รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

Fabrication of CuO Thin Films by Reactive DC Sputtering Method for CdS/CuO Heterojunction Solar Cell

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

Fabrication of CuO Thin Films by Reactive DC Sputtering Method for CdS/CuO Heterojunction Solar Cell

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

.b 12775836

.i

เลขหมู่

เลขทะเบียน 142452

วัน.เดือน.ปี 4 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 200,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558

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

ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: ngamnit.wo@kmitl.ac.th
นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ อ.คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, E-mail: tiparatana.w@bu.ac.th
นายชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330, E-mail: Chaisingh.P@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO โดยการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีการฉายแสง พบว่าสิ่งประดิษฐ์นี้แสดงพฤติกรรมเรียงกระแสที่ดีแบบไดโอดสารกึ่งตัวนำ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 100-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ แฟกเตอร์อุดมคติ และความต้านทานอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง ได้ทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 25-60 องศาเซลเซียส จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความถี่ เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบนี้ให้กระแสลัดวงจรเท่ากับ 2.3×10^{-5} แอมแปร์ แรงดันเปิดวงจรเท่ากับ 0.32 โวลต์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 4.22 % จากการทดลองพบว่าสิ่งประดิษฐ์นี้สามารถพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต้นทุนต่ำได้

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของ CdS และ CuO, รีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง, รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Fabrication of CuO Thin Films by Reactive DC Sputtering Method for CdS/CuO Heterojunction Solar Cell

Researcher: Mr. Thitinai Gaewdang, Mrs. Ngamnit Wongcharoen, Mrs. Tiparatana Wongcharoen and Mr. Chaisingh Poo-Rakkiat

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

In this research work, p-n heterojunction based on CdS and CuO thin films were fabricated using thermal evaporation and reactive DC magnetron sputtering methods, respectively. The obtained device exhibits a good rectifying behavior of the diode from the dark I-V characteristics. From the data of I-V measurements at low temperature range of 100-300 K, the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using thermionic emission theory and Cheung's method. Impedance spectroscopy of the device was investigated at temperature of 25-60 °C. The real and imaginary parts of the complex impedance are changed with the temperature and frequency. The obtained device exhibits a short-circuit of 2.3×10^{-5} A, open-circuit voltage of 0.32 V and power conversion efficiency of 4.22 %. The experimental results suggest that the device could be used possibly a good candidate for photovoltaic devices with low thermal budget and low product cost.

Keywords : CdS and CuO thin films, reactive DC magnetron sputtering, CdS/CuO heterojunction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นายนพณัฐ เดชะคำภู และนางสาวชนิภรณ์ จุ้ไชสง นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี–วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Heλios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu_{K_α} 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายฐิตินัย แก้วแดง
นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ
นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ
นายชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	X
สารบัญภาพ	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างของผลึก	8
2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI	8
2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	9
2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์	10
2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO	10
2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก	13
2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง	13
2.2.2.2 การระบุทิศทาง	13
2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 การหาขนาดของเกรน	16
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.5 การส่งผ่านแสง	18
2.6 รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ	20
2.6.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลความร้อน	20
2.6.2 รอยต่อแบบขั้นบันได	21
2.6.3 รอยต่อพี-เอ็นภายใต้สภาวะการไบแอสย้อนกลับ	24
2.7 ค่าความจุไฟฟ้า	25
2.8 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	28
2.9 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย	28
2.10 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ	29
2.10.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว	30
2.10.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	32
2.11 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง	34
2.12 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	37
2.12.1 การตอบสนองต่อแสง	37
2.12.2 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า	44
2.13 หลักการสปัตเตอริง	47
2.13.1 โกลวดิสชาร์จ	47
2.13.2 สปัตเตอริง	49
2.13.2.1 ยีลด์การสปัตเตอริง	49
2.13.2.2 ดีซีไดโอดสปัตเตอริง	50
2.13.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	51
2.14 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	55
2.14.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	55
2.14.2 การให้ความเย็นที่เป้า	55
2.14.3 การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป้า	55
2.14.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.15 คุณสมบัติของพลาสมา 60

2.15.1 หัววัดลางมัวร์ 60

2.15.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ 60

2.15.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน 62

2.15.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา 62

2.15.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก 63

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 64

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย 64

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 64

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 64

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้ 65

3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 65

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 65

3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น 66

3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง 66

3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ 66

3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง 67

3.2 ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 67

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 67

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะคอปเปอร์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 68

3.2.3 วิธีการทำรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 76

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลวดิสชาร์จ 76

4.2 ผลการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 79

4.3 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 84

4.4 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 85

4.4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO สไลด์ ซึ่งเตรียมโดยซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 85

4.4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 87

4.4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 88

4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 89

4.5.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง	92
4.5.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน	98
4.5.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	104
4.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	109
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	114
5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	114
5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	114
5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO	115
5.1.3 ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	116
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	116
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	118
เอกสารอ้างอิง	138
ภาคผนวก	142
ประวัตินักวิจัย	153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายีลด์ของธาตุชนิดต่างๆ	50
4.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน สปัตเตอริง	78
4.2	เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	80
4.3	ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็ค ทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	83
4.4	ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	84
4.5	ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	90
4.6	ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	98
4.7	ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	99
4.8	ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากสองวิธีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	109
4.9	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ได้จากการฟิตกราฟ ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอกซ์โพแนนเชียล	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคื้อรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	111
4.11	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS/CuO เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ	7
2.2	พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	8
2.3	โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS	9
2.4	โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ CdS	10
2.5	โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O	11
2.6	โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O	12
2.7	แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อย และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ ในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ ในระบบสุญญากาศ เฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu, Cu_2O และ CuO	12
2.8	การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก	14
2.9	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.10	ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
2.11	ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
2.12	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.13	ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	18
2.14	ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	21
2.15	ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นที่เป็นแบบขั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ก. ความเข้มข้นสารเจือ ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค. ประจุค้าง ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.16	โปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย	26
2.17	โครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบแอสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a	28
2.18	การลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบแอสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a	30
2.19	กระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบแอสไปหน้า V_a	31
2.20	ความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดสั้นภายใต้การไบแอสไปหน้า V_a	33
2.21	อัตราส่วนของ x_i/x_d เป็นฟังก์ชันกับแรงดันไบแอสย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อ p+ -n	36
2.22	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน	37
2.23	ก. อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากบริเวณผิว รอยต่อของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว ข. มิติของเซลล์แสงอาทิตย์และความกว้างของการแพร่พาหะข้างน้อย ค. ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่บริเวณผิวรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์	38
2.24	ก. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยแสดงการแจกแจง 3 บริเวณ (เส้นประแทนด้วยการตอบสนองในเชิงอุดมคติ) ข. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อต่างกัน	42
2.25	วงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.26	ก. ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่มีการฉายแสง ข. ภาพกลับหัวของรูป 2.26 (ก)	44
2.27	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชันท์	45
2.28	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของ โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์	46
2.29	โครงสร้างของการ โกลวดิสชาร์จ	48
2.30	การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า	49
2.31	การสปัตเตอริง โดยดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	51
2.32	การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	53
2.33	ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็ก โทรด โคแอคเชียลทรงกระบอก	54
2.34	ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	58
2.35	ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	59
2.36	แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	59
2.37	หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	60
2.38	แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	61
3.1	ภาพถ่ายเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรก โตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	65
3.2	ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α)	65
3.3	ภาพถ่ายอิเล็ก โตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟแวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	66
3.4	ภาพถ่ายอิเล็ก โตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	66
3.5	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	67
3.6	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	67
3.7	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.1 ภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ อาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ 77

4.2 ภาพถ่ายของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ 81

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ 82

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ 82

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ 83

4.6 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ 84

4.7 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 85

4.8 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 85

4.9 พีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 86

4.10 พีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 86

4.11 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 87

4.12 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.13	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	87
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_xO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1000	88
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร	88
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 500-1000 นาโนเมตร	89
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ กับ กระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO	90
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กับ กระแสไฟฟ้าของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO	91
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	93
4.20	กราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	93
4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	94
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/d(lnI) กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	97
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuOซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	99
4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง dV/d(lnI) กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	101
4.26	การหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	102
4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	102
4.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	103
4.29	กราฟอาร์เรเนียสของ n[lnI$_S$] เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	103
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	105
4.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	105
4.33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	106
4.34	กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	106
4.35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -dC/dlnf กับ f เพื่อหาค่า ω_0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	107
4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ (1000/T) ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ -dC/dlnf กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	107
4.37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ (1000/T) ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	108
4.38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับช่วงอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	108
4.39	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาภายใต้แรงดันไบอัส -0.5 กับ 0.3 โวลต์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.40	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	110
4.41	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	110
4.42	แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO	112
4.43	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบคเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 (Moller, 1993) จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI_2 เช่น CdTe, CdS, $CuInSe_2$ และ $CuInGaSe_2$ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดผลิตจากซิลิคอน ต้นทุนในการผลิตซิลิคอนความบริสุทธิ์สูงยังอยู่ในระดับสูงและส่วนใหญ่ผลิตป้อนให้กับอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กโทรนิกส์เป็นหลัก ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอระวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อาจเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต เนื่องจากธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นั้นมีปริมาณมากบนโลก ราคาถูก และไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากจึงมุ่งความสนใจมาศึกษาสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น เพื่อที่จะค้นคว้าหาวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมเพื่อทดแทนการใช้ซิลิคอนในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำคิวปริกออกไซด์ (cupric oxide; CuO) เป็นสารประกอบออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีความโดดเด่น กล่าวคือมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ (Al-Kuhaili, 2008) ซึ่งสอดคล้องดีกับช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ CuO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ส่วนคิวปรัสออกไซด์ (cuprous oxide; Cu_2O) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดประมาณ 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนเฟสเป็นไปเป็น CuO ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส (Al-Kuhaili, 2008; Gevorkyan et al., 2012) เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้สนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำคิวปริกออกไซด์ (CuO) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลีนิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟาเรดและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ CuO มีข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ CuO ไม่เป็นสารพิษ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีและเอ็น (Al-Kuhaili, 2008) เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ผิวเคลือบอิเล็กโตโครมิค (electrochromic coatings) ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี เป็นต้น อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการริเริ่มมีการวิจัยและพัฒนากันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ในหลากหลายรูปแบบเช่น p-Cu_2O/n-ZnO (Jeong et al., 2008), p-Cu_2O/n-CuO (Jayathilaka et al., 2015; Wijesundera, 2010), CuO/ZnO (Zainelabdin et al., 2012), และ p-CuO/n-Si (Gao et al., 2012) เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่ มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาย่อมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิคอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง p-Cu_2O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 % (Minami et al., 2011) จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบชาลโคจีไนด์ เช่น $CuAlO_2$/CdZnS (Gaewdang et al., 2011), p-$Cu_xSn_yS_zO$/n-ZnO (Nakashima and Ichimura, 2012) และ CuO/CdS (Gaewdang and Wongcharoen, 2015; ฐิตินัย, 2557) พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ CuO ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเคมี วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีรีแอกทีฟสปัตเตอริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) เป็นต้น แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มักจะมีเฟสของ Cu, Cu_2O ปรากฏร่วมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดี่ยวของฟิล์มบาง CuO สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ในช่วงอุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสม

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีข้อดีหลายประการคือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางต่ำ ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบางฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจากเป้าโลหะ Cu โดยการเลือกอัตราการไหลของก๊าซ Ar และ O_2 ที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์อันได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลพบว่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 4.20 และ 4.07 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ (Escorcia-Garcia et al., 2014; Chabane, 2015) ส่วนช่องว่างและแถบพลังงานของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 2.40 และ1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะคำนวณได้ว่าค่าออปเซ็ต (offset) ของแถบนำ (ΔE_C) และค่าออปเซ็ตของแถบนำวาเลนซ์ (ΔE_V) ของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO จะมีค่าเท่ากับ 0.13 และ 0.92 อิเล็กตรอนโวลต์ คาดว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) จะมีค่าประมาณ 1.09 อิเล็กตรอนโวลต์ ในเบื้องต้นคณะผู้วิจัยได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS ลงบนเซรามิกของ CuO และนำไปแอลนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ พบว่าเป็นรอยต่อที่มีสมบัติเรียงกระแสแบบไดโอดที่ดี โดยมีแรงดันทำงาน (working voltage) หรือแรงดันเทิร์น ออน (turn on voltage) ของกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 โวลต์ (Gaewdng and Wongcharoen, 2015; ฐิตินัย, 2557) ซึ่งสอดคล้องดีกับค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อดังกล่าว

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริง และประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้มีโครงสร้างเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และในเบื้องต้นจะทำการศึกษาสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO นี้โดยการวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ เช่นกระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ฟิลแฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นในขั้นต่อไปจะเป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป้าที่เป็นโลหะทองแดงความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่นอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน รวมทั้งเลือกความดันบรรยากาศของห้องสุญญากาศขณะทำการสปัตเตอร์เป็นต้น

1.2.2 เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศให้เคลือบบนกระจกสไลด์ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง FTO จากนั้นจึงเคลือบฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงลงบนฟิล์มบาง CdS เพื่อให้เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

1.2.3 ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้มีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิกบนฟิล์มบาง CuO โดยการเคลือบฟิล์มบาง Cu ด้วยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริง

1.2.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ต้นแบบโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า, วัดความจุ- แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สปกโตรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเคลือบบนกระจกสไลด์จากเป้าที่เป็นโลหะทองแดงความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่นอัตราส่วนผสมของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน ความดันบรรยากาศของห้องสุญญากาศขณะทำการสปัตเตอร์ และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็นต้น

1.3.2 เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนกระจกสไลด์ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง FTO เคลือบไว้แล้ว โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และฟิล์มบาง CdS นี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.3 เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และฟิล์มบาง CuO นี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuO ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS

1.3.5 ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเคลือบฟิล์มบาง Cu ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าเพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าฟิลแฟกเตอร์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น วัดความจุ- แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สปกโตรสโคปีของรอยต่อพี-เอ็น

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 พัฒนาระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงในห้องสุญญากาศความดันต่ำให้เหมาะสมที่จะเตรียมฟิล์มบาง CuO

1.4.2 เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงลงบนกระจกสไลด์ โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

1.4.3 เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนกระจกสไลด์ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง FTO เคลือบไว้แล้ว โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

1.4.4 เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และฟิล์มบาง CuO นี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

1.4.5 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdS และ CuO ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

1.4.6 ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS และ CuO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) รวมทั้งตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS

1.4.7 ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเคลือบฟิล์มบาง Cu ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง

1.4.8 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าเพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร, ค่าแรงดันวงจรเปิด, ค่าฟิลแฟกเตอร์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น รวมทั้งวัดความจุ- แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สปกโตรสโคปีของรอยต่อพี-เอ็น

1.4.9 วิเคราะห์และสรุปผล

1.4.10 เขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงลงบนกระจกสไลด์ โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

1.5.2 ทำให้ทราบถึงวิธีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO โดยการเคลือบฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงให้เคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และฟิล์มบาง CuO นี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร, ค่าแรงดันวงจรเปิด, ค่าฟิลแฟกเตอร์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

1.5.4 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปเผยแพร่ในวารสารและนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติได้

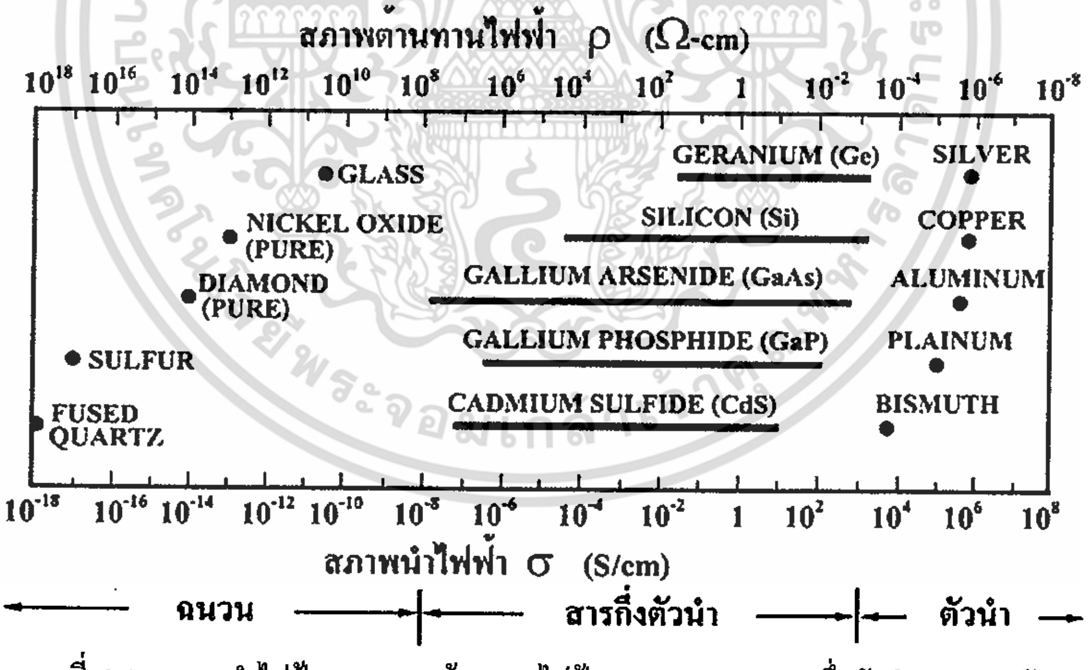
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18}-10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^{4}-10^{6} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

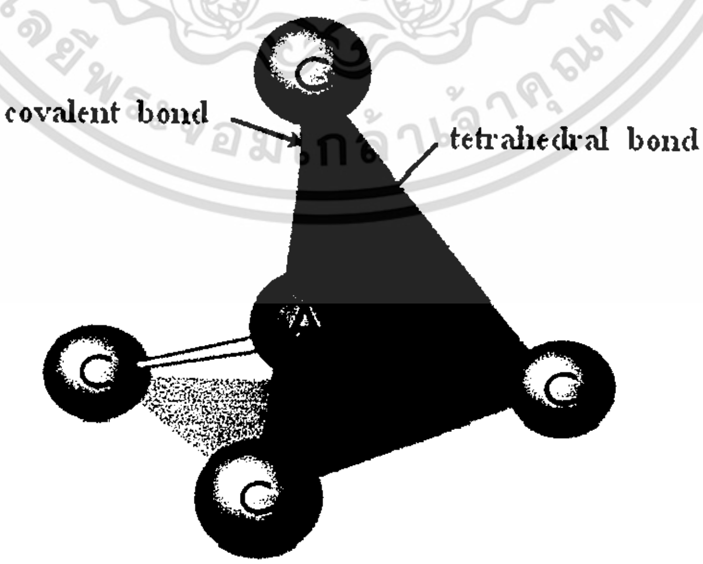
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของผลึก (งามนิตย์, 2531; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2005; Runyan, 1975)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันไปด้วย เช่น สมบัติการทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น

2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก ส่วนโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของแคดเมียมเซลิไนด์ (CdSe) จะมีลักษณะ 2 แบบ คือ เป็นคิวบิก (cubic structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล หรือแบบเวิร์ทไซท์ (hexagonal structure or wurtzite)

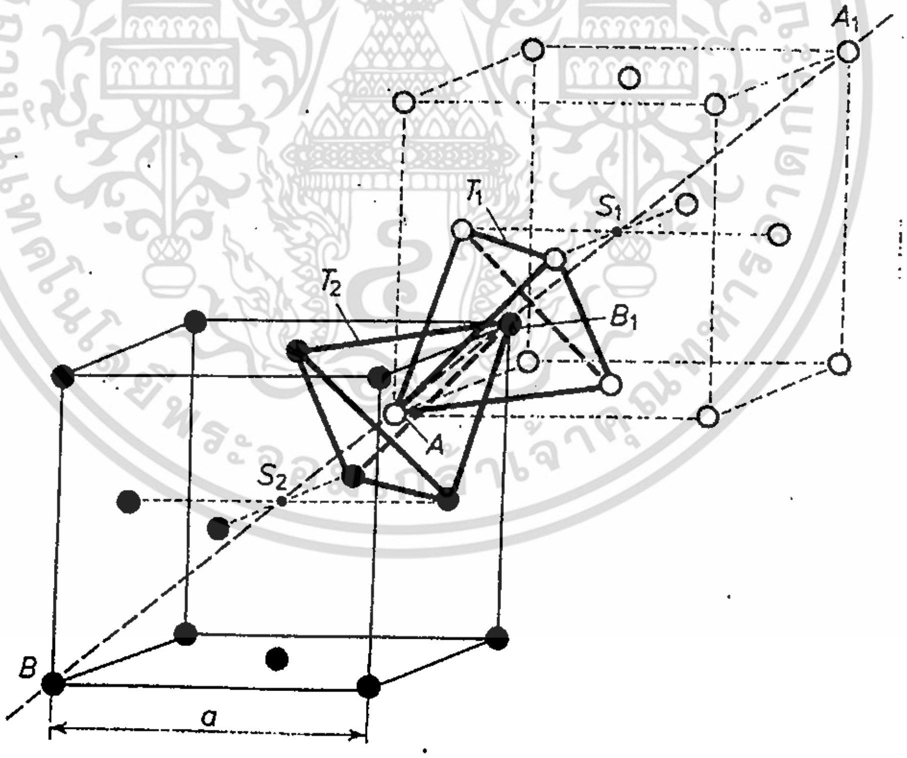


ภาพที่ 2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นในสารกึ่งตัวนำ CdTe อะตอมของธาตุ Cd จะอยู่ที่ตำแหน่ง (0,0,0), (0,1/2,1/2), (1/2,0,1/2) และ (1/2,1/2,0) ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Te จะอยู่ที่ (1/4,1/4,1/4), (1/4,3/4,3/4), (3/4,1/4,3/4) และ (3/4,3/4,1/4) สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญ เหมาะสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

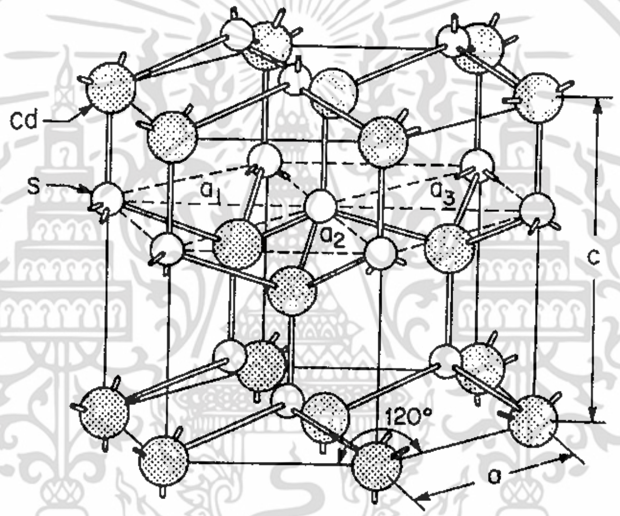


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ 5/8 ตามแนวแกน c (c - axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนท์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS และ ZnS เป็นต้น



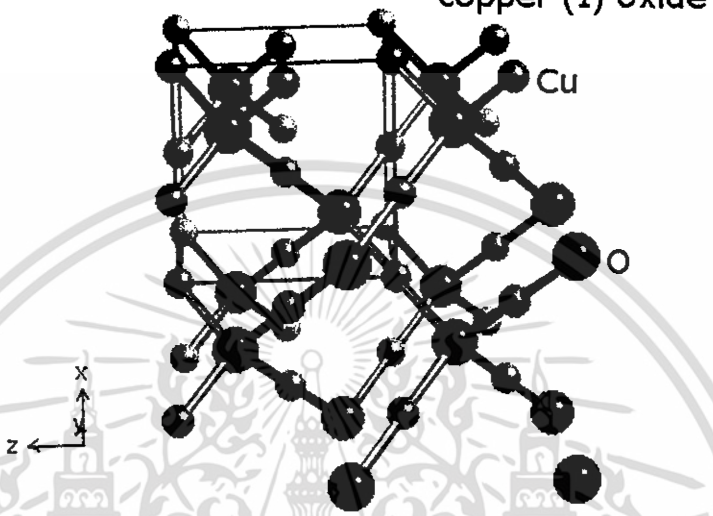
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ CdS

2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO (ฐิตินัย, 2557; Bugarinovic et al., 2011)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซับแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับซับแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ซับแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ซับแลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทแยงมุมของซับแลตทิซแรกเป็นระยะ 1/4 ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าคงที่โครงผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.26964 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรงแต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น สารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อราสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เคยนำไปทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยสารกึ่งตัวนำ Si



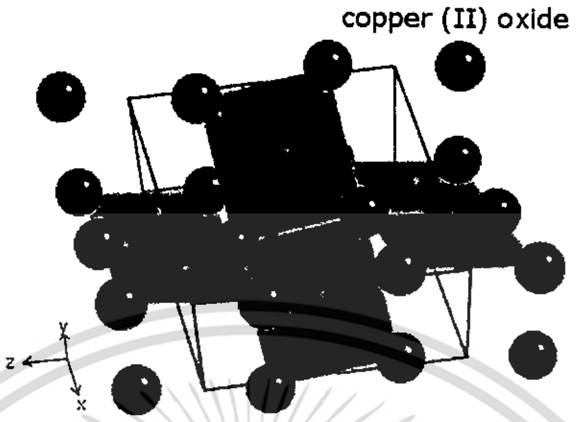
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O

สารกึ่งตัวนำ CuO มีสีดำ พบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuO จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือแต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,603 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ชื้นได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดโฟมมิกร้อน (formic acid) และละลายได้ได้ในกรดอะซิติกเดือด เป็นต้น สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็น สารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวินในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลงเมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

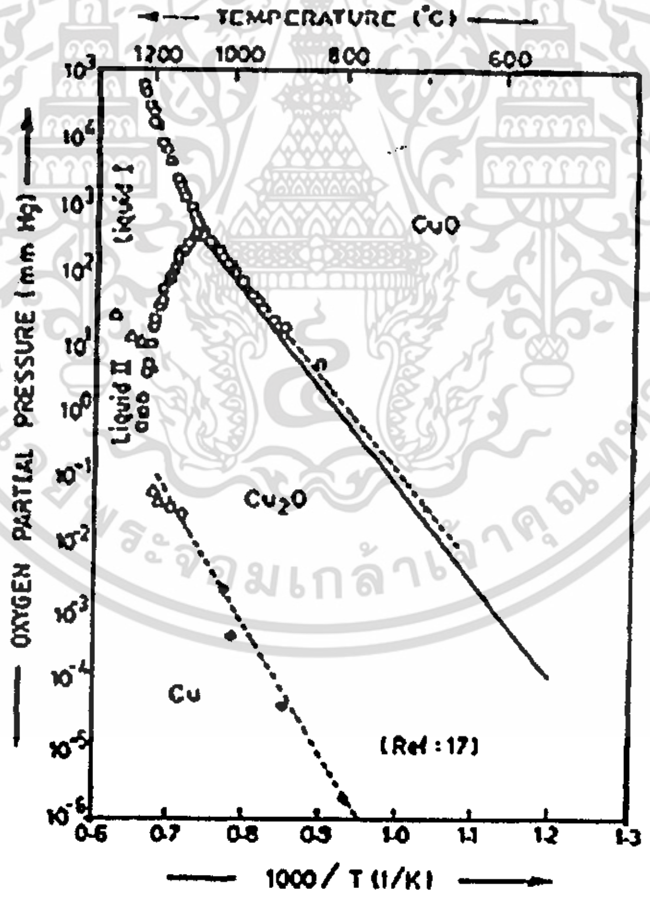
ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698 - 973 เคลวิน สารประกอบ CuO มีสีดำ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจรู้แก๊สชนิดต่างๆและฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะ ใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O



ภาพที่ 2.7 แผนภาพเฟสของสารประกอบ CuO แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศ เฟสที่เกิดขึ้นได้ คือCu, Cu_2O และ CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2551; งามนิตย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan,1975)

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยสังเกตเครื่องหมาย "," ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด (1,2,3) หมายความว่าเป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด x =1, y =2, z =3

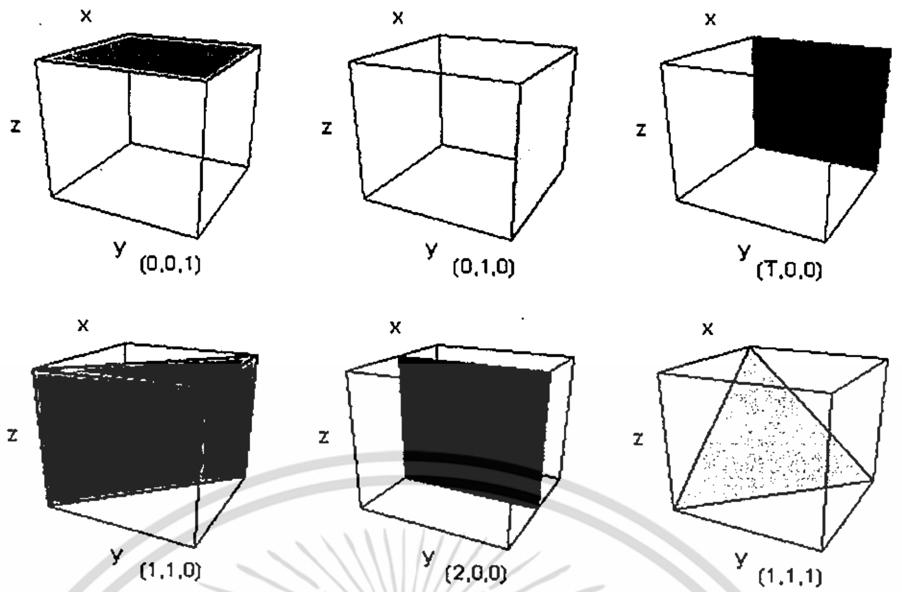
2.2.2.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น [u v w] โดยสังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยม และไม่มีเครื่องหมาย "," คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นวงเล็บก็จะใส่เครื่องหมาย "-" หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่นทิศทาง [$12\bar{1}$] แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย " , " คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด (1/0,1/1,1/0) หรือ จุด (∞,1,∞) นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; ฐิตินัย, 2530; งามนิตย์, 2531; Kittel, 2005; Runyan,1975; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย,2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตร-มิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็น ชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \tag{2.1}$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

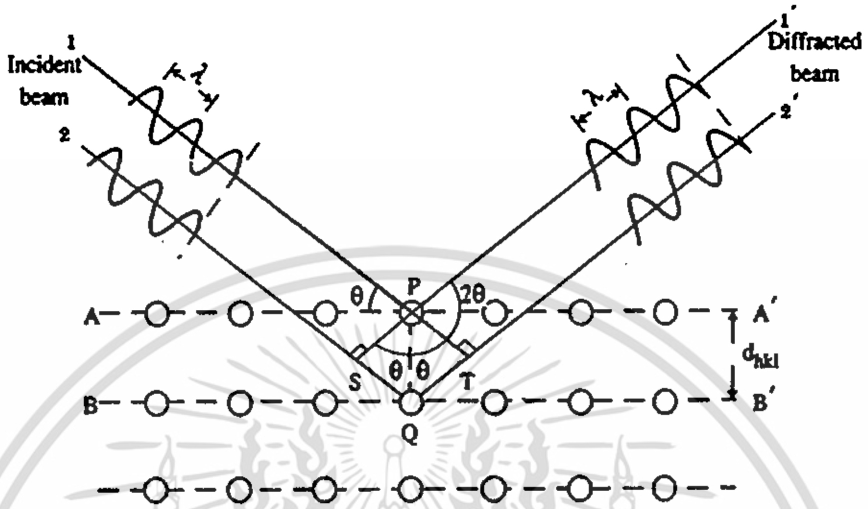
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...

2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟริ้วการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟริ้วการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบ ซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

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

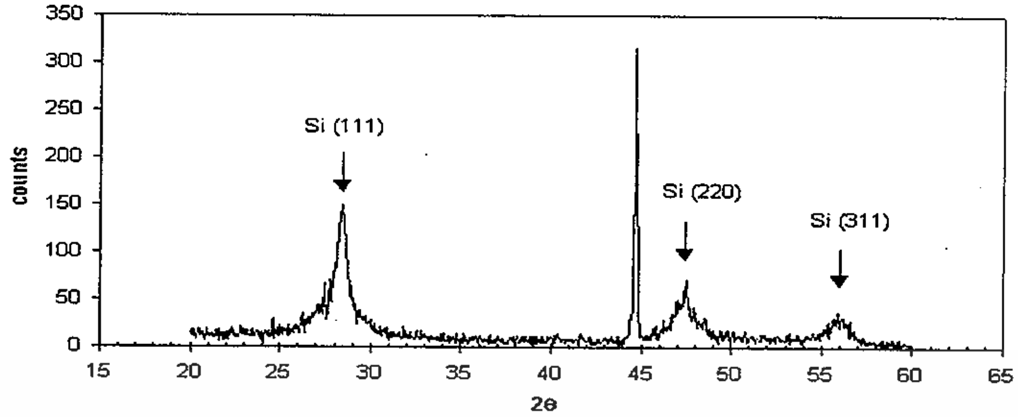
และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

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

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.3.2 การหาขนาดของเกรน

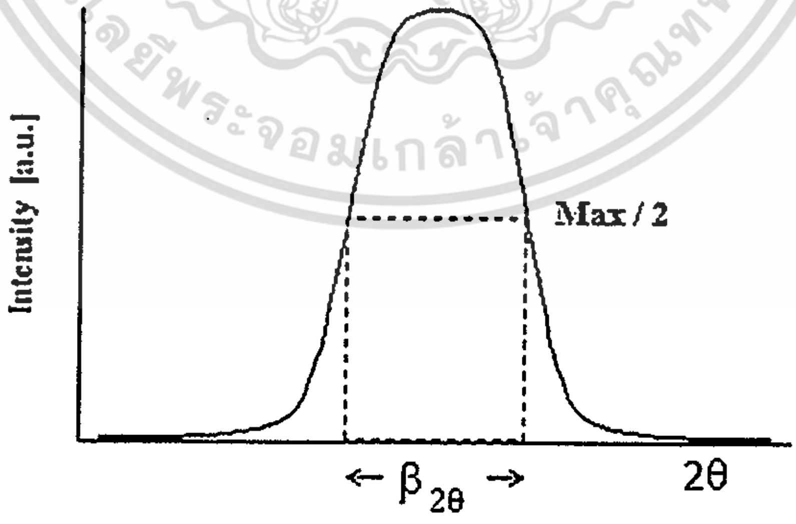
การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.11 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

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



ภาพที่ 2.11 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

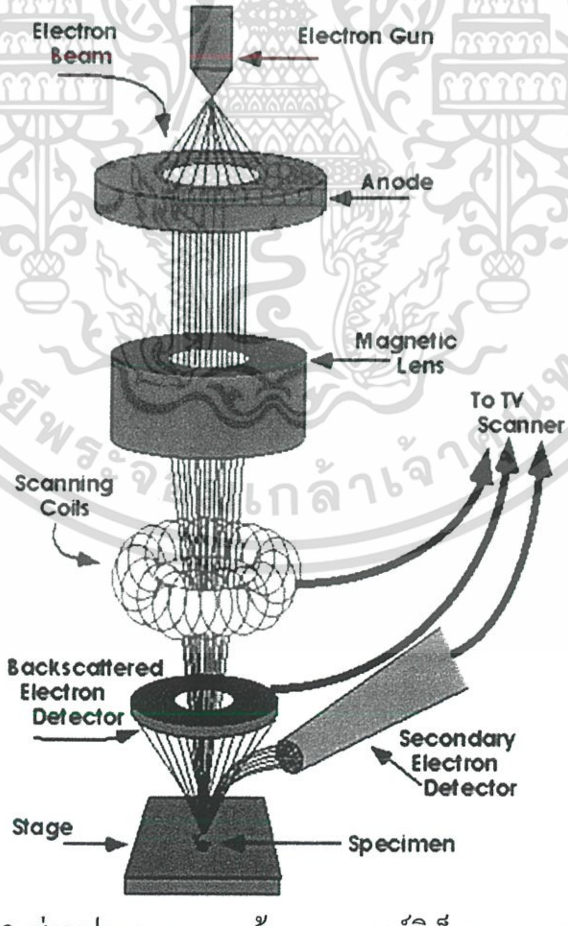
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2543; Schroder,1990; ฐิตินัย, 2551; งามนิตย์, 2552)

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 ชารเลส์ วิลเลียม แอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์ -วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



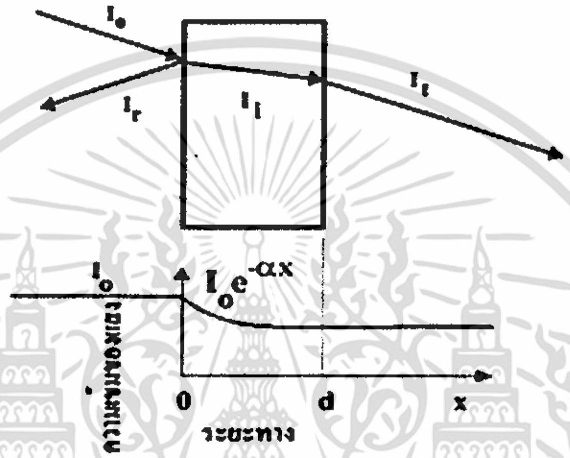
ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

142452

2.5 การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2531; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย , 2552)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ I_O คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง

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

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

หรือ

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดั
งสมการ

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_o) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

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

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

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

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ (p-n junction) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2557; Muller and Kamins, 1986; Singh, 1994; Schroder, 1990)

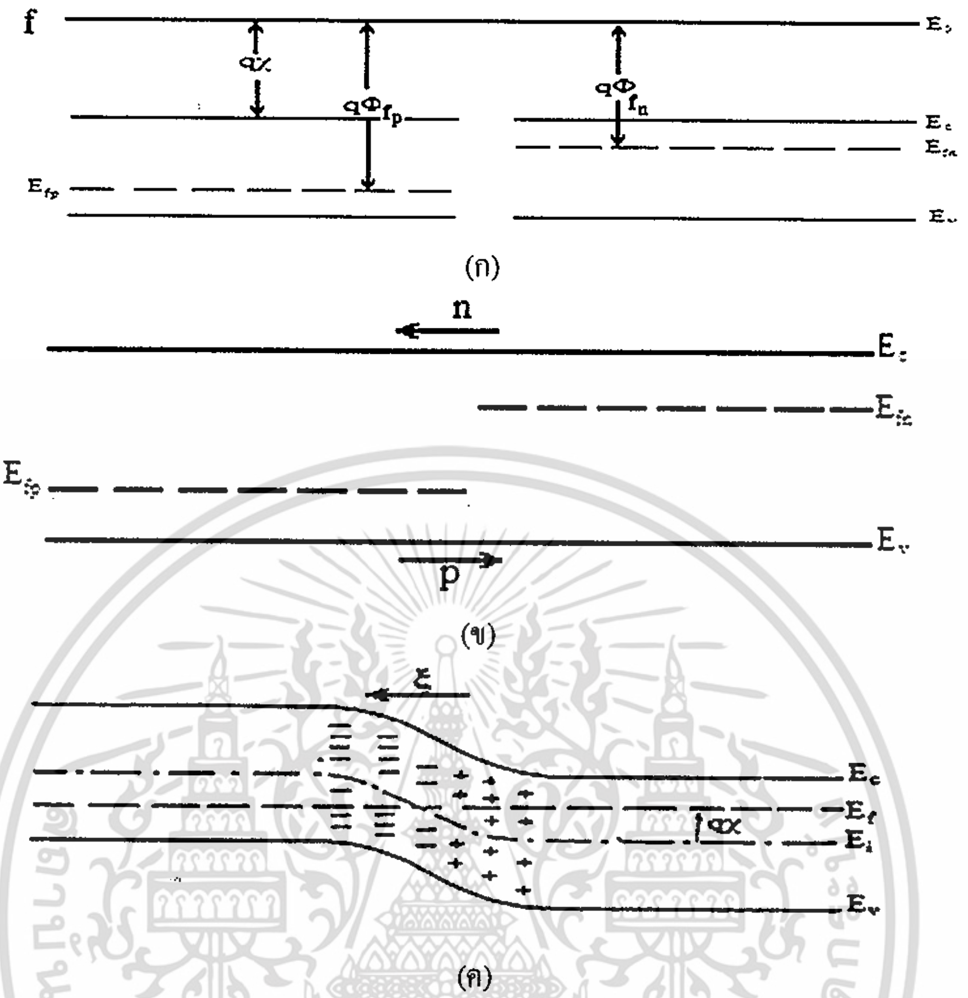
รอยต่อพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ดังกล่าวนี้จะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญๆ ในปัจจุบันมีดังนี้คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอิพิแท็กซี (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

2.6.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึมไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่ซึมไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ซึมของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้านั่นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่า เขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.14 โดยที่รูป 2.14 (ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.14 (ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ค) โดยที่ ϕ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

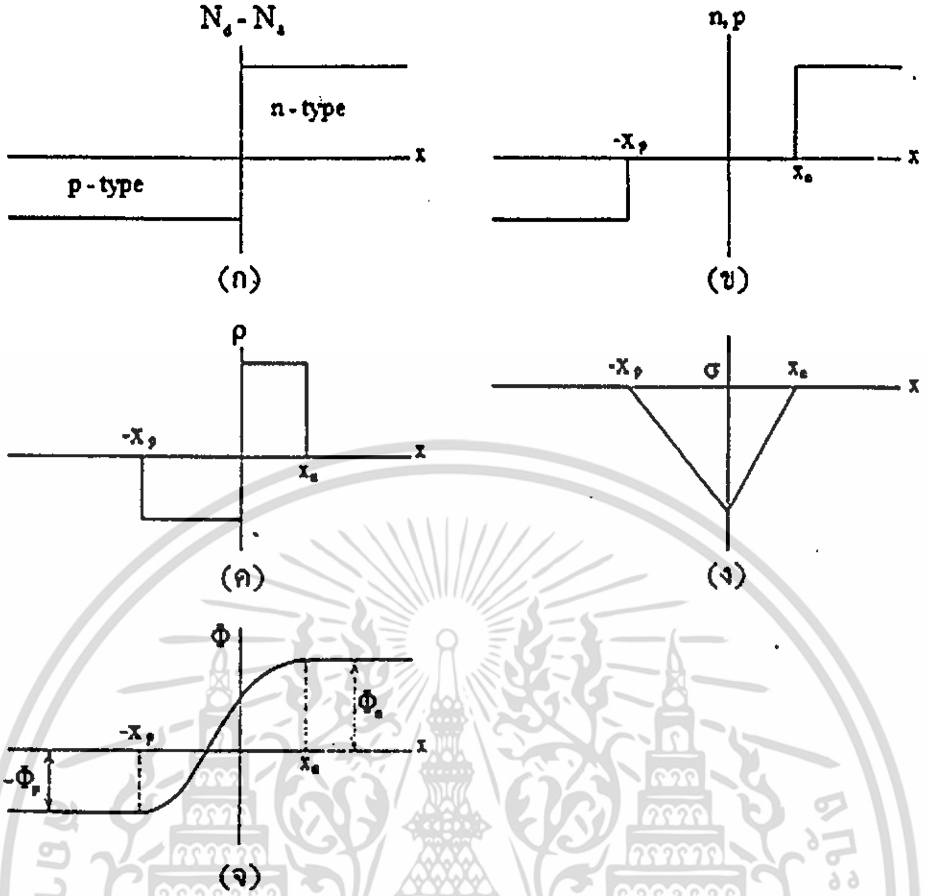


ภาพที่ 2.14 ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น
ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

2.6.2 รอยต่อแบบขั้นบันได (step junction)

รอยต่อแบบขั้นบันไดเป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่เป็นแบบขั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกระยะทาง

ก. ความเข้มข้นสารเจือ

ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ

ค. ประจุค้าง

ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \qquad (2.14)$$

แล้ว

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n \qquad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qNa}{\epsilon_s}(x - x_p); -x_p < x < 0 \tag{2.16}$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ $x = 0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \tag{2.17}$$

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่า เขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อแบบขั้นบันไดด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรต สมการที่ (2.15) เทียบกับ x นั่นคือ

$$\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x_n - x)^2; 0 < x < x_n \tag{2.18}$$

โดยที่

$$\phi_n = \frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \tag{2.19}$$

ในทำนองเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_p)^2; -x_p < x < 0 \tag{2.20}$$

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q}\ell n\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_p คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \qquad (2.22)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันในตัว (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก $\approx 10^{19}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.22) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่ากรณีที่มีการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราวๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในอะตอมของธาตุ Si ดังนั้นในรอยต่อ p^+-n ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนั้นคือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q}\ell n\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \qquad (2.23)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q}\phi_i\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.24)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.6.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ

ถ้าให้แรงดันไฟ V_a แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ (2.25) จะถูกแทนที่ด้วย $(\phi_i - V_a)$

$$x_d = x_n + x_p = \left[\frac{2\epsilon_s}{q}\phi_i\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)(\phi_i - V_a)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า V_a มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ V_a จากรูปที่ 2.15 (ง) สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

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

ดังนั้น

$$\xi_{max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \tag{2.26}$$

2.7 ค่าความจุไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อ จะแสดงอยู่ในรูปของประจุ Q_s (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

$$Q_s = qN_d x_n = qN_a x_p \tag{2.27}$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d\frac{dx_n}{dV_a} = qN_a\frac{dx_p}{dV_a} \tag{2.28}$$

แต่เนื่องจาก $x_p = (N_d / N_a)x_n$ และ $x_d = x_n + x_p$ รวมทั้งพิจารณาสมการที่ (2.25) จะได้ว่า

$$\frac{dx_n}{dV_a} = \frac{1}{N_d}\left[\frac{\epsilon_s}{2q\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)(\phi_i - V_a)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.29}$$

และ

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s}{2q\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)(\phi_i - V_a)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.30}$$

ในกรณีที่ $|V_a|$ มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบขั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ V_a ถ้าแทนสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.30) จะได้ว่า $C=\epsilon_s/x_d$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสลับสัญญาณขนาดเล็ก

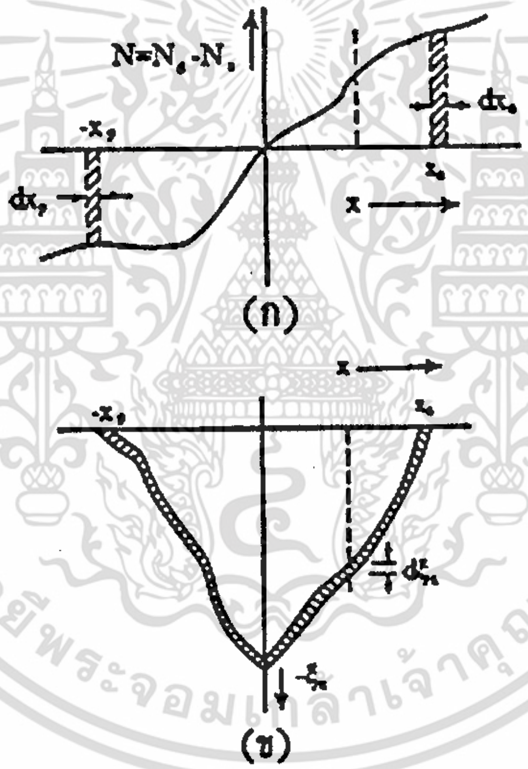
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอในช่วง $-x_p$ ถึง x_n ดังรูปที่ 2.16 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ Q ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง x และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ x_n จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = q\int_{x}^{x_n} N dx \tag{2.31}$$

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

$$-\xi(x) = \frac{1}{\epsilon_s}\int_{x}^{x_n} qNdx = \frac{Q}{\epsilon_s} \tag{2.32}$$



ภาพที่ 2.16 โปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ

ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ

ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.16 (ข) เมื่อแรงดันไฟย้อนกลับ V_a มีค่าเปลี่ยนไป dV_a ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป dx_n และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณตั้งแต่ x จนถึง x_n จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n)dx_n \tag{2.33}$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด x จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s}N(x_n)dx_n \tag{2.34}$$

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ ξ_x กับ x จะสัมพันธ์กับ $\phi_i - V_a$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.16 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s}dQ \tag{2.35}$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \tag{2.36}$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.36) เทียบกับ x_n คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)^2}\left(1 + \frac{dx_p}{dx_n}\right) \tag{2.37}$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากันนั่นคือ

$$|dQ| = |qN(-x_p)dx_p| = qN(x_n)dx_n \tag{2.38}$$

และ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s}\left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|}\right) \tag{2.39}$$

แทนค่า dx_n ของสมการที่ (2.39) ลงในสมการที่ (2.33) จะได้ว่า

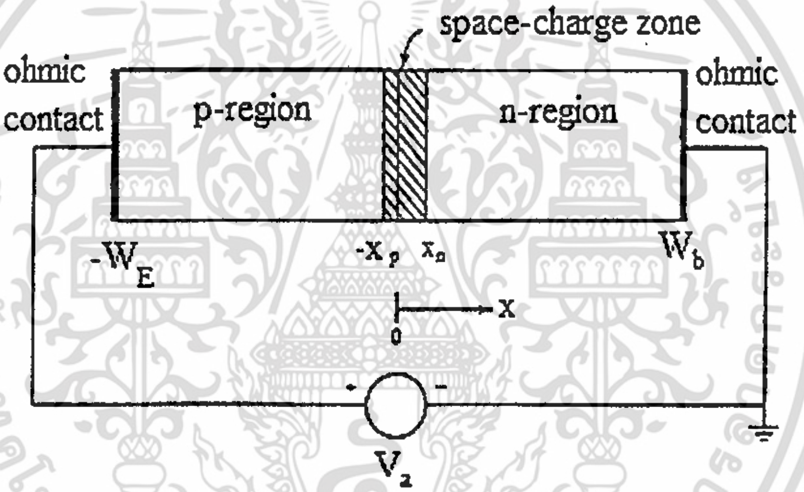
$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s\,(dC/dV_a)}\left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|}\right) \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนัก แล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ (2.40) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบขั้นข้างเดียว (one sided step junction)

2.8 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2557)

จากรูปที่ 2.17 แสดงการป้อนแรงดันไฟตรง V_a ให้กับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน V_a แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ (ϕ_i-V_a) ถ้า V_a มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่าการไบอัสไปหน้า แต่ถ้า V_a มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า V_a ในช่วงของ V_a ขนาดหนึ่ง



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a

2.9 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย

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

$$n_{po}(-x_p) = n_{no}(x_n)\exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right)$$

$$= N_d(x_n)\exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_{no}(x_n) = p_{po}(-x_p)\exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right)$$

$$= N_a(-x_p)\exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \tag{2.42}$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำจะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n)\exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.43}$$

และ

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p)\exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.44}$$

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน n' และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน p' ที่เกิดขึ้นคือ

$$n' \equiv n - n_0 \tag{2.45}$$

$$p' \equiv p - p_0 \tag{2.46}$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{po}(-x_p)\left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kT}\right) - 1\right] \tag{2.47}$$

และ

$$p'_n(x_n) = p_{no}(x_n)\left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1\right] \tag{2.48}$$

2.10 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอน โดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อ คือ

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - (G - R)$$

$$= D_p\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - U$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} \qquad (2.49)$$

ในสภาวะคงตัว $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ แล้ว จะได้สมการเป็น

$$0 = D_p \frac{d^2 p_n'}{dx^2} - \frac{p_n'}{\tau_p} \qquad (2.50)$$

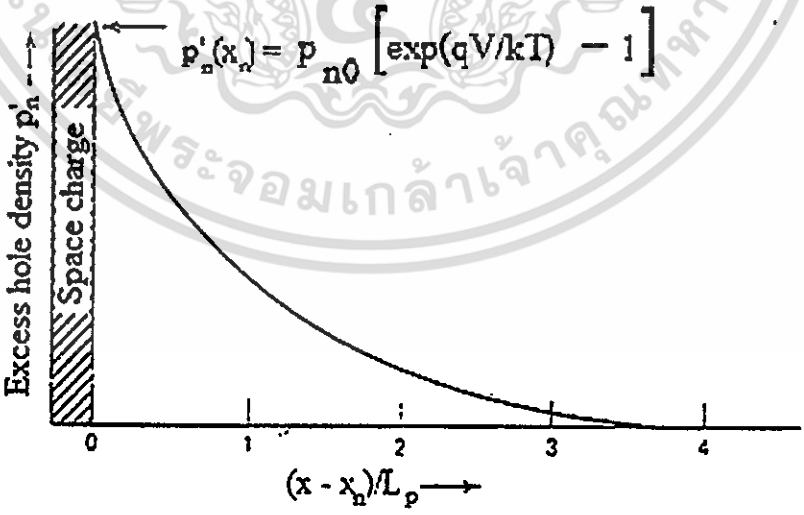
ผลเฉลยของสมการที่ (2.50) คือ

$$p_n'(x) = A\exp\left(-\frac{(x - x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B\exp\left(\frac{(x - x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \qquad (2.51)$$

2.10.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-base diode characteristics)

จากรูปที่ 2.18 ถ้า W_B มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกกรณีนี้ว่าไดโอดยาว เนื่องจาก P_n' ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง x ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว B ในสมการที่ (2.51) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$P_n'(x) = p_{no}[e^{(qV_a/kT)} - 1]e^{-(x-x_n)/L_p} \qquad (2.52)$$



ภาพที่ 2.18 การลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบแอสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a

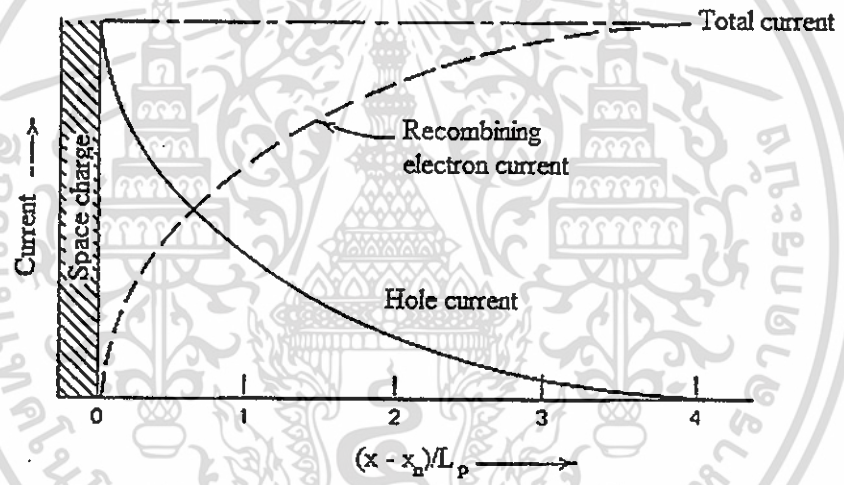
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสาร จะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้น เนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมาก สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

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

$$= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p}\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right]e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.53)$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ $x = x_n$ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง x เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 กระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบแอสไปหน้า V_a

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

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n}\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right]e^{(x+x_p)/L_n} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x ในสมการที่ (2.54) จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อx ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็น ไปสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้น กระแสสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ (2.53) รวมกับสมการที่ (2.54) นั่นคือ

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

$$= J_0[e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.55)$$

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

และเรียก J_0 ว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

2.10.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง W_B และ W_E สั้นกว่า ความยาวแพร่ซึมของโฮล L_p และของอิเล็กตรอน L_n จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปในเนื้อสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเนื้อสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง W_B และW_E สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.51) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้ว่า

$$p_n'(x) = A' + B'\frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.56)$$

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

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

$$B' = \frac{-A'L_p}{(W_B - L_n)} \quad (2.57)$$

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ จะได้ว่า $$p_n'(x_n) = p_{no}[e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.58)$$

และที่ตำแหน่ง $x = x_n$ นี้สมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.56) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

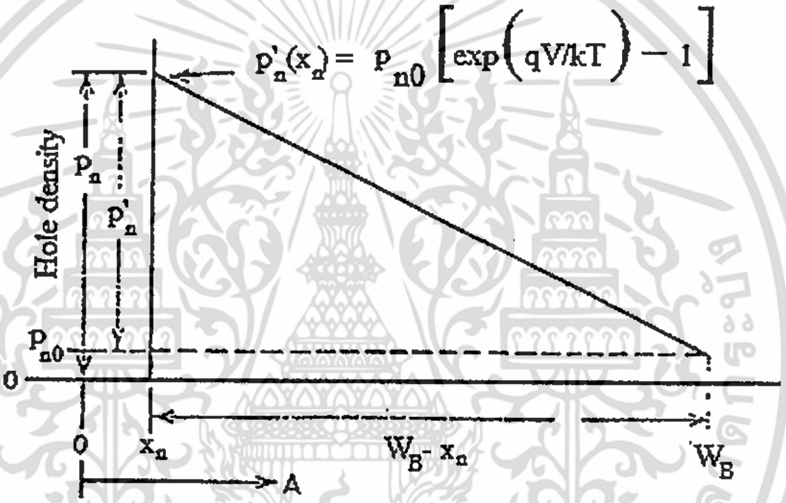
$$A' + B'\frac{(x_n - x_n)}{L_p} = p_{no}[e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

แล้ว
$$A' = p_{no}[e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.59)$$

แทนสมการที่ (2.57) และสมการที่ (2.59) ลงในสมการที่ (2.56) จะได้

$$p_n'(x) = p_{no}[e^{(qV_a/kT)} - 1]\left(1 - \frac{x - x_n}{W_B'}\right) \quad (2.60)$$

เมื่อ $W_B' = W_B - x_n$ ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.20



ภาพที่ **2.20** ความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็น ของไดโอดสั้น ภายใต้การไบแอสไปหน้า V_a

จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮล จะได้ว่า

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

$$= qD_p\frac{n_i^2}{N_d W_B'}\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right] \quad (2.61)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้น คือ

$$J_t = qn_i^2\left(\frac{D_p}{N_d W_B'} + \frac{D_n}{N_a W_E'}\right)\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right]$$

$$= J_0\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right] \qquad (2.63)$$

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

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริงอาจจะเป็นรูปแบบการผสมของไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ซึ่งการหาค่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.55) และสมการที่ (2.63) ภายใต้การไบอัสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ V_a เนื่องจากเป็นการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อ แต่ภายใต้การไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสอิ่มตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากเป็นการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิ่มตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.11 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุ

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังสมการที่ (2.55) และสมการที่ (2.63) นั้นยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสที่อาจจะลดลงภายใต้การไบอัสไปหน้า เนื่องจากพาหะอิสระสูญหายไปบางส่วนซึ่งเกิดจากกลไกการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวในบริเวณประจุค้าง ในทางกลับกันพาหะอาจถูกสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ยังผลให้กระแสอิ่มตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของช็อกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัวสุทธิ จะได้ว่า

$$U = n_i^2 \frac{\left[e^{(qV_a/kT)} - 1\right]}{\left[p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)\right]\tau_0} \qquad (2.64)$$

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุค้างคือ

$$J_r = q\int_{-x_p}^{x_n} U dx \qquad (2.65)$$

ถ้าประมาณว่า $E_t \approx E_i, p = n = n_i \exp(qV_a/2kT)$ **แล้วแก้สมการ (2.64) จะกลายเป็น**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U=\frac{n_i^2\left[e^{(qV_a/kT)}-1\right]}{2n_i\left[e^{(qV_a/kT)}+1\right]\tau_0} \tag{2.66}$$

แทนสมการที่ (2.66) ลงในสมการที่ (2.65) จะได้

$$J_r=\frac{qx'n_i^2\left[e^{(qV_a/kT)}-1\right]}{2n_i\left[e^{(qV_a/kT)}+1\right]\tau_0}$$

$$\approx\frac{qx'n_i}{2\tau_0}\exp(qV_a/2kT) \tag{2.67}$$

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

$$\frac{J_t}{J_r}=\frac{2n_i}{x_d}\left[\frac{L_n}{N_a}+\frac{L_p}{N_d}\right]\exp(qV_a/2kT) \tag{2.68}$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้น ยังผลให้ J_t ยิ่งเด่นกว่า J_r ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านเดียวที่มี L_n= 60 ไมโครเมตร, x_d= 0.25ไมโครเมตร, N_a= 10^{16} ลูกบาศก์เซนติเมตร และ J_t จะมีค่ามากกว่า J_r เมื่อ V_a มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทางตัวเศษของสมการที่ (2.64) จะมีค่าเป็น $-n_i^2$ ยังผลให้ U มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุค้าง บริเวณความกว้าง x_i ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุค้าง x_d เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข $p=n<<n_i$ ซึ่งจะทำให้ U ของสมการที่ (2.64) กลายเป็น

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

แทนค่า U ลงในสมการที่ (2.65) จะได้ว่า

$$J_g=\frac{qn_ix_i}{2\tau_0} \tag{2.69}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิด การรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ E_i ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ p^+ - n บริเวณประจุค้างจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้าง x_d และบริเวณ x_i ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุดจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

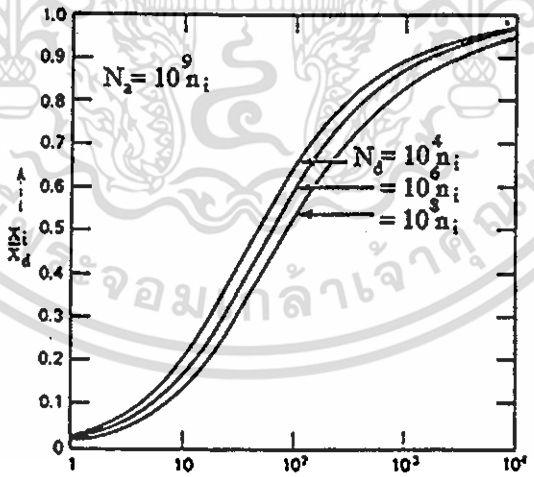
$$x_d = \left[\frac{2\in_s}{qN_d}(\phi_i - V_a)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{2\in_s kT}{q^2 N_d}\left(\ell n\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) - \frac{qV_a}{kT}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.70)$$

และ

$$x_i = \left(\frac{2\in_s kT}{q^2 N_a}\right)^{\frac{1}{2}}\left[\left(\ell n\left(\frac{N_d}{n_i}\right) - \frac{qV_a}{kT}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\ell n\frac{N_d}{n_i}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (2.71)$$

ซึ่ง V_a คือแรงดันไบอัส ($V_a < 0$) ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง x_d และ x_i จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความแตกต่างระหว่าง x_d และ x_i จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.21 อัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อแบบขั้นบันไดด้านเดียว p^+ - n



ภาพที่ 2.21 อัตราส่วนของ x_i/x_d เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อ p^+-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

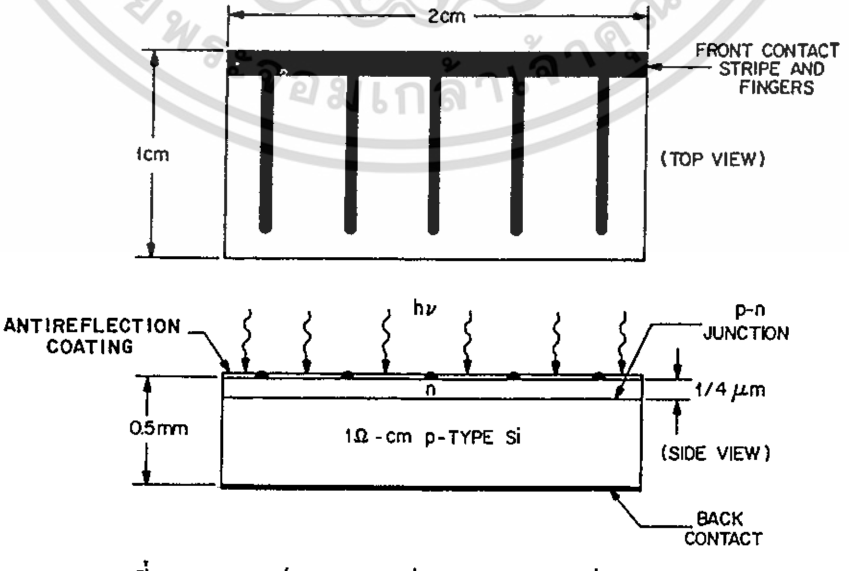
2.12 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction solar cell) (Sze, 1981; ยุทธ, 2530; ฐิตินัย, 2544, ฐิตินัย, 2552)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน มีความสำคัญต่อเซลล์แสงอาทิตย์ทุกชนิด ทั้งในดาวเทียม อวกาศหรือบนพื้นดิน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆ (flate-pate solar cell) ทำมาจากซิลิกอน มีช่วงอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพสูง และมีความน่าเชื่อถือได้ ตัวอย่างเช่น ไม่เกิดความเสื่อมคุณภาพได้ง่ายเมื่อมีการแผ่รังสีอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากภายนอก นอกจากประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือแล้วจึงต้องคำนึงถึงราคาด้วยเพื่อที่จะได้แข่งขันกับแหล่งพลังงานอื่นๆ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆจำเป็นต้องลดราคาการผลิตให้มากขึ้นเท่าที่จะเป็นไปได้และในขณะเดียวกันต้องมีประสิทธิภาพอย่างน้อยสุด 10 เปอร์เซ็นต์ จึงมีการใช้เทคนิคเอดจ์-ดีไฟน์ ฟิล์ม-เฟด-โกรท์ (edge-defined film-fed growth : EFG), กระบวนการริบบอนทูริบบอน (ribbon to ribbon)และกระบวนการเดนไดรท์-เวบ (dendrite-web) การใช้ผลึกพหุพันธ์ของ ซิลิกอนบนเซรามิกส์หรือบนซิลิกอนเกรดถลุงแร่ (metallurgical-grade silicon) เป็นการช่วยลดราคาแผ่นฐานรองรับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟต์และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆ

2.12.1 การตอบสนองต่อแสง (spectral response)

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.22 ประกอบด้วย รอยต่อพี-เอ็นชนิดตื้น ด้านบนสุดเป็นขั้วสัมผัสที่ผิวหน้า (front contact) แบบสไตร์ป (stripe) และฟิงเกอร์ (finger) มีชั้นต้านการสะท้อนแสงเคลือบอยู่ และด้านล่างสุดเป็นขั้วสัมผัสด้านหลัง (back contact)



ภาพที่ 2.22 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

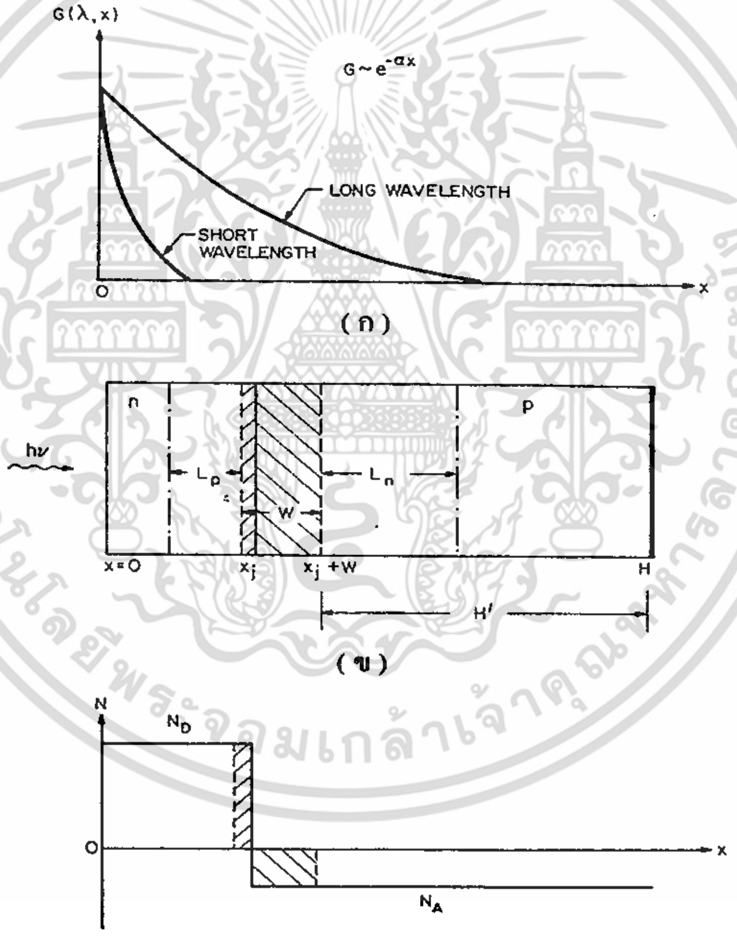
เมื่อแสงความยาวคลื่นเดียว (λ) ตกกระทบบนขั้วสัมผัสด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เกิดกระแสจากแสงและการตอบสนองต่อแสงเกิดขึ้น อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ระยะทาง x จากผิวด้านบน ดังรูปที่ 2.33 แสดงดังสมการที่ (2.72)

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)x] \tag{2.72}$$

เมื่อ α(λ) คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

F(λ) คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีต่อหนึ่งหน่วยความกว้างแถบสเปกตรัมแสง

R(λ) คือ สัดส่วนของจำนวนโฟตอนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า



ภาพที่ 2.23 ก. อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว

ข. มิติของเซลล์แสงอาทิตย์และความกว้างของการแพร่พาหะข้างน้อย

ค. ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่บริเวณผิวรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ฉีดกระแสเข้าไปน้อย ในระบบ 1 มิติ ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังสมการที่ (2.73) และ (2.74)

สำหรับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} + \frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} = 0 \tag{2.73}$$

สำหรับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} = 0 \tag{2.74}$$

ความหนาแน่นของกระแส ดังสมการที่ (2.75) และ (2.76)

$$J_n = q\mu_n n_p \xi + qD_n \frac{dn_p}{dx} \tag{2.75}$$

$$J_p = q\mu_p p_n \xi - qD_p \frac{dp_n}{dx} \tag{2.76}$$

เมื่อ J_n คือ ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนตรงบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะกับฐานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

J_p คือ ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนตรงบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะกับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อมีการเจืออย่างคงที่ในแต่ละด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 2.23 (ข) และ 2.23 (ค) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภานนอกเขตปลอดพาหะ (depletion region) ในกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีรอยต่อแบบเอ็น-พีโดยมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่ด้านหน้ารับแสงและสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นฐานด้านล่าง จากสมการที่ (2.72) ,(2.74) และ (2.76) เขียนใหม่ ได้ดังสมการที่ (2.74)

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha F(1-R)\exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} = 0 \tag{2.77}$$

สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ ดังสมการที่ (2.78)

$$p_n - p_{no} = A\cosh(x/L_p) + B\sinh(x/L_p) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1}\exp(-\alpha x) \tag{2.78}$$

เมื่อ $L_p = (D_p\tau_p)^{1/2}$ คือ ค่าความยาวแห่งการแพร่ มีเงื่อนไขของขอบเขต 2 ข้อ บริเวณพื้นผิว จะมีความเร็วของการรวมตัว (S_p) ดังสมการที่ (2.79)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_p \frac{d(p_n - p_{no})}{dx} = S_p(p_n - p_{no}) \qquad \text{เมื่อ } x = 0 \tag{2.79}$$

บริเวณขอบของเขตปลอดพาหะ เมื่อความหนาแน่นของพาหะที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมากเนื่องจาก สนามไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะ ดังสมการที่ (2.80)

$$p_n - p_{no} \cong 0 \qquad \text{ที่ } x = x_j \tag{2.80}$$

และความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p_n - p_{no} = [\alpha F(1-R)\tau_p/(\alpha^2 L_p^2 - 1)] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p\right)\sinh\left(\frac{x_i - x}{L_p}\right) + e^{-\alpha x_j}\left(\frac{S_p L_p}{D_p}\sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p}\right)}{(S_p L_p/D_p)\sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} - e^{-\alpha x}\right] \tag{2.81}$$

ความหนาแน่นของกระแสจากแสงของโฮลที่ขอบของเขตปลอดพาหะ คือ

$$J_p = -qD_p\left(\frac{dD_n}{dx}\right)_{x_j} = \left[qF(1-R)\alpha L_p/\left(\alpha^2 L_p^2 - 1\right)\right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p\right) - e^{-\alpha x_j}\left(\frac{S_p L_p}{D_p}\cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p}\right)}{\left(S_p L_p/D_p\right)\sin\left(x_j/L_p\right) + \cosh\left(x_j/L_p\right)} - \alpha L_p e^{-\alpha x_j}\right] \tag{2.82}$$

กระแสจากแสงได้จากบริเวณชั้นด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าบริเวณนี้มีช่วงชีวิต สภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการเจือมีค่าคงที่ การหากระแสจากแสงของอิเล็กตรอนมีการรวมตัวกันที่ฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ จากสมการที่ (2.72), (2.73), และ (2.75) จะได้ว่า

$$n_p - n_{po} \cong 0 \qquad \text{ที่} \qquad x = x_i + W \tag{2.83}$$

$$S_n\left(n_p - n_{po}\right) = -D_n dn_p/dx \qquad \text{ที่} \qquad x = H \tag{2.84}$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของเขตปลอดพาหะ และ H คือ ความกว้างของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด

จากสมการที่ (2.83) ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยที่เพิ่มขึ้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่บริเวณขอบของเขตปลอดพาหะ ส่วนสมการที่ (2.84) แสดงว่าการรวมตัวของพาหะอิสระที่ผิวด้านหลังจะเกิดที่ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอห์มมิก ใช้เงื่อนไขขอบเขตนี้ จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฐานที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีการเจือสม่ำเสมอ คือ

$$n_p - n_{po} = \frac{\alpha F(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L^2 - 1}\exp\left[-\alpha(x_j + W)\right]\left\{\cosh\left(\frac{x - x_j - W}{L_n}\right) - e^{-\left[\alpha(x - x_j - W)\right]}\right.$$
$$- \frac{(S_n L_n/D_n)\left[\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')\right] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{(S_n L_n/D_n)\sinh(H'/L_n)}$$
$$\left.\times \sinh\left(\frac{x - x_j - W}{L_n}\right)\right\} \quad (2.85)$$

และความหนาแน่นกระแสจากแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้จากขอบของเขตปลอดพาหะ

$x = x_j + W$ คือ

$$J_n = qD_n\left(\frac{dn_p}{dx}\right)_{x_j + W} = \frac{qF(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1}\exp\left[-\alpha(x_j + W)\right] \times \left\{\alpha L_n - \right.$$
$$\left.\frac{(S_n L_n/D_n)\left[\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')\right] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{(S_n L_n/D_n)\sinh(H'/L_n) + \cosh(H'/L_n)}\right\} \quad (2.86)$$

เมื่อ H' คือ บริเวณที่เป็นกลางในชั้นฐานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูป 2.23(ข) สมการที่ (2.86) มีสมมุติฐานว่ามีช่วงชีวิต สภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการเจือมีค่าคงที่ ถ้าสิ่งเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของระยะทาง จำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์เชิงตัวเลข

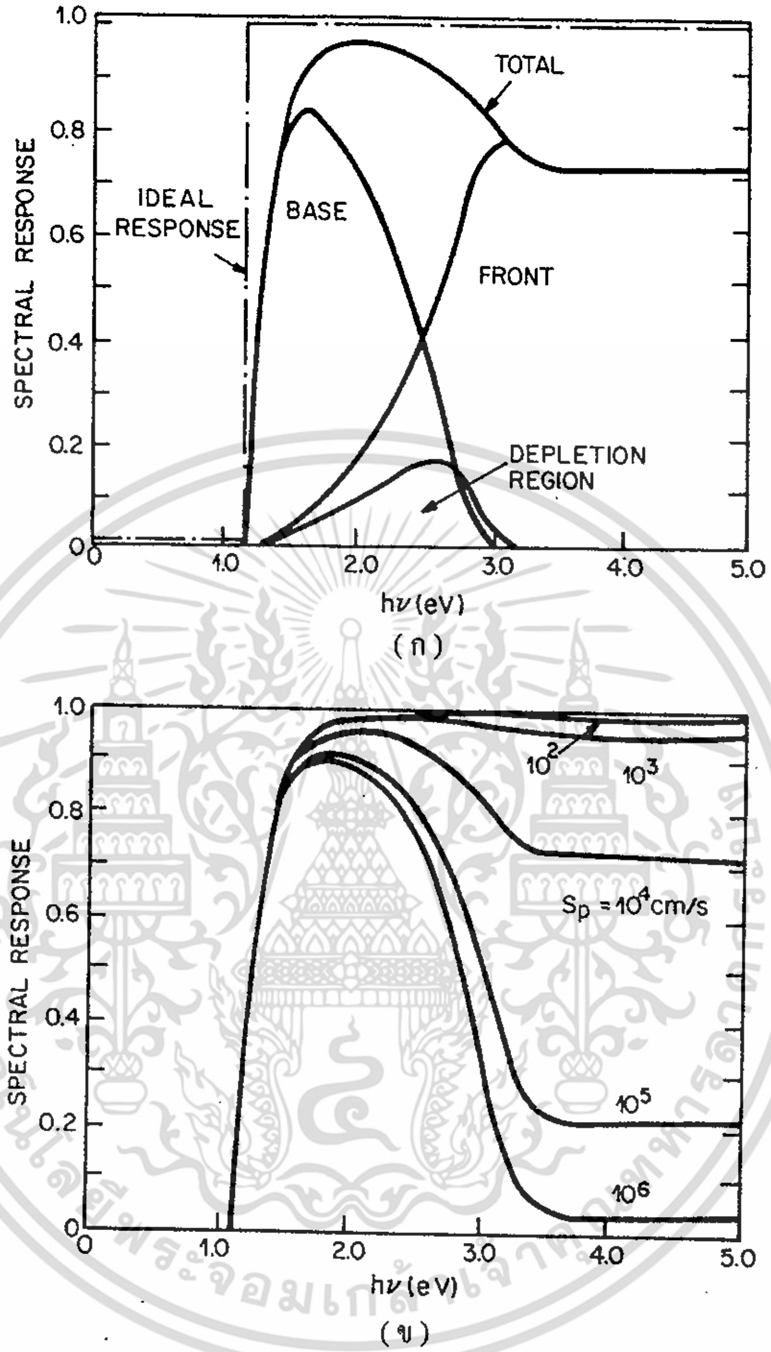
การเกิดกระแสจากแสงสามารถเกิดภายในเขตปลอดพาหะได้ ในขอบเขตนี้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่จะเร่งพาหะให้ออกไปจากเขตปลอดพาหะได้ก่อนที่จะเกิดการรวมตัวของพาหะ กระแสจากแสงต่อหนึ่งหน่วยความกว้างแถบสเปกตรัมแสงเท่ากับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

$$J_{dr} = qF(1-R)\exp(-\alpha x_j)\left[1 - \exp(-\alpha W)\right] \quad (2.87)$$

กระแสรวมที่ความยาวคลื่นหนึ่ง เกิดจากผลรวมของสมการที่ (2.82), (2.86) และ (2.87)

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (2.88)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.24 ก. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยแสดงการแจกแจง 3 บริเวณ (เส้นประแทนด้วยการตอบสนองในเชิงอุดมคติ)

ข. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อแสง (spectral response :SR) เท่ากับผลรวมของการตอบสนองต่อแสงภายนอกเป็น qF หรือผลรวมของของการตอบสนองต่อแสงภายในเป็น $qF(1-R)$ ดังสมการที่ (2.89)

$$SR(\lambda) = \frac{1}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]}\left[J_p(\lambda)+J_n(\lambda)+J_{dr}(\lambda)\right] \quad (2.89)$$

การตอบสนองต่อแสงภายในเชิงอุดมคติสำหรับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน E_g เป็นฟังก์ชันแบบขั้นบันไดมีค่าศูนย์เมื่อ $h\nu < E_g$ และเป็นหนึ่งเมื่อ $h\nu \geq E_g$ (เส้นประดังรูปที่ 2.24 (ก)) สำหรับการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเคลื่อนบนพีแสดงดังรูปที่ 2.24 (ก) โดยแบ่งบริเวณออกเป็น 3 ส่วน พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ

$N_D = 5\times10^{19}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, $N_A = 1.5\times10^{16}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, $\tau_p = 0.4$ ไมโครวินาที,
$\tau_n = 10$ ไมโครวินาที, $x_j = 0.5$ ไมโครเมตร, $H = 450$ ไมโครเมตร
$S_p(\text{front}) = 10^4$ เซนติเมตรต่อวินาที, $S_n(\text{back}) = \infty$

เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ พาหะส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณฐานเนื่องจากซิลิกอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ เมื่อพลังงานโฟตอนมากกว่า 2.5 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานโฟตอนสูงกว่า 3.5 อิเล็กตรอนโวลต์ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงมากกว่า 10^6 ต่อเซนติเมตร การตอบสนองต่อแสงจะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า แต่การรวมตัวของพาหะที่ผิวมีค่าสูงจึงส่งผลกระทบต่อการตอบสนองต่อแสง เนื่องจากจะไปลดจำนวนพาหะบริเวณผิวหน้าซึ่งเกิดจากโฟตอนที่มีพลังงานสูง การตอบสนองต่อแสง เมื่อ $\alpha L_p >> 1$ และ $\alpha x_j >> 1$ จากสมการที่ (2.82) กระแสจากแสงผิวด้านหน้า เท่ากับ

$$SR = \frac{1+S_p/\alpha D_p}{(S_pL_p/D_p)\sinh(x_j/L_p)+\cosh(x_j/L_p)} \quad (2.90)$$

อัตราการรวมตัวบริเวณผิวหน้า (S_p) มีผลกระทบต่อการตอบสนองต่อแสงที่พลังงานโฟตอนมีค่าสูง แสดงดังรูปที่ 2.24 (ข) เมื่อ S_p แปรค่าจาก 10^2 เป็น 10^6 เซนติเมตรต่อวินาที จากสมการที่ (2.90.90) แสดงว่าสำหรับค่า S_p หนึ่งๆ ถ้าต้องการให้การตอบสนองต่อแสงดีขึ้นจะต้องเพิ่มความยาวแห่งการแพร่ (L_p) โดยทั่วไปการตอบสนองต่อแสงที่ดีนั้นตลอดช่วงความยาวคลื่น จะต้องเพิ่มทั้ง L_n และ L_p แต่ลดค่า S_n และ S_p

เมื่อทราบค่าการตอบสนองต่อแสงแล้ว สามารถหาค่าความหนาแน่นของกระแสจากแสงจากการแจกแจงของเซลล์แสงอาทิตย์ ($F(\lambda)$) ดังนี้

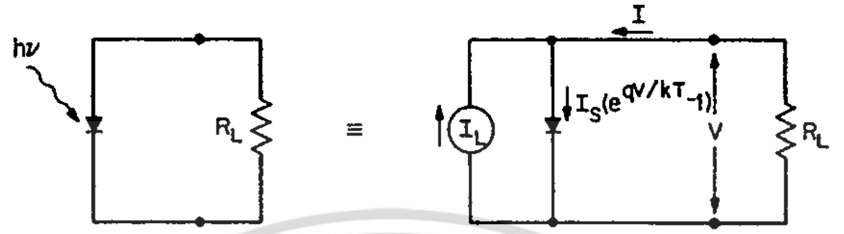
$$J_L = q\int_0^{\lambda_m} F(\lambda)[1-R(\lambda)]SR(\lambda)d\lambda \quad (2.91)$$

เมื่อ λ_m คือ ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานนั้นๆ

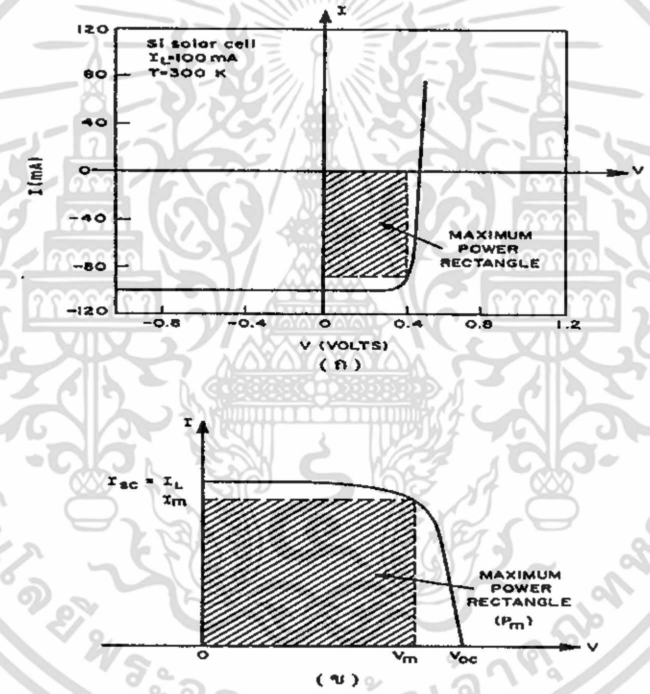
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการให้ J_L มากๆ จะต้องลดค่า $R(\lambda)$ และเพิ่มค่า $SR(\lambda)$ ตลอดช่องความยาวคลื่น $0 < \lambda < \lambda_m$ ความหนาแน่นของกระแสจากแสงในอุดมคตินั้น จะต้องมีค่า $R(\lambda)=0$ และ $SR=1$

2.12.2 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์



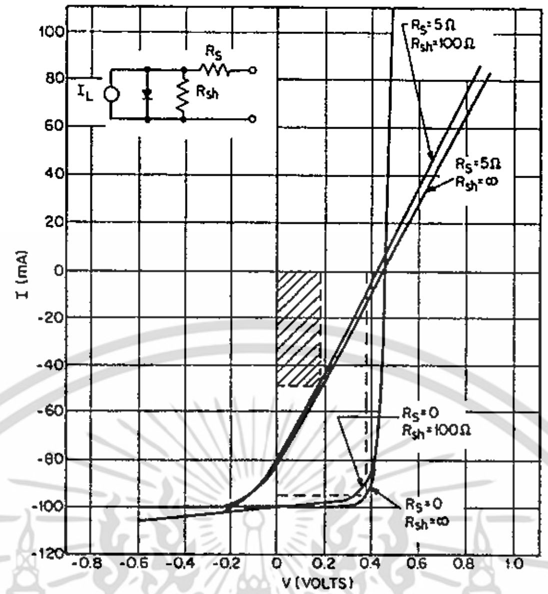
ภาพที่ **2.26** ก. ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่มีการฉายแสง
ข. ภาพกลับหัวของรูป 2.26 (ก)

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัตินั้นจะพิจารณาวงจรสมมูลในอุดมคติดังรูปที่ 2.26 ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมจากการสูญเสียของโอห์มมิก และความต้านทานชันท์จากกระแสรั่วไหล วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.27 ถ้ากระแสไดโอดเป็นดังสมการที่ (2.92) ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (2.93)

$$I = I_s\left(e^{qv/kT} - 1\right) - I_L \qquad (2.92)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\left(\frac{I+I_L}{I_s}-\frac{V-IR_s}{I_sR_{sh}}+1\right)=\frac{q}{kT}\left(V-IR_s\right) \quad (2.93)$$



ภาพที่ 2.27 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชันท์

จากสมการที่ (2.93) ถ้ากำหนดให้ $R_s = 0,5$ โอห์ม และ $R_{sh} = 0, \infty$ โอห์ม สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งพารามิเตอร์ I_s, I_L และ T ยังเหมือนกับรูปที่ 2.25 จะพบว่าความต้านทานชันท์ที่มีค่าต่ำกว่า 100 โอห์มนั้นจะไม่ทำให้กำลังเอาท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเปลี่ยนแปลง ส่วนความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 5 โอห์มจะทำให้กำลังเอาท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงถึง 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกำลังเอาท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความต้านทานอนุกรมเท่ากับศูนย์ (R_s=0) ดังนั้นเราสามารถที่จะละพารามิเตอร์ R_{sh} ได้แล้ว กระแสขาออกและกำลังเอาท์พุท ได้จาก

$$I = I_s\left\{\exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right]-1\right\}-I_L \quad (2.94)$$

$$P = |IV| = I\left[\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I+I_L}{I_s}+1\right)+IR_s\right] \quad (2.95)$$

จากความสัมพันธ์กำลังเอาท์พุทสูงสุดที่ได้ คือ 1, 0.77, 0.57, 0.27 หรือ 0.14 สำหรับ R_s เท่ากับ 0, 1, 2, 5 หรือ 10 โอห์ม ตามลำดับ ค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความลึกของรอยต่อ ความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น และการทำขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก จากรูปที่ 2.26 และ 2.27 สามารถคำนวณหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (fill factor : FF) ได้จาก

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_L V_{OC}} \quad (2.96)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_L V_{OC}}{P_{in}} \quad (2.97)$$

ในเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดกระแสการรวมตัวของพาหะขึ้นในบริเวณพร่องพาหะ เป็น

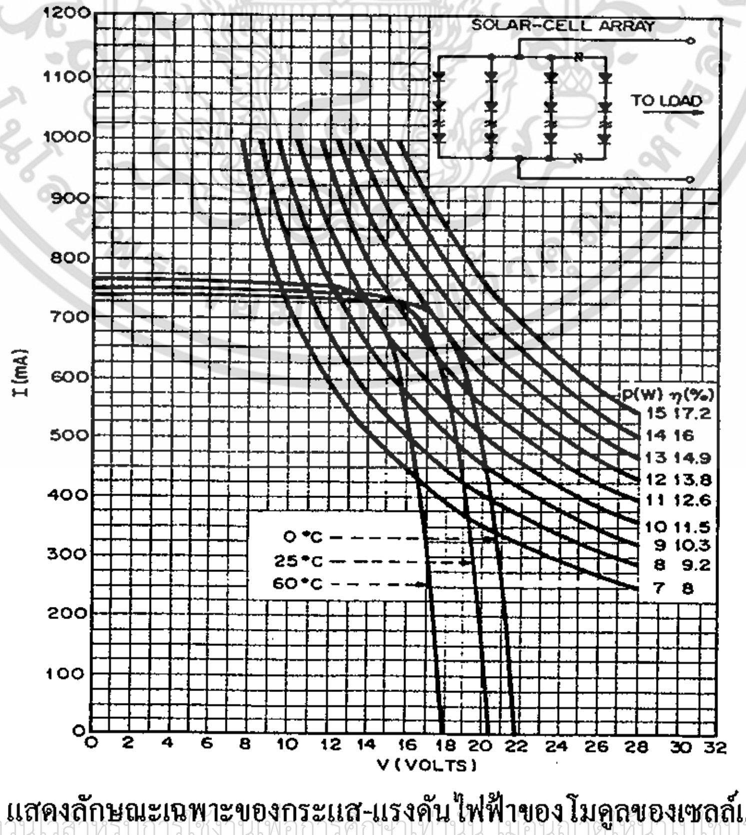
$$I_{rec} = I_s' \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (2.98)$$

โดย

$$\frac{I_s'}{A} = \frac{q n_i W}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} \quad (2.99)$$

ประสิทธิภาพสำหรับในกรณีที่กระแสการรวมตัวของพาหะมีค่าน้อยกว่ากรณีกระแสในอุดมคติ เนื่องจาก V_{oc} และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน กระแสการรวมตัวของพาหะจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงถึง 25 เปอร์เซ็นต์

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีทั้งกระแสแพร่และกระที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะ หรือเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อบกพร่องประจุมาก กระแสไฟฟ้าภายใต้ไบแอสตรงอาจจะแสดงในรูปของเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ขึ้นกับแรงดันคือ exp(qV/nkT) เมื่อ n คือแฟกเตอร์ในอุดมคติ โดยปกติประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อค่าแฟกเตอร์อุดมคติเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.28 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนที่มีพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตรจะมีค่าแรงดันวงจรเปิด (*Voc*) เท่ากับ 0.5 ถึง 0.6 โวลต์และมีกระแสลัดวงจรเท่ากับ 30 ถึง 60 มิลลิแอมป์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์สามารถต่อกันได้ทั้งแบบอนุกรมและขนาน ตัวอย่างการต่อเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.28 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะให้กำลังประมาณ 10 วัตต์ มีประสิทธิภาพ 11.5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไข *AM*1 (□100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งกราฟของกำลังจะแสดงโดยเส้นสัมผัสกับกราฟกระแส-แรงดันไฟฟ้า ที่จุดที่มีกำลังสูงสุดจะสอดคล้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (*Vm*) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (*Im*) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการต่อดังรูปที่ 2.28 นี้จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 720 มิลลิแอมป์ และในกรณีที่อุณหภูมิต่ำค่ากำลังเอาท์พุทกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีค่าลดลง

2.13 หลักการสปัตเตอริง (งามนิตย์, 2558; สุรสิงห์, 2545)

ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปัตเตอริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.13.1 โกลวดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะเรียกว่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอนซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

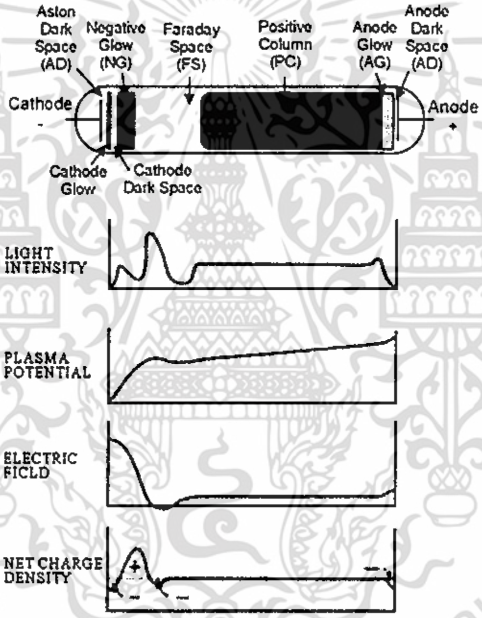
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \tag{2.100}$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลวดิสชาร์จก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การโกล์วดิสชาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้ โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วอาโนดดังแสดงในภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.29 โครงสร้างของการโกลวดิสชาร์จ

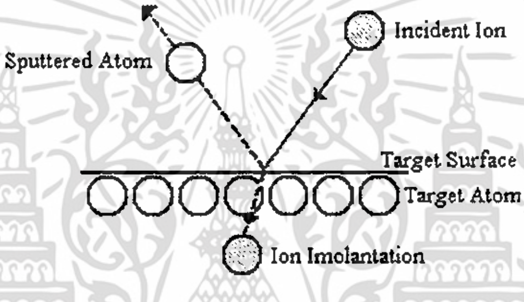
สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลวที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของโกลวดิสชาร์จแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.29 การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลวดิสชาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.13.2 สปัตเตอริง

สปัตเตอริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า

2.13.2.1 ยีลด์การสปัตเตอริง (sputtering yields)

ยีลด์ของการสปัตเตอริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ (2.101) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปัตเตอริง

ยีลด์ของการสปัตเตอริง = อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า / ไอออนที่ชนเป้า (2.101)

การสปัตเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่ายีลด์ของการสปัตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสปัตเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยีลด์ของการสปัตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายีลด์ของธาตุชนิดต่างๆ

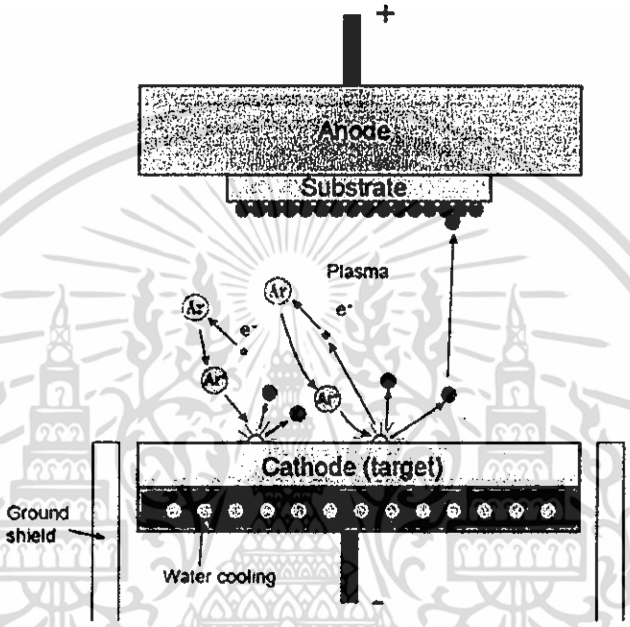
Elements	Threshold (eV)	Ar^+ energy (eV)				
		60	100	200	300	600
Ag	15	0.22	0.63	1.58	2.20	3.40
Al	13		0.11	0.35	0.65	1.24
Au	20		0.32	1.07	1.65	2.43
Be	15		0.074	0.18	0.28	0.80
Cr	22		0.30	0.67	0.87	1.30
Cu	17	0.10	0.48	1.10	1.59	2.30
Fe	20	0.064	0.20	0.53	0.76	1.26
Ge	25		0.22	0.50	0.74	1.22
Mo	24	0.027	0.13	0.40	0.58	0.93
Nb	25	0.017	0.068	0.25	0.40	0.65
Ni	21	0.067	0.28	0.66	0.95	1.52
Pd	20		0.42	1.00	1.41	2.39
Pt	25	0.032	0.20	0.63	0.95	1.56
Re	35		0.10	0.37	0.56	0.91
Si			0.07	0.18	0.31	0.53
Ta	26	0.01	0.10	0.28	0.41	0.62
Ti	20		0.081	0.22	0.33	0.58
V	23	0.03	0.11	0.31	0.41	0.70
W	33	0.008	0.068	0.29	0.40	0.62
Zr	22	0.027	0.12	0.28	0.41	0.75

2.13.2.2 ดีซีไดโอดสปัตเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วอาโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วอาโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง โดยการดิสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วอาโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงจะถูกเร่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.31 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโกลวดิสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วอาโนด



ภาพที่ 2.31 การสปัตเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

2.13.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปัตเตอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปัตเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_{\perp}$ ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \qquad (2.102)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \tag{2.103}$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qv_\perp B = \frac{mv_\perp^2}{r} \tag{2.104}$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_\perp / Bq \tag{2.105}$$

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

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \tag{2.106}$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = e\left(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B}\right) \tag{2.107}$$

โดย e = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

$\vec{v}$ = ความเร็วของอิเล็กตรอน

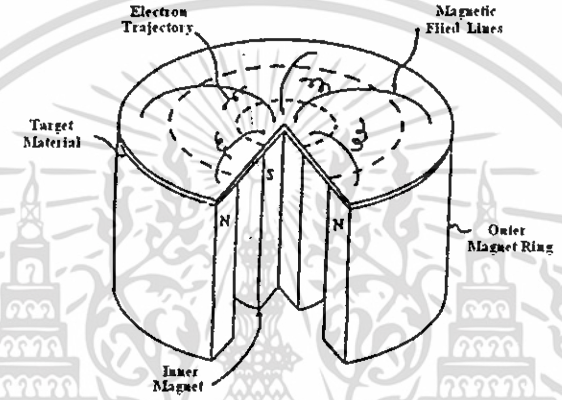
$\vec{E}$ = สนามไฟฟ้า

$\vec{B}$ = สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E}\times\vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื่อนลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในภาพที่ 2.32 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสปัตเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปัตเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.32 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \qquad (2.108)$$

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|qV|}{m}} \qquad (2.109)$$

แทนค่า (2.108) ลงใน (2.105) จะได้

$$r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2\,mv}{|q|}} \qquad (2.110)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

$$r = 0.33\times10^{-5}\,\frac{\sqrt{v}}{B} \qquad (2.111)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

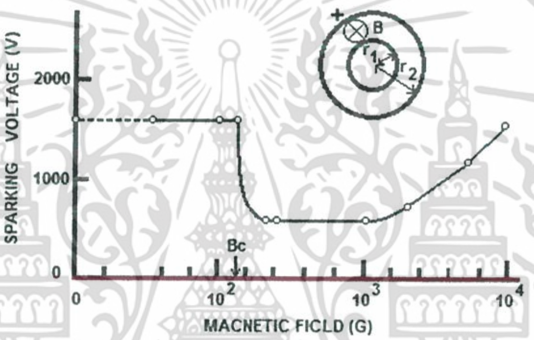
และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งทุติผล (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.112

$$B_c = \frac{1}{L}\sqrt{\frac{2mv_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \qquad (2.112)$$

โดย v_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.13.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



ภาพที่ 2.33 ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในภาพที่ 2.33 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วอาโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (งามนิตย์, 2558; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปัตเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.14.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกใช้ควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ดังต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการรั่วซึม
2. เป็นวัสดุที่มีการยึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าให้มีค่าน้อยลง

2.14.2 การให้ความเย็นที่เป้า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปัตเตอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป้ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป้าและความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวเป้าในขณะเกิดการสปัตเตอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป้าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป้า และโอริง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป้าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังในการรั่วซึมออกมาของน้ำ

2.14.3 การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป้า

บริเวณของเป้าจะถูกล้อมรอบด้วยกำบังบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชีลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชีลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปัตเตอริงเกิดที่เป้าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป้าและตัวยึดเป้าอาจจะถูกสปัตเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกันระยะห่างระหว่างเป้าและกราวด์ชีลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ ในบางโอกาสพบว่าตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นเล็กจะทำให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นขอบที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆ ต้องกำจัดออกไปเสียก่อน และเนื่องจากความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างเป้าและกราวด์ชีลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบ และภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมืดจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.113

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_e) แสดงโดย

$$P_e/P \cong \left[1+(\omega\tau)^2\right]^{1/2} \tag{2.113}$$

โดย ω คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน

τ คือ เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)

P คือ ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

โดย $\omega = eB/m$ และ $\tau = \lambda_0/p\left[2(e/m)V_0\right]^{1/2}$

จะได้ว่า

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2}\, pV_0^{1/2} \tag{2.114}$$

โดย λ_0 คือ ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอร์

B คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

e/m คือ ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

V_0 คือ ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมืดกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมืดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 2.115

$$d = cV^{-m} \tag{2.115}$$

โดย c คือ ค่าคงที่

m คือ เลขยกกำลังระหว่าง -3 และ -6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของบริเวณมืด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไชลด์ ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์

$$I \;\alpha\; \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^{2}} \tag{2.116}$$

เมื่อการขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมืดถูกแทนลงในสมการ (2.97) จะได้ความสัมพันธ์

$$I \;\alpha\; kV^{n} \tag{2.117}$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์

n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

2.14.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

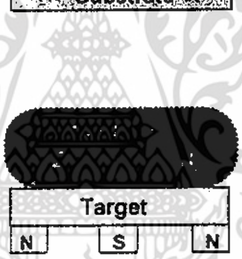
สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบ โดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากันกับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือแมกนีตรอนแบบสามัญ (conventional magnetron)
2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type 1)
3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced magnetron type 2)

ในกรณีดิสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากันกับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะไม่ถูกกักโดยสนามแม่เหล็กและจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ขั้วคาโทดและเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าทำให้เกิดการสปัตเตอริงของเป้าและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิสชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า และจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น ฟิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำ เป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร

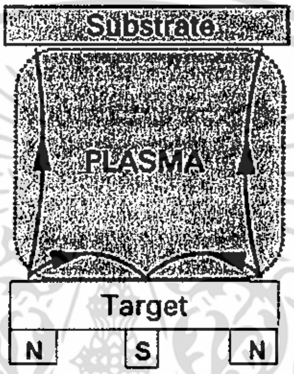


ภาพที่ 2.34 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ จึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไอออนมีค่าสูงโดยได้รับจากพลาสมาที่เกิดขึ้นโดยวินโดวส์และซาว์ไวด์ และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมาว่าที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตร

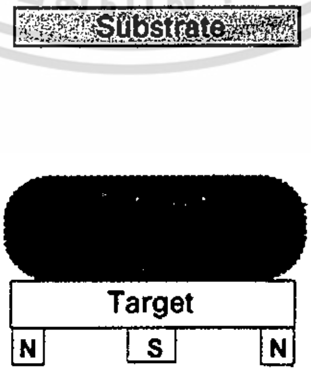
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า และอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตามอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเค้นที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1



ภาพที่ 2.35 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ เป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



ภาพที่ 2.36 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

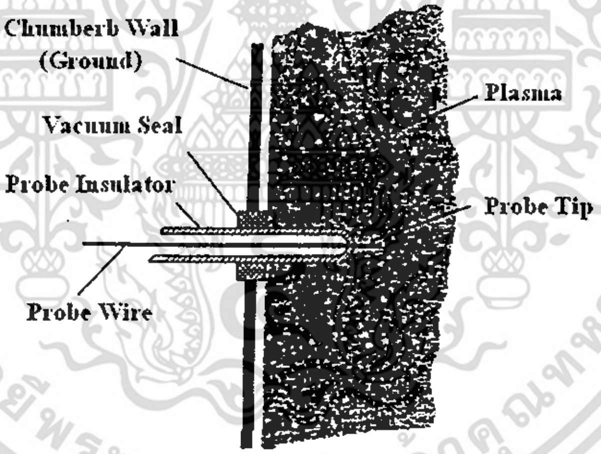
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 คุณสมบัติทางพลาสมา (งามนิตย์, 2558; สุรสิงห์, 2545)

2.15.1 หัววัดลางมัวร์

หัววัดลางมัวร์เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ปกคลุมด้วยฉนวน ยกเว้นที่ปลายหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา หัววัดทำมาจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงดังเช่น ทังสเตน โมลิดินัม หรือแพทตินัม โดยจะใช้หัววัดลางมัวร์ในการวิเคราะห์พลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาเย็น โดยใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของพลาสมา (n) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ศักย์ของพลาสมา (V_p) และศักย์ลอย (floating potential; V_f)

ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัววัดที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในภาพที่ 2.37 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในภาพที่ 2.38 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมา สำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (saw tooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบกับผนังของภาชนะสุญญากาศ

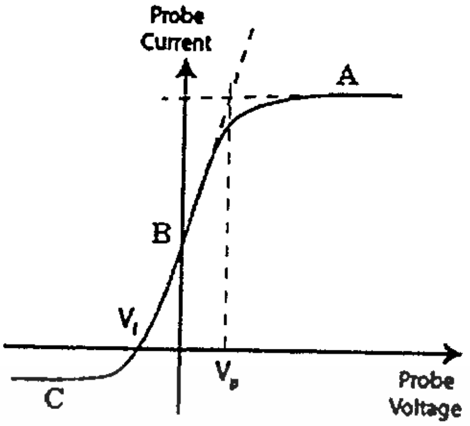


ภาพที่ 2.37 หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

2.17.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยวลางมัวร์วิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัด โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.38 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากันกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาชีท อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} eAn_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.118}$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (I_{se})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_e = eAn_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \tag{2.119}$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอย (V_p) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัดและจะสร้างพลาสมาชีทขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านขอบชีทจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณกระแสไอออนอิ่มตัว (I_{is}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออนจะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.120}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.117) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\frac{d\ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \tag{2.121}$$

หรือจะหาค่า จากการรวมสมการที่ (2.119) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.120) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

$$I = -\frac{1}{2}eAn_i\left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4}eAn_e\left(\frac{8kT_e}{\pi n_e}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e}\right) \tag{2.122}$$

จากการแจกแจงความเร็วอิเล็กตรอนของแมกเวลล์-โบลซ์มานน์ ค่า $n_i = n_e = n$ จะได้ว่า

$$I = \frac{1}{2}eAn\left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}}\left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e}\right)\right] \tag{2.123}$$

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ $(I = 0)$

$$I = 0 = \frac{1}{2}eAn\left(\frac{kT}{m_i}\right)^{\frac{1}{2}}\left[-1 + \left(\frac{2_i}{\pi m_e}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{e(V_f - V_p)}{kT_e}\right)\right] \tag{2.124}$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln\left(\frac{2m_i}{\pi m_e}\right)} \tag{2.125}$$

หน่วยของ kT_e/e คือโวลต์ ดังนั้น สามารถหา kT_e ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

2.15.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นของไอออน (n_i) ที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา จะมีค่าเท่ากัน $n_e \approx n_i \approx n_p$ โดย n_p คือความหนาแน่นของพลาสมา (n_p) โดยสามารถหาค่าความหนาแน่นพลาสมาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6Ae}\left(\frac{m_i}{kT_e}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.126)$$

โดย A คือ พื้นที่ของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา

I_{is} คือ กระแสไอออนอิ่มตัว

m_i คือ มวลของไอออน

2.15.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์ $r = mv_{\perp}/eB$ เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลรวมของสนามแม่เหล็กสามารถละลายได้ในกรณีที่ $r >> a$ เมื่อ a คือ ขนาดของหัววัด
เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะว่าโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิ่มตัวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัวที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัวที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัวจะได้รับผลกระทบน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งได้เคลือบไว้บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ดังนั้นจึงต้องเริ่มต้นจากการหาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เพื่อเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และหาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เพื่อเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจึงศึกษาสมบัติต่างๆ ทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ซึ่งได้แก่การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ เมื่อได้เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CdS และ CuO ที่เหมาะสมแล้วจึงนำเงื่อนไขเหล่านี้ไปประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ต่อไป

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2558; งามนิตย์, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบไปด้วย
  - อะซีโตน (CH_3COOH)
  - เอทานอล (C_2H_5OH)
  - น้ำปลอดประจุ (DI water)
- แผ่นกระจกสไลด์ 12 x 25 มิลลิเมตร
- บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิค

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

- กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
- อะซีโตน (CH_3COOH)
- สำลีสำหรับการเช็ดทำความสะอาด
- เป้าคอปเปอร์ (Cu)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องสปัตเตอร์

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้

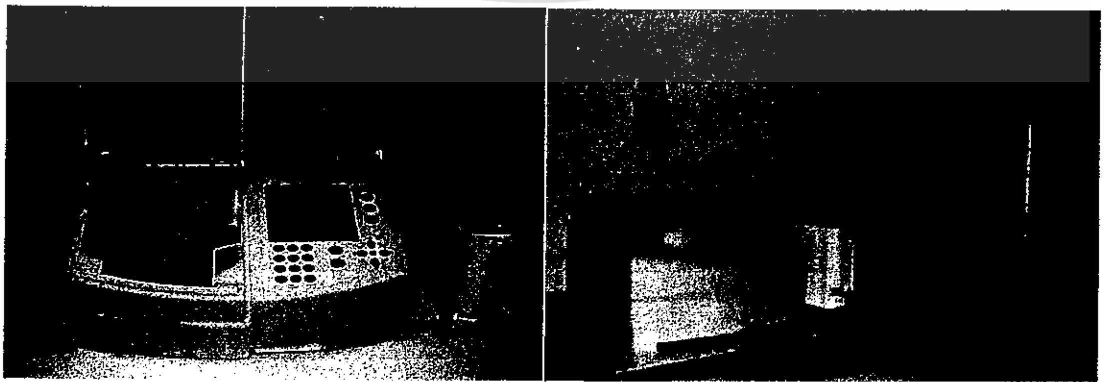
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอ็กซ์ย่าน Cu_{K_α} มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation (Heλ iosα) ความยาวคลื่นแสงในช่วง 200-1,000 นาโนเมตร

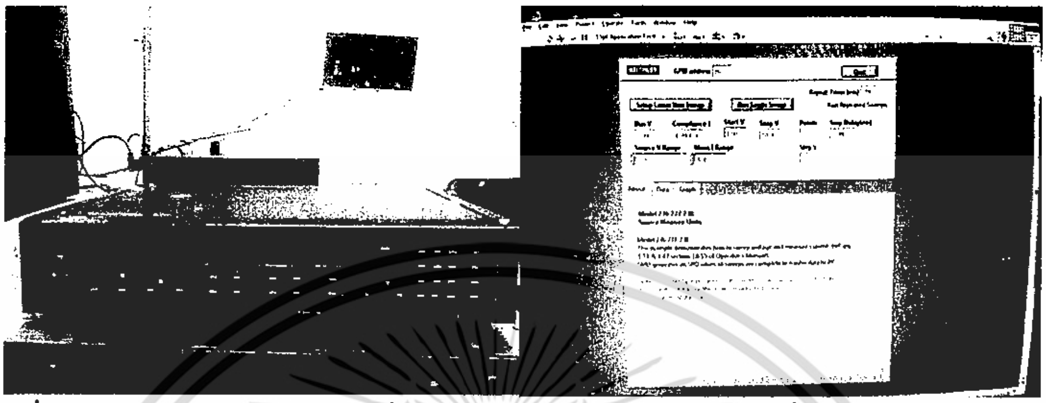


ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (Heλ iosα)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



ภาพที่ 3.3 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟแวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

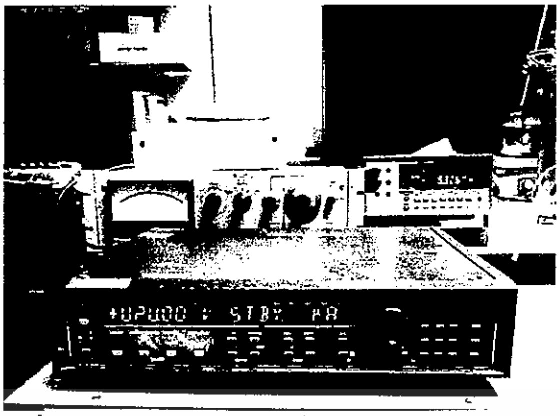
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- หลอดฮาโลเจนชนิด ELH (120 โวลต์, 300 วัตต์)
- โปรแกรม Lab View

ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- เครื่อง FLUKE 8808A (5-1/2 DIGIT MULTIMETER)
- สนามแม่เหล็ก 4,600 เกาส์
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610

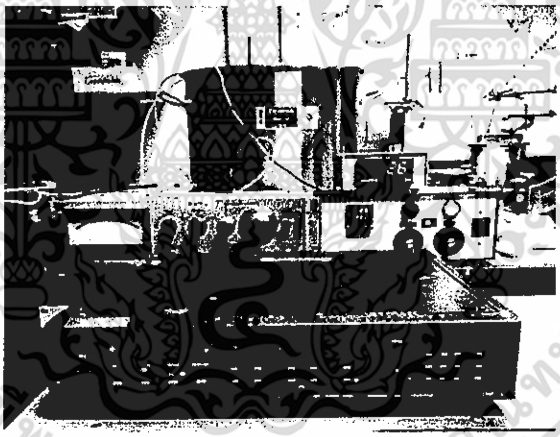
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610
- หม้อ ยี่ห้อ ZEBRA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร
- เครื่องวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณภูมิห้อง

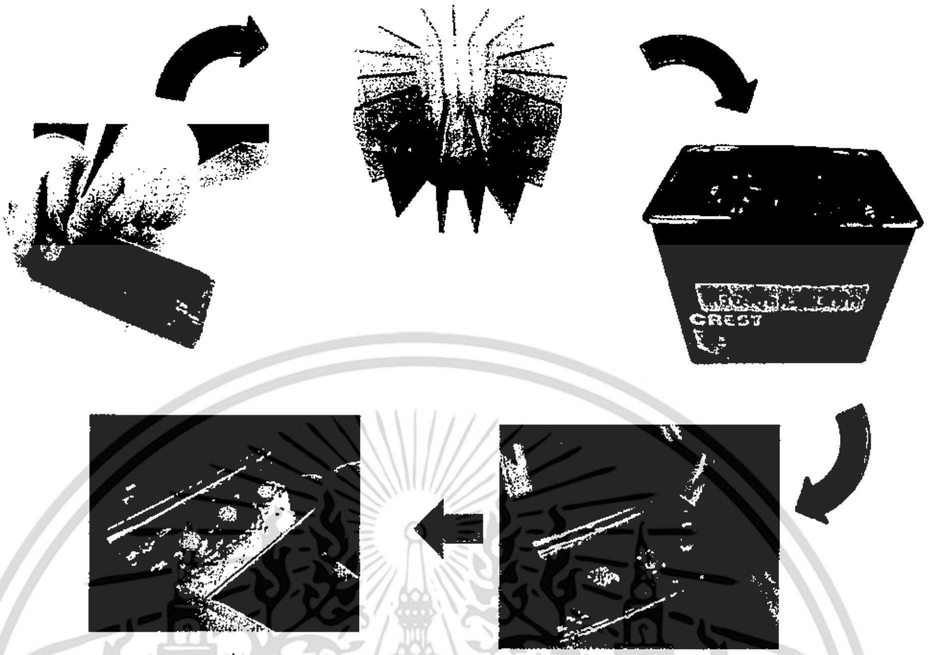
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างกระจกสไลด์ด้วยอะซีโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



***ภาพที่* 3.7** ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

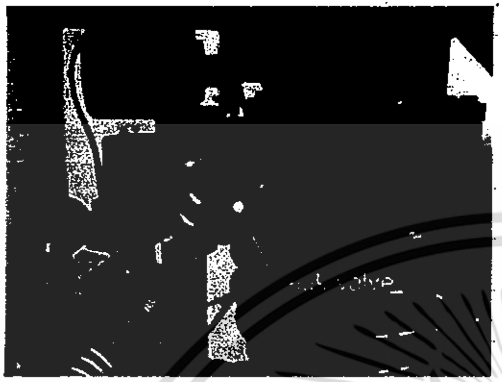
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะคอปเปอร์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (งามนิตย์, 2558)

ในการเตรียมฟิล์มบางของโลหะคอปเปอร์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

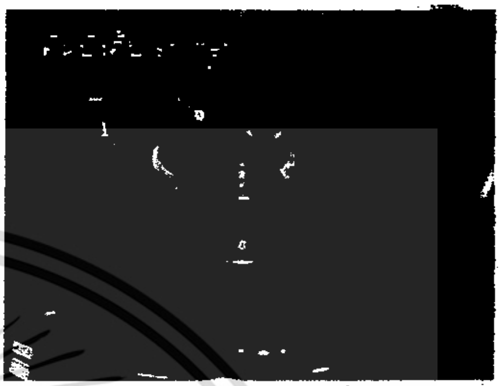
1. ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็น ดึงสวิตช์ปุ่มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำรอเอาไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปุ่มปั๊มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ขัดผิวหน้าเป้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด เพื่อลดปัญหาการอาร์ค
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชีลด์ (โลหะทรงกระบอกมีรูตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป้าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป้าคอปเปอร์เข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชีลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชัตเตอร์และกราน์วชีลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ยกฝาบนห้องสุญญากาศปิดเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป้าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมกับหมุนน็อตหางปลายึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



ภาพแสดง leak valve



ภาพแสดงคันบังคับ shutter ที่อยู่ภายใน

8. ปิดชัตเตอร์ (คันบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้ก่อน
9. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (Rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (Roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ $3x10^{-2}$ ทอร์ (*roughing valve) เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน)
13. ปิดวาล์วหยาบและเปิดวาล์วหลังโดยปรับตำแหน่งวาล์วไปที่ backing เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศผ่านทางปั๊มไอฟุ้งกระจาย เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้น เพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ใช้เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)

ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มพ์กลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มพ์ไอฟุ้งกระจาย)

ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

14. เมื่อครบ 15 นาที ปรับคันโยกของวาล์วผีเสื้อ (butterfly valve) ไปที่ตำแหน่งเปิด (open) (ดันคันโยกออกจากตัวจนสุด) หากดันคันโยกออกจากตัวตำแหน่งของวาล์วผีเสื้อคือเปิด แต่ถ้าดึงเข้าหาตัวคือปิด

ภาพแสดง butterfly valve ในตำแหน่ง open

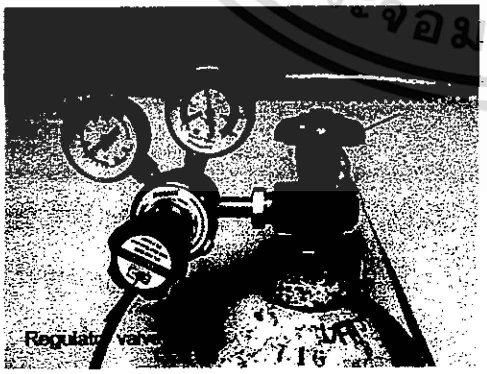
ภาพแสดง speedy valve

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ที่ประมาณ $3x10^{-5}$ ทอร์ หรือต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
   - พิรานิเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงการทำงานอยู่ที่ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
   - เพนนิงเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก 10^{-3}–10^{-6} ทอร์

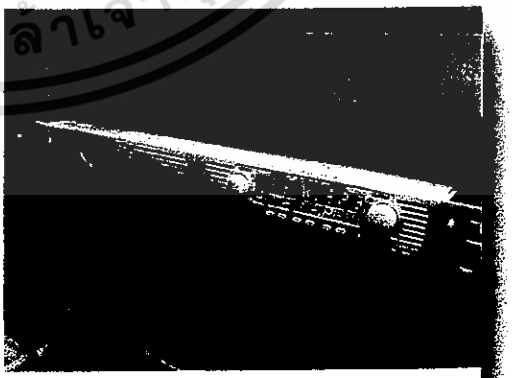
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. การป้อนก๊าซอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้มีก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุดและใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนก๊าซแล้วสูบออกจำนวน 3 ครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า การฟลัชด้วยอาร์กอนมีขั้นตอนดังนี้

- เปิดวาล์วที่หัวถังก๊าซ เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดสปีดีวาล์ว (speedy valve) และเปิดวาล์วเข็ม (needle valve) สำหรับวาล์วเข็มให้เปิดขึ้นนิดหน่อยก็พอในช่วงแรก หมุนทวนเข็มนาฬิกา คือ เปิด (หมุนตามเข็มนาฬิกา คือ ปิด) เพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที
- ปิดสปีดีวาล์วแล้วก๊าซภายในห้องสุญญากาศจะถูกสูบออกไปจนความดันลดลงเป็น $3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 1)
- เปิดสปีดีวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที
- ปิดสปีดีวาล์วเพื่อสูบก๊าซภายในอีกครั้งจนความดันลดลงเป็น $3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 2)
- เปิดสปีดีวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที
- ปิดสปีดีวาล์วเพื่อสูบก๊าซภายในอีกครั้งจนความดันลดลงถึง $3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอน เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะประมาณได้ว่าภายในห้องสุญญากาศมีเพียงโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา
- เปิดสปีดีวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งโดยควบคุมการป้อนก๊าซผ่านวาล์วรูเข็มจนความดันภายในมีค่าประมาณ $2x10^{-3}$ ทอร์



ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

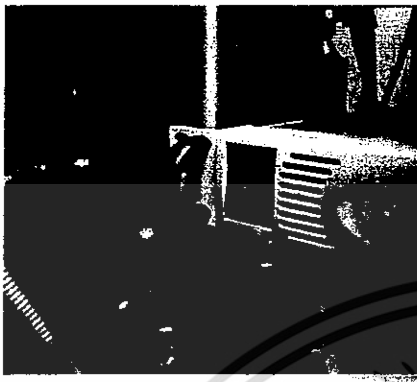


ภาพแสดง power supply

17. เปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม ON เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ อยู่ทางซ้ายมือสุดของเครื่อง)



ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply

เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

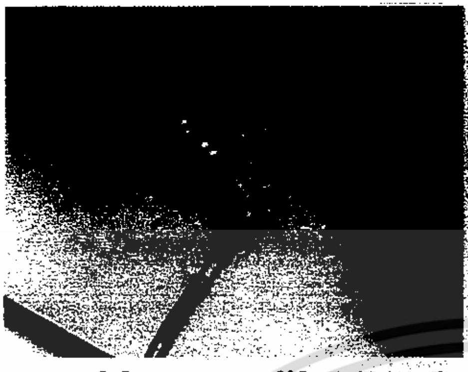
19. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ช้าๆ จนกระทั่งพลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีน้ำเงินอยู่ในห้องสุญญากาศ)ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่ เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสภาวะยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์บางลงบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หาเคลือบลงบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีสีออกไปทางสีดำ มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้ก่อน เมื่อพลาสมามีพลังงานและสภาวะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก แล้วทำการเคลือบฟิล์มต่อไป

ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

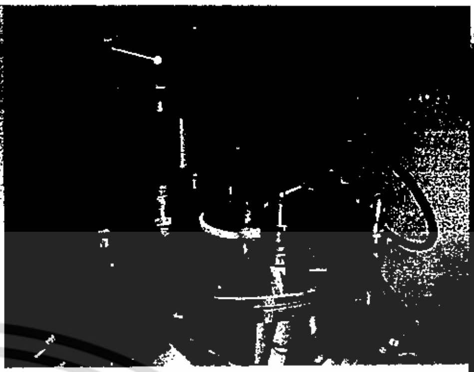
20. เมื่อพลาสมาติดให้ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปใช้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปัตเตอร์ริงยีลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับเป้าที่เป็นคอปเปอร์จะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่อยู่ในระดับ 3.6×10^{-3} ทอร์ หรือตามที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าหากมากไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรอง เนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนกระเจิงออกไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสนั้นแปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนภายใน chamber แบบละเอียด เมื่อเริ่มเคลือบฟิล์ม จะปรับความดันผ่านวาล์วตัวนี้เพียงวาล์วเดียวเท่านั้น



ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

21. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการสปัตเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาด เรียกขั้นตอนนี้ว่า การเตรียมตัวสปัตเตอริง (pre sputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆ ที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่างเช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆ ดังนี้

ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

แรงดันไฟฟ้า: 360-370 โวลต์

กระแส: 0.08 - 0.09 แอมแปร์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ 3.6×10^{-3} ทอร์

ระยะระหว่างเป้ากับฐานรองรับ 8-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์มโลหะคอปเปอร์ประมาณ 6 นาที

22. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้า และความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่านวาล์วรูเข็มเท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามเวลาที่ต้องการแล้ว ให้หมุนชัตเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบฟิล์ม หมุนลดแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กทางซ้ายของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตช์สีดำ

23. หยุดการป้อนก๊าซอาร์กอน โดยปิดสปีดีวาล์วตามด้วยเรกูเลเตอร์วาล์ว (กดพร้อมกับหมุนเข้า คือ เปิด หมุนออก คือ ปิด) และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
24. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าหาตัว)
25. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
26. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
27. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นหมุนน็อตหางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมดเหลือไว้แต่น็อตตัวที่เป็นมือจับ (ที่ต้องถอดออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลีควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตหางปลาออกก่อนเกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนเปิดลีควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ แล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะเด้งออกมาเอง (เสียงดังปุ๊ก)
28. เปิดฝาหน้าออก นำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาชั่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ (ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อยสำหรับการทำงานครั้งต่อไป
29. หลังจากสับสวิตช์ (DIFFSTAK ON) ลงแล้ว 20 นาที จึงปิดปั๊มโรตารี

3.2.3 วิธีการทำรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในกรณีที่ต้องการจะทำรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อให้ได้ฟิล์มคอปเปอร์ออกไซด์ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เมื่อสร้างสภาพโกลวดิสชาร์จได้แล้ว จึงทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยอาศัยเครื่องควบคุมการไหลมวลก๊าซยี่ห้อ AALBORG รอจนกระทั่งความดันภายในห้องสุญญากาศอยู่ในระดับ 10^{-3} ทอร์ แล้วจึงเปิดชัตเตอร์เพื่อให้เกิดฟิล์มบางเคลือบบนแผ่นฐานรองรับ
2. บางครั้งจำเป็นต้องปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนด้วยเพื่อให้ความดันภายในห้องสุญญากาศอยู่ในระดับที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เพื่อให้ลำพลาสมายืดยาวคลุมแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เวลาในการทำสปัตเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 20 นาที ถ้าใช้เวลาน้อยฟิล์มจะบางเกินไป ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะสูงถึงเมกะโอห์มซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

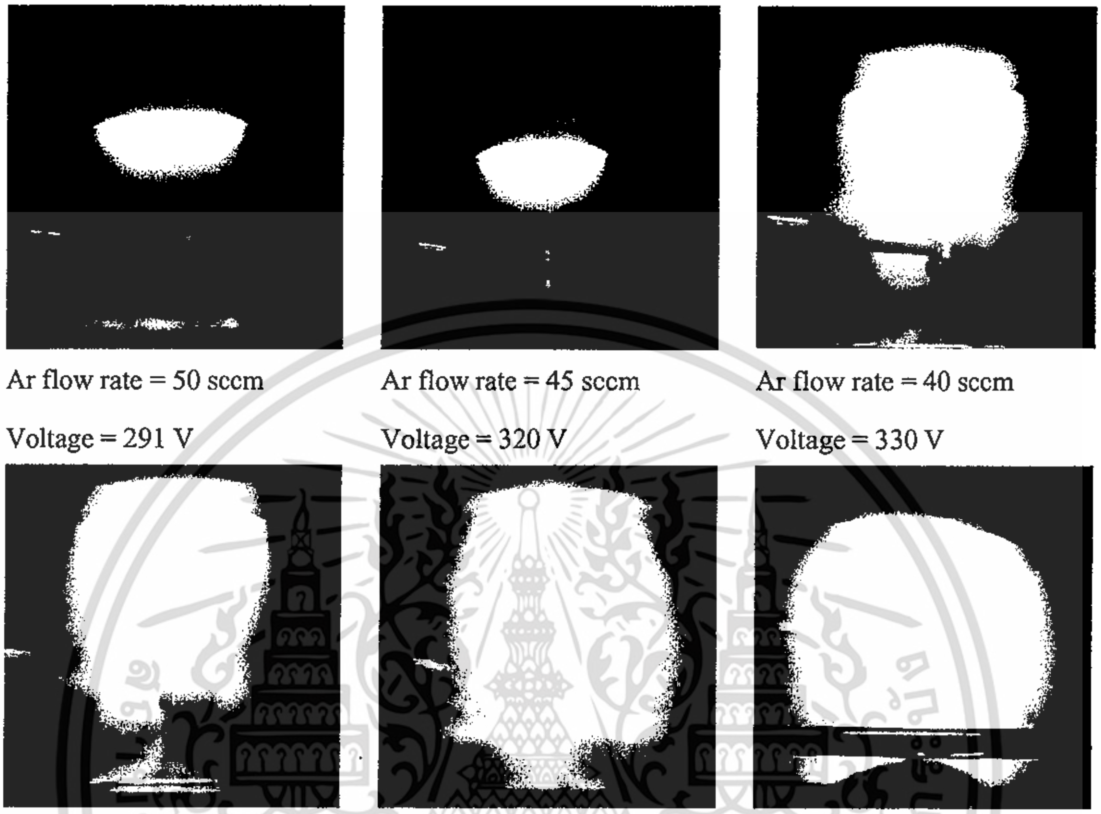
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งได้เคลือบไว้บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO นำสิ่งประดิษฐ์รอยต่อแบบพี-เอ็นมาทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 - 300 เคลวิน และวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกับดักพาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS กับ p-CuO

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดิสชาร์จ

ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป้าทองแดงความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 630 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา ปั๊มสุญญากาศประกอบไปด้วยปั๊มแพร่ไอน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 9 เซนติเมตร ความดันพื้นฐานเท่ากับ 3.0×10^{-5} ทอร์ เริ่มทำการทดลองโดยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความดันของห้องสุญญากาศที่อ่านได้จากเกจพิรานิ (Pirani gauge) ในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวบน อ่านได้เท่ากับ 2.3×10^{-1} ทอร์ ส่วนความดันที่อ่านได้จากเกจเพนนิง (Penning gauge) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวล่าง อ่านได้เท่ากับ 3.0×10^{-3} ทอร์ ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึง 237 โวลต์ การโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสชาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทะลายทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงต่อไปอีก พบว่าลำพลาสมาจะเรียวเล็กลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพื่อทำให้ลำพลาสมาพองโตขึ้นและการโกลวดิสชาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จต่อไปอีก สีของการโกลวดิสชาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโกลวดิสชาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ลำพลาสมาจะโตขึ้นและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยืดออกมากขึ้น) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโกลวดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1



Ar flow rate = 50 sccm
Voltage = 291 V

Ar flow rate = 45 sccm
Voltage = 320 V

Ar flow rate = 40 sccm
Voltage = 330 V

Ar flow rate = 35 sccm
Voltage = 337 V

Ar flow rate = 35 sccm
Voltage = 350 V

Ar flow rate = 32 sccm
Voltage = 365 V

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Characteristics
50	ตัวบน = $2.3x10^{-1}$ ตัวล่าง = $3.0x10^{-3}$	237.2	0.013	แรงดันพังทะลายทาวน์เซนด์ ซึ่งก็คือแรงดันที่จุดติดพลาสมา
	ตัวบน = $2.3x10^{-1}$ ตัวล่าง = $3.0x10^{-3}$	253.9	0.024	พลาสมาสีม่วง
	ตัวบน = $2.3x10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.8x10^{-3}$	291.0	0.052	พลาสมาสีม่วงเข้ม
	ตัวบน = $2.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.9x10^{-3}$	300.0	0.059	พลาสมาสีม่วงอมน้ำเงิน
	ตัวบน = $2.3x10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.9x10^{-3}$	310.0	0.067	พลาสมาสีม่วงอมน้ำเงินมากขึ้น
45	ตัวบน = $2.0x10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.1x10^{-3}$	320.0	0.068	-
	ตัวบน = $2.0x10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.7x10^{-3}$	330.0	0.070	-
40	ตัวบน = $1.7x10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.4x10^{-3}$	330.0	0.065	-
35	ตัวบน = $1.6x10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.4x10^{-3}$	337.0	0.069	พลาสมามีน้ำเงินเข้มใหญ่ขึ้น
30	ตัวบน = $1.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.2x10^{-3}$	340.0	0.071	พลาสมาสีม่วงลดลง
	ตัวบน = $1.3x10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.1x10^{-3}$	350.0	0.075	พลาสมาสีม่วงอมน้ำเงินลดลง แสงสว่างมากขึ้น
32	ตัวบน = $1.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.8x10^{-4}$	360.0	0.085	เพิ่มอาร์กอนจาก 30 sccm เป็น 32 sccm พลาสมาสีม่วงอมน้ำเงิน สว่างมากขึ้น
	ตัวบน = $1.5x10^{-1}$ ตัวล่าง = $8.2x10^{-4}$	360.0	0.081	-
	ตัวบน = $1.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $7.5x10^{-4}$	360.0	0.080	-
	ตัวบน = $1.5x10^{-1}$ ตัวล่าง = $7.2x10^{-4}$	360.0	0.080	-
	ตัวบน = $1.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.2x10^{-4}$	363.0	0.082	พลาสมาสีม่วงสว่างมากขึ้น
	ตัวบน = $1.4x10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.2x10^{-4}$	365.0	0.085	พลาสมาสว่างมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการทดลองเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ต้องใช้แรงดันพังทลายทาวน์เซนต์ประมาณ 237 โวลต์ การโกลวดิสชาร์จจึงจะปรากฏขึ้น เป้าหมายต่อไปคือการสร้างสภาวะโกลวดิสชาร์จให้คงตัวอยู่ได้ที่อัตราการไหลของก๊าซมีค่าต่ำสุด วิธีการคือทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ในขณะเดียวกันก็ต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จด้วย พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงมาเหลือ 32 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีต้องปรับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จขึ้นไปเป็น 360 โวลต์ ความดันตัวบนและตัวล่างเท่ากับ 4.7×10^{-3} และ 1.1×10^{-4} ทอร์ ทำการสปัตเตอร์ 20 นาที จะให้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด จากการทำการทดลองซ้ำหลายครั้งพบว่าความดันตัวบนควรจะอยู่ในช่วง $4.7\text{-}7.0 \times 10^{-3}$ ทอร์ จึงจะได้ฟิล์มคอปเปอร์ที่มีคุณภาพดี

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะเริ่มจากการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ ให้กับขั้วค่าโทรด จนกระทั่งถึง 290 โวลต์ สภาพโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศด้วยอัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันในห้องสุญญากาซจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงเหลือ 31.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จขึ้นเป็น 360 โวลต์ จะได้ความดันตัวบนของห้องสุญญากาศเท่ากับ 8.5×10^{-3} ทอร์ ตามต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ ตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะแสดงดังตารางที่ 4.2 ส่วนรูปที่ 4.2 จะแสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความดันตัวบนของห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงเพื่อให้ความดันของห้องสุญญากาศไม่สูงกว่า 10^{-3} ทอร์ ฟิล์มบางที่เตรียมได้จึงจะมีสีน้ำตาลเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

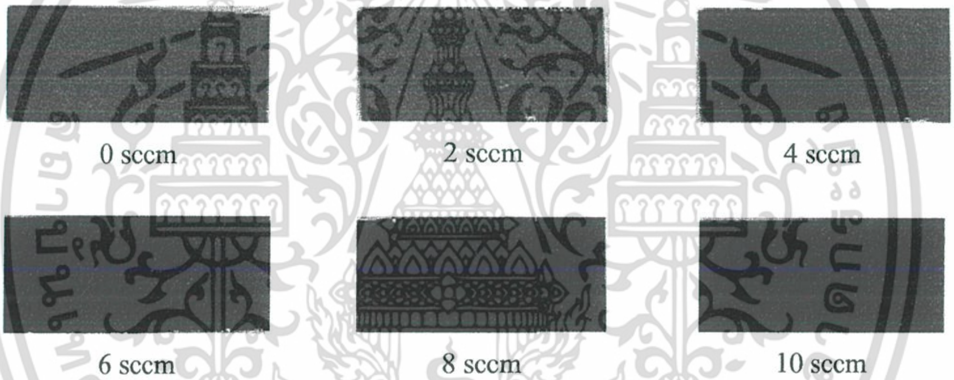
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

#	Flow Rate (sccm)		Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering time (min)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Film Characteristic
	Ar	O_2							
1	31.5	1.0	ตัวบน = 2.2×10^{-2} ตัวล่าง = 2.5×10^{-4}	360.0	0.060	21.60	20	2.0×10^{5}	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสงส่องผ่านได้
2	27.0	1.0	ตัวบน = 8.5×10^{-3} ตัวล่าง = 1.6×10^{-4}	360.0	0.041	14.76	25	83.3	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสงส่องผ่านได้
3	25.0	0.5	ตัวบน = 7.0×10^{-3} ตัวล่าง = 1.5×10^{-4}	370.0	0.045	16.65	20	18.7	ฟิล์มสีน้ำตาลอมเหลือง ไม่ทึบแสง แสงส่องผ่านได้ (เข้มกว่า 1 กับ 2 นิดหน่อย)
4	22.0	1.0	ตัวบน = 5.7×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	385.0	0.045	17.33	30	88.0	ฟิล์มสีน้ำตาลแดง
5	22.0	2.0	ตัวบน = 5.2×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	385.0	0.040	15.40	40	94.8	ฟิล์มน้ำตาลแดงเข้ม ไม่ทึบแสง
6	22.0	3.0	ตัวบน = 5.5×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	385.1	0.040	15.40	40	130.0	ฟิล์มน้ำตาลแดงไม่ทึบแสง
7	22.0	4.0	ตัวบน = 6.1×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	385.0	0.042	16.17	30	1.1×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาลอ่อนอมเหลืองไม่ทึบแสง
8	22.0	5.0	ตัวบน = 5.9×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	390	0.045	17.55	15	7.1×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มไม่ทึบแสง
9	22.0	5.0	ตัวบน = 6.1×10^{-3} ตัวล่าง = 1.4×10^{-4}	390.1	0.045	17.55	30	2.4×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มอมเหลือง ไม่ทึบแสง
10	22.0	6.0	ตัวบน = 6.4×10^{-3} ตัวล่าง = 1.3×10^{-4}	390.0	0.050	19.50	30	3.7×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาลแก่เข้ม
11	13.0	8.0	ตัวบน = 5.6×10^{-3} ตัวล่าง = 1.4×10^{-4}	410.0	0.048	19.68	30	6.3×10^{5}	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำเล็กน้อย
12	20.0	10.0	ตัวบน = 1.3×10^{-2} ตัวล่าง = 1.4×10^{-4}	390.0	0.062	24.18	30	1.7×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาล
13	17.0	10.0	ตัวบน = 7.5×10^{-3} ตัวล่าง = 1.2×10^{-4}	390.1	0.054	21.06	30	2.9×10^{4}	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

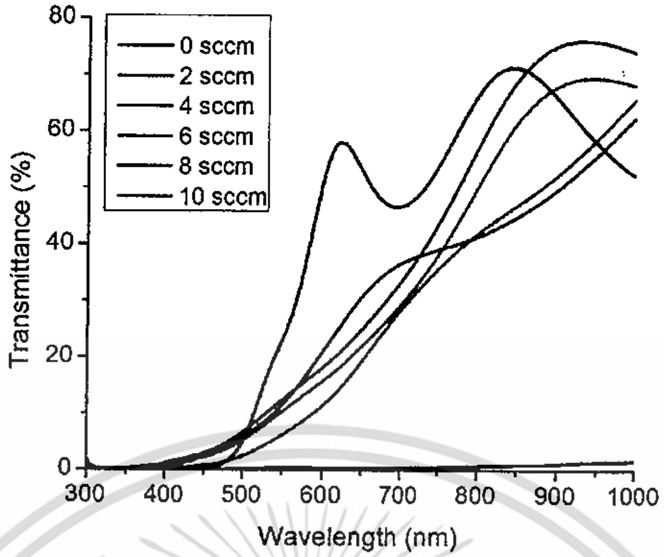
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงถึงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

14	22.0	10.0	ตัวบน = 5.7×10^{-3} ตัวล่าง = 9.7×10^{-5}	410.0	0.057	23.37	30	70.0	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำ
15	13.0	15.0	ตัวบน = 5.6×10^{-3} ตัวล่าง = 1.1×10^{-4}	410.0	0.048	19.68	30	19.9	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสง
16	22.0	18.0	ตัวบน = 7.0×10^{-3} ตัวล่าง = 9.4×10^{-5}	400.0	0.074	29.6	30	313.0	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสง
17	7.5	20.0	ตัวบน = 8.7×10^{-3} ตัวล่าง = 9.2×10^{-5}	380.0	0.073	27.74	30	5.1×10^{3}	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสง
18	8.0	15.0	ตัวบน = 6.5×10^{-3} ตัวล่าง = 1.1×10^{-4}	400.0	0.060	24.00	30	15.0	ฟิล์มสีน้ำตาลเหลืองไม่ทึบแสง

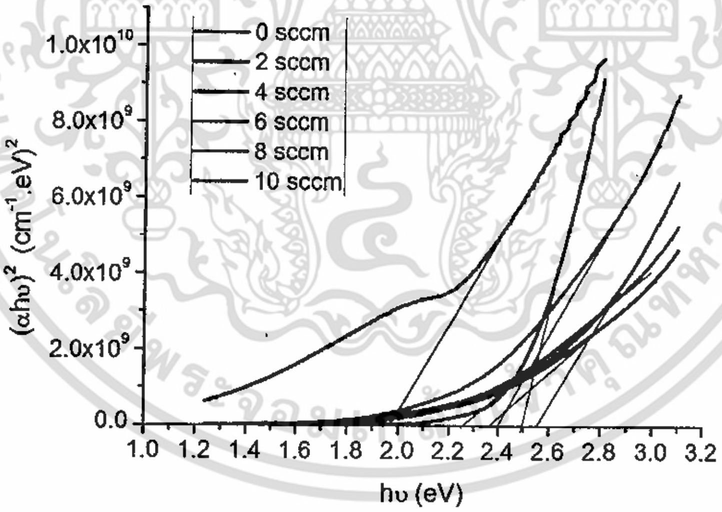


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

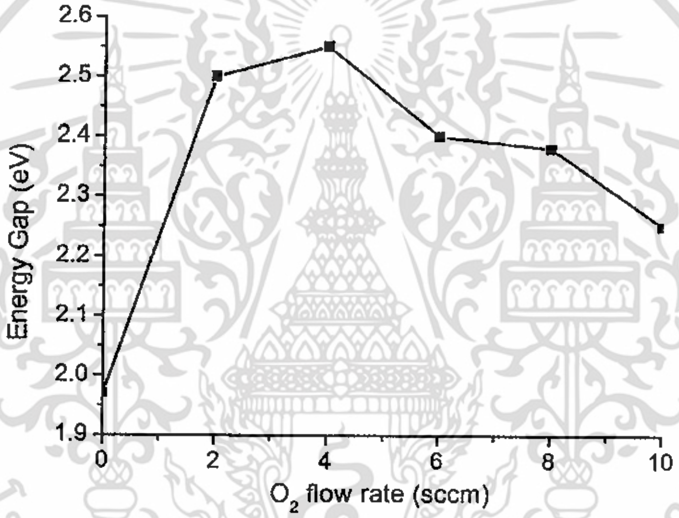


ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O_2 flow rate (sccm)	E_g (eV)
0	1.97
2	2.50
4	2.55
6	2.40
8	2.38
10	2.25



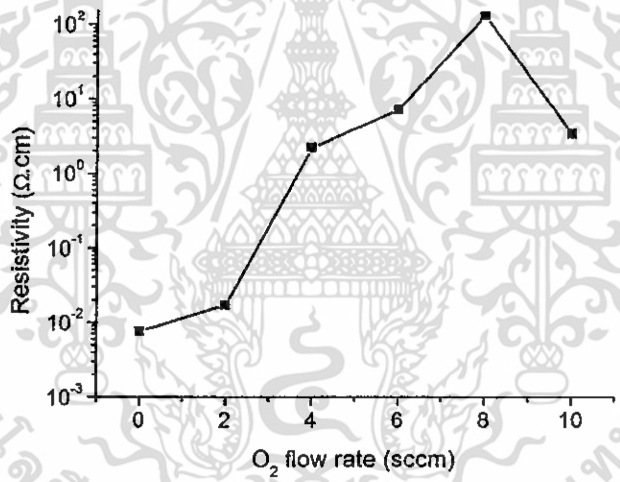
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

จากการทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยขั้วความร้อน (hot probe) พบว่าชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ค่าความต้านทานแผ่นจะแสดงดังตารางที่ 4.3 ส่วนภาพที่ 4.6 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

$Ar : O_2$ Flow Rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity (Ω.cm)
31.5 : 0	38.00	7.6×10^{-3}
22 : 2	94.6	1.7×10^{-2}
22 : 4	1.1×10^{4}	2.2
22 : 6	3.7×10^{4}	7.2
13 : 8	6.5×10^{5}	1.3×10^{2}
12 : 10	1.7×10^{4}	3.4

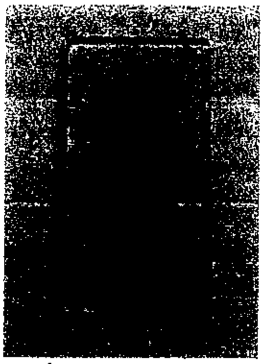


ภาพที่ 4.6 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

4.3 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก FTO จะปรากฏดังภาพที่ 4.7 พบว่าฟิล์มบาง CdS มีสีเหลืองส้มเป็นมันวาวยึดติดกับแผ่นกระจก FTO ได้ดี ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นมีน้ำตาลเข้มเคลือบบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS จะแสดงดังภาพที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

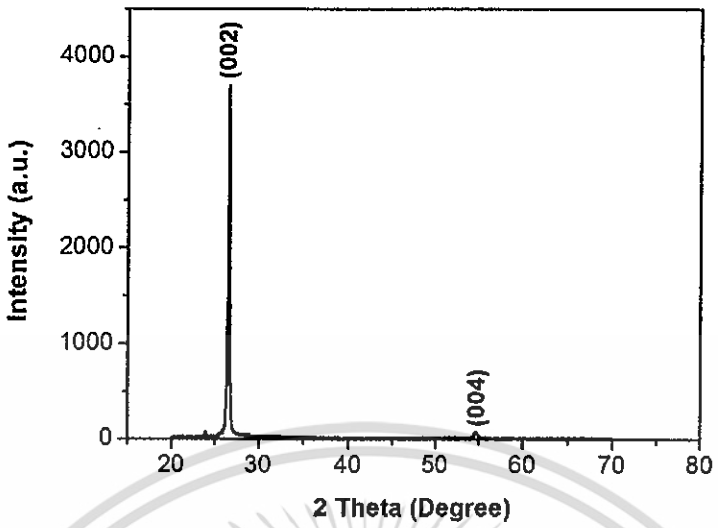
ภาพที่ 4.8 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.4 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

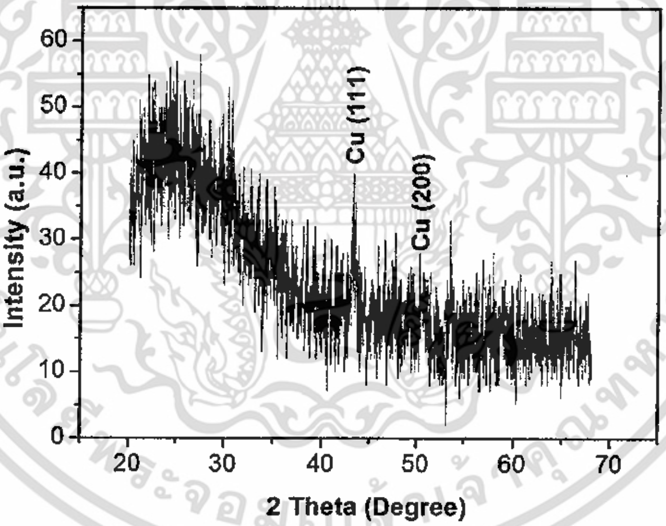
4.4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนคือ (002) และ (004) ซึ่งเป็นระนาบของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล ส่วนภาพที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



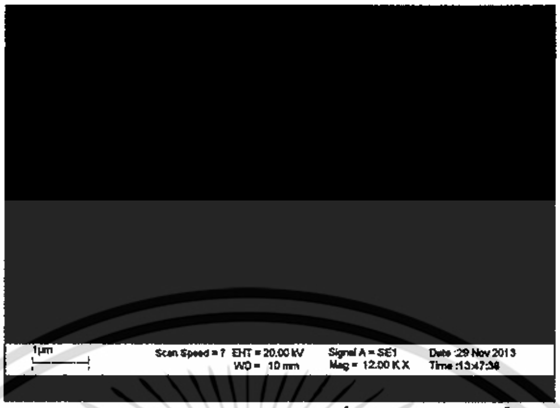
ภาพที่ 4.9 พีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



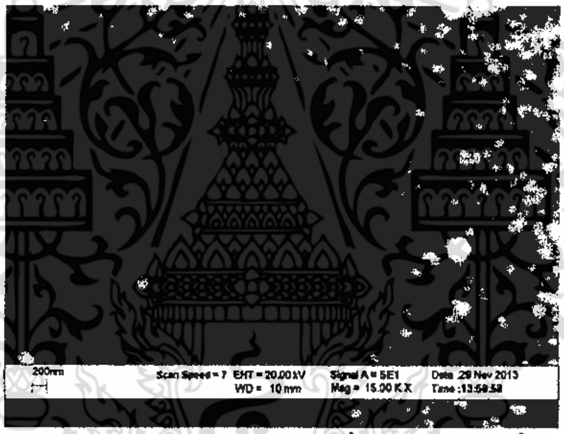
ภาพที่ 4.10 พีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

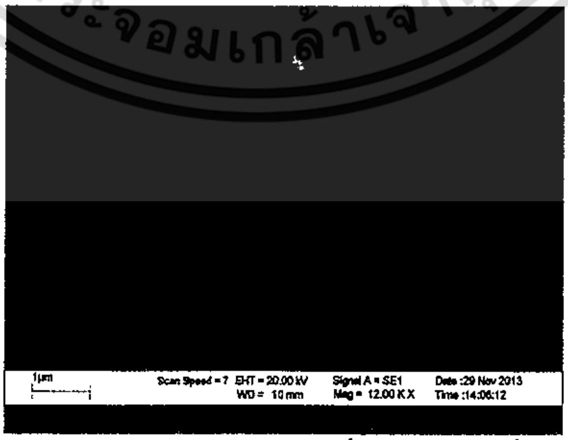
4.4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

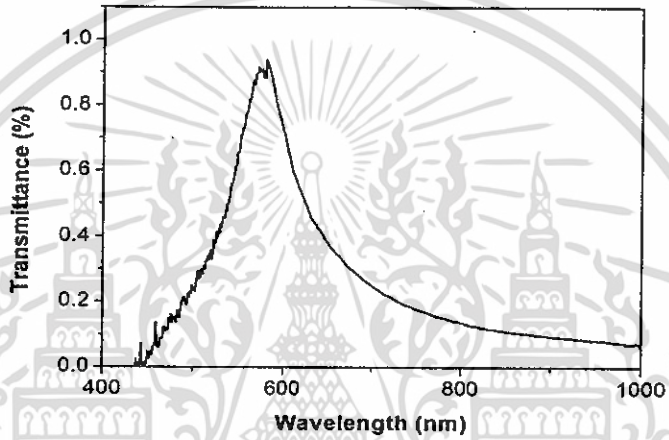


ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

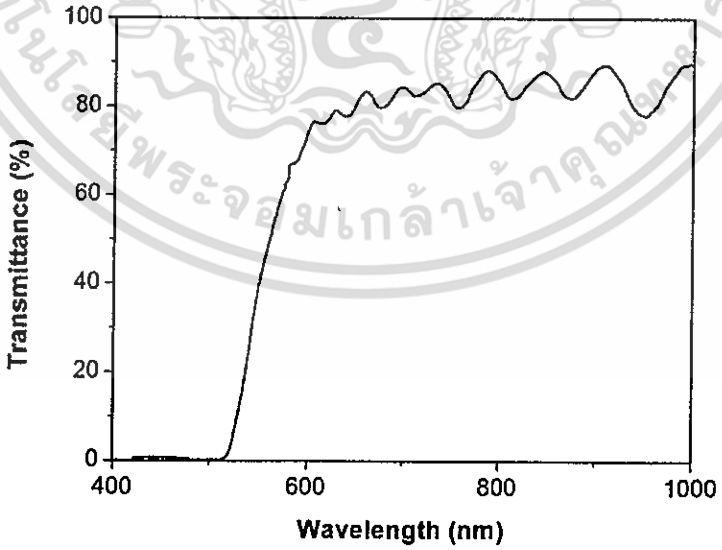
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 และ 580 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ตามลำดับ

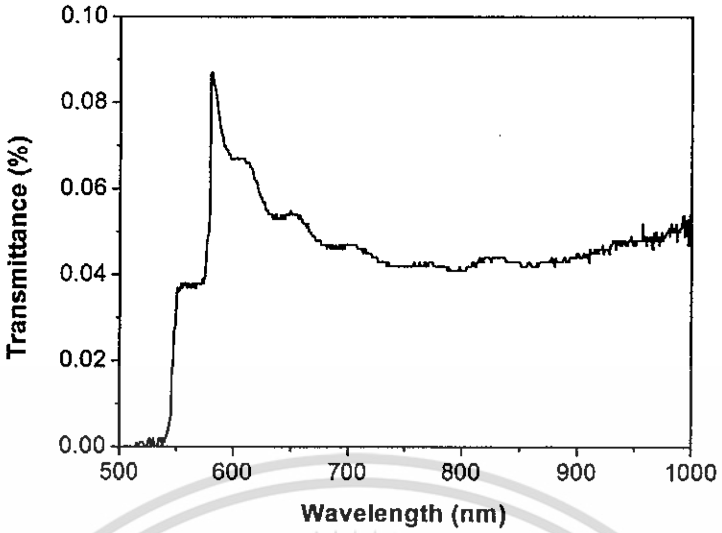


ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_xO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสง ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 500-1000 นาโนเมตร

4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง กระทำโดยการวัดค่าความ สัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 – 300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ

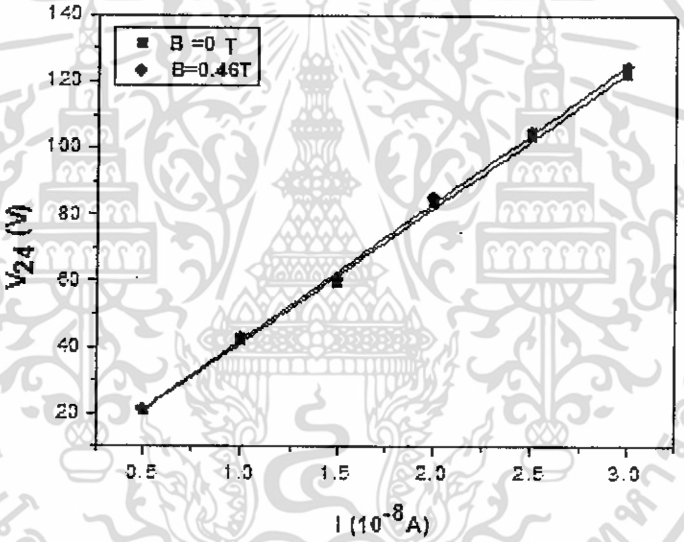
4.5.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะแสดงในตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

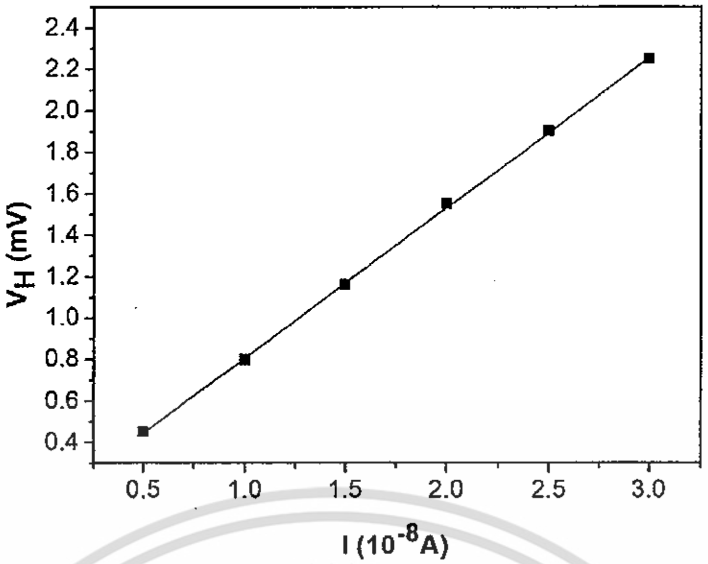
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Temperature (C°)	Current (I) (10^{-8} A)	V_{24} (B=0 T)	V_{24}'(B=4600 G)	V_H(mV)
300°	0.5	20.95	21.4	0.45
	1.0	42.00	42.8	0.80
	1.5	59.24	60.4	1.16
	2.0	83.55	85.1	1.55
	2.5	103.10	105.0	1.90
	3.0	122.35	124.6	2.25



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\rho = \frac{10^7 \times 0.4 \times 5 \times 10^{-5}}{0.4} = 500 \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$R_H = 10^6 \left(\frac{V_H}{I}\right)\frac{d}{B} = 10^6 \left(0.7251 \times \frac{10^{-3}}{10^{-8}}\right)\left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600}\right)$$

$$R_H = 7.88 \times 10^2 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์สามารถนำมาคำวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}(7.88 \times 10^2)}$$

$$n = 7.93 \times 10^{15} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าสภาพนำไฟฟ้าสามารถนำมาคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะ ได้ดังนี้

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{7.88 \times 10^2}{500}$$

$$\mu_H = 1.58 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)}$$

และจากค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type)

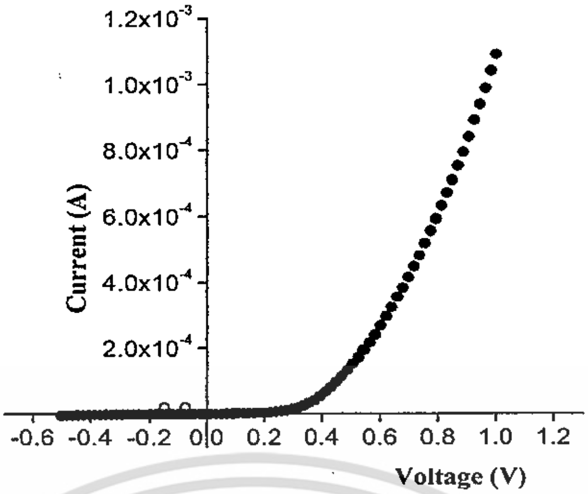
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

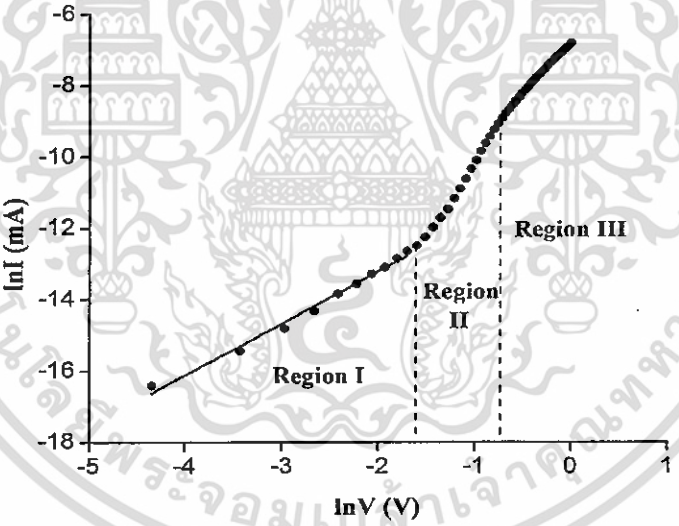
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในภาพที่ 4.19 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p^+ -n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชอตต์กีโดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังภาพที่ 4.20 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V ดังภาพที่ 4.21 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแส ไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dnI กับ I ดังภาพที่ 4.22 ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I ดังภาพที่ 4.23 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

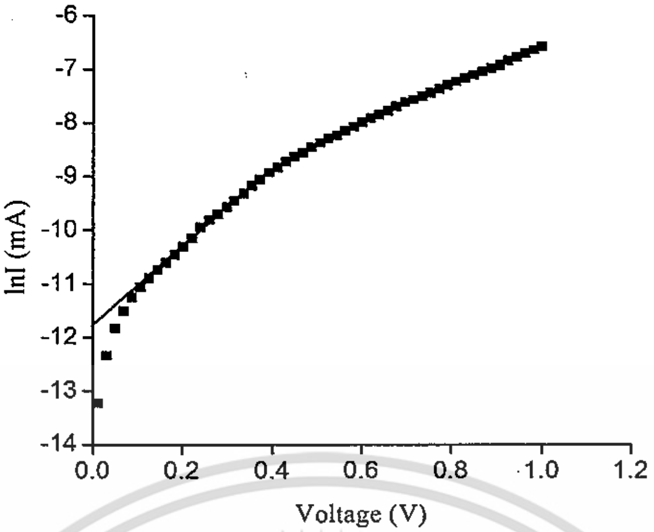


ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.20 กราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากรูป 4.20 จะเห็นได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO แบ่งออกเป็น 3 บริเวณอย่างชัดเจนกล่าวคือ บริเวณที่ 1 จะอยู่ในช่วงแรงดัน -0.5 ถึง 0.15 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ 2 จะอยู่ในช่วงแรงดัน 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ 3 จะอยู่ในช่วงแรงดัน 0.45 ถึง 1.0 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง

จากภาพที่ 4.21 คือกราฟความสัมพันธ์ค่าลอกาลิทึมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^*T^2\exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \tag{4.2}$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน ln I โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ (4.2) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

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

ความสูงกำแพงศักย์ ϕ_{B0} ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^{*} เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (Region III) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_S\left\{\exp\left(\frac{q}{nkT}(V-IR_S)\right)-1\right\} \tag{4.5}$$

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_S = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{q\varphi_{BO}}{kT}\right) \tag{4.6}$$

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_S\left\{\exp\frac{q}{nkT}(V - IR_S)[1-\exp(-qV/kT)]\right\} \tag{4.7}$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาอนุพันธ์ของ V เทียบกับ lnI เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I ดังภาพที่ 4.22 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร (R_S) และจุดตัดแกน $dV/d(\ln I)$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.8) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ H(I) ดังนี้

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

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\Phi_B + IR_S \tag{4.11}$$

เมื่อทำการคำนวณค่า H(I) จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I ก็จะได้ผลดังภาพที่ 4.23 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ($n\phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน H(I) นั้นก็คือค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

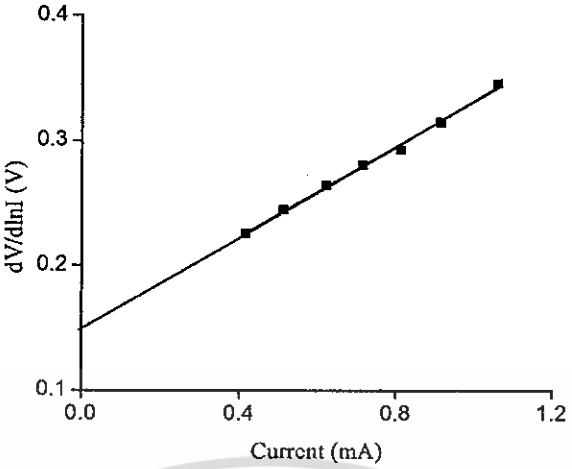
กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

$$I = kV^m \tag{4.12}$$

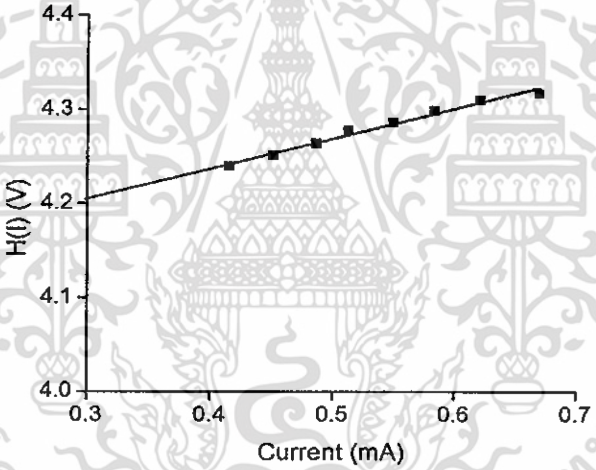
$$\ln I = m\ln V + \ln k \tag{4.13}$$

เมื่อ m คือความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า m > 2 จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.03 แสดงว่ากับดักประจุเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/d(lnI) กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuOซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_S) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_S) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

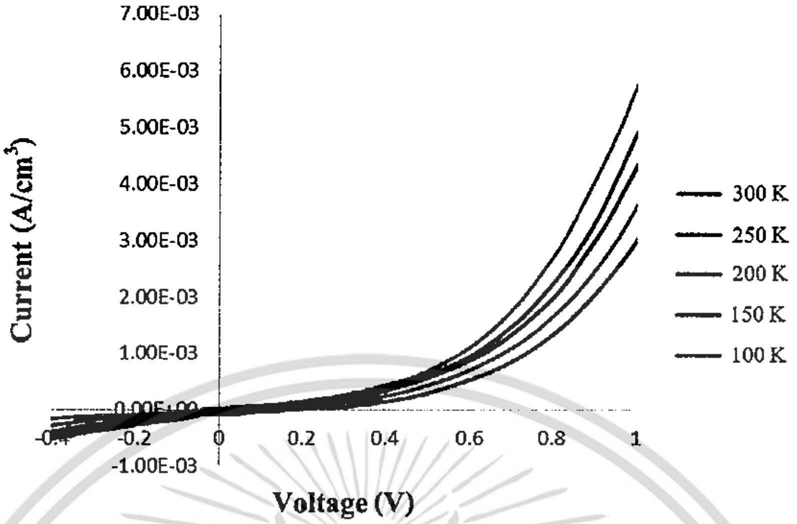
Sample	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor n		Barrier Height Φ_{B0} (eV)		Series Resistance R_s (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)]-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)]-I
CdS/CuO	7.41×10^{-6}	5.19	5.79	0.534	0.709	0.31	0.18

4.5.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังภาพที่ 4.24 และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 0.5 เป็น 0.4 โวลต์ การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.45 โวลต์เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.45 โวลต์ จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มี การแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ V เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อเทียบกับผลจากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันเพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และ แฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวง โดยค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง แสดงในตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Temperature (K)	Saturation Current(Is) (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance (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
10	1.99E-04	94.03	89.61	0.375	0.381	6.98	5.07
20	2.18E-04	51.17	63.38	0.376	0.386	5.73	4.20
40	2.32E-04	24.16	23.12	0.385	0.401	4.41	3.32
60	2.49E-04	17.92	13.86	0.401	0.410	3.70	2.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

80	2.67E-04	14.24	11.01	0.408	0.415	3.25	2.56
100	2.77E-04	11.95	9.35	0.418	0.426	2.99	2.39
120	2.96E-04	10.91	8.05	0.429	0.435	2.83	2.23
140	3.07E-04	10.13	7.79	0.435	0.447	2.70	2.11
160	3.12E-04	9.61	7.27	0.446	0.453	2.35	1.84
180	3.19E-04	9.35	6.75	0.458	0.468	2.06	1.52
200	3.23E-04	8.05	6.75	0.464	0.475	1.70	1.24
220	3.31E-04	7.53	6.49	0.475	0.483	1.57	1.08
240	3.37E-04	7.27	5.97	0.490	0.498	1.38	0.81
260	3.76E-04	6.75	5.71	0.495	0.503	1.06	0.47
280	4.19E-04	5.71	5.19	0.504	0.514	0.87	0.30
300	5.08E-04	5.19	4.15	0.520	0.534	0.31	0.18

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 4.25

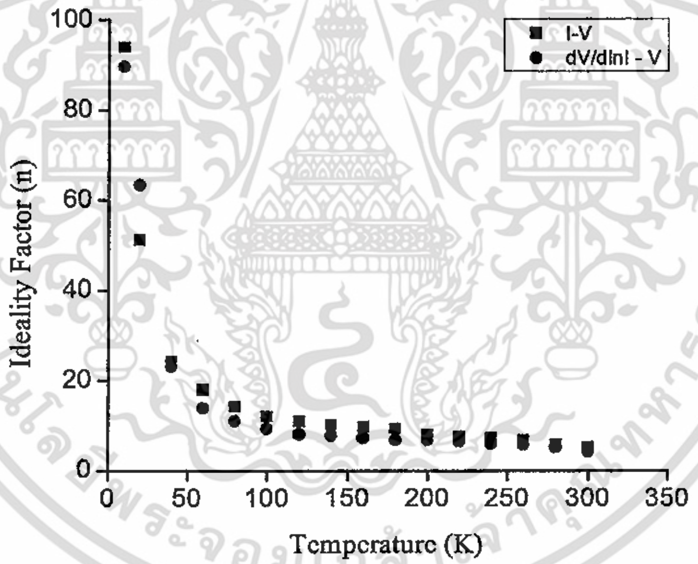
ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลงเหมือนกัน แสดงดังภาพที่ 4.27 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ชอตต์กีมาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

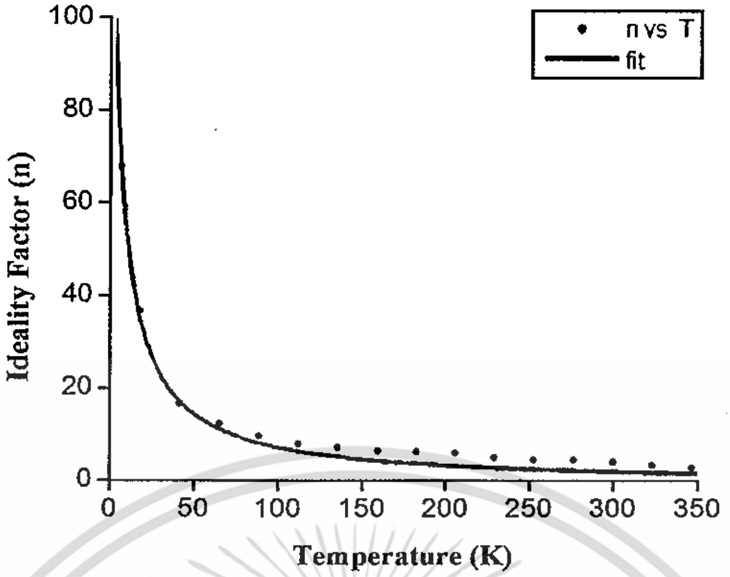
ให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อยจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจึงมีค่าความสูงของกำแพงศักย์น้อยและค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่ามากที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.28 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้น มีสาเหตุมาจากการที่ความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ p^{+} - n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

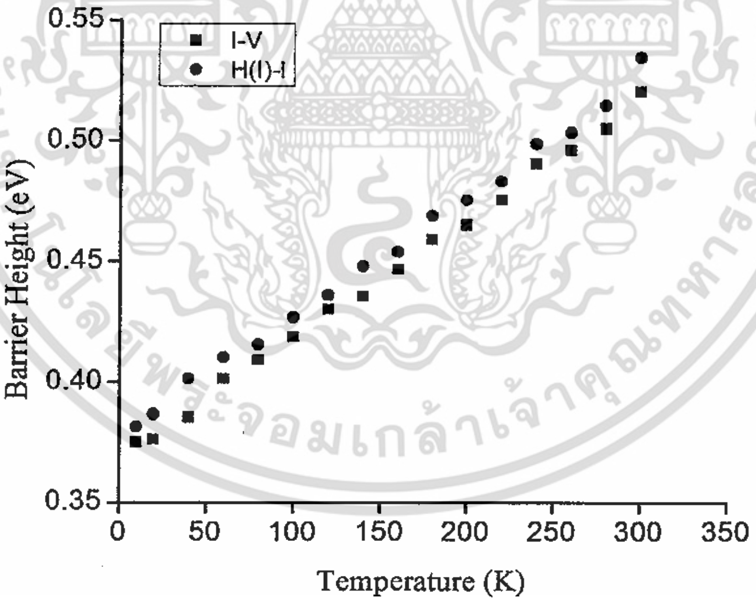


ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง dV/d(lnI) กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

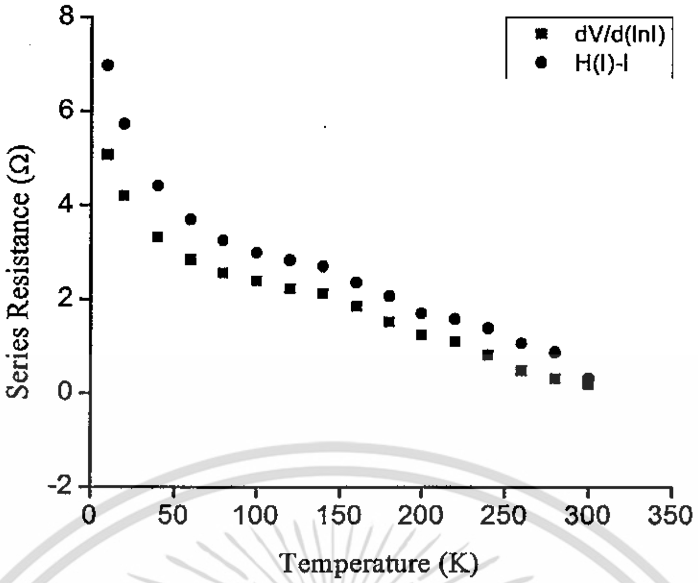


ภาพที่ 4.26 การหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

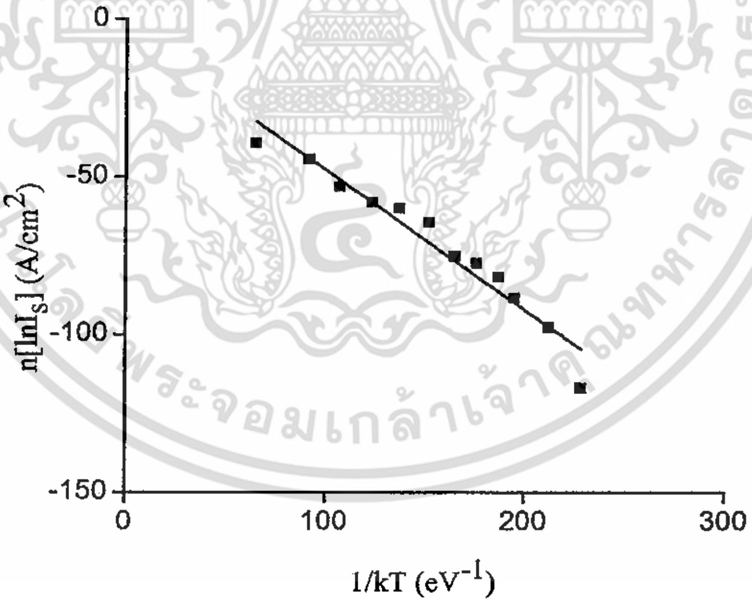


ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.29 กราฟอาร์เรเนียสของ n[lnI$_S$] เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวินของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความชันของกราฟในภาพที่ 4.29 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จาก สมการที่ (4.14)

$$n\ln(J_0) = -E_a\left(\frac{1}{kT}\right) \quad (4.14)$$

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากความชันของภาพที่ 4.26

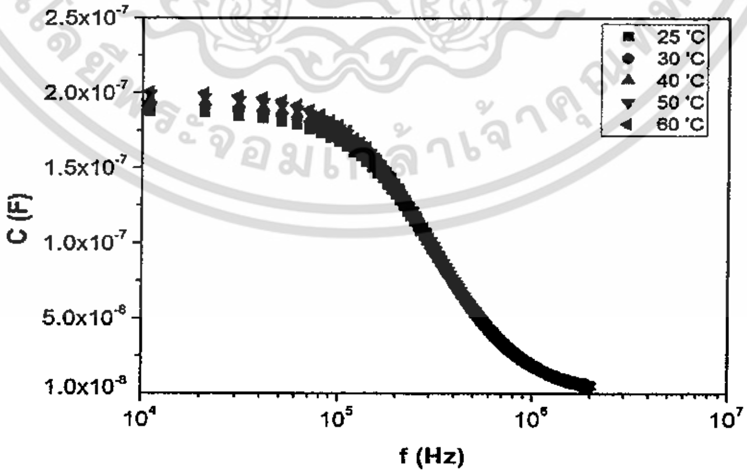
ดังนั้น ความชัน $= E_a$

จะได้ $E_a = 0.4431$ อิเล็กตรอนโวลต์

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 4.29 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบเคียงกับสมการที่ (4.14) เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.4431 อิเล็กตรอนโวลต์

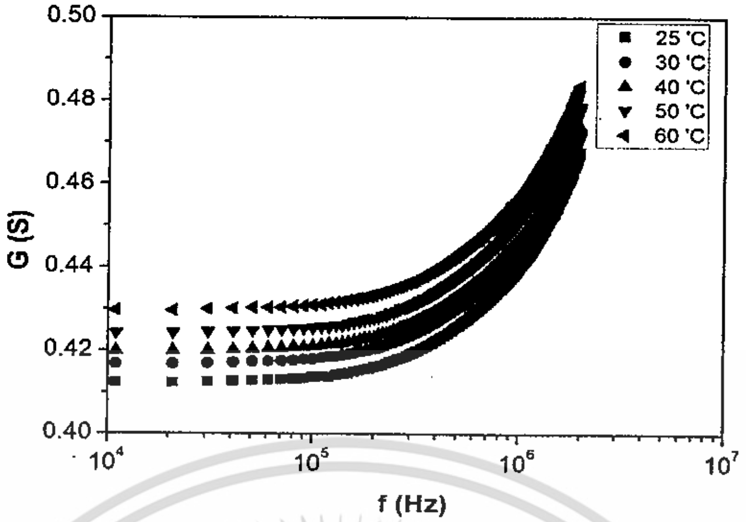
4.5.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

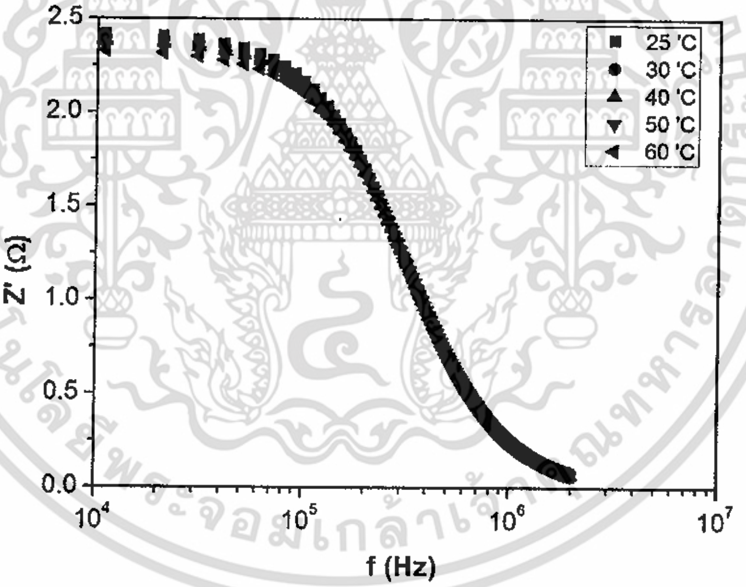


ภาพที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

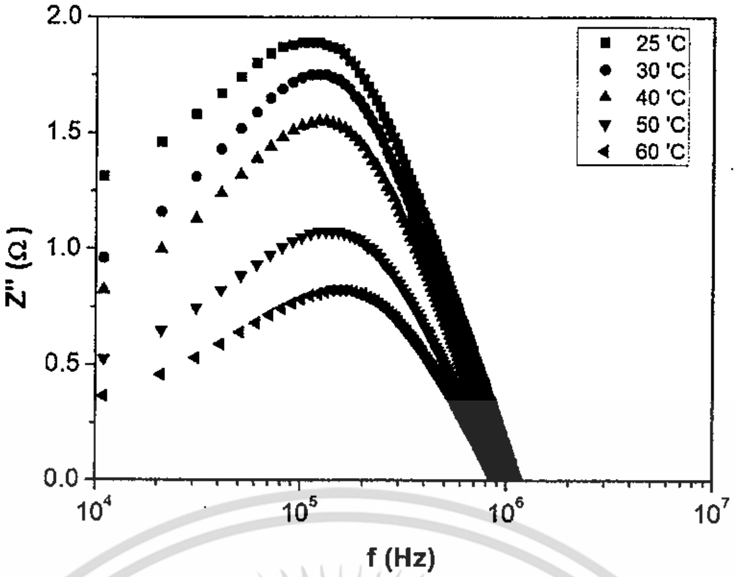


ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

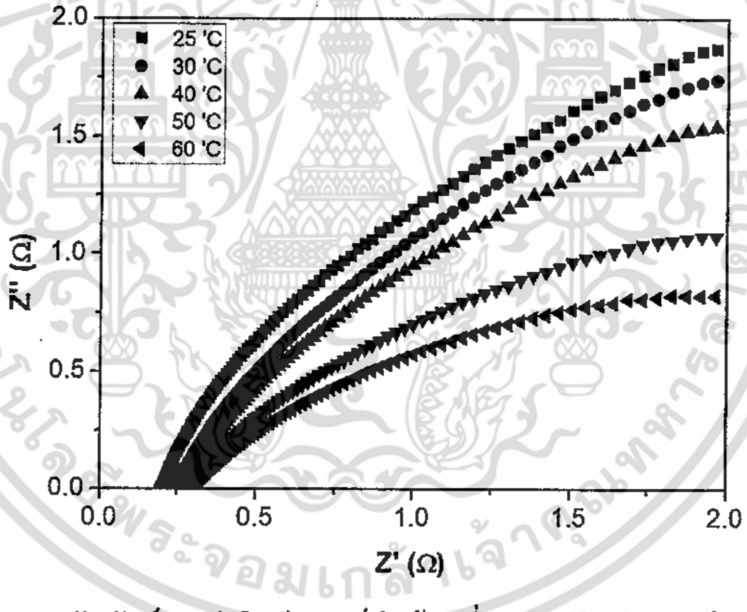


ภาพที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

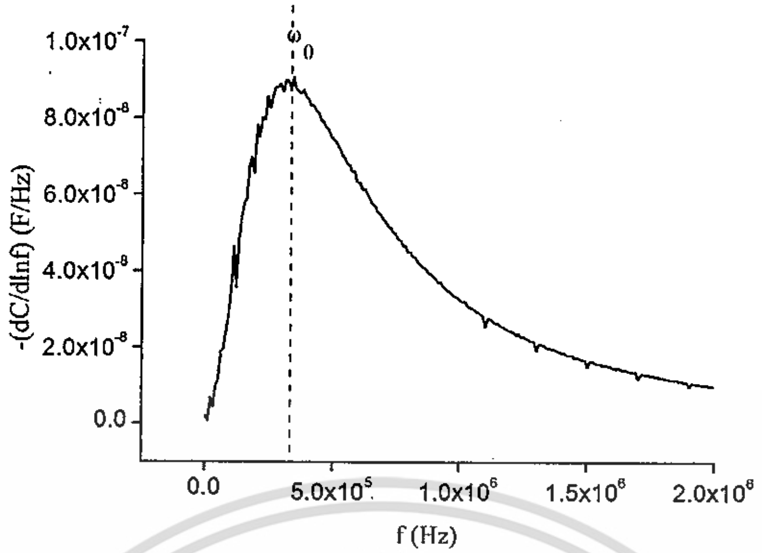


ภาพที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

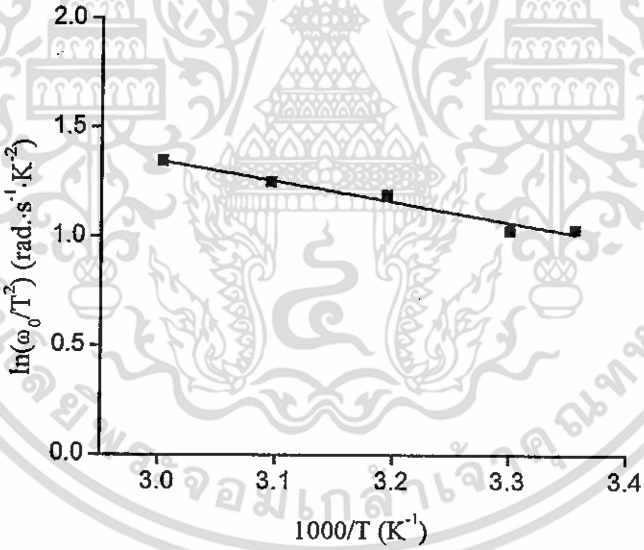


ภาพที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

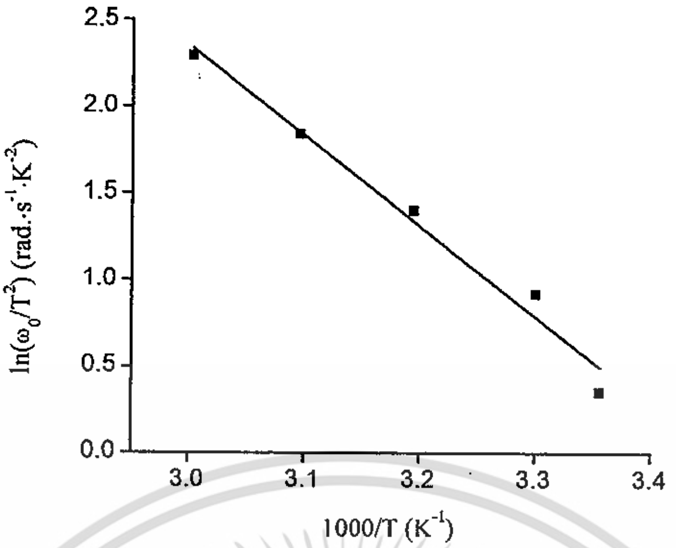


ภาพที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง -dC/dlnf กับ f เพื่อหาค่า ω_0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

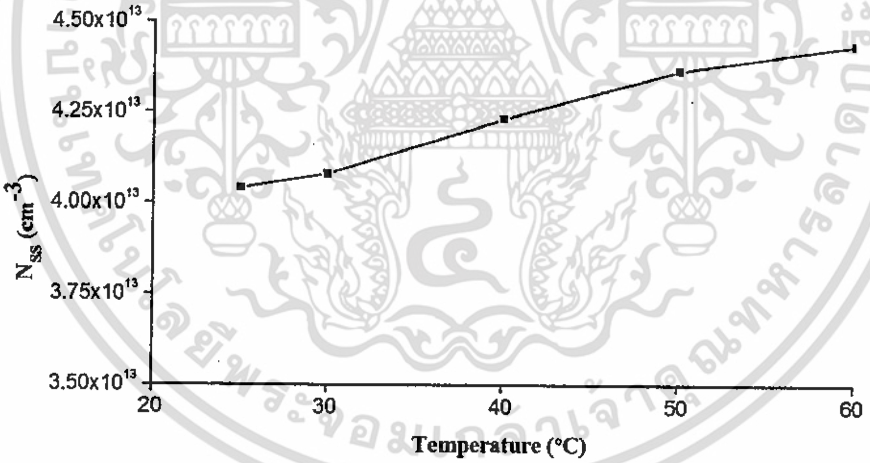


ภาพที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ (1000/T) ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ -dC/dlnf กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ (1000/T) ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับช่วงอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

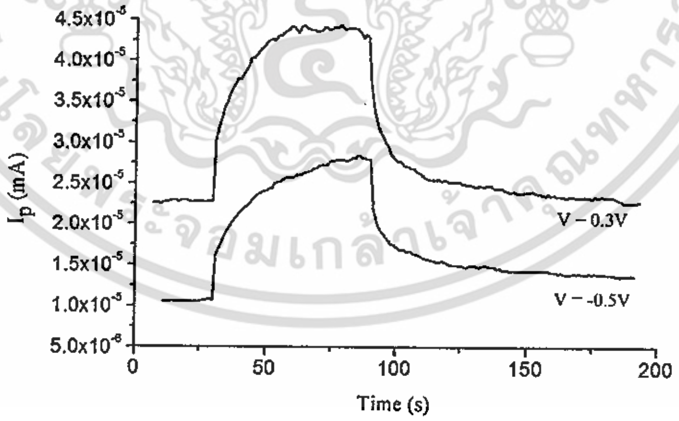
จากกราฟความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ (1000/T) สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากสองวิธีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Method	T (°C)	ω_0 (rad/s)	E_a (eV)	ξ_0 ($s^{-1}K^{-2}$)	σ_T (cm^{-1})
(-dC/dlnf)-f	25	340,830	0.082	66.6	2.6×10^{-24}
	30	320,840			
	40	320,840			
	50	290,855			
	60	310,845			
Z'-Z"	25	100,950	0.466	1.16×10^{6}	4.54×10^{-18}
	30	110,945			
	40	510,745			
	50	120,940			
	60	110,045			

4.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียม โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

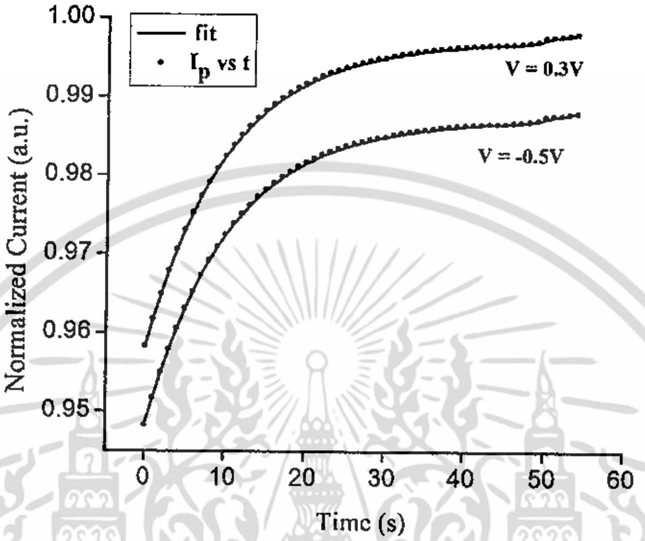


ภาพที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาภายใต้แรงดันไบอัส -0.5 กับ 0.3 โวลต์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

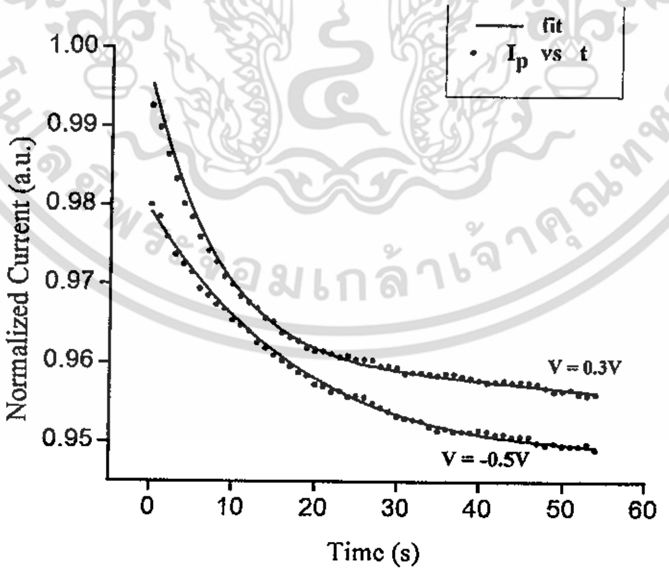
จากกราฟในรูปที่ 4.39 เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลงทำให้ทราบค่าช่วงชีวิตพาหะได้ จากนั้นจึงนำค่าช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวิตพาหะนี้ไปเป็นค่าเริ่มต้นในการฟิตกราฟโดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์กับเวลาของกระแสโฟโตขาขึ้นและขาลงจะแสดง ดังภาพที่ 4.41 และภาพที่ 4.42 ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.10 จะแสดงค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในช่วงกระแสขาลง



ภาพที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคื้อรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ได้จากการฟิตกราฟ ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอกซ์โพแนนเชียล

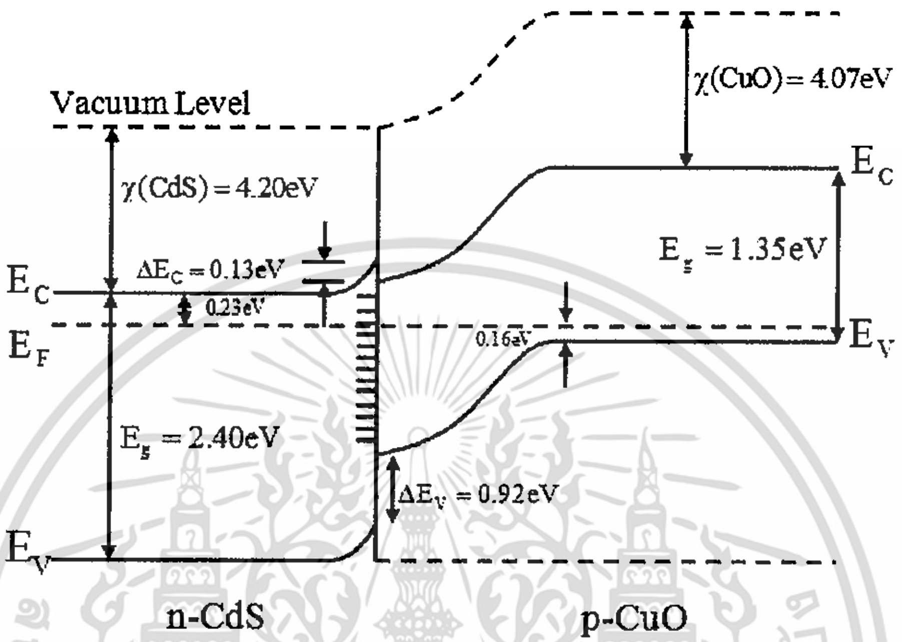
Rise Time (s)	Bias Voltage (V)		Decay Time (s)	Bias Voltage (V)	
	-0.5	0.3		-0.5	0.3
1^{st} Term	$A_1 = 5.06$ $\tau_{r1} = 42.03$ (s)	$A_1 = 4.52$ $\tau_{r1} = 38.05$ (s)	1^{st} Term	$A_1 = 0.15$ $\tau_{d1} = 42.90$ (s)	$A_1 = 0.05$ $\tau_{d1} = 50.45$ (s)
2^{nd} Term	A2 = -142.40 $\tau_{r2} = 125.78$ (s)	$A_1 = 4.52$ $\tau_{r1} = 38.05$ (s)	2^{nd} Term	$A_2 = -1.01$ $\tau_{d2} = 268.10$ (s)	$A_2 = -0.04$ $\tau_{d2} = 423.73$ (s)
3^{rd} Term	A3 = 356.30 $\tau_{r3} = 233.10$ (s)	$A_3 = 42.90$ $\tau_{r3} = 180.18$ (s)	3^{rd} Term	$A_3 = -6.13$ $\tau_{d3} = 900.90$ (s)	$A_3 = 0.03$ $\tau_{d3} = 578.03$ (s)
4^{th} Term	A4 = -3680 $\tau_{r4} = 980.39$ (s) $\beta = 0.136$	$A_4 = -667.50$ $\tau_{r4} = 862.06$ (s) $\beta = 0.135$	4^{th} Term	$A_4 = 7.96$ $\tau_{d4} = 1156.07$ (s) $\beta = 0.700$	$A_4 = 0.94$ $\tau_{d4} = 2832.86$ (s) $\beta = 0.089$

ตารางที่ 4.10 ความหนาแน่นของกับดักพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคื้อรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

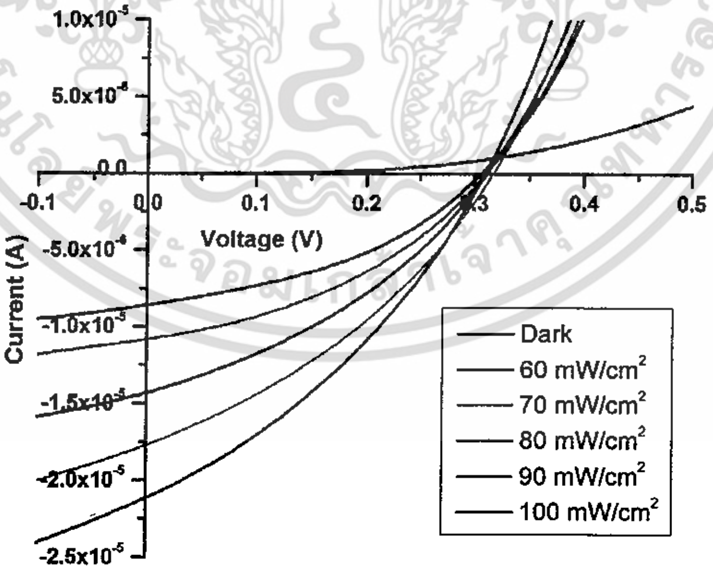
Sample Conditions			Bias Voltage (V)	
			-0.5	0.3
Decay Component	1^{st} Term	I_1 (A)	2.15E-05	3.48E-05
		τ_{r1} (s)	42.90	50.45
		σ_{t1} (cm^{-2})	3.02E+13	8.16E+13
	2^{nd} Term	I_2 (A)	1.72E-05	2.72E-05
		τ_{r2} (s)	268.10	423.73
		σ_{t2} (cm^{-2})	2.42E+13	6.38E+13
	3^{rd} Term	I_3 (A)	1.53E-05	2.65E-05
		τ_{r3} (s)	900.90	578.03
		σ_{t3} (cm^{-2})	2.15E+13	6.21E+13
	4^{th} Term	I_4 (A)	1.50E-05	2.40E-05
		τ_{r4} (s)	1156.07	2832.86
		σ_{t5} (cm^{-2})	2.11E+13	5.63E+13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และพลังงานกระตุ้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้ดังภาพที่ 4.42



ภาพที่ 4.42 แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO



ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อทำการวัดภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS/p-CuO เมื่อทำการวัดกระแส- แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ

Illumination Intensity (mW/cm^2)	I_{SC} (A)	V_{oc} (V)	F.F.	η (%)	R_s $(\times 10^4 \Omega)$	R_{sh} $(\times 10^4 \Omega)$
60	8.0×10^{-6}	0.30	0.20	2.67	1.10	8.89
70	1.2×10^{-5}	0.31	0.25	2.65	1.01	7.75
80	1.5×10^{-5}	0.32	0.26	3.24	0.87	5.89
90	1.8×10^{-5}	0.33	0.34	3.71	0.80	5.67
100	2.3×10^{-5}	0.32	0.36	4.22	0.77	3.68

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบาง CuO เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และการเตรียมฟิล์มบาง CdS เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง CuO และ CdS ในขั้นสุดท้ายได้ทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า-แสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ จากนั้นจึงวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ที่ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 22และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีตามลำดับ ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ ให้กับขั้วค่าโทรด จนกระทั่งถึง 410 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ผิวหน้าของฟิล์มบางมีลักษณะความมันเงาสีน้ำตาลเข้มโปร่งแสงยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS นั้นเตรียมขึ้นโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีลักษณะเป็นสีเหลืองส้มเป็นมันวาวโปร่งแสง ยึดติดกับกระจกสไลด์ได้

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบเลี้ยวเบนเด่นชัดที่สุดที่มุม 26.55 องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าเป็นระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO แสดงว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นอะมอร์ฟัส และมีเกรนเล็กมาก

สำหรับการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO จะเริ่มจากการเตรียมฟิล์บาง CdS ให้เคลือบแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงเคลือบฟิล์มบาง CuO ลงบน CdS โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเงื่อนไขเหมือนกับการเตรียมฟิล์มบาง CuO เคลือบบนกระจกสไลด์

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1 โวลต์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องมีสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันขีดเริ่มอยู่ที่ 0.5 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ 7.41×10^{-6} แอมแปร์ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ที่หาได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกันคือ 5.19 และ 5.79 ตามลำดับ ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่หาได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันกับวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.534 และ 0.709 อิเล็กตรอนโวลต์ 0.31 และ 0.18 โอห์ม ตามลำดับ

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 1.0 โวลต์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน พบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าแปรตรงตามอุณหภูมิ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.084 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง มีค่าค่าแปรตรงตามอุณหภูมิ และค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากวิธีของชวงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และวิธีของชวงที่มีความสัมพันธ์ $dV/d(\ln I) - I$ สามารถอธิบายความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมได้ดีที่สุด

จากการทดสอบปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องและความเข้มแสงอาทิตย์เท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าแรงดันเปิดวงจรเท่ากับ 0.32 โวลต์ กระแสลัดวงจรเท่ากับ 2.3×10^{-5} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ฟิลแฟกเตอร์เท่ากับ 0.36 ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 4.22 เปอร์เซนต์ แต่เมื่อความเข้มของแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น พบว่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องดีกับทฤษฎี

5.1.3 ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25 - 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเราจะได้ค่าความถี่เฉพาะ ω_0 ที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ และ ω_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังสามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 82 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และเรายังได้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่ ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของกับดักพาหะมีค่าเท่ากับ 4.05 x 10^{13} ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง สามารถคำนวณได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่ ซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะนี้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้เรียนรู้ถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้ศึกษาลักษณะของเกรนที่ได้จากภาพถ่ายกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก FTO ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ได้เรียนรู้วิธีการวัดคุณสมบัติต่างๆของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยได้ทำการวัดกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า การวัดค่าอิมพิแดนซ์เชิงซ้อนและการวัดความจุไฟฟ้า-ความถี่ เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูงกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ ค่าพลังงานกระตุ้น เป็นต้น ได้เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 4.22 เปอร์เซนต์ ซึ่งสิ่งนี้เองจะช่วยทำให้เราสามารถพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้อีกในอนาคต

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระวังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกไม่สม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ติดทั้งแผ่นทำความสะอาดเป้าสปัตเตอร์ทุกครั้งก่อนใช้งานและทำการขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียดเพื่อป้องกันการอาร์ค

การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงควรสร้างสภาพโกลวดิสชาร์จขึ้นก่อน แล้วจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าห้องสุญญากาศจุดประสงค์เพื่อไม่ให้ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเป้าทองแดงโดยตรงซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นชั้นออกไซด์เคลือบผิวหน้าเป้าทองแดงอันจะส่งผลให้การโกลวดิสชาร์จดับได้

การเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยการระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควรเพิ่มกระแสไฟฟ้าอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้สารเคมีกระเด็นตกจากภาชนะระเหยสาร และยังช่วยควบคุมไม่ให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางสูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบกันสัญญาณรบกวนที่ดีเพราะเวลาวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำจะมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

ควรจะทำการวัดความจุไฟฟ้า-ความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตสโคปีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้อย่างถูกต้อง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1 ชื่อบทความวิจัย “Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films” ตีพิมพ์ใน Advanced Materials Research vol. 1098, 2015, pp. 6-11. โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

ABSTRACT

CuO thin films were obtained through thermal oxidation of dc magnetron sputtered metallic Cu films on glass substrates. Thermal oxidation process was performed in air at temperature ranging 300-500^{O}C. From XRD patterns, CuO single phase of monoclinic structure was formed at oxidation temperature beyond 450^{O}C whereas amorphous phase with very small grains was obtained at oxidation temperature below 450^{O}C. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. From transmission spectra, direct band gap value is varied between 2.17 and 2.83eV. From the transient photoconductivity measurements, persistent photoconductivity (PPC) behavior was observed. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions resulting into five slow decay times. Density of trap states corresponding to its decay time was also evaluated from the decay current data.

Keywords: p-CuO/n-CdS heterojunction, I-V characteristics, C-V characteristics

INTRODUCTION

Oxides of copper are well-known to show p-type conductivity and have many advantages for catalysts and solar energy conversion application. Non-toxic, economic, abundant availability and relatively simple formation of oxide makes copper oxide as an interesting material [1]. Two common forms of copper oxide are cuprous oxide (Cu_2O) and cupric oxide (CuO). A meta-stable copper oxide, Cu_4O_3, which is an intermediate compound between the previous two, has also reported [2]. Cu_2O and CuO belong to cubic and monoclinic structures with band gap of 2.1-2.6 eV and1.9-2.1eV, respectively. The growth of high quality p-type CuO thin films is essential for fabricating p-n junction-based oxide devices, such as solar cells, light emitting diodes and transistors. The optical transmittance and electrical resistivity of the films are two critical parameters in evaluating the performance of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

photovoltaic cells and electrochromic devices. In this paper, CuO thin films were obtained through thermal oxidation of dc magnetron sputtered metallic Cu films on glass substrates. 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.

EXPERIMENTAL

Copper thin films were grown on glass substrates by using dc magnetron sputtering from a home-made circular planar magnetron sputtering system. A circular planar magnetron of 60 mm diameter was used as the magnetron cathode. The magnetron target assembly was mounted on the top plate of the sputter chamber such that the sputtering could be done by sputtering down configuration. A continuously variable dc power supply of 630 V and 2.6 A was used a power source for sputtering. A 60 mm diameter and 3 mm thick pure copper (99.99%) used as sputter target. Pure argon was used as sputter gas. The flow rate of argon was controlled by AALBORG mass flow controller. Before deposition of each batch, the target was sputtered in pure argon atmosphere for 5 min to remove oxide layer if any on the surface of target. The sputtering conditions maintained during the growth copper films are given in Table 1. The as-deposited copper thin films were oxidized in tubular furnace at temperature ranging from 300-500 ^{o}C in air for 60 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 JEOL model JSM-6400 scanning electron microscope. Optical transmission measurements were performed with UV-VIS double beam spectrophotometer in the wavelength range of 220-1,000 nm. The band gap (E_g) of the transparent films was determined by using the equation $(\alpha hV)^2 = A(hV - E_g)$ where α is the absorption coefficient, A is a constant and hV is the photon energy. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 List of some conditions for preparing CuO thin films

Conditions	Parameters	Values
Sputtering	Target	Cu
	Argon flow rate (sccm)	15
	Target to substrate distance (cm)	10
	Bias voltage (V)	370
	Current (mA)	80
	Substrate temperature (^{o}C)	25
	Working pressure (torr)	3.6×10^{-3}
	Sputtering time (min)	6
Oxidized in air	Temperature (^{o}C)	300-500
	Time (min)	60

RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 shows XRD patterns of CuO films as a function of oxidation temperature. XRD patterns of the films oxidized at temperature below 450^{O}C show amorphous characteristics. In contrast, the XRD spectrum of the films oxidized at 500^{O}C shows the well-resolved two diffraction peaks. These peaks correspond to the reflection of (-111) and (111) planes of standard JCPDS data card of CuO (JCPDS No. 80-1268). The crystallite size was calculated using Scherrer's formula, neglecting peak broadening due to residual stresses in the films, $L= 0.9\lambda/(\beta\cos\theta)$ where β is the broadening of diffraction line measured at half its maximum intensity in radian and λ is the wavelength of X-rays (0.1540 nm). The calculated value of L is about 15 nm. SEM images of CuO films obtained from oxidation temperature during 300-500^{O}C were shown in Fig. 2. When the films were oxidized below 350^{O}C, the morphology does not change much and shows better uniformity in free surface. However, oxidation temperatures higher than 350^{O}C, small pores over the films were observed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

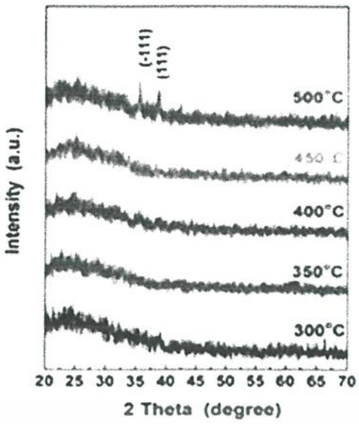
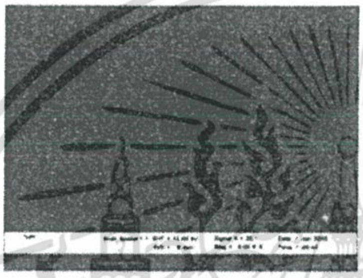
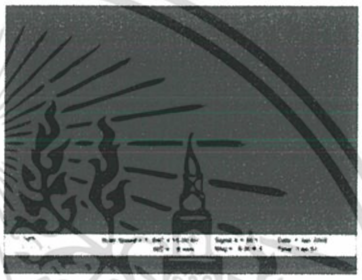


Fig. 1 XRD patterns of CuO films as a function of oxidation temperature.



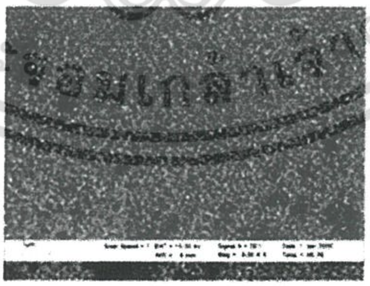
T = 300 ^{O}C



T = 350 ^{O}C

T = 400 ^{O}C

T = 450 ^{O}C



T = 500 ^{O}C

Fig. 2 SEM images of CuO films obtained from oxidation temperature between 300-500^{O}C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 3 shows transmittance spectra of CuO films obtained from oxidation temperature during 300-500^{o}C. From the transmittance spectra we have also calculated band gap of films with different oxidation temperatures. The absorption coefficient (α) is calculated using the equation α = (1/d)ln(1/T) where T is transmittance and d is film thickness. The absorption coefficient (α) and the incident photon energy (hV) related by $(\alpha hV)^2=A(hV-E_g)$ where A and E_g are constant and band gap values, respectively. The E_g can be determined by extrapolation of the linear portion of the curve to the photon energy axis. Fig. 4 shows the curve of $(\alpha hV)^2$ vs. photon energy (hV) of the films obtained from oxidation temperature at 500^{o}C. Two allowed direct transition band gap were obviously observed. The smaller band gap value (E_{g1}) should correspond to the major CuO phase. The bigger band gap (E_{g2}) is possibly attributed to the parasitic phase of Cu_2O which cannot be observed by XRD due to too small amount of Cu_2O content in the bulk of films. The variation of E_{g1} and E_{g2} was shown in Fig. 5. The E_{g1} decreases from 2.41 to 2.17 eV with oxidation temperature increases from 300 to 400^{o}C and then increases to 2.19 eV when oxidation temperature further increases to 500^{o}C. The similar behavior is also observed in E_{g2}. These results indicate that E_{g1} and E_{g2} are sensitive to the oxidation temperature.

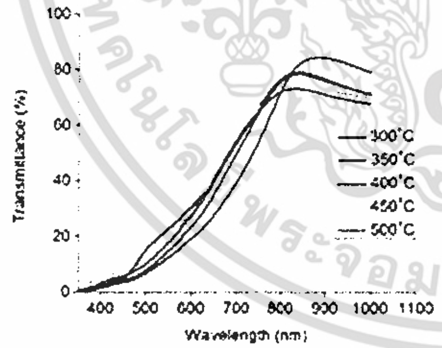


Fig. 3 Transmittance of CuO films obtained from oxidation temperature between 300-500°C.

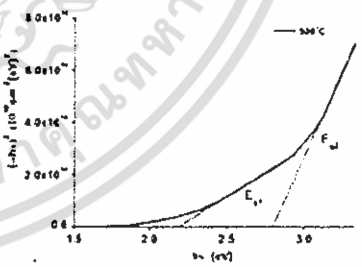


Fig. 4 $(\alpha hV)^2$ vs. hV plot of CuO films obtained from oxidation temperature at 500°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

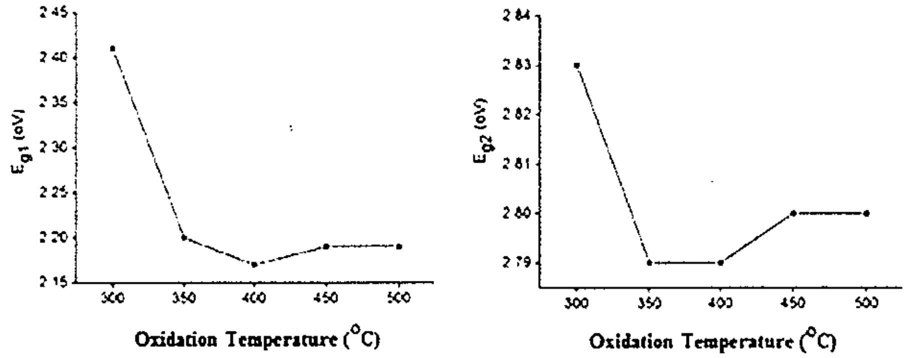


Fig. 5 Variation of band gap of CuO films as a function of oxidation temperature.

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 are exhibited p-type conductivity. Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against oxidizing temperature are shown in Fig. 6. Carrier concentration (n) is 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) is determined using the relation $1/ne\rho$ where ρ is resistivity. Resistivity of the films increases from $5.01x10^2$ to attain maximum at $7.50x10^3\Omega$.cm with oxidation temperature increasing from 300 to 400^oC, and decreases to $1.88x10^3$ Ω.cm when the oxidation temperature further increase to 500^oC. The mobility initially decreases with an increase in oxidation temperature up to 400^oC and then increases with an increase in oxidation temperature. The variation of carrier concentration shows the similar behavior to mobility. These results indicate that the resistivity, carrier concentration and mobility of the films are sensitive to the oxidation temperature.

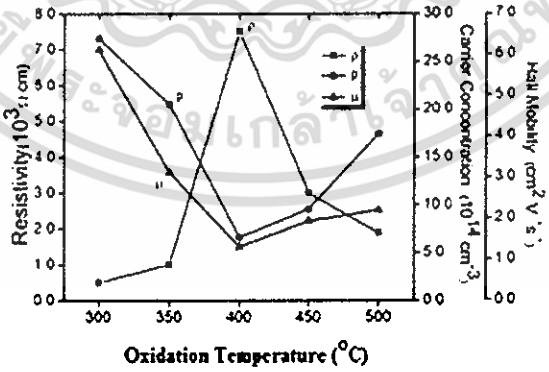


Fig. 6 Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against oxidation temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The photocurrent response of the films oxidized at 500^{o}C was measured by two probe method using halogen lamp as a light source. Two silver electrodes with area 0.05 cm^2 was made on the sample surface. The photocurrent response of the films oxidized at 500^{o}C was shown in Fig. 7. The sample was connected to the experimental setup and maintained in darkness under a constant applied bias of 6 V to stabilize the current. After the stabilization period, the current was recorded in the following sequences: 30 s in darkness, 400 s under illumination and, finally, 400 s in the darkness. Under illumination, the current increases immediately because a lot of carriers were exited by light illumination. After the illumination period, the persistent photoconductivity (PPC) effect of the films oxidized at 500^{o}C occurred in darkness. The decay of PPC in Fig. 7 can be described by multiple exponential functions [3,4] as

$$I = I_{dark} + (I_0 - I_{dark})\sum_i \exp(-\frac{t}{\tau_i})$$

where I_{dark} is the current measured in darkness, I_0 is the PPC buildup level near the moment of light excitation being removed, τ is the PPC decay time constant. The normalized decay current in darkness as shown in Fig. 8, which follows the illumination period, indicates the persistent of charge carrier traps in the films [5]. In Fig. 8 the dash line is the measured data and the solid line is the least squares fit data by the multiple exponential functions as described above. According to the function of fitting curve in Fig. 8 we calculated that the five τ values are 120.77, 208.33, 414.94, 884.96 and 1504.95 s. Method for calculating the trap densities corresponding to the PPC decay constant was reported in the literatures [6-8]. The corresponding trap densities are 1.38x10^{11}, 1.03x10^{11}, 7.90x10^{10}, 6.70x10^{10} and 5.89x10^{10} cm^{-2}.

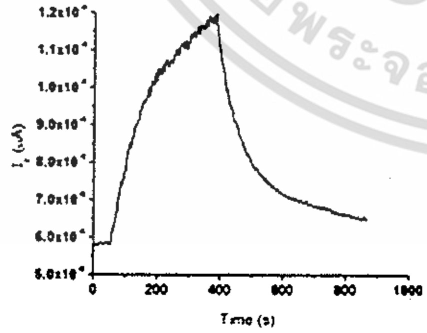


Fig. 7 Photocurrent response of CuO films obtained from oxidation temperature at 500^{o}C.

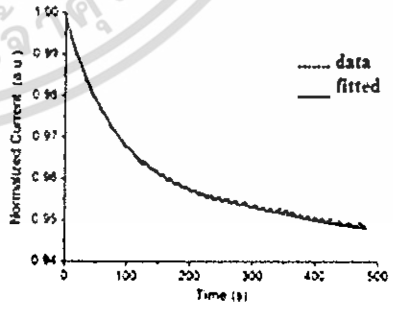


Fig. 8 Normalized decay time of CuO films obtained from oxidation temperature at 500^{o}C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUMMARY

CuO thin films were obtained through oxidation of metallic Cu films deposited on glass substrates by dc magnetron sputtering method. It is shown that the CuO single phase of monoclinic structure was formed at oxidation temperature beyond 450^{O}C where amorphous phase with very small grains, confirmed by SEM images, was obtained at oxidation temperature below 450^{O}C. All studied films are p-type semiconductors with band gap of 2.17-2.83 eV. The photocurrent response of films oxidized at 500^{O}C was measured by two probe using halogen lamp as a light source. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions. Five slow decay times and five trap densities values are 120.77, 208.33, 414.94, 884.96, 1504.95 s and1.38x10^{11}, 1.03x10^{11}, 7.90x10^{10}, 6.70x10^{10}, 5.89x10^{10} cm^{-2}, respectively.

ACKNOWLEGEMENTS

This project was financially supported by KMITL under grant No. 2555-A118-0220.

REFERENCES

[1] F. Gao, X.J. Liu, J.S. Zhang, M.Z. Song and N. Li: J. Appl. Phys. Vol. 111 (2012), pp. 084507-1-084507-3.

[2] H. Zhu, J. Zhang, C. Li, F. Pan, T. Wang and B, Huang: Thin Solid Films Vol. 517 (2009), pp. 5700-5704.

[3] F. Jaing, H. Shen, C. Gao, B. Liu, L. Lin and Z. Shen: Appl. Surf. Sci. Vol. 257 (2011), pp. 4901-4905.

[4] H.K. Yadav, V. Sreenivas and V. Gupta: App. Phys. Lett. Vol. 96 (2010), pp. 23507-1-2230507-3.

[5] N.R. Mathew, H.B.M. Anaya. M.A. Cortes-Jacome, C. Angeles-Chavez and J.A.Toledo-Antonio: J. Electrochem. Soc. Vol. 157 (2010), pp. H337-H341.

[6] B.C. Huang and Y.J. Lin: Appl. Phys. Lett. Vol. 99 (2011), pp. 113301-111303-3.

[7] Gu, M.G. Kanne, J.E. Doty and A .H. Firester: Appl. Phys. Lett. Vol. 87 (2005), pp.243512-1-243512-3.

[8] S.A. Studenikin, N. Gelego and M. Locivera: J. Appl. Phys. Vol. 83 (1998), pp 2104-2111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ชื่อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ "Preparation of CuO Thin Films by Thermally Oxidized Metallic Cu Films for CdS/CuO Heterojunction Diode" ดังมีรายละเอียดดังนี้

ABSTRACT

Copper thin films were deposited on glass substrates using thermal evaporation in vacuum and then thermally oxidized in air at temperature ranging 100-500°C. XRD patterns show the formation of fine grain Cu_2O phase at 300°C and CuO phase at 400°C, respectively. Crystallinity and grain size were found to improve with increasing oxidation temperature. The energy gap of the samples evaluated from absorption measurements was found to be in between 2.10 and 2.23 eV. Important electrical parameters such as resistivity, carrier concentration and mobility of CuO thin films obtained from oxidation temperature 500°C are 8.53×10^3 $\Omega\cdot$cm, 7.60×10^{13} cm^{-3} and 6.22 $cm^2/V\cdot s$, respectively. The prototype of CdS/CuO thin film heterojunction diode was successfully prepared by thermal evaporation of CdS thin films on CuO thin films substrate in vacuum. The obtained device exhibits a good rectifying behavior from I-V characteristics. Various junction parameters such as barrier height, ideality factor and series resistance were calculated using I-V data and observed to be 5.190 eV, 0.520 and 3.87 Ω, respectively. Impedance spectroscopy of the device was investigated at temperature of 25-60°C. The real and imaginary parts of the complex impedance are changed with the temperature and frequency. The experimental results suggest that the device could be possibly used a good candidate for photovoltaic devices with low thermal budget and low product cost.

Keywords: CuO thin films, thermal oxidation, CdS/CuO heterojunction, impedance spectroscopy

INTRODUCTION

Copper oxides are semiconducting materials that have a natural abundance of starting material Cu. They have been extensively studied because of their potential applications as solar cells, gas sensors, electrochemical sensors and batteries(Ooi et al. 2013; Valladares, 2012). Copper oxides are reported to be composed of two oxide phases, namely, cupric oxide (CuO) and cuprous oxide (Cu_2O) with p-type conductivity. The former has a narrow band gap of 1.21-1.51 eV absorbing throughout the visible spectrum with a monoclinic structure while the latter has a direct optical band gap range from 2.10-2.60 eV with a cubic structure (Cho et al., 2013). A meta-stable copper oxide, Cu_4O_3, which is an intermediate compound between the previous two, has also reported (Ooi et al., 2013). Numerous methods such as reactive sputtering, chemical vapor deposition, sol-gel, electro-deposition and thermal oxidation have been used to grow copper oxide thin films. In this work, we investigated the effect of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

temperature of oxidation on the properties of copper oxide thin films prepared by oxidation of thermal vacuum evaporated Cu thin films. Structural, optical and electrical properties of the films were studied in order to find the possibility to use them in p-n junction. The formation of CdS/CuO heterojunction was elaborated by thermal evaporating CdS thin films on CuO thin films coated on ITO glass substrate. We investigated I-V and C-V characteristics of CdS/CuO heterojunction for evaluating some important parameters such as junction barrier height, ideality factor and series resistance values by using thermionic emission theory and Cheung's method. Moreover, impedance spectroscopy of the device was investigated at temperature range 25-60°C.

MATERIAL AND METHODS

Copper thin films were grown on glass substrates by thermal evaporation in vacuum better than $5x10^{-5}$ mbar. Prior to deposition, the glass substrates were cleaned in acetone, ethanol and de-ionized water, respectively. The starting material was metallic Cu pellets (99.99% purity). The film thickness about 200 nm was monitored by a quartz crystal thickness monitor (Edward type FTM 6). The thermal oxidation of Cu films was carried out in a muffle furnace at difference temperatures ranging 100-500°C for 60 min. The heating rate was maintained at 100°C/h. After oxidation, the samples were cooled down to room temperature naturally. 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 JEOL model JSM-6400 scanning electron microscope. Optical absorption measurements were performed with UV-VIS double beam spectrophotometer in the wavelength range of 220-800 nm. The band gap (E_g) of the transparent films was determined by using the equation $(\alpha h\nu)^2 = A'(h\nu - E_g)$ where α is the absorption coefficient, A' is a constant and $h\nu$ is the photon energy. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature. In order to fabricate CdS/CuO thin film heterojunction, Cu thin films deposited on ITO coated glass substrate and oxidized at 500°C for 60 min. CdS thin films were subsequently evaporated onto CuO films. Finally, ohmic contact was made of silver paste on the surface of CdS and on the surface of ITO. The I-V characteristic curves were measured by using a computer interfaced Keithley 236 current/voltage source at room temperature. Impedance spectroscopy was carried out by Agilent E4980A Precision LCR Meter with frequency range 10 kHz- 2 MHz and temperature range 25-60°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESULTS AND DISCUSSION

Cu-O films characteristics

The XRD patterns of the as-grown and thermally oxidized Cu films at different temperatures ranging 100-500°C were shown in Figure 1. The as-grown Cu sample reveals a diffraction peak at 2θ equal to 43.50° corresponding to (111) diffraction plane of metallic Cu. Oxidation of Cu thin films at 100 and 200°C still shows purely (111) diffraction plane of metallic Cu phase with reduction in peak intensity. For the sample Cu films oxidized at 300°C, there is a weak diffraction peak at 36.46° which corresponds to the (111) plane of Cu_2O in agreement with the literature reported (Valladares et al., 2012). However, oxidation temperature at 400°C the (-111) diffraction plane of monoclinic CuO phase was occurred. For the films oxidized at 500°C the well- resolved two diffraction peaks at 2θ of 35.40° and 38.35° were observed. These peaks correspond to diffraction of (-111) and (111) planes of standard JCPDS data of CuO (JCPDS No. 80-1268). Figure 2 shows the SEM micrograph of Cu films oxidized at 500°C. The surface of the as-deposited Cu films is mostly smooth and uniform, while the surface particle size and surface roughness increase with the increase of thermal oxidation temperature.

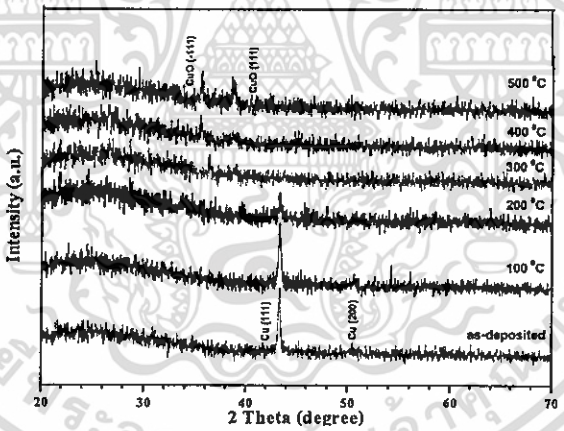


Figure 1. XRD patterns of Cu-O films.

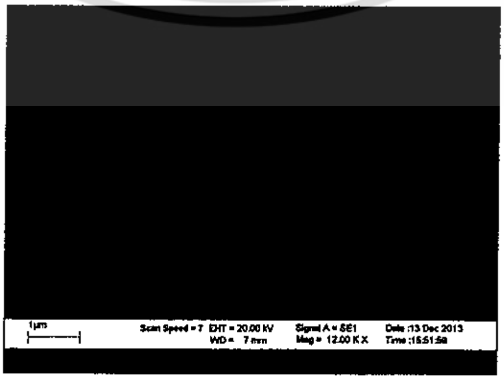


Figure 2. SEM micrograph of Cu-O films oxidized at 500°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. We found that Cu films oxidized at 100-500°C are exhibited p-type conductivity. Variations of the resistivity(ρ), carrier concentration (p) and mobility(μ) against oxidation temperature are shown in Figure 3. Resistivity value of the as-deposited and the Cu films oxidized at 100°C is very low (~10^{-4} Ω·cm). It suggests that the main phase of the films oxidized at 100°C is still metallic Cu which is good agreement with XRD results. In contrast, the films oxidized at temperature beyond 200°C show high resistivity in the order 10^3 Ω·cm. The carrier concentration initially decreases with an increase in oxidation temperature up to 300°C and then increases with an increase in oxidation temperature. The mobility is gradually decreased from 31.28 to 6.22 cm^2/V·s when the oxidation temperature increases from 100 to 500°C.

Figure 4 shows the absorbance (A) as a function of wavelength for the films oxidized at different temperatures. As seen, the absorbance value decreases as the wavelength increases. The absorption coefficient (α) can be calculated by using the relation; $\alpha = 2.303A/d$, where A is the absorbance and d is the thickness of the sample. From optical absorbance measurements the $(\alpha h\nu)^2$ data was obtained and, following the method reported by Tauc, were plotted as a function of photon energy ($h\nu$) to estimated the energy gap (E_g). Figure 5 displays the plot for Tauc's method to calculate the energy gap of the films oxidized at 300 °C. Variation of energy gap as a function of oxidation temperature is shown in Figure 6. The E_g value initially increases up to the maximun value 2.23 eV at oxidation temperature 300°C and then decrease to the minimum value 2.10 eV at oxidation temperature 500°C.

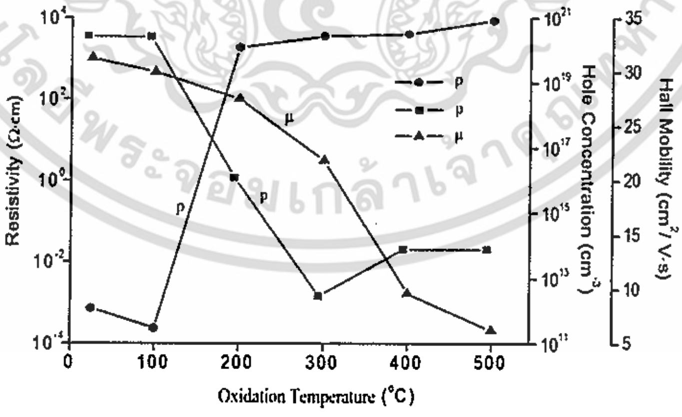


Figure 3. Variation of ρ, p and μ of Cu-O films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

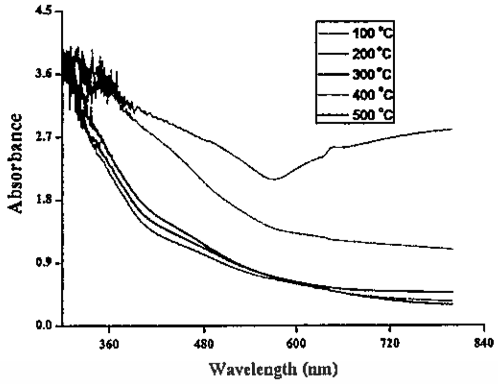


Figure 4. Absorption spectra of Cu-O films.

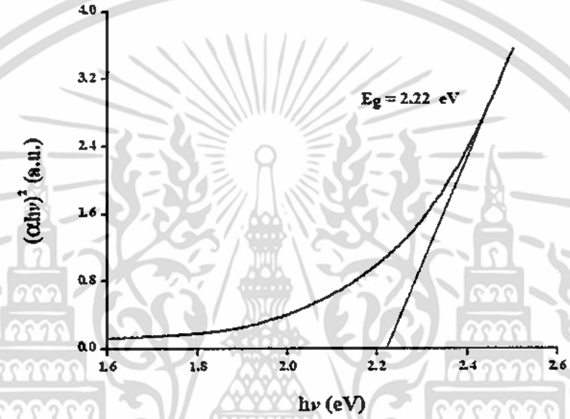


Figure 5. Plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ of Cu-O films oxidized at 300°C.

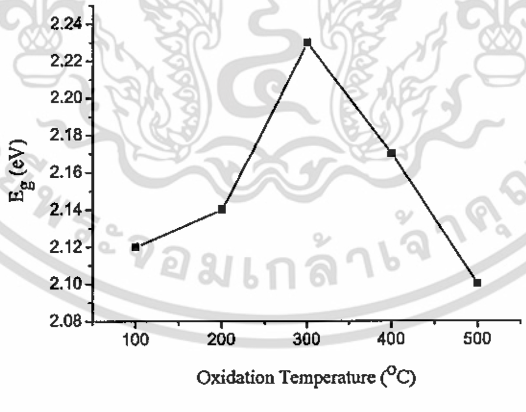


Figure 6. Variation of E_g with oxidation temperature.

Device characteristics

In the literature reviews, CdS compound has a higher resistivity than CuO and carrier concentration of CdS ($<10^{14} cm^{-3}$) is lower than CuO ($>10^{16}$ cm^{-3}) about 3 order. Therefore, in the view of large different carrier concentration between CdS and CuO, it may be assumed that this heterojunction act as nearly a step junction. Therefore, it may assumed that the current through a diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

at a forward bias V, based on the thermionic emission (TE) mechanism, is given by the relation (Rhoderick and Willam, 1988)

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

and

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

where I_S is the saturation current derived from the straight line intercept of the semi-logarithmic I-V plot at V=0, V is forward bias voltage, T is the absolute temperature, q is the electronic charge, k is Boltzmann constant, A is the effective area, $A^* = 4\pi qm_e k^2/h^3$ is the effective Richardson constant of 20 $A\cdot cm^{-2}\cdot K^{-2}$ for n-CdS, where $m^*=0.165m_0$ is the effective mass of the electrons, ϕ_{B0} is the apparent barrier height at zero bias voltage and n is the ideality factor. From Eq. (1), the ideality factor n which is given by

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

The measured I-V plot of CdS/CuO diode at room temperature is shown in Figure 7. We have performed a least square fit of Eq. (1) to the linear part of the measured semi-logarithmic I-V plots (Figure 8) within bias voltage about 0.1-0.4 V. Once I_S is known, the zero bias barrier height (ϕ_{B0}) can also be computed with the help of Eq. (2). Using Eqs. (2) and (3), the experimental values of the ideality factor and the barrier height having 5.190 and 0.520 eV were determined. The observed high ideality factor suggests that the transport properties of the device could not be well defined by thermionic emission model. To better understand the mechanism that controls the transport properties of this heterojunction, lnI-lnV plot is presented in Figure 9. It is evident from lnI-lnV plot that forward bias characteristics show three regions. The first region (V<0.1V) I-V characteristics comply with the linear ohmic behavior (I~V), which is mainly caused by thermally generated charge carriers (Tyaki et al., 2015). In the region II ($0.1 \leq V \leq 0.4V$) the current increases exponentially with bias voltage (I ~expαV). This is mainly to the recombination- tunneling mechanism (Aksoy and Cagar, 2012). At higher bias voltage (region III, V>0.4V) the I-V characteristics follow a power law relation ($I\sim V^2$). The current flow through the junction is due to space- charge limited current (SCLC) conduction, dominated by a single energy trap level (Zeyada et al., 2015). This SCLC mechanism is a normal phenomenon in the wide band gap semiconductor (Tyaki, 2015).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

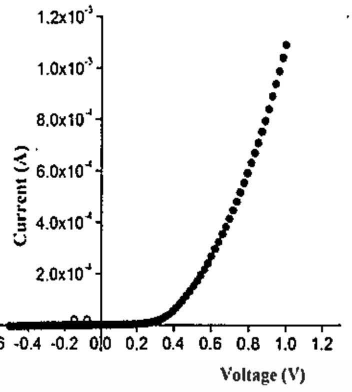


Figure 7. I-V plot of CdS/CuO diode.

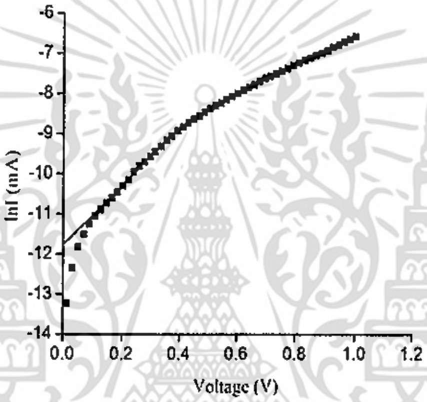


Figure 8. lnI-V plot of CdS/CuO diode.

The series resistance R_S is an important parameter in the electrical characteristics of diode. This parameter is significant in the downward curvature (non-linear region) of the forward bias I-V characteristics, but the other two parameters (n and ϕ_{B0}) are significant in both the linear and non-linear regions of the I-V characteristics. An efficient technique to determine R_S, n and ϕ_{B0} has been proposed by Cheung (Aksoy and Cagar, 2014). From Eq. (1) the following functions can be written as

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \tag{4}$$

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \tag{5}$$

and H(I) is given as follows;

$$H(I) = n\phi_{B0} + IR_s \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where ϕ_{B0} is the barrier height obtained from data of downward curvature region in the forward bias I-V characteristics. Eq. (4) should give a straight line for the data of downward curvature region in the forward bias I-V characteristics. Thus, a plot of dV/d(lnI)-I will give R_S as the slope and nkT/q as the y-axis intercept as shown in Figure 10. The values of n and R_s have been calculated as 5.322 and 3.48 Ω, respectively. This n value is slightly different obtaining from the forward bias lnI-V plot. This difference may be caused by the presence of series resistance and interface states (Barsoukov and Macdonald, 2005). Using the n value determined from Eq. (4) and the data of the downward curvature region in the forward bias I-V characteristics in Eq. (5), a plot of H(I)-I will also lead to a straight line with the y-axis intercept equal to $n\phi_{B0}$. The slope of this plot also determines R_S, which can used to check the consistency of this approach. From the Figure 11, the barrier height and series resistance of the device are calculated as 0.542 and 3.87 Ω, respectively. Furthermore, the values of R_S obtained from dV/d(lnI)-I and H(I)-I plots are in good agreement with each other. This case shows the consistency of Cheung's approach.

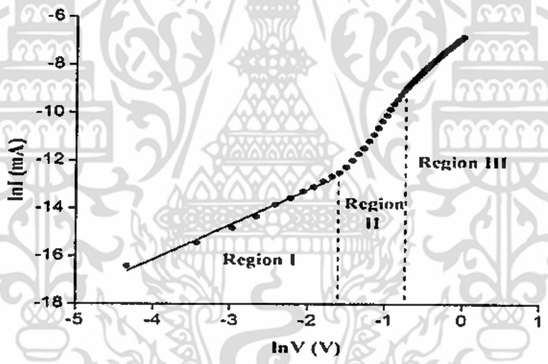


Figure 9. lnI-lnV plot of CdS/CuO diode.

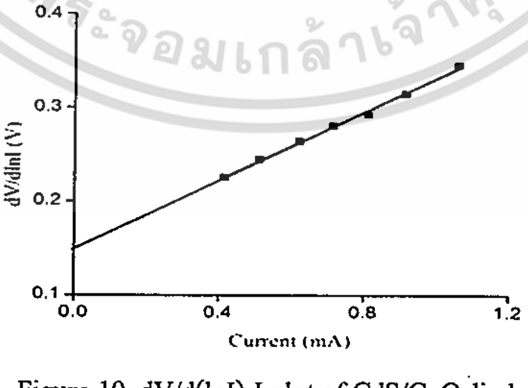


Figure 10. dV/d(lnI)-I plot of CdS/CuO diode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

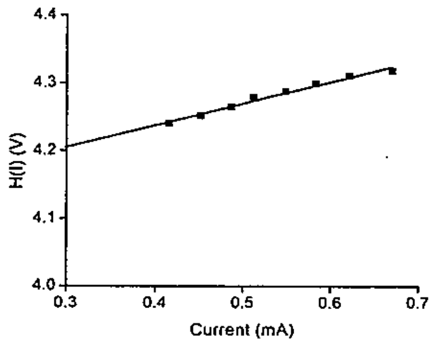


Figure 11. H(I)-I plot of CdS/CuO diode.

Figure 12 shows the variation of the real part of complex impedance (Z') with frequency at different temperatures. With increasing temperature, the curves display monotonous decrease in value of Z' with frequency. The magnitude of Z' decreases whereas temperature increases. It may indicate the increase in the a.c. conductivity. The Z' values merge above 100 kHz at all temperatures. Figure 13 shows the variation of the imaginary part of complex impedance (Z'') with frequency at different temperatures. The peak frequency of the Z'' shifts to higher frequencies with increasing temperature. This may indicate that decreasing relaxation in the system. The relaxation frequency (ω_0) was calculated from the peak frequency of Z'' plot with the help of the relation $2\pi f_0 RC=\omega_0 RC=1$[9]. This frequency was found to increase with temperature indicating increasing loss in the sample. From the Arrhenius plot of $\ln(\omega_0/T^2)$ as shown in Figure 14, the activation energy around 0.466 eV of the deep traps occurring at CdS/CuO interface was subsequently calculated. The appearance of discrete trapping level is in consistence with the results observed in d.c. transport studies corresponding to SCLC conduction controlled by single energy trap level.

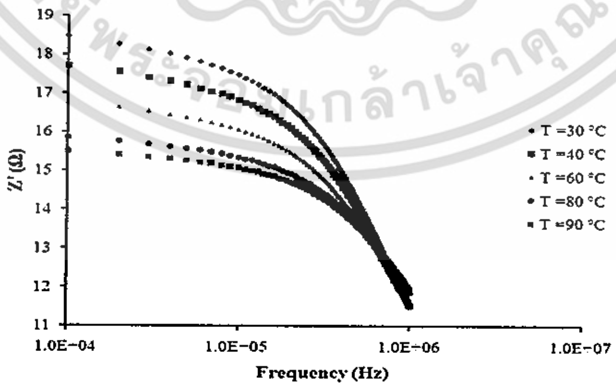


Figure12. Z'-f plot of CdS/CuO diode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

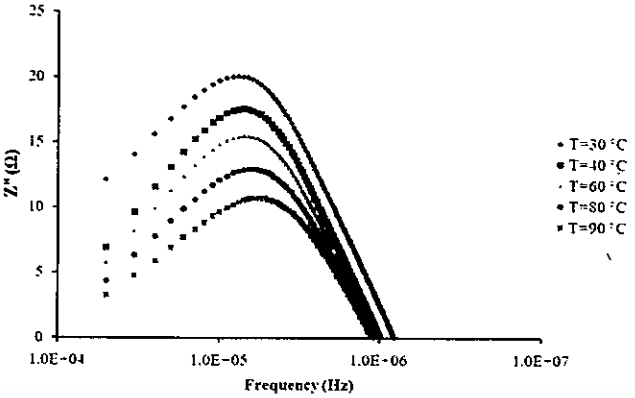


Figure 13. Z''-f plot of CdS/CuO diode.

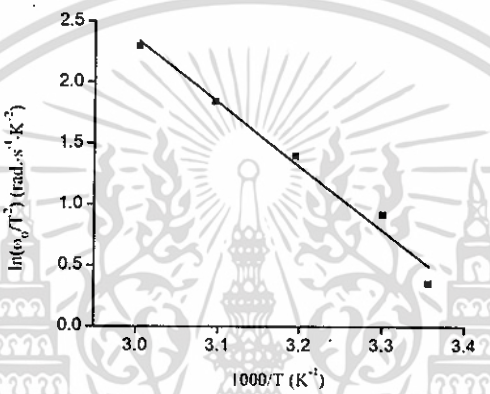


Figure 14. Arrhenius plot of $\ln(\omega_0/T^2)$.

CONCLUSION

Copper oxide thin films were successfully obtained through thermal oxidation process of Cu thin films, prepared by thermal evaporation in vacuum, at temperature beyond 200°C. From XRD patterns, a weak diffraction peak corresponding to (111) plane of Cu_2O phase was observed in the films oxidized at 300°C. For the films oxidized at 500°C, the well-resolved two diffraction peaks attributed to (-111) and (111) planes of CuO phase were appeared. From SEM micrographs, the surface particle size and surface roughness increase with the increase of thermal oxidation temperature. The dc electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature. The CdS/CuO heterojunction was successfully fabricated by thermal evaporation of CdS thin films on CuO thin films obtained by oxidation process at 500°C for 60min. The as-grown heterojunction shows a good rectifying behavior. The forward current transport is limited by three types of transport mechanisms namely Ohmic conduction, recombination-tunneling and space- charge limited current mechanisms depending on the applied forward bias voltage. Impedance spectroscopy of the device was investigated at temperature of 25-60°C. The real and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

imaginary parts of the complex impedance are changed with the temperature and frequency. The experimental results suggest that the device could be used possibly a good candidate for photovoltaic devices with low thermal budget and low product cost.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Assoc.Prof.Dr. T. Wongcharoen and Asst. Prof. Dr. C. Poo-Rakkiat for valuable discussions. This work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant number 2558A11802069/164817).

REFERENCES

Aksoy S. and Y. Cagar. 2012. Effect of ambient temperature on electrical properties of nanostructure n-ZnO/p-Si heterojunction diode. Superlattices and Microstructures 51: 613-625. DOI 10.1016/j.spmi.2012.02.018.

Aksoy, S. and Y. Cagar. 2014. Structural transformation of TiO_2 films with deposition temperature and electrical properties of nanostructure n-TiO_2/p-Si heterojunction diode. Journal of Alloys and Compounds 613: 330-337. DOI 10.1016/j.jallcom.2014.05.192.

Barsoukov E. and J.R. Macdonald. 2005. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment and Application, 2nd Edn., John Wiley & Sons, Inc., New York.

Cho, S. 2013. Optical and electrical properties of CuO thin films deposited at several growth temperatures by reactive rf magnetron sputtering. Metals and Materials International 19: 1327-1331. DOI 10.1007/s12540-013-6030-y.

Ooi, P.K., S.S. Ng, M.J. Abdullah, H. Abu Hassan and Z. Hassan. 2013. Effect of oxygen percentage on the growth of copper oxide thin films by reactive radio frequency sputtering. Materials Chemistry and Physics 140: 243-248. DOI 10.1016/j.matchemphys.2013.03.028.

Rhoderick, E.H. and R.H. William. 1988. Metal-Semiconductor Contacts. 2nd Edn., Oxford University Press.

Tyagi M., H. Toman and V. Gupta. 2015. Trap assisted space charge conduction in p-NiO/n-ZnO heterojunction diode. Material Research Bulletin 66:123-131.DOI 10.1016/j.materresbull. 2015.02.015.

Valladares L.L.S., D.H. Salinas, D.A. Najarro, S.I. Khondake, T. Mitrelias, C.H.W. Barnes, J.A. Aguiar and Y. Majima. 2012. Crystallization and electrical resistivity of Cu_2O and CuO obtained by thermal oxidation of Cu thin films on SiO_2/Si substrates. Thin Solid Films 520: 6368-6371. DOI 10.1016/j.tsf.2012.06.043.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zeyada H.M., M.M. El-Nahass, E.M. El-Menyawy and A.S. El-Sawah. 2015. Electrical and photovoltaic characteristics of indium phthaloyanine chloride/p-Si solar cell. Synthetic Metals 207: 46-53. DOI 10.1016/j.synthmet.2015.06.008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

Al- Kuhaili, M.F. 2008. Characterization of Copper Oxide Thin Films Deposited by the Thermal Evaporation of Cuprous Oxide (Cu_2O). Vacuum. 82, 623-629.

Bugarinovic, N., Rajcic-Yujasinovic, M., Stevic, Z. and Grekulovi, V. 2011. Cuprous Oxide as an Active Material for Solar Cells in Solar Cells-New Aspects and Solution. Edited by Leonoid A. Kosyachenko: Intech Open Science Open Minds.

Chabane, J., Zebbar, N., Lamri Zeggar, M., Aida, M.S., Kechouane, M. and Trari, M. 2015. Effects of CuO Film Thickness on Electrical Properties of CuO/ZnO and CuO/ZnS Heterojunctions. Materials Science in Semiconductor Processing. 40, 840-847.

Cullity, B.D., 1956. Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company Inc. Escorcia-García, J., Becerra, D., Nair, M.T.S. and Nair, P.K. 2014. Heterojunction CdS/Sb_2S_3 Solar Cells Using Antimony Sulfide Thin Films Prepared by Thermal Evaporation. Thin Solid Films. 569, 28-34.

Gaewdang, T. and Wongcharoen, Ng. 2015. Heterojunction Properties of p- CuO/n-CdS Diode. Advanced Materials Research, 1098, 1-5.

Gaewdang, T., Wongcharoen, Ng. Ariyarit, A., Nopparuchikun, A., Wongcharoen, T. and Poo-Rakkiat, C. 2011. Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics of CdZnS/$CuAlO_2$ Heterojunction Diode. SWU Journal, 3, 12-22.

Gao, F., Liu, X.J. Zhang, J.S., Song, M.Z. Li, N. 2012. Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron Sputtering. J. Appl. Phys. 111, 084507-1- 84507-4.

Gevorkyan, V.A. , Reymers, A.E., Nersesyan, M.N. and Arzakantsyan, M.A. 2012. Characterization of Cu_2O Thin Films Prepared by Evaporation of CuO Powder. J.Physics: Conference Series, 350, 012027.

Jayathilaka, C., Kapaklis, V. Siripala, W., Jayanetti, S. 2015. Improved Efficiency of Electrodeposited p-CuO/n-Cu_2O Heterojunction Solar Ccell. Applied Physics Express. 8(6), 065503.

Jeong, S.S., Mittiga, A., Salza, E., Masci, A. and Passerini, S. 2008. Electrodeposited ZnO/Cu_2O Heterojunction Solar Cells. Electrochimica Acta. 53(5), 2226-2231.

Kittel, C., 1971. Introduction to Solid State Physics, 4^{th} Ed., New York: John, Wiley & Son.

Kittel, C., 2005. Introduction to Solid State Physics. 8^{th} Ed. United States of America : John Wiley&Sons Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Korzhavyi, P.A. and Johansson, B. 2011. Literature Review on the Properties of Cuprous Oxide Cu_2O and the Process of Copper Oxidation. Technical Report Submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Minami, T., Nishi, Y., Miyata, T. and Nomoto, J., 2011. High Efficiency Oxide Solar Cells With ZnO/Cu_2O Heterojunction Fabricated on Thermally Oxidized CuO Sheets. Appl. Phys. Express, 4, 02301-062304.

Moller, H.J., 1993. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc. 1993.

Muller, R.S. and Kamins, T.I., Device Electronics for Integrated Circuits, 2^{nd} Ed, John Wiley & Sons , Inc., Singapore, 1986.

Nakashima, Y. and Ichimura, M. 2012. Electrochemical Deposition of $Cu_xSn_yS_zO$ Thin Films and Their Application for Heterojunction Solar Cells. Photovoltaic Materials and Devices. 2012, Article ID 171432, 8 pages.

Runyan, W.R., 1975. Semiconductor Measurement and Instrumentation, 3^{rd}Ed, Mc. Graw-Hill, New York.

Schroder D.K. 1975. Semiconductor Material and Device Characterization. John Wiley & Sons. Inc, New York.

Singh , J., Semiconductor Devices : An Introduction, Mc. Graw-Hill International Editions" , Singapore , 1994.

Sze, S.M., 1981. Physic of Semiconductor Devices, 2^{nd} Ed., John Wiley & Sons Inc., New York.

Wijesundera, R.P. 2010. Fabrication of the CuO/Cu_2O Heterojunction Using an Electrodeposition Technique for Solar Cell Applications. Semicond. Sci. Technol. 25, 045015-1-045015-5.

Zainelabdin, A. Zaman, S. Amin, G. Nur, O. Willander, M. 2012. Optical and Current Transport Properties of CuO/ZnO Nanocoral p-n Heterostructure Hydrothermally Synthesized at Low Temperature. Appl. Phys. A, 108, 921-928.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xWO_3(0 \le x \le 0.05)$ และการประยุกต์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสปัตเตอริงเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอาบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียนติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ยุทธ อัครมาส. 2530. ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกุล ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิรา. 2545. การ ออกแบบและการสร้างอันบาลานซ์ แมกนีตรอนคาโทด สำหรับระบบสปัตเตอริง. รายงานวิจัยเสนอต่อกองทุนต้นตราภรณ์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของสารประกอบ CdS

Pattern : 75-1546 *Radiation =* 1.540600 *Quality :* Calculated

Cd S

Cadmium Sulfide

Lattice : Face-centered cubic *Mol. weight =* 144.47

S.G. : F-43m (216) *Volume [CD] =* 197.14

a = 5.82000 *Dx =* 4.868

Z = 4 *I/Icor =* 14.05

ICSD COLLECTION CODE : 031075
TEST FROM ICSD : No R value given.
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

*Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 62, page 260, (1925) :
Ulrich, F., Zachariasen, W.

Radiation : CuKa1 *Filter :* Not specified

Lambda : 1.54060 *d-sp :* Calculated spacings

2th	I	h	k	l
26.505	100	1	1	1
30.699	22	2	0	0
43.969	47	2	2	0
52.076	33	3	1	1
54.579	5	2	2	2
63.932	6	4	0	0
70.468	11	3	3	1
72.585	5	4	2	0
80.842	10	4	2	2
86.902	7	5	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของสารประกอบ CuO

Pattern : 80-1268 *Radiation =* 1.540600 *Quality :* Calculated

CuO

Copper Oxide

Lattice : Monoclinic

S.G. : C2/c (15)

a = 4.68330

b = 3.42080 *Beta* = 99.57

c = 5.12940

a/b = 1.36907 *Z* = 4

c/b = 1.49947

Mol. weight = 79.55

Volume [CD] = 81.03

Dx = 6.520

I/Icor = 4.00

ICSD COLLECTION CODE : 069094
TEMPERATURE FACTOR : ATF
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 11.
REMARKS FROM ICSD : REM RVP.

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

*J. Solid State Chem., volume 89, page 184, (1990) :
Brese, N.E., O'Keeffe, M., Ramakrishna, B.L., von Dreele, R.B.

Radiation : CuKa1 *Filter :* Not specified

Lambda : 1.54060 *d-sp :* Calculated spacings

2th	*I*	*h*	*k*	*l*
32.548	7	1	1	0
35.466	37	0	0	2
35.566	92	-1	1	1
38.769	100	1	1	1
38.974	29	2	0	0
46.277	2	-1	1	2
48.743	28	-2	0	2
51.419	1	1	1	2
53.534	10	0	2	0
56.773	1	0	2	1
58.376	14	2	0	2
61.567	19	-1	1	3
65.870	14	0	2	2
66.292	14	-3	1	1
67.987	9	1	1	3
68.175	16	2	2	0
68.951	<1	-2	2	1
71.725	<1	-3	1	2
72.498	6	3	1	1
73.045	<1	2	2	1
75.059	5	0	0	4
75.298	8	-2	2	2
79.812	<1	0	2	3
80.191	2	-2	0	4
82.397	4	-3	1	3
83.184	4	2	2	2
83.701	4	3	1	2
*83.701	4	4	0	0
86.602	1	-4	0	2
86.811	1	-2	2	3
88.096	<1	1	1	4
89.877	5	-1	3	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Materials Research Vol. 1098 (2015) pp 6-11
© (2015) Trans Tech Publications, Switzerland
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1098.6

Submitted: 04.12.2014
Accepted: 04.12.2014

Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films

Ngamnit Wongcharoen[a], Thitinai Gaewdang[b]

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1, Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand.

[a]email: kwngamni@kmitl.ac.th, [b]email: kgthitin@kmitl.ac.th

Keywords: CuO thin films, XRD, SEM, Persistent photoconductivity

Abstract. CuO thin films were obtained through thermal oxidation of dc magnetron sputtered metallic Cu films on glass substrates. Thermal oxidation process was performed in air at temperature ranging 300-500 °C. From XRD patterns, CuO single phase of monoclinic structure was formed at oxidation temperature beyond 450 °C whereas amorphous phase with very small grains was obtained at oxidation temperature below 450 °C. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in all studied films. From transmission spectra, direct band gap value is varied between 2.17 and 2.83eV. From the transient photoconductivity measurements, persistent photoconductivity (PPC) behavior was observed. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions resulting into five slow decay times. Density of trap states corresponding to its decay time was also evaluated from the decay current data.

Introduction

Oxides of copper are well-known to show p-type conductivity and have many advantages for catalysts and solar energy conversion application. Non-toxic, economic, abundant availability and relatively simple formation of oxide makes copper oxide as an interesting material [1]. Two common forms of copper oxide are cuprous oxide (Cu_2O) and cupric oxide (CuO). A meta-stable copper oxide, Cu_4O_3, which is an intermediate compound between the previous two, has also reported [2]. Cu_2O and CuO belong to cubic and monoclinic structures with band gap of 2.1-2.6 eV and1.9-2.1eV, respectively. The growth of high quality p-type CuO thin films is essential for fabricating p-n junction-based oxide devices, such as solar cells, light emitting diodes and transistors. The optical transmittance and electrical resistivity of the films are two critical parameters in evaluating the performance of photovoltaic cells and electrochromic devices. In this paper, CuO thin films were obtained through thermal oxidation of dc magnetron sputtered metallic Cu films on glass substrates. 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.

Experimental

Copper thin films were grown on glass substrates by using dc magnetron sputtering from a home-made circular planar magnetron sputtering system. A circular planar magnetron of 60 mm diameter was used as the magnetron cathode. The magnetron target assembly was mounted on the top plate of the sputter chamber such that the sputtering could be done by sputtering down configuration. A continuously variable dc power supply of 630 V and 2.6 A was used a power source for sputtering. A 60 mm diameter and 3 mm thick pure copper (99.99%) used as sputter target. Pure argon was used as sputter gas. The flow rate of argon was controlled by AALBORG mass flow controller. Before deposition of each batch, the target was sputtered in pure argon atmosphere for 5 min to remove oxide layer if any on the surface of target. The sputtering conditions maintained during the growth copper films are given in Table 1. The as-deposited copper thin films were oxidized in tubular furnace at temperature ranging from 300-500 °C in air for 60 min. The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 171.96.174.174, King Mongut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand-25/02/15,15:51:23)

D 8 diffractometer using CuK_α radiation. Surface morphology was examined by JEOL model JSM-6400 scanning electron microscope. Optical transmission measurements were performed with UV-VIS double beam spectrophotometer in the wavelength range of 220-1,000 nm. The band gap (E_g) of the transparent films was determined by using the equation $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ where α is the absorption coefficient, A is a constant and $h\nu$ is the photon energy. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature.

Table 1 List of some conditions for preparing CuO thin films

Conditions	Parameters	Values
Sputtering	Target	Cu
	Argon flow rate (sccm)	15
	Target to substrate distance (cm)	10
	Bias voltage (V)	370
	Current (mA)	80
	Substrate temperature (°C)	25
	Working pressure (torr)	3.6×10^{-3}
	Sputtering time (min)	6
Oxidized in air	Temperature (°C)	300-500
	Time (min)	60

Results and Discussion

Fig. 1 shows XRD patterns of CuO films as a function of oxidation temperature. XRD patterns of the films oxidized at temperature below 450 °C show amorphous characteristics. In contrast, the XRD spectrum of the films oxidized at 500 °C shows the well-resolved two diffraction peaks. These peaks correspond to the reflection of (-111) and (111) planes of standard JCPDS data card of CuO (JCPDS No. 80-1268). The crystallite size was calculated using Scherrer's formula, neglecting peak broadening due to residual stresses in the films, $L = 0.9\lambda/(\beta\cos\theta)$ where β is the broadening of diffraction line measured at half its maximum intensity in radian and λ is the wavelength of X-rays (0.1540 nm). The calculated value of L is about 15 nm. SEM images of CuO films obtained from oxidation temperature during 300-500 °C were shown in Fig. 2. When the films were oxidized below 350°C, the morphology does not change much and shows better uniformity in free surface. However, oxidation temperatures higher than 350 °C, small pores over the films were observed.

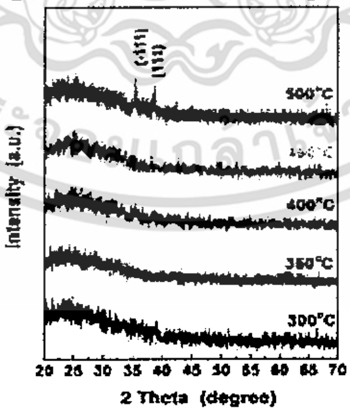


Fig. 1 XRD patterns of CuO films as a function of oxidation temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

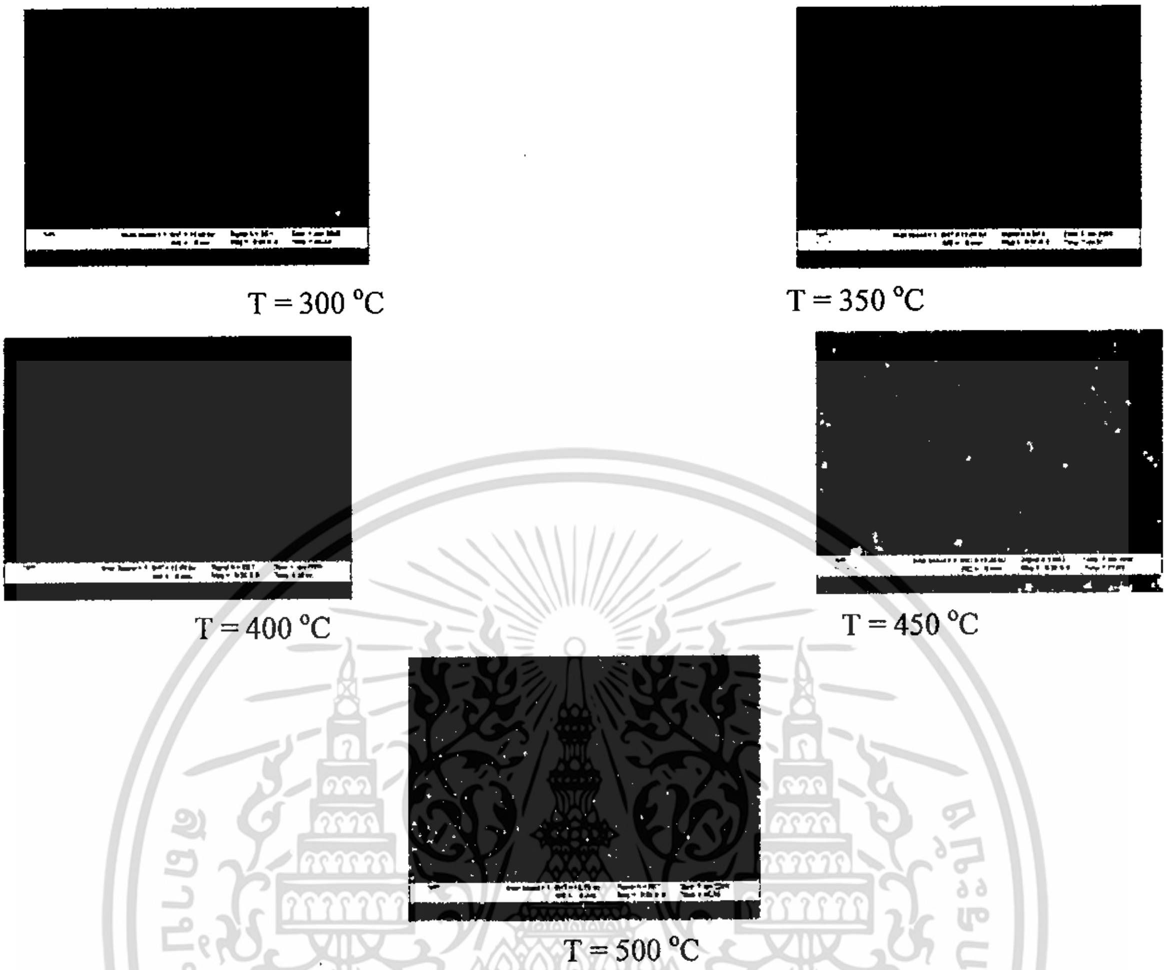


Fig. 2 SEM images of CuO films obtained from oxidation temperature between 300-500 °C.

Fig. 3 shows transmittance spectra of CuO films obtained from oxidation temperature during 300-500 °C. From the transmittance spectra we have also calculated band gap of films with different oxidation temperatures. The absorption coefficient (α) is calculated using the equation $\alpha = (1/d)\ln(1/T)$ where T is transmittance and d is film thickness. The absorption coefficient (α) and the incident photon energy ($h\nu$) related by $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ where A and E_g are constant and band gap values, respectively. The E_g can be determined by extrapolation of the linear portion of the curve to the photon energy axis. Fig. 4 shows the curve of $(\alpha h\nu)^2$ vs. photon energy ($h\nu$) of the films obtained from oxidation temperature at 500 °C. Two allowed direct transition band gap were obviously observed. The smaller band gap value (E_{g1}) should correspond to the major CuO phase. The bigger band gap (E_{g2}) is possibly attributed to the parasitic phase of Cu_2O which cannot be observed by XRD due to too small amount of Cu_2O content in the bulk of films. The variation of E_{g1} and E_{g2} was shown in Fig. 5. The E_{g1} decreases from 2.41 to 2.17 eV with oxidation temperature increases from 300 to 400 °C and then increases to 2.19 eV when oxidation temperature further increases to 500 °C. The similar behavior is also observed in E_{g2}. These results indicate that E_{g1} and E_{g2} are sensitive to the oxidation temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

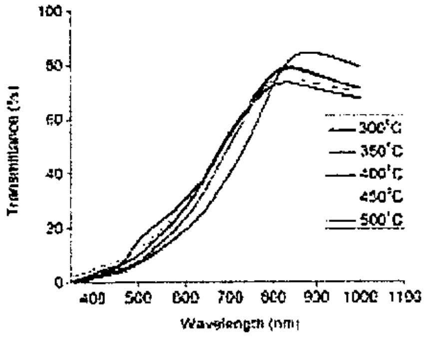


Fig. 3 Transmittance of CuO films obtained from oxidation temperature between 300-500 °C.

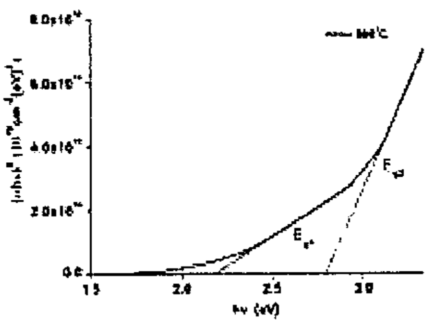


Fig. 4 $(\alpha hv)^2$ vs. hv plot of CuO films obtained from oxidation temperature at 500 °C.

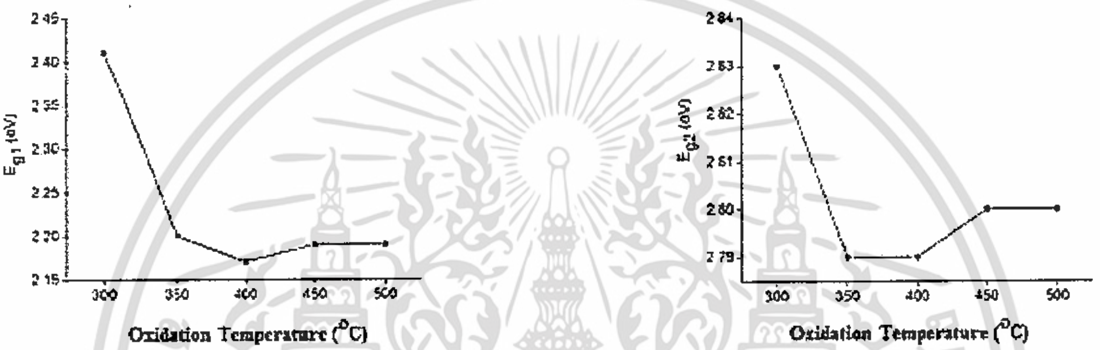


Fig. 5 Variation of band gap of CuO films as a function of oxidation temperature.

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 are exhibited p-type conductivity. Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against oxidizing temperature are shown in Fig. 6. Carrier concentration (n) is 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) is determined using the relation $1/ne\rho$ where ρ is resistivity. Resistivity of the films increases from 5.01×10^2 to attain maximum at $7.50\times10^3\Omega$.cm with oxidation temperature increasing from 300 to 400 °C, and decreases to 1.88×10^3 Ω.cm when the oxidation temperature further increase to 500°C. The mobility initially decreases with an increase in oxidation temperature up to 400 °C and then increases with an increase in oxidation temperature. The variation of carrier concentration shows the similar behavior to mobility. These results indicate that the resistivity, carrier concentration and mobility of the films are sensitive to the oxidation temperature.

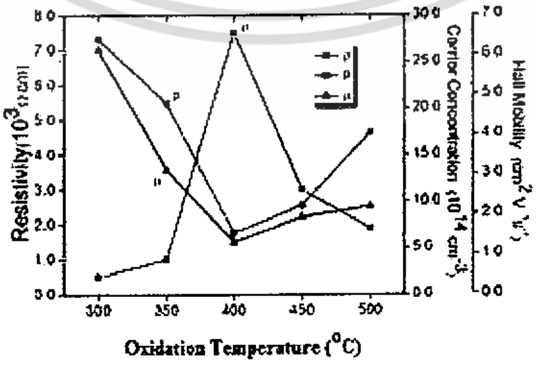


Fig. 6 Variations of the resistivity, carrier concentration and mobility against oxidation temperature.

The photocurrent response of the films oxidized at 500 °C was measured by two probe method using halogen lamp as a light source. Two silver electrodes with area 0.05 cm^2 was made on the

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sample surface. The photocurrent response of the films oxidized at 500 °C was shown in Fig. 7. The sample was connected to the experimental setup and maintained in darkness under a constant applied bias of 6 V to stabilize the current. After the stabilization period, the current was recorded in the following sequences: 30 s in darkness, 400 s under illumination and, finally, 400 s in the darkness. Under illumination, the current increases immediately because a lot of carriers were exited by light illumination. After the illumination period, the persistent photoconductivity (PPC) effect of the films oxidized at 500 °C occurred in darkness. The decay of PPC in Fig. 7 can be described by multiple exponential functions [3,4] as

$$I = I_{dark} + (I_0 - I_{dark})\sum_i \exp(-\frac{t}{\tau_i})$$

where I_{dark} is the current measured in darkness, I_0 is the PPC buildup level near the moment of light excitation being removed, τ is the PPC decay time constant. The normalized decay current in darkness as shown in Fig. 8, which follows the illumination period, indicates the persistent of charge carrier traps in the films [5]. In Fig. 8 the dash line is the measured data and the solid line is the least squares fit data by the multiple exponential functions as described above. According to the function of fitting curve in Fig. 8 we calculated that the five τ values are 120.77, 208.33, 414.94, 884.96 and 1504.95 s. Method for calculating the trap densities corresponding to the PPC decay constant was reported in the literatures [6-8]. The corresponding trap densities are 1.38×10^{11}, 1.03×10^{11}, 7.90×10^{10}, 6.70×10^{10} and 5.89×10^{10} cm^{-2}.

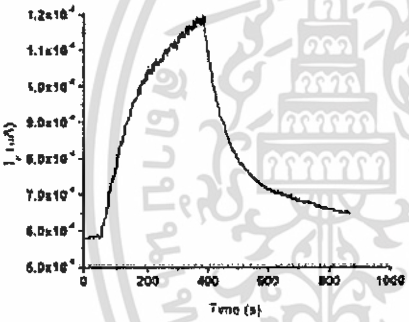


Fig. 7 Photocurrent response of CuO films obtained from oxidation temperature at 500 °C.

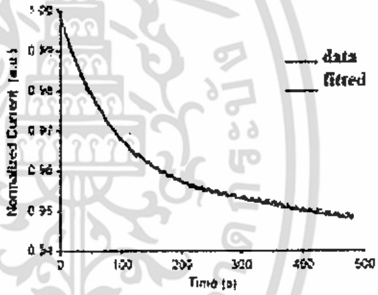


Fig. 8 Normalized decay time of CuO films obtained from oxidation temperature at 500 °C.

Summary

CuO thin films were obtained through oxidation of metallic Cu films deposited on glass substrates by dc magnetron sputtering method. It is shown that the CuO single phase of monoclinic structure was formed at oxidation temperature beyond 450 °C where amorphous phase with very small grains, confirmed by SEM images, was obtained at oxidation temperature below 450 °C. All studied films are p-type semiconductors with band gap of 2.17-2.83 eV. The photocurrent response of films oxidized at 500 °C was measured by two probe using halogen lamp as a light source. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions. Five slow decay times and five trap densities values are 120.77, 208.33, 414.94, 884.96, 1504.95 s and1.38×10^{11}, 1.03×10^{11}, 7.90×10^{10}, 6.70×10^{10}, 5.89×10^{10} cm^{-2}, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

[1] F. Gao, X.J. Liu, J.S. Zhang, M.Z. Song and N. Li: J. Appl. Phys. Vol. 111 (2012), pp. 084507-1-084507-3.

[2] H. Zhu, J. Zhang, C. Li, F. Pan, T. Wang and B, Huang: Thin Solid Films Vol. 517 (2009), pp. 5700-5704. [3] F. Jaing, H. Shen, C. Gao, B. Liu, L. Lin and Z. Shen: Appl. Surf. Sci. Vol. 257 (2011), pp. 4901-4905.

[4] H.K. Yadav, V. Sreenivas and V. Gupta: App. Phys. Lett. Vol. 96 (2010), pp. 23507-1-2230507-3.

[5] N.R. Mathew, H.B.M. Anaya. M.A. Cortes-Jacome, C. Angeles-Chavez and J.A. Toledo-Antonio: J. Electrochem. Soc. Vol. 157 (2010), pp. H337-H341.

[6] B.C. Huang and Y.J. Lin: Appl. Phys. Lett. Vol. 99 (2011), pp. 113301-111303-3.

[7] Gu, M.G. Kanne, J.E. Doty and A .H. Firester: Appl. Phys. Lett. Vol. 87 (2005), pp. 243512-1-243512-3.

[8] S.A. Studenikin, N. Gelego and M. Locivera: J. Appl. Phys. Vol. 83 (1998), pp 2104-2111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสโครงการ/รหัสสัญญา 2558A11802069

แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 ประจำปีงบประมาณ 2558

✓ แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) ☐ แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

(ภาษาอังกฤษ) Driver and Obstacle in Implementing Green Logistics in OTOP Enterprise

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/2557 ถึงวันที่ 30/ กันยายน/ 2558

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ ระบุ 1/ ตุลาคม/2557 ถึงวันที่ 30/ กันยายน/2558

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 30,000.- บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 7 พ.ย.57,29 ม.ค.58

งวดที่ 2 170,000.- บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 8 เม.ย.58

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	0.-	0.-	0.-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	0.-	0.-	0.-
ค่าใช้สอย	45,000.-	2,675.-	42,325.-
ค่าวัสดุ	155,000.-	197,325.-	(-42,325.-)
ค่าสาธารณูปโภค	0.-	0.-	0.-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	0.-	0.-	0.-
รวม	200,000.-	200,000.-	0.-

(รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

21 / ต.ค. / 58

(นางสาวสุชาดา ไชยวงศ์)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน

4 ต.ค. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายฐิตินัย แก้วแดง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2530	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2536	ปริญญาเอก	Ph.D.	วัสดุศาสตร์	Bordeaux University I, France

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode" Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-$CuFeO_2$ Heterojunction Diode" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
6. 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.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-$CuCrO_2$ Heterojunction" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 781-788.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-$CuAlO_2$ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.
12. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{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.
13. 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.
14. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 "Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode" Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-$CuFeO_2$ Heterojunction Diode" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-$CuCrO_2$ Heterojunction" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 781-788.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-$CuAlO_2$ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.
12. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{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.
13. 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.
14. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparuchikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Fabrication and Characterization of Heterojunction of CdS Thin Films and $CuAlO_2$ Ceramic Pill Substrate" Journal of Metals, Materials and Minerals, vol. 22(2), 2012, pp. 125-129.
16. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, "Thermoelectric Properties of Ni-Doped $CuAlO_2$" Physics Procedia, vol.2, 2009, pp.101-106.
17. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripuddhaiwon 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.
18. 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.
19. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Co-existence of F and Sb Dopant in Transparent Conducting SnO_2 Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Method" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007. Beijing, China, Proceedings, pp.1269-1274.
20. 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)
21. 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.
22. 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.
23. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of B-Doped $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696- 697.
24. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2529	ปริญญาโท	วท.ม.	คณิตศาสตร์ประยุกต์	มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ
2538	ปริญญาเอก	Ph.D.	วิศวกรรมไฟฟ้า	City University London, U.K.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-$CuAlO_2$ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} ($0 \le x \le 1$) Thin Films" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2070-2077.
5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, C, Thaisatuen, W. Bunkua, A. Ariyaritand and T. Woncharoen "Optical and Electrical Properties of CdTe Thin Films with Different Thicknesses" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 352-356.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351.
9. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang "Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films" The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200.
10. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen and T. Gaewdang "Preparation and Characterization of Cadmium Sulfide Thin Films", The 25th Congress on Science and Technology of Thailand, 1999, pp. 546-547.

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ
   (ภาษาอังกฤษ) Mr. Chaisingh Poo-Rakkiat
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1016-00437-200
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8 ทำงานวิจัยจำนวน 4 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

หมายเลขโทรศัพท์ โทร. (02)218-5298, e-mail: Chaisingh.P@chula.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ การศึกษา	ระดับ ปริญญา	อักษรย่อ ปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2522	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
2525	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ทฤษฎี)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2532	ปริญญาเอก	Ph.D.	ฟิสิกส์นิวเคลียร์	Notre Dame University, U.S.A.

6. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

การสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง กับการบริหารงานวิจัย และงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

–

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

–

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. T. Khantayaporn, Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and C. Poo-Rakkiat "Structural and Optical Properties of CdS_xTe_{1-x} Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40), December 2-4, 2014, Khon Kaen, Thailand, pp. 71-78. (ผู้ร่วมวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparachikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Fabrication and Characterization of Heterojunction for CdS Thin Films and $CuAlO_2$ Ceramic Pill Substrate" Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 22 No. 2, 2012, pp.125-129. (ผู้ร่วมวิจัย)

3. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351. (ผู้ร่วมวิจัย)

4. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, J. Wattananurak and C. Poo-Rakkiat "Structural and Electrical Properties of Ni-Doped $CuAlO_2$" International Conference on Engineering, Applied Science and Technology (ICEAST 2007), November 21-23, 2007, Bangkok, Thailand, Proceedings, pp.885-888. (ผู้ร่วมวิจัย)

5. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang "Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films" The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200. (ผู้ร่วมวิจัย)

6. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang," Crystalline Bulk Growth of Cadmium Sulfide", The 23rd Congress on Science and Technology of Thailand. 1997, pp. 172-173. (ผู้ร่วมวิจัย).

7. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Germanium on Some Properties of Indium Oxide Compounds" The 22nd Congress on Science and Technology of Thailand, 1996, pp. 142-143. (ผู้ร่วมวิจัย)

8. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen, and T. Gaewdang, "The Influence of Tin on the Electrical Resistivity of Indium Oxide Ceramic Samples" The 21st Congress on Science and Technology of Thailand, 25-27 October (1995), pp. 200-201 (ผู้ร่วมวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้