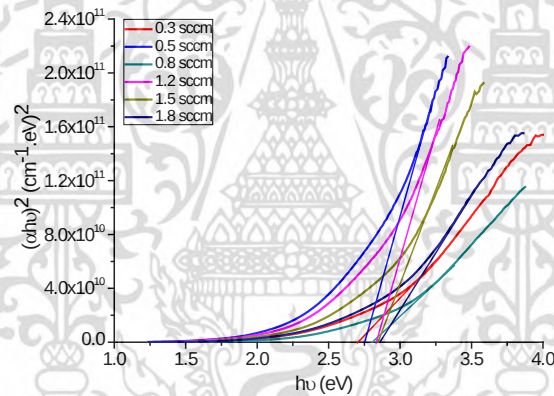


Fig. 5. $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ plot of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

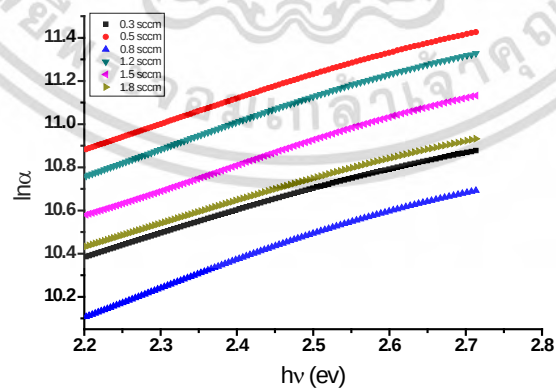


Fig. 6. $\ln \alpha$ vs. $h\nu$ plot of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

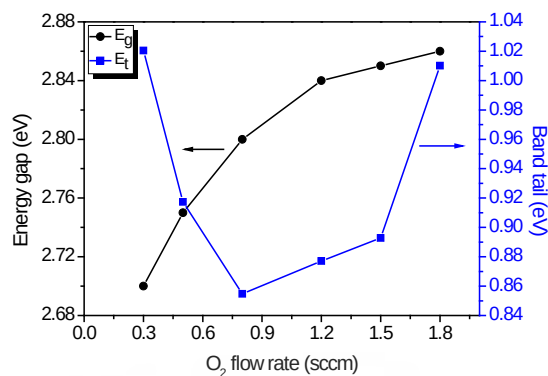


Fig. 7. Variation of E_g and band tail values of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

Photocurrent response of CuO_x films under multiple on/off white light illumination cycles was performed in ambient air and at constant bias voltage 5 V. Three repeated cycles are shown in Fig. 9, in which the photocurrent was observed to be consistent and repeatable. However, the persistent photoconductivity effect was observed in all studied films. It suggested that density of states occurred in energy gap is rather complicated.

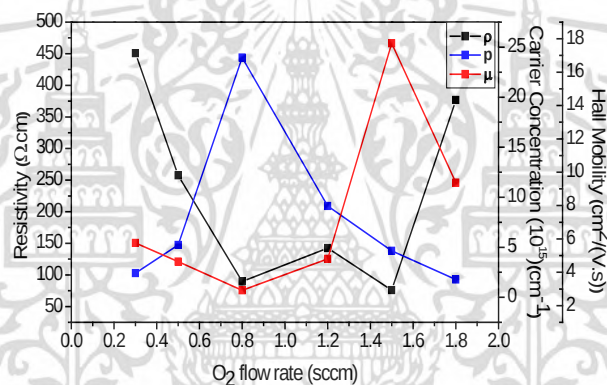


Fig. 8. Variations of ρ , p and μ of CuO_x films as a function of $R(\text{O}_2)$.

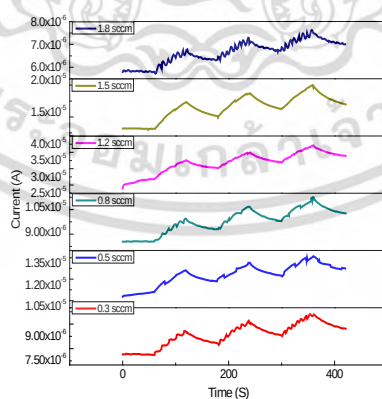


Fig. 9. Photocurrent response of CuO_x films.

Fig. 10 (a) shows the Arrhenius plot of $\ln(\sigma)$ and $1000/T$ for the films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm. As seen in Fig. 10(a), no single mechanism can be fitted in the whole curve of conductivity. In the high temperature range (200-300 K), holes do not have sufficient thermal energy to be excited from the acceptor levels to the valence band and the conduction in the valence band becomes less important. In this case, holes can hop between nearest-neighbor acceptors in the impurity band. The Nearest-Neighbor Hopping conduction (NNH) becomes the main conduction mechanism. The resistivity of NNH is given by [6, 7]

$$\ln \sigma = -E_{NNH} / kT + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (1)$$

where $\sigma_{0,NNH}$ is pre-exponential factor, k is Boltzmann's constant and E_{NNH} is the nearest-neighbor activation energy. As shown in Fig. 10(b), a good linear relationship can be observed in the Arrhenius plot in the high temperature range (200-300 K). The important parameters deduced from NNH mechanism were listed in Table 1: T_{c1} is the transition temperature from NNH to Mott-VRH and N_a is acceptor concentration. For low temperature range (110-190 K), the plot of $\ln(\sigma T^{1/2})$ vs $T^{-1/4}$ was found to be linear as shown in Fig. 10 (c). This suggested that the conduction is controlled by Mott variable-range hopping (Mott-VRH) instead of the NNH mechanism at high temperature. The Mott's parameters can be extracted from the relation [8]:

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = -(T_{0,Mott} / T)^{1/4} + \ln \sigma_{0,Mott} \quad (2)$$

The important parameters deduced from Mott-VRH model were tabulated in Table 2: $T_{0,Mott}$ is a characteristic temperature coefficient, $\sigma_{0,Mott}$ is pre-exponential factor, $N_0(E_F)$ is density of state at the Fermi level, $R_{hop,Mott}$ is average hopping distance, and $W_{hop,Mott}$ is average hopping energy. At very low temperature range (65-100 K), the measured data were satisfied the Efros-Shklovskii variable-range hopping (ES-VRH). In this electrical conduction mechanism region, the electron interaction caused the density of state at Fermi level is separated and became to the coulomb gap (Δ_C). The conductivity in ES-VRH model is given as [8]

$$\ln(\sigma T) = -(T_{0,ES} / T)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES} \quad (3)$$

Fig. 10(d) shows the plot of $\ln(\sigma T)$ vs $T^{-1/2}$. The important parameters deduced from ES-VRH model were listed in Table 3: $T_{0,ES}$ is a characteristic temperature coefficient, $\sigma_{0,ES}$ is pre-exponential factor, $R_{hop,ES}$ is average distance and $W_{hop,ES}$ is average hopping energy.

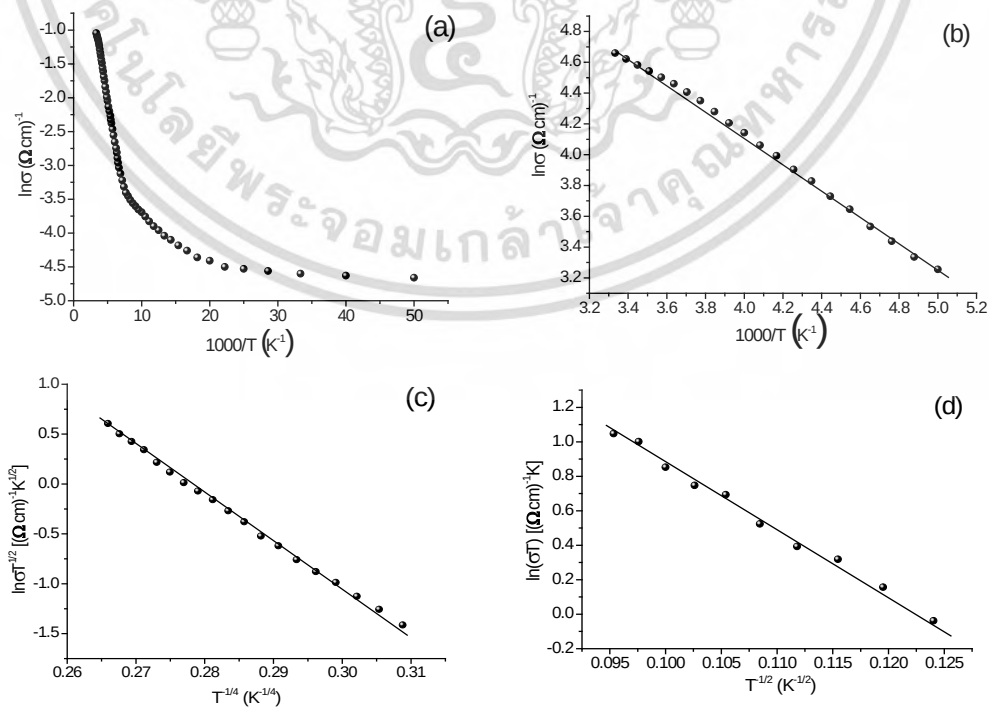


Fig. 10. $\ln(\sigma)$ vs $1000/T$ plot (a) and (b), $\ln(\sigma T^{1/2})$ vs $T^{-1/4}$ plot (c), and $\ln(\sigma T)$ vs $T^{-1/2}$ plot (d) of CuO_x thin films prepared at $R(\text{O}_2)$ of 1.5 sccm.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. NNH's parameters at high temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm)	E_{NNH} (eV)	N_a (cm ⁻³)	T_{c1} (K)
200-300	2.03×10^3	0.075	1.22×10^{20}	193.22

Table 2. Mott's parameters at low temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm)	$T_{0,Mott}$ (K)	ξ_{Mott} (nm)	$N_0(E_F)$ (cm ⁻³ ·eV ⁻¹)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$	$W_{hop,Mott}$ (meV)
110-190	4.66×10^5	4.87×10^3	0.865	8.18×10^{19}	3.78	4.37	31.06

Table 3. ES's parameters at very low temperature of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm.

Temperature range	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm)	$T_{0,ES}$ (K)	$R_{hop,ES}$ (nm)	ξ_{ES} (nm)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{Mott}}$	$W_{hop,ES}$ (meV)	Δ_C (μeV)
65-100	1.02×10^2	1.41×10^3	45.90	40.80	1.12	13.60	1.46

Conclusion

Thin films of CuO_x semiconductor with amorphous phase were prepared on glass substrates by reactive dc magnetron sputtering with the oxygen flow rate in the range of 0.3-1.8 sccm. XRD revealed that the as-deposited films remained amorphous in the whole range of oxygen flow rate. With increasing the R(O₂) from 0.3 to 1.8 sccm, the average particle size and surface roughness of the films increased from 49.4 to 166.2 nm and from 2.5 to 4.8 nm, respectively. Energy gap value increased from 2.70 to 2.86 as the oxygen flow rate increased from 0.3 to 1.8 sccm. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. The films prepared at oxygen flow rate of 1.5 sccm revealed the largest mobility value. From temperature-dependent electrical conductivity of the films prepared at R(O₂) of 1.5 sccm, it was shown that three types of behavior can be expected, nearest-neighbor hopping at high temperature range (200-300 K), the Mott variable range hopping at low temperature (110-190 K) and Efros-Shklovskii variable range hopping at very low temperature (65-100 K). Some important parameters corresponding to NNH, Mott-VRH and ES-VRH conduction mechanisms were determined. These parameters would be useful to achieve further optimization the performance of photovoltaic applications.

Acknowledgment

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under grant number A118-61-038.

References

- [1] Y.S. Lee, E.K.H. Yu, D.H. Shim, H.S. Kong, L. Bie, J. Kanicki, Oxygen flow effects on electrical properties, stability, and density of states of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 121101-1-121101-5.
- [2] W. Maeng, S.H. Lee, J.D. Kwon, J. Park, J.S. Park, Atomic layer deposited p-type copper oxide thin films and the associated thin film transistor properties, *Ceramics International* 42 (2016) 5517-5522.
- [3] P.K. Ooi, S.S. Ng, M.J. Abdullah, H. Abu Hassan, Z. Hassan, Effect of oxygen percentage on the growth of copper oxide thin films by reactive radio frequency sputtering, *Materials Chemistry and Physics* 140 (2013) 243-248.

- [4] J.F. Pierson, A. Thobor-Keck, A. Billard, Cuprite, Paramelaconite and tenorite films deposited by reactive magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* 210 (2013) 359-367.
- [5] T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, Influence of oxygen flow rate on structural, optical and electrical properties of copper oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 211 (2017) 012025-1-012025-5.
- [6] A. Yildiz, A.A. Alsac, T. Serin, N. Serin, The change in the electrical transport mechanism from the grain boundary conduction to the nearest-neighbor hopping conduction in SnO_2 , *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 22 (2011) 872-875.
- [7] A. Yidiz, N. Serin, T. serin, M. Kasap, Cross-over from nearest-neighbor hopping conduction to Efros-Shklovskii variable-range hopping conduction in hydrogenated amorphous silicon films, *Jpn. Appl. Phys.* 48 (2009) 111203-1-111203-5.
- [8] H. Baqiah, N.B. Ibrahim, M.H. Abdi, S.A. Halim, Electrical transport, microstructure and optical properties of Cr-doped In_2O_3 thin film prepared by sol-gel method, *J. Alloys Compd.* 575 (2013) 198-206.

