



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu
ที่ได้จากการสเป็คเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

Preparation of CuO Thin Films by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Films
for Solar Cell Application

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นายจตุตินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

ท.ช.

๗ ๓๓๖๓

๒๕๕๘

๗๒๗๕๗๓๖๖

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 141509

วันเดือนปี 16 ส.ค. 2559

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของ
ฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปคเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kwngamni@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

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

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

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มโลหะ Cu ด้วยความร้อนในบรรยากาศความดันปกติ ฟิล์มโลหะ Cu นี้เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงเคลือบบนกระจกสไลด์ กระบวนการออกซิเดชันกระทำในอากาศที่อุณหภูมิในช่วง 300-500 องศาเซลเซียส จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า เฟสเดี่ยวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกเกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้อุณหภูมิลดต่ำกว่าค่านั้น ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอะมอร์ฟัสและเกรนมีขนาดเล็กมาก สัมประสิทธิ์ของฮอลล์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 2.17 และ 2.83 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าฟิล์มบางมีสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีขึ้นจากผลการวัดกระแสแสงจะพิตกราฟได้ดีโดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ส่งผลให้ได้ช่วงชีวิตแบบยาวจำนวนหลายค่า ความหนาแน่นของกักตักพาหะสามารถคำนวณหาได้จากกระแสแสงเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO, สมบัติทางไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Preparation of CuO Thin Films by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Films
for Solar Cell Application

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

.....Wongcharoen

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

In this research, CuO thin films were obtained through thermal oxidation of dc magnetron sputtered metallic Cu films on glass substrate. 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 annealing temperature beyond 450°C whereas amorphous phase with very small grain was obtained at annealing temperature lower than 450°C. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in the films with CuO phase. From transmission spectra, direct band gap value is varied between 2.17 and 2.83 eV. From the transient photoconductivity measurements, persistent photoconductivity behavior was observed. The decay current data are better fitted with the multiple exponential functions resulting into the several slow decay times. Density of trap states was also evaluated from the decay current.

Keywords : CuO thin films, electrical properties, photoconductivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปilotประจุมานำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาววรรณนิศา สุขกรี นางสาววลัยพัชร ใจเรื่อน นางสาวศวิตา ทศนิม นายนพณัฐ เดชะคำภู และนางสาวชนิภรณ์ จูโรสง นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสตีเบล แบบดับเบิลบีมีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	6
2.2.1 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	9
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO	11
2.4 ปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน	13
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.5.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	15
2.5.2 การหาขนาดของเกรน	16
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.7 ส่วนหางของแถบพลังงาน	18
2.8 การส่งผ่านแสง	19
2.8.1 ซ็อบกพร่องผลึกแบบจุด	20
2.8.2 ซ็อบกพร่องผลึกเชิงเส้น	20
2.8.3 ซ็อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	21
2.9.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	21
2.9.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
2.9.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	24
2.9.4 ปราคฏการณ์ฮอลล์	25
2.9.5 การศึกษาปราคฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	29
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	31
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสกลาง	38
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	39
2.11 หลักการสปีดเตอร์ริง	40
2.11.1 โกล์วดีสซาร์จ	40
2.11.2 สปีดเตอร์ริง	42
2.11.2.1 ยิลด์การสปีดเตอร์ริง	42
2.11.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	44
2.11.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	45
2.11.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดีสซาร์จ	48
2.12 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	48
2.12.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	48
2.12.2 การให้ความเย็นที่เป้า	49
2.12.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอร์ริงเฉพาะผิวเป้า	49
2.12.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	51
2.13 คุณสมบัติทางพลาสมา	53
2.13.1 หัววัดลางมัวร์	53
2.13.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	54
2.13.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	55
2.13.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา	56
2.13.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	58
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	58
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	58
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	58
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้	59
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	59
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	59
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	60
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าเชิงแสง	60
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	61
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงานกระตุ้น	61
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	62
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	62
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	63
3.2.3 วิธีการแอนนีส	69
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	70
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	70
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	71
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	72
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	73
4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	77
4.3.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	77
4.3.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	80
4.3.3 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	87
4.3.4 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	93
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ	96
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	96
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	117
ภาคผนวก	122
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานวิจัย	137
ประวัตินักวิจัย	139



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทึ่งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	10
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดตัวของธาตุชนิดต่างๆ	43
ตารางที่ 4.1 ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	76
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีวิธีการออกซิเดชัน เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง โดยความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางหน่วย (Ω/sq)	80
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	85
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	91
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์ม โลหะ Cu	92
ตารางที่ 4.6 พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์ม โลหะ Cu	94

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สภาพนิวไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ	5
ภาพที่ 2.2 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
ภาพที่ 2.3 การบอกระนาบต่างๆ ของผลึก	10
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O	11
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	12
ภาพที่ 2.6 แผนภาพเฟสของระบบ CuO	13
ภาพที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
ภาพที่ 2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
ภาพที่ 2.11 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	18
ภาพที่ 2.12 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	19
ภาพที่ 2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	21
ภาพที่ 2.14 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	22
ภาพที่ 2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
ภาพที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	24
ภาพที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	25
ก. การวัดแบบสองขั้ว โดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
ภาพที่ 2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	26
ภาพที่ 2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	30
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.21 ระดับพลังงานของกัปคักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{μ}) และกัปคักพาหะชนิดจับโฮล (E_{ν}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดที่บและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ	32
ภาพที่ 2.22 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	35
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	36
ภาพที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัปคักพาหะในช่วงกระแสขาลง	38
ภาพที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัปคักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	39
ภาพที่ 2.26 โครงสร้างของการโกล์วคิศจารัจ	41
ภาพที่ 2.27 การเกิดสปีดเตอร์ริงที่ผิวเป้า	42
ภาพที่ 2.28 การสปีดเตอร์ริงโดยดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	44
ภาพที่ 2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	46
ภาพที่ 2.30 ความต่างศักย์ของการดิศจารัจกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก	48
ภาพที่ 2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	52
ภาพที่ 2.32 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	53
ภาพที่ 2.33 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	53
ภาพที่ 2.34 หัววัดเดี่ยววางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	54
ภาพที่ 2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	54
ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	59
ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α)	59
ภาพที่ 3.3 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	60
ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	61
ภาพที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	61
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	62
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	70
ภาพที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	71
ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	72
ภาพที่ 4.4 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuO ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	73
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	74
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีกัล ในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	75
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	75
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	76
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และ (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	77
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	77
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	78
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	79
ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	79
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	81
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	81
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	81
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	82
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	83
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 4500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	83
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	84
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	84
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	85
ภาพที่ 4.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	86
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	88
ภาพที่ 4.29 การพิศกรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	89
ภาพที่ 4.30 การพิศกรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	90
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(R_0/R)$ กับอุณหภูมิ (T) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบคเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 (Moller, 1993) จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดผลิตจากซิลิคอน ต้นทุนในการผลิตซิลิคอนความบริสุทธิ์สูงยังอยู่ในระดับสูงและส่วนใหญ่ผลิตป้อนให้กับอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอร์ราวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อาจเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต เนื่องจากธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นั้นมีปริมาณมากบนโลก ราคาถูก และไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากจึงมุ่งความสนใจมาศึกษาสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น เพื่อที่จะค้นคว้าหาวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมเพื่อทดแทนการใช้ซิลิคอนในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

สารกึ่งตัวนำคิวปริคออกไซด์ (cupric oxide; CuO) เป็นสารประกอบออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีความโดดเด่น กล่าวคือมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ (Al-Kuhaili, 2008) ซึ่งสอดคล้องดีกับช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ CuO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ส่วนคิวปริคออกไซด์ (cuprous oxide; Cu_2O) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดประมาณ 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนเฟสเป็นไปเป็น CuO ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส (Al-Kuhaili, 2008; Gevorkyan et al., 2012) เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้สนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำคิวปริคออกไซด์ (CuO) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ CuO มีข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ CuO ไม่เป็นสารพิษ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีและเอ็น (Al-Kuhaili, 2008) เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ฟิล์มเคลือบอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

coatings) ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี เป็นต้น อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการริเริ่มมีการวิจัยและพัฒนาแก๊สเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ในหลากหลายรูปแบบเช่น p-Cu₂O/n-ZnO (Jeong et al., 2008), p-Cu₂O/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 ราคาข้อมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิคอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบาง p-Cu₂O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 % (Minami et al., 2011) จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจยังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลไฟด์ เช่น CuAlO₂/CdZnS (Gaewdang et al., 2011), p-Cu_xSn_yS₂O/n-ZnO (Nakashima and Ichimura, 2012) และ CuO/CdS (Gaewdang and Wongcharoen, 2015) พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ CuO ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) เป็นต้น แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มักจะมีเฟสของ Cu, Cu₂O ปะปรายร่วมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดี่ยวของฟิล์มบาง CuO สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ในช่วงอุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสม

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงมีข้อดีหลายประการคือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางต่ำ ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบางฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มบางโลหะ Cu ด้วยความร้อนในอากาศความดันปกติ จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์อันได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มโลหะ Cu ด้วยความร้อนในอากาศความดันปกติ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง จากนั้นจึงนำไปแอนนิต ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.3.3 ถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง CuO สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางนี้
- 1.4.2 ทำการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง
- 1.4.3 ทำการแอนนิตฟิล์มโลหะ Cu ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuO โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.4.5 ถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 200-1,000 นาโนเมตร
- 1.4.7 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.4.8 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 1.4.9 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.10 เขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

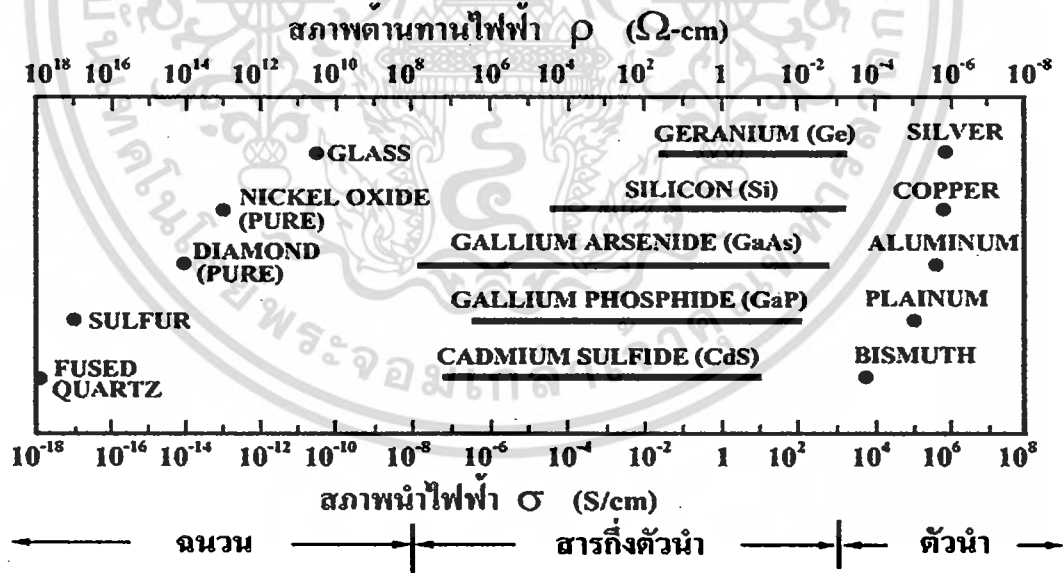
- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงวิธีการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมมาตรของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งานนิตย, 2530; งานนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

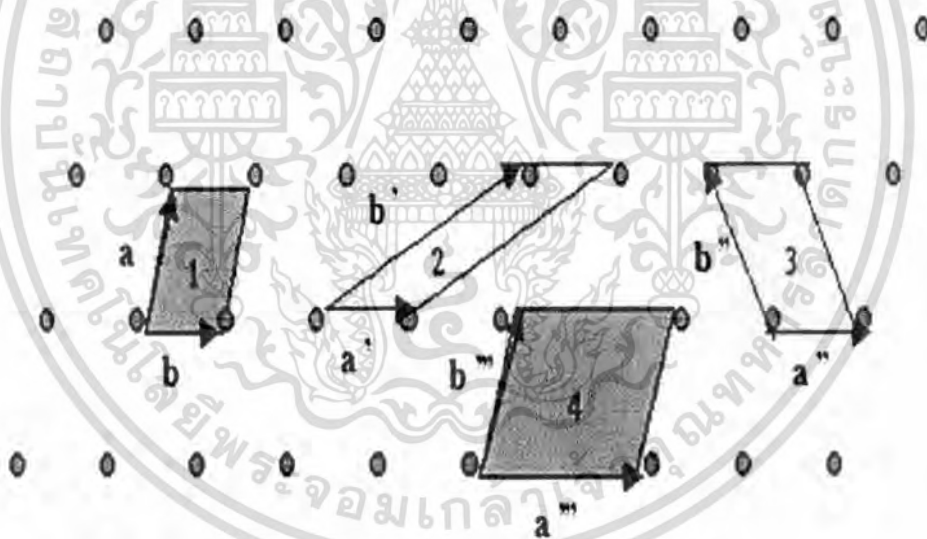
วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน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



ภาพที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

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

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือ โมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่าโครงสร้างหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้าง ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

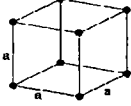
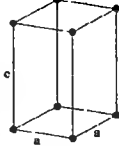
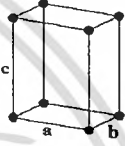


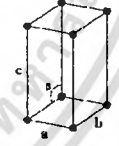
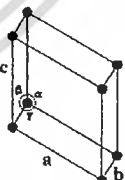
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

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

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

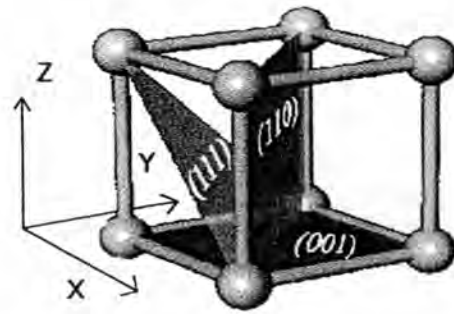
การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2}1\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุระนาบจะใช้อักษร $(h \ k \ l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” “-” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ ($-$) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ ($\bar{}$) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



ภาพที่ 2.3 การบอกระนาบต่างๆ ของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก		ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)	
	$\frac{1}{x}$	$\frac{1}{y}$		$\frac{1}{z}$
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{\infty}$	(010)
$-1, 1, 1$	$\frac{1}{-1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	($\bar{1}$ 11)
$-1, -1, -1$	$\frac{1}{-1}$	$\frac{1}{-1}$	$\frac{1}{-1}$	($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)
$0.5, 0.5, 0.25$	$\frac{1}{0.5}$	$\frac{1}{0.5}$	$\frac{1}{0.25}$	(224)
$0.5, 0.5, \infty$	$\frac{1}{0.5}$	$\frac{1}{0.5}$	$\frac{1}{\infty}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

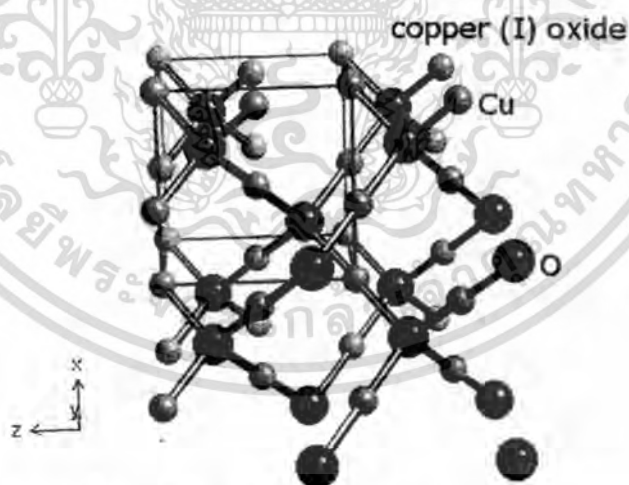
เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ($1\bar{1}0$) ในระบบเฮกซะโกนัลเฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกัน นั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ดิจีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง คือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางที่เรียกว่าสปีดเตอร์ริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

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

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากชั้นแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับชั้นแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ชั้นแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ชั้นแลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปแนวทะแยงมุมของชั้นแลตทิซแรกเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ของความยาวเส้นทะแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อรา เคยนำไปทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



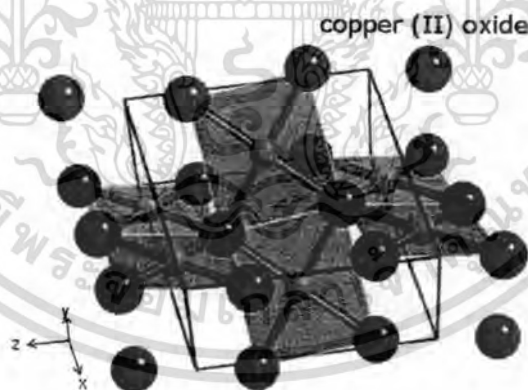
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O

สารประกอบ CuO มีสีดำพบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO จะมีลักษณะโคโคเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในภาพที่ 2.4 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ชั้นใต้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศ ความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

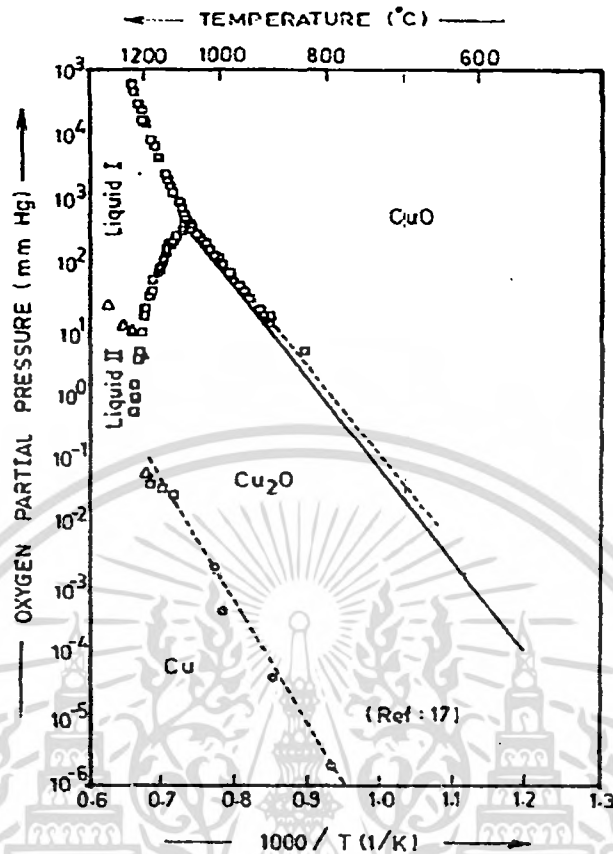
ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ CuO มีสีดำ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นไฟเบอร์และเซรามิกตัวตรวจรู้แก๊สชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzavyi and Johansson, 2011)

ภาพที่ 2.6 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางกอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu , Cu_2O และ CuO



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO

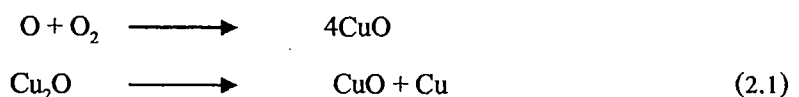
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) (Bugarinovic, 2011; จูตินัย, 2556)

ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบ Cu_2O สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ Cu โดยอาศัยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 1,273-1,773 เคลวิน และในช่วงเวลานานหลายนาที่จนถึงหลายชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความหนาของสารตั้งต้น มุซา และเพื่อนร่วมงาน (Musa, 1998) ทำการเตรียมสารประกอบ Cu_2O ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนในเตาเผาที่ความดันบรรยากาศปกติ โดยใช้แผ่นโลหะ Cu เป็นสารตั้งต้น ใช้อุณหภูมิในช่วง 473-1,323 เคลวิน พบว่า เฟสของสารประกอบ Cu_2O เกิดขึ้นก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเฟสของสารประกอบ CuO ตามมาภายหลัง การเกิดเฟสของสารประกอบ CuO จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,273 เคลวิน สามารถอธิบาย ได้ดังสมการ



สำหรับเฟสของสารประกอบ CuO ที่ไม่ต้องการสามารถที่จะกำจัดออกได้โดยการกัดออกด้วยสารละลายของ FeCl, HCl และสารละลายของ HNO_3 กับ NaCl ฟิล์มบางที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,323 เคลวิน พบว่าเป็นเฟสเดียวของสารประกอบ Cu_2O โดยการตรวจสอบด้วย XRD และ SEM ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเป็นเฟสผสมของสารประกอบ Cu_2O และ CuO เสมอ แสดงว่ายิ่งอุณหภูมิของปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าต่ำลง ปริมาณของเฟสของสารประกอบ Cu_2O ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งลดลงด้วยจากข้อบ่งชี้ทางอุณหพลศาสตร์ระบุได้ว่า การระงับเฟสของสารประกอบ CuO ไม่ให้เกิดร่วมกับเฟสของสารประกอบ Cu_2O อยู่ที่อุณหภูมิ 1,313 เคลวิน ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเฟสของสารประกอบ Cu_2O ขึ้นก่อน จากนั้นจะค่อยๆ กลายเป็นเฟสของสารประกอบ CuO โดยขึ้นกับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ ฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยยังไม่ได้แอนนัลจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูงในระดับ 2×10^3 โอห์ม-เซนติเมตร และสภาพคล่องของพาหะมีค่าประมาณ 75 ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที) แต่เมื่อนำไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซ HCl เพื่อทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cl สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงและสภาพคล่องของพาหะจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที) จากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าการแอนนัลส่งผลให้เนื้อฟิล์มแน่นขึ้นและเกรนมีขนาดโตขึ้นซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

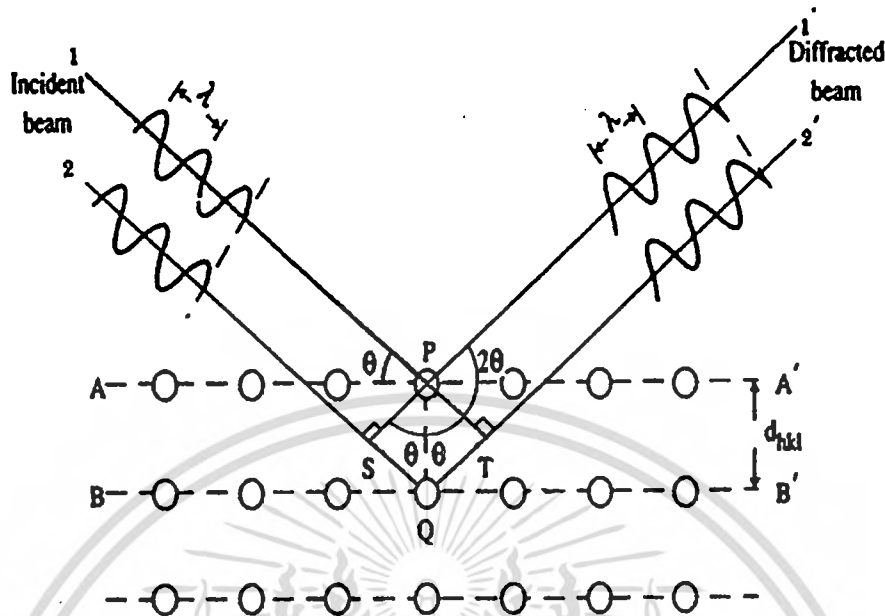
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; คูสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิริชัย, 2551; จูตินัย, 2551; จูตินัย, 2550; จูติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

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

$$2d_{hk} \sin\theta = n\lambda \quad (2.2)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นชอบจะยื่นคืนคืนการดำเนินงานนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้ว กระจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน 2θ ดังแสดงในภาพที่ 2.7

2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟรั้วการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟรั้วการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

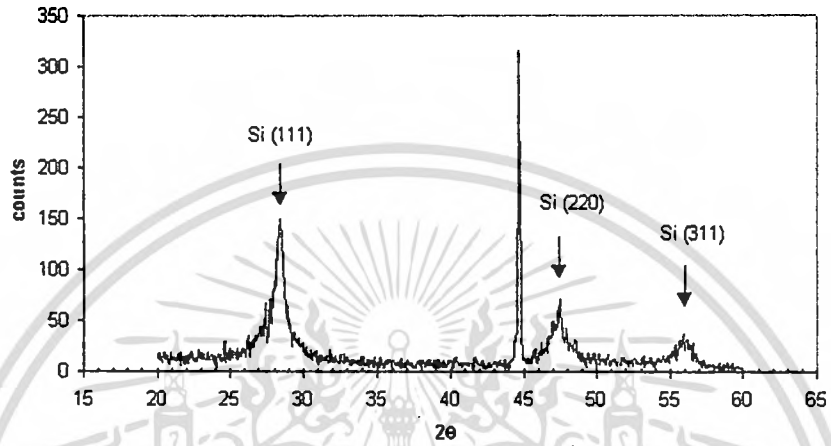
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \tag{2.4}$$

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



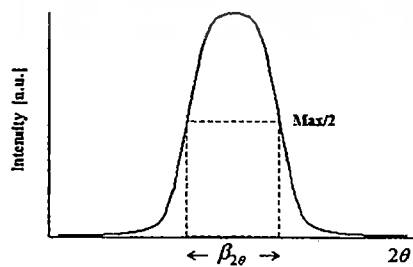
ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.5.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในภาพที่ 2.9 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \tag{2.5}$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด



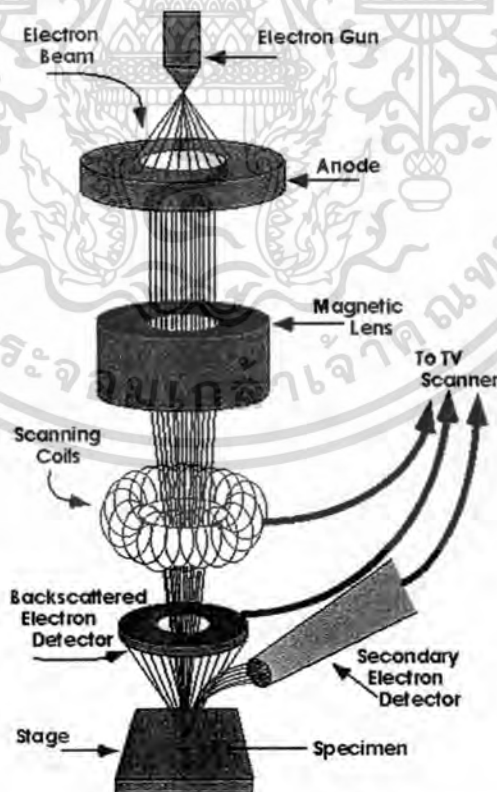
ภาพที่ 2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; คุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2553)

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

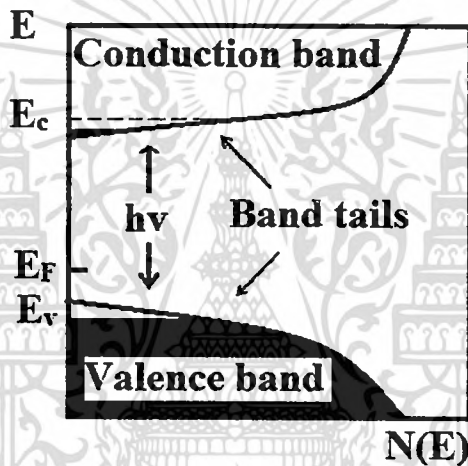


ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; คุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2553)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่า ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเอออบัก (urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

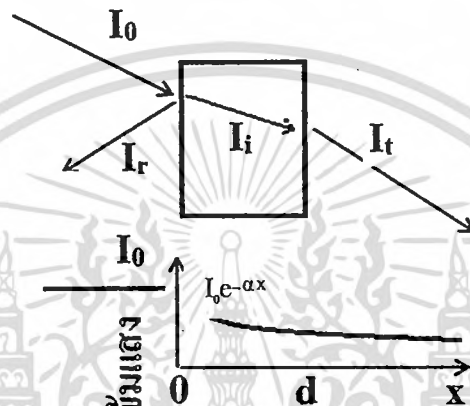
$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.6) นี้บอกเป็นนัยว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลาดส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะสู่เขาสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดคู่รวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การส่งผ่านแสง (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2553)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูป



ภาพที่ 2.12 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_0} (1 - R) e^{-\alpha d} \tag{2.7}$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$R = \frac{I_r}{I_0}$$

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่และมีค่าน้อยมากดังนั้นสมการจะกลายเป็น

$$T \approx e^{-\alpha d} \tag{2.8}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรงคือ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.9)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียงคือ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.10)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

2.8.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป หรืออาจจะเรียกว่าอีกอย่างว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตตี้ (schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของ โครงผลึกแต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของ โครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของ โครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีค่าอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) การผิดรูปของ โครงผลึกแบบเฟรเนเคิล (frenkel disorder) คือ จะเกิดลักษณะ (ก) และ(ข) ร่วมกัน โดยมีจำนวนเท่าๆ กัน
- ง) การผิดรูปของ โครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (anti structure disorder) คือจะเกิดลักษณะของอะตอมตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไปเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ โครงผลึกทำให้ลักษณะของ โครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.8.2 ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้น

ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน (dislocation) เกิดจากความผิดปกติกของจุดของ โครงผลึกตั้งแต่สองจุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติกของ โครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู

2.8.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติกของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ คือการเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบแจ้งนี้จะขอคืนหนังสือนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

boundaries) ขอบพร้อมผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันเรียกว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คูสิต, 2535)

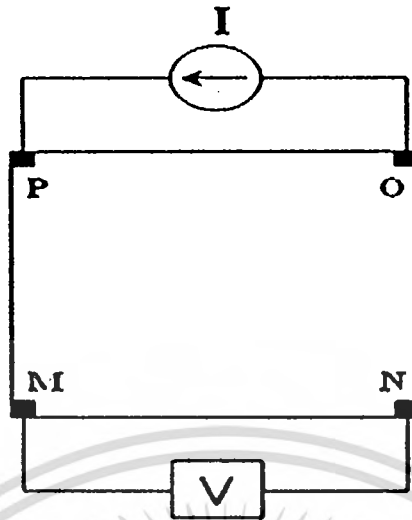
จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้าม และแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะและความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.9.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในภาพที่ 2.13 และ 2.14 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่างรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



ภาพที่ 2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



ภาพที่ 2.14 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค
แวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกร่วม
ขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.11)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.11)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกร่วมขั้ว O-N จะ
ได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.12)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.12)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

$$\text{โดย} \quad f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.14)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

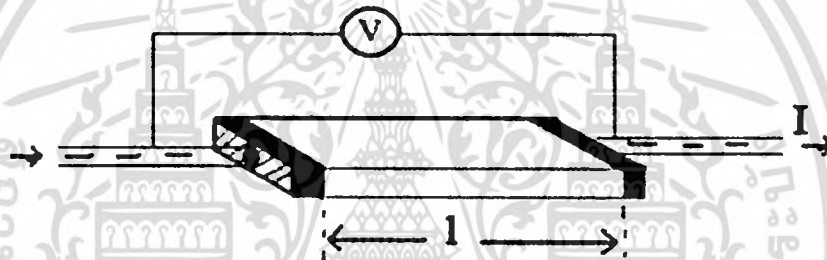
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

2.9.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังภาพที่ 2.15 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A คือ บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



ภาพที่ 2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.16)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.17)$$

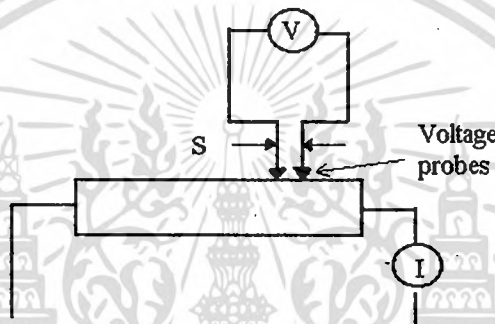
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่)ตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.9.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

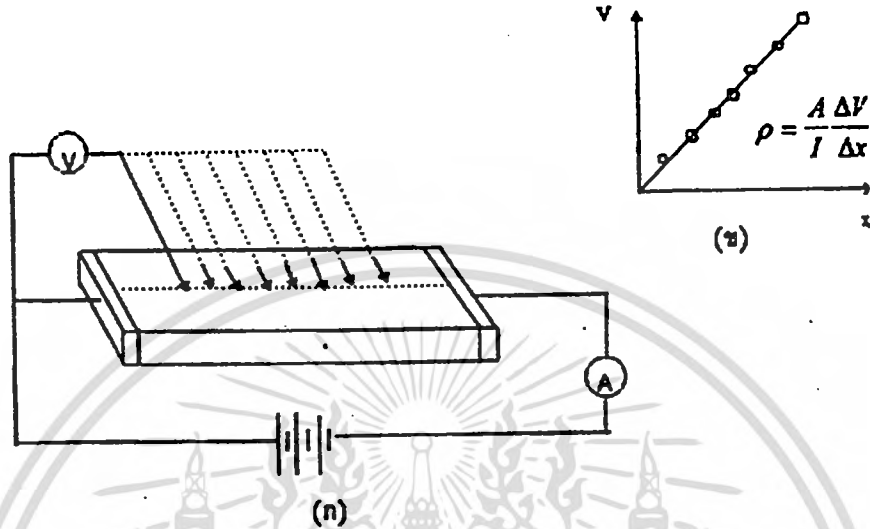
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.16 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



ภาพที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $\frac{\ell}{A} > 3$ เมื่อ ℓ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีครึ่งที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังภาพที่ 2.17 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



ภาพที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.9.4 **ปรากฏการณ์ฮอลล์** (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษณ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คุณิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \tag{2.18}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \tag{2.19}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{c(n\mu_e + p\mu_p)} \tag{2.20}$$

- เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
- p คือ ความหนาแน่นของ โฮลอิสระ
- μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

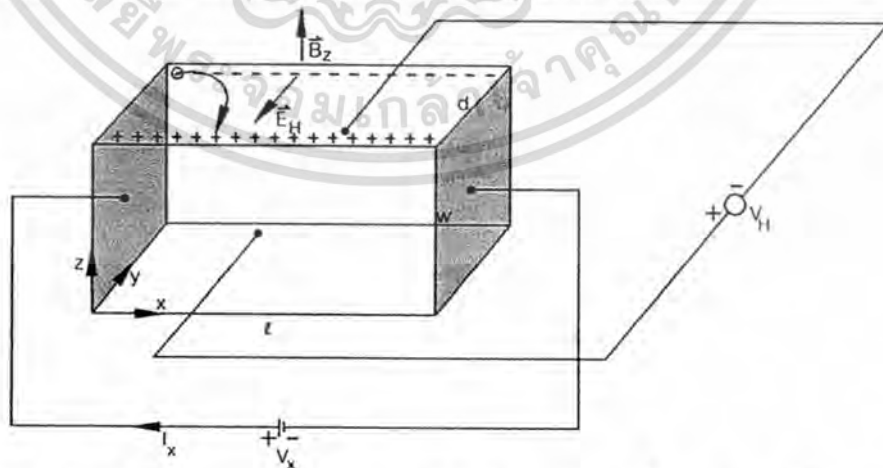
$$n = \frac{1}{c\rho\mu_e} \tag{2.21}$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{1}{c\rho\mu_p} \tag{2.22}$$

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



ภาพที่ 2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในภาพที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนว ทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.23)

จาก
$$I = nqvA$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.23)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.24)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.25)$$

จากรูปที่ 2.18
$$A = w \cdot d \quad (2.26)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) และ (2.26)

$$\rho = \frac{V_x \cdot A}{I_x \cdot L} = \frac{V_x \cdot wd}{I_x \cdot L} \quad (2.27)$$

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

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.28)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิมเพราะฉะนั้น จะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.29)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.29) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $J_x = \frac{I_x}{wd}$ (2.31)

แล้ว $R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn}$ (2.32)

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

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d}$$
 (2.33)

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x B_z} \cdot d$$
 (2.34)

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd}$$
 (2.35)

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E)$$
 (2.36)

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq}$$
 (2.37)

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq}$$
 (2.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.39)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกล้อไอออนในวัสดุสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.40)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.38) และ (2.39) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.41)$$

หรือ จากสมการที่ (2.35) และ (2.36)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.42)$$

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

2.9.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิศย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



ภาพที่ 2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทะแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \tag{2.43}$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \tag{2.44}$$

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

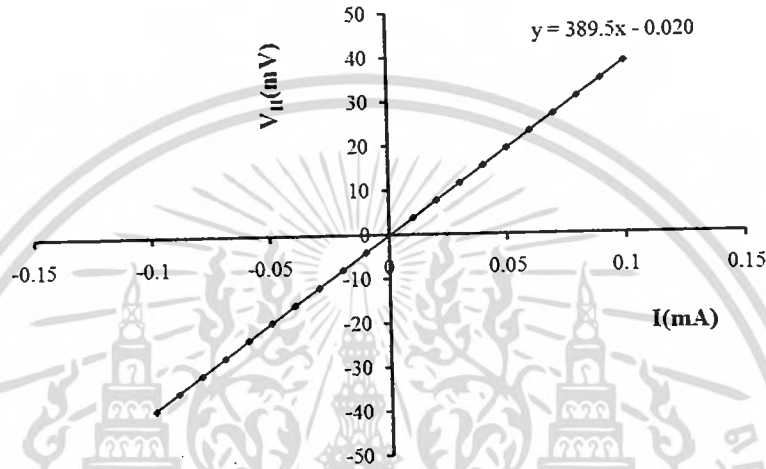
B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.45) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.45)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังภาพที่ 2.40 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า $\frac{V_H}{I}$



ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.46)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.47)$$

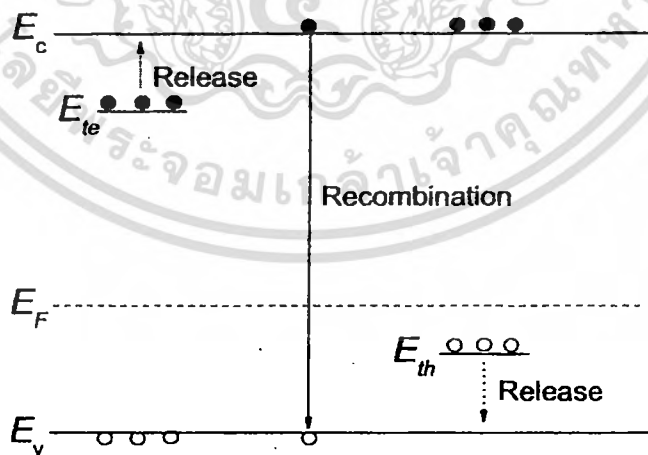
เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในภาพที่ 2.21 มีทั้งระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กักตักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกักตักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกักตักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับกักตักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กักตักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกักตักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อย (release) จะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัว (recombination) แต่เนื่องจากกักตักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัว (recombination) ใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



ภาพที่ 2.21 ระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.48)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.49)$$

แทนสมการที่ (2.49) ลงใน (2.48) จะได้

$$I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.50)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.51)$$

แทนสมการที่ (2.51) ลงใน (2.50) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.52)$$

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.53)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.54)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.50) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) (nd) V_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \end{aligned} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ_u คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากัมมันตภาพมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกัมมันตภาพทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ui} \exp \left(-\frac{t}{\tau_i} \right) \right) \quad (2.56)$$

เมื่อ σ_{ui} คือความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ui} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp \left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.57)$$

โดยที่ V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น โวลต์

μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)

w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

d คือ ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ

τ_i คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)

N_{ui} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร

σ_{ui} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้าร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp \left(\frac{E_t}{kT} \right) \quad (2.58)$$

$$\ln \tau_r = \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right)$$

$$= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1,000 k)} \left(\frac{1,000}{T} \right)$$

เมื่อ ความชัน $= \frac{E_t}{(1,000)k}$

ดังนั้น $E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q}$

$$= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{อีเล็กตรอน โวลต์} \quad (2.59)$$

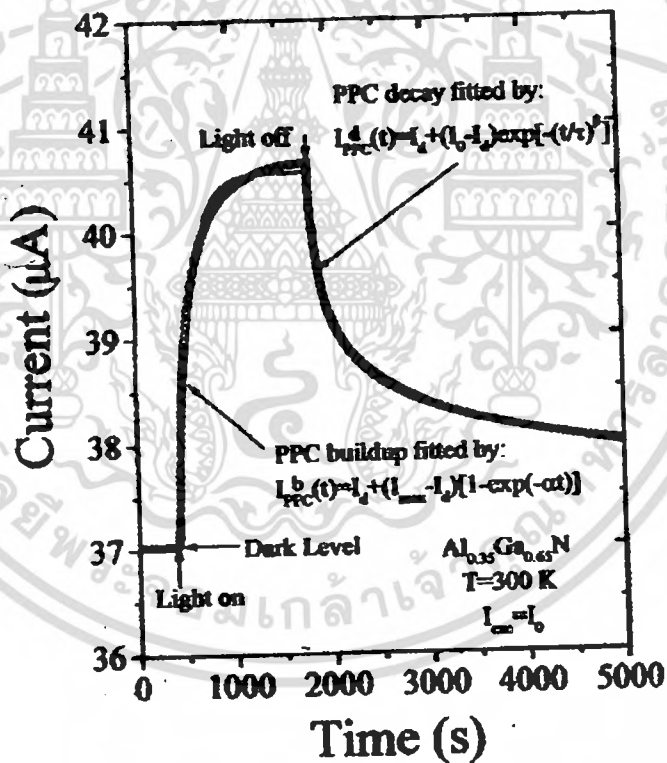
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังภาพที่ 2.22 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.60)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.61)$$



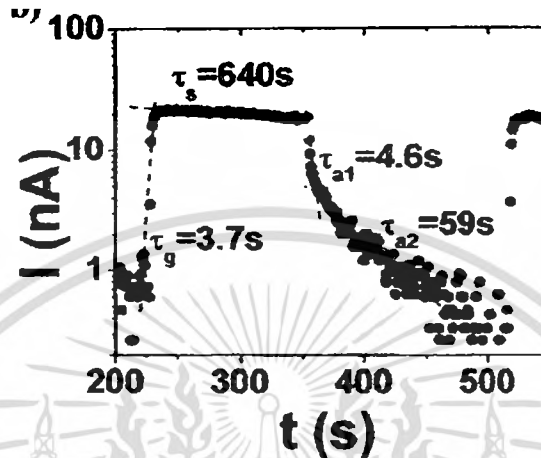
ภาพที่ 2.22 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.60) และสมการที่ (2.61) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t (ดังภาพที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.56) และสมการที่ (2.61) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.63)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการ ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.64) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.57) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.65)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.66)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวข้องกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right)$$

สมการที่ (2.64) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.67)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right] \quad (2.68)$$

ส่วนกรณีของชิ้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.53) และ (2.64) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{1} \right) V_a N_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{1} \right) V_a N_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.69) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.70)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.71)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right)$$

สมการที่ (2.69) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.72)$$

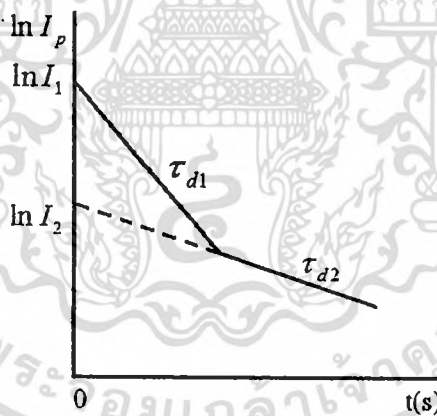
ซึ่ง A_1' และ A_2' สามารถหาได้จากการพล็อตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตคาเซ็น ก็สมารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1'' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \right] + A_2'' \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \right] \quad (2.73)$$

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังภาพ

ที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.74)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะของฟิล์มบาง ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.75)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$ ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \quad (2.76)$$

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.77)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

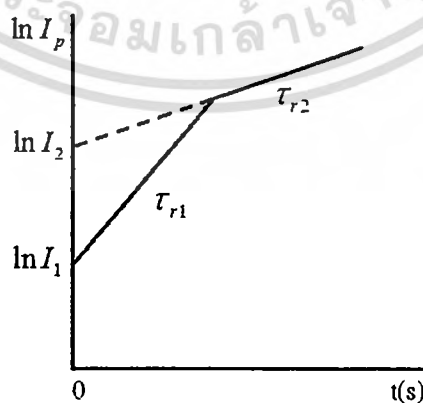
$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.78)$$

และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.79)$$

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (2.80)$$

$$\frac{I}{I_{\max}} = 1 - \exp(-t/\tau_r)$$

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp(-t/\tau_r)$$

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -t/\tau_r \quad (2.81)$$

จากสูตร

$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.81) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.82)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.82) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.75), (2.77), (2.78) และ (2.79) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.11 หลักการสปีดเตอร์ริง (รูตินัย, 2556; สุรสิงห์, 2545)

ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำ ความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปีดเตอร์ริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.11.1 โกล์วดีซาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง

โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

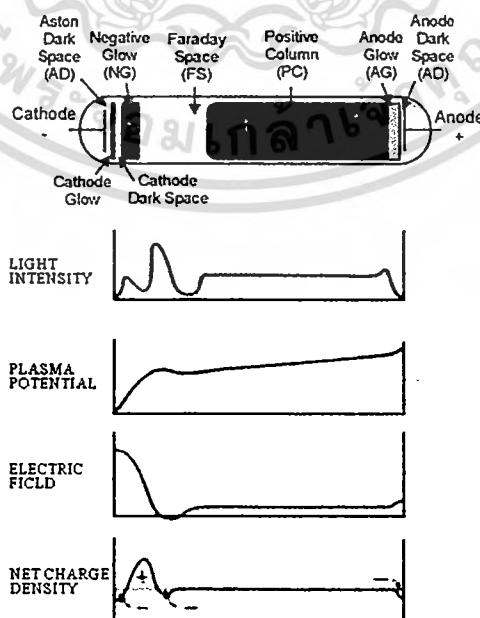
ไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ไอเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยไอเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรือไอเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคือไอเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยไอเล็กตรอน โดยที่ไอเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \tag{2.86}$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
 m คือ มวลของไอเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของไอเล็กตรอน

การโกล์วดิสซาร์จก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การโกล์วดิสซาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วอโนดดังแสดงในภาพที่ 2.26

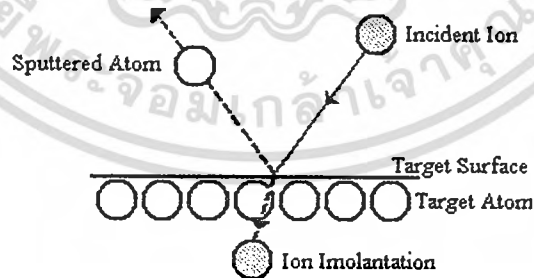


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาพที่ 2.26 โครงสร้างของการโกล์วดิสซาร์จให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะหลักอิเล็คตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็คตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโคถั่วที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็คตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็คตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็คตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของโคถั่วดิสชาร์จแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7 การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงพอการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโคถั่วดิสชาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.11.2 สปีดเตอริง

สปีดเตอริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็คตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 การเกิดสปีดเตอริงที่ผิวเป้า

2.11.2.1 ยีลด์การสปีดเตอริง (sputtering yields)

ยีลด์ของการสปีดเตอริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.84 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{yield ของการสเปตเตอริง} = \text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า} / \text{ไอออนที่ชนเป้า} \quad (2.84)$$

การสเปตเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะ โดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่า yield ของการสเปตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสเปตเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอน โวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม yield ของการสเปตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่า yield ของธาตุชนิดต่างๆ

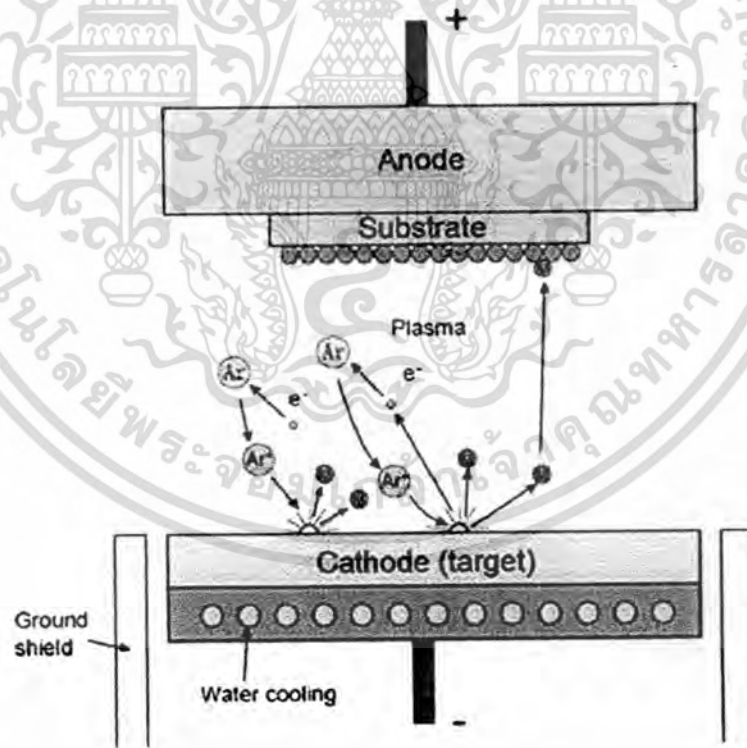
Elements	Threshold (eV)	Ar ⁺ energy (eV)				
		60	100	200	300	600
Ag	15	0.22	0.63	1.58	2.20	3.40
Al	13		0.11	0.35	0.65	1.24
Au	20		0.32	1.07	1.65	2.43
Be	15		0.074	0.18	0.28	0.80
Cr	22		0.30	0.67	0.87	1.30
Cu	17	0.10	0.48	1.10	1.59	2.30
Fe	20	0.064	0.20	0.53	0.76	1.26
Ge	25		0.22	0.50	0.74	1.22
Mo	24	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.29 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโคล์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะวาอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



ภาพที่ 2.28 การสปีดเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสเป็คเตอรืงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเตอรืงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเตอรืงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสเป็คเตอรืงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสเป็คเตอรืง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_{\perp} ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.85)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.86)$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก
 F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{r} \quad (2.87)$$

โดยจะไดรัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_{\perp}/Bq \quad (2.88)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

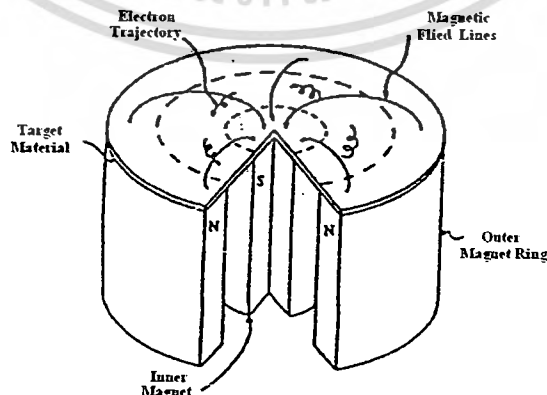
$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.89)$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.90)$$

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

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื่อนลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในภาพที่ 2.29 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทาง

เลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้น โดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรูด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \quad (2.91)$$

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|q|V}{m}} \quad (2.92)$$

แทนค่า (2.91) ลงใน (2.87) จะได้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mv}{|q|}} \quad (2.93)$$

โดยจะ ได้รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

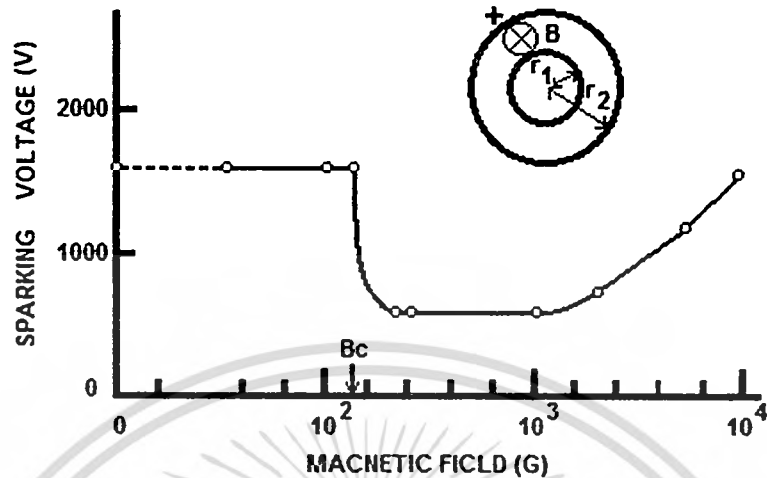
$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{v}}{B} \quad (2.94)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสราร์จ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสราร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.95

$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mv_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรูดแผ่นราบ} \quad (2.95)$$

โดย v_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรูด
 L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรูด

2.11.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสราร์จ



ภาพที่ 2.30 ความต่างศักย์ของการดิสราร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรมอดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในภาพที่ 2.30 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสราร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรมอดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรมอด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรมอดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสราร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสราร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพื้นที่การชนอย่างต่อเนื่อง

2.12 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง (ฐิตินัย, 2556; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปีดเทอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.12.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกใช้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ตั้ง

ต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	ω	คือ	ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน
	τ	คือ	เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)
	P	คือ	ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

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

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} pV_0^{1/2} \quad (2.97)$$

โดย	λ_0	คือ	ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอร์
	B	คือ	ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก
	e/m	คือ	ค่าประจุนต่อมวลของอิเล็กตรอน
	V_0	คือ	ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมืดกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมืดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 2.98

$$d = cV^{-m} \quad (2.98)$$

โดย	c	คือ	ค่าคงที่
	m	คือ	เลขยกกำลังระหว่าง -3 และ -6

ความหนาของบริเวณมืด กระแส และความต่างศักย์คือตามกฎของไฮลด์ ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์

$$I \propto \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (2.99)$$

เมื่อการขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมืดถูกแทนลงในสมการ (2.97) จะได้ความสัมพันธ์

$$I \propto k^n \quad (2.100)$$

โดย	k	คือ	ค่าคงที่ของความสัมพันธ์
	n	คือ	ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอน โดยสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

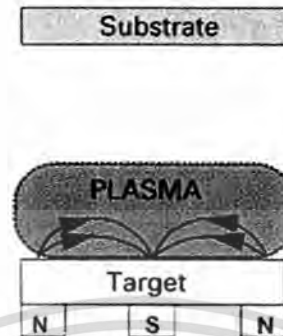
2.12.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบ โดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก 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)

ในกรณีทิศทางของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะไม่ถูกกักโดยสนามแม่เหล็กและจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ขั้วคาโทด และเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าทำให้เกิดการสเป็คเตอรืงของเป้าและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดีซาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า และจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น ฟิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำ เป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

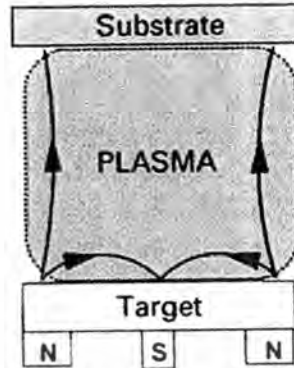
ฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



ภาพที่ 2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

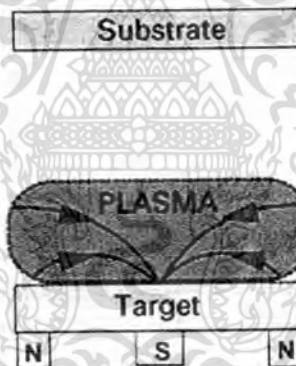
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ จึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไอออนมีค่าสูง โดยได้รับจากพลาสมาที่เกิดขึ้นโดยวินโดวส์และขั้วไวต์ และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมาว่าที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์ม โดยวิธีสเปคโตรริง และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า และอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตามอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนา โดยปราศจากการนำไปสู่ความเครียดที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.32 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้ เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ เป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



ภาพที่ 2.33 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

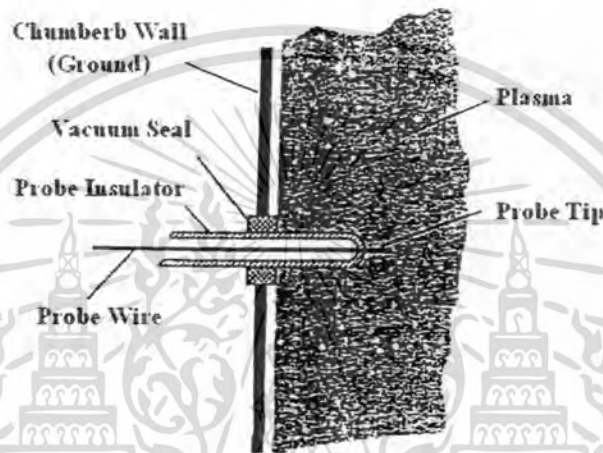
2.13 คุณสมบัติทางพลาสมา (ฐิตินัย, 2556; สุรสิงห์, 2545)

2.13.1 หัววัดลางมัวร์

หัววัดลางมัวร์เป็นข้อไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ปกคลุมด้วยฉนวน ยกเว้นที่ปลายหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา หัววัดทำมาจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงดังเช่น ทังสเตน โมลิบดีนัม หรือแพททินัม โดยจะใช้หัววัดลางมัวร์ในการวิเคราะห์พลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาเย็น โดยใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของพลาสมา (n) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ศักย์ของพลาสมา (V_p) และศักย์ลอย (floating potential; V_f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

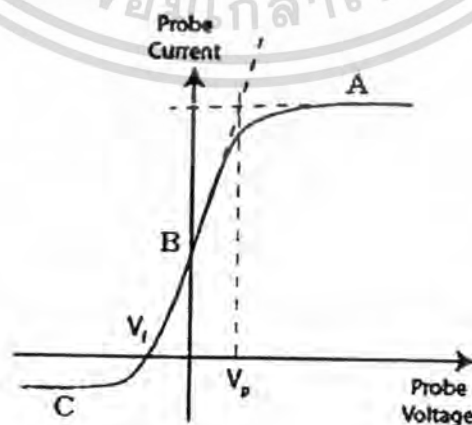
ในการใช้หัววัดกลางมัวร์จะดำเนินโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัววัดที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในภาพที่ 2.34 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัด ดังแสดงในภาพที่ 2.35 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมา สำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (saw tooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวกลางมัวร์ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบกับผนังของภาชนะสุญญากาศ



ภาพที่ 2.34 หัววัดเดี่ยวกลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

2.13.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยวกลางมัวร์วิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัด โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาอีเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอีเล็กตรอนจะสะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} e A n_c \left(\frac{8kT_c}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.101)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอีเล็กตรอนอิมิตัว (I_{sc})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อีเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อีเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอีเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_c = e A n_c \left(\frac{kT_c}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_c} \right) \quad (2.102)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอย (V_p) กระแสอีเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด และจะสร้างพลาสมาอีเล็กตรอนขึ้นมา อีเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านขอบเขตจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณกระแสไอออนอิมิตัว (I_{is}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออนจะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} e A n_i \left(\frac{kT_c}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.103)$$

2.13.2.1 อุณหภูมิอีเล็กตรอน (T_c)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอีเล็กตรอนในสมการที่ (2.100) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\frac{d \ln I_c}{dV} = \frac{e}{kT_c} \quad (2.104)$$

หรือจะหาค่า จากการรวมสมการที่ (2.99) สำหรับกระแสอีเล็กตรอนและสมการที่ (2.100) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = -\frac{1}{2} e A n_i \left(\frac{kT_c}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} e A n_e \left(\frac{8kT_c}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_c} \right) \quad (2.105)$$

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

$$I = \frac{1}{2} e A n \left(\frac{kT_c}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_c} \right) \right] \quad (2.106)$$

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I=0$)

$$I=0 = \frac{1}{2} e A n \left(\frac{kT_c}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{e(V_f - V_p)}{kT_c} \right) \right] \quad (2.107)$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_c}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln\left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)} \quad (2.108)$$

หน่วยของ kT_c/e คือโวลต์ ดังนั้น สามารถหา kT_c ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

2.13.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา

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

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6Ae} \left(\frac{m_i}{kT_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.109)$$

โดย A คือ พื้นที่ของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา
 I_{is} คือ กระแสไอออนอิมิต์
 m_i คือ มวลของไอออน

2.13.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์ $r = mv_{\perp}/eB$ เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลรวมของสนามแม่เหล็กสามารถละลายได้ในกรณี $r \gg a$ เมื่อ a คือ ขนาดของหัววัด

เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิมพัลส์แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมพัลส์ที่ถูกวัด โดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิมพัลส์ที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิมพัลส์จะได้รับผลกระทบน้อยมาก



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษา โครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบไปด้วย
 - อะซีโตน (CH_3COOH)
 - เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
 - น้ำปอดประจุ (DI water)
- แผ่นกระจกสไลด์ 12 x 25 มิลลิเมตร
- บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา

ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

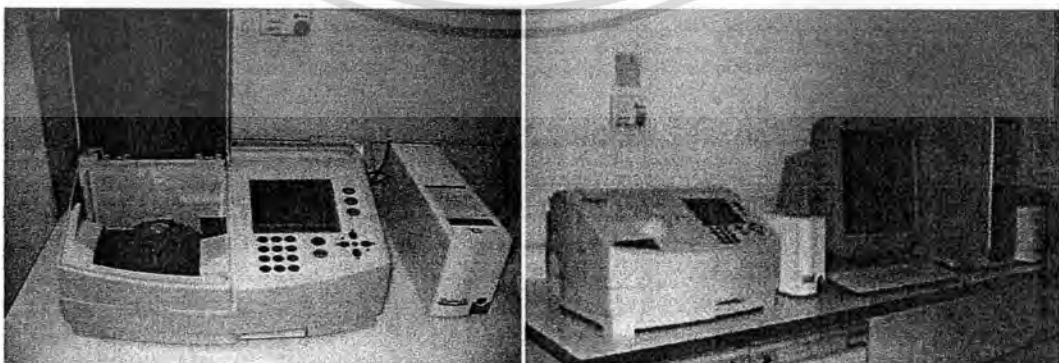
ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน Cu K_α มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($\text{He} \lambda \text{ios} \alpha$) ความยาวคลื่นแสงในช่วง 200-1,000 นาโนเมตร

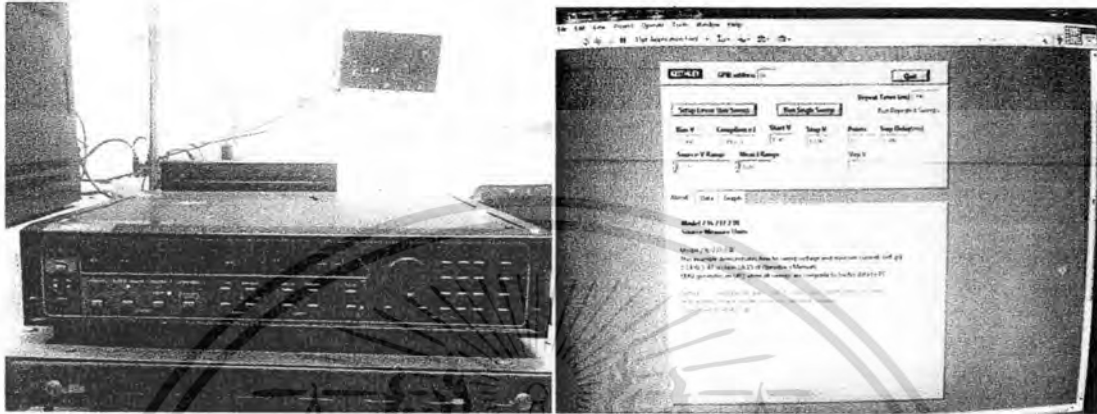


ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น ($\text{He} \lambda \text{ios} \alpha$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

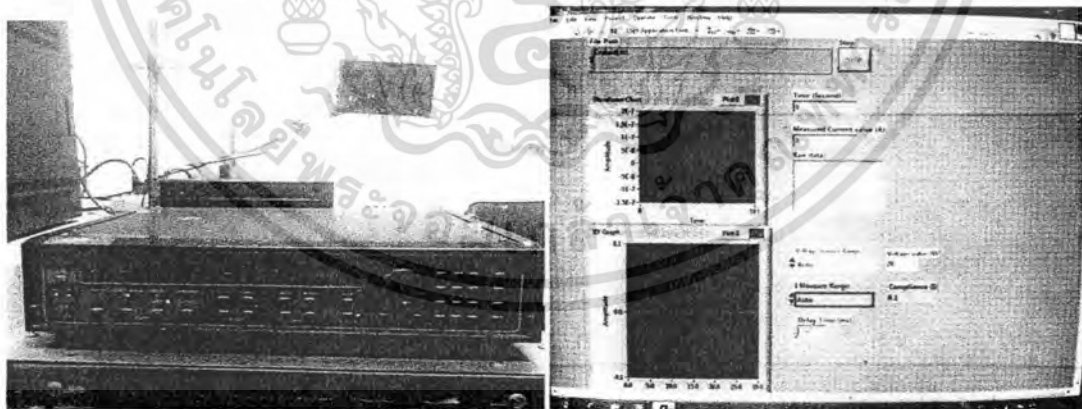
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



ภาพที่ 3.3 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น

3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

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

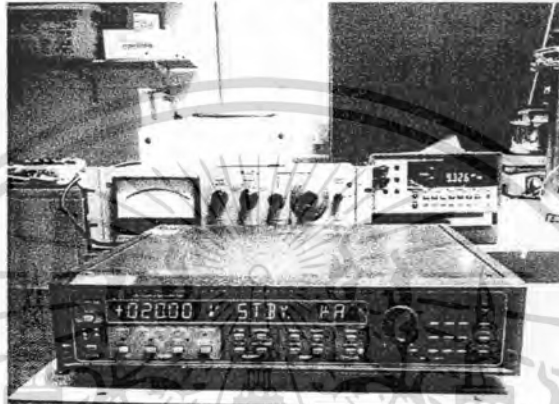


ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



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

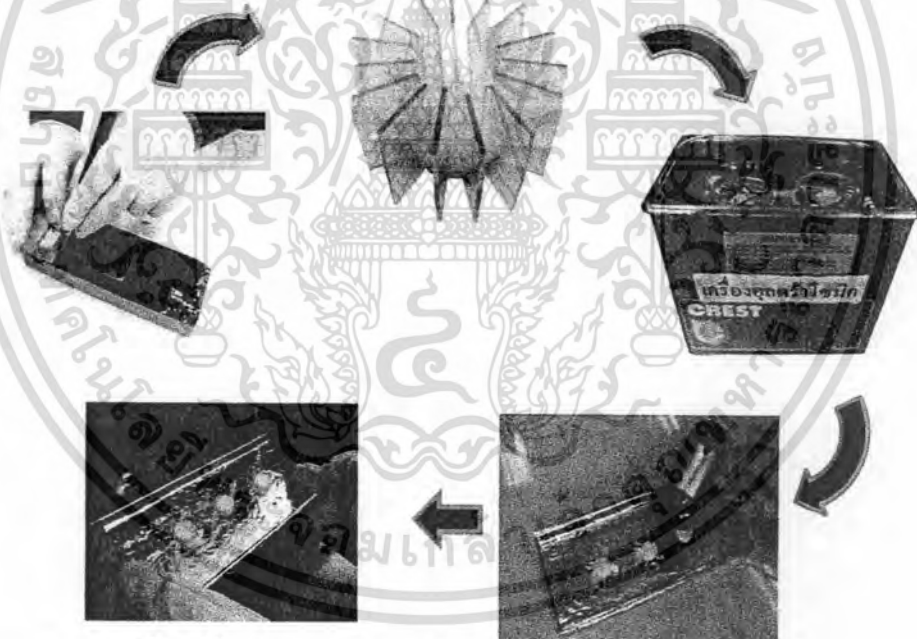


ภาพที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างกระจกสไลด์ด้วยอะซีโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็น ดึงสวิทช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำรอเอาไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิทช์ปั๊มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ ไปเลย) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชิลด์ (โลหะทรงกระบอกมีรูตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชัตเตอร์และกราน์วชิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ยกฝาบนห้องสุญญากาศปิดเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลบบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากากลบ ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมกับหมุนน็อตทางปลาซิดิ์ให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



ภาพแสดง leak valve



ภาพแสดงคั่นบังคับ shutter ที่อยู่ภายใน

8. ปิดชัตเตอร์ (คั่นบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป่าเอาไว้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ปิดสวิทช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิทช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (Rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ต้นออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (Roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ (*roughing valve) เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวกว่า Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน)
13. ปิดวาล์วหยาบและเปิดวาล์วหลังโดยปรับตำแหน่งวาล์วไปที่ backing เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศผ่านทางปั๊มไอฟุ้งกระจาย เปิดสวิทช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิทช์ DIFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อคัม น้ำมันให้ร้อน ใช้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้น้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



ภาพแสดงตำแหน่งสวิทช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)



ภาพแสดงวาล์วโมตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดง butterfly valve ในตำแหน่ง open

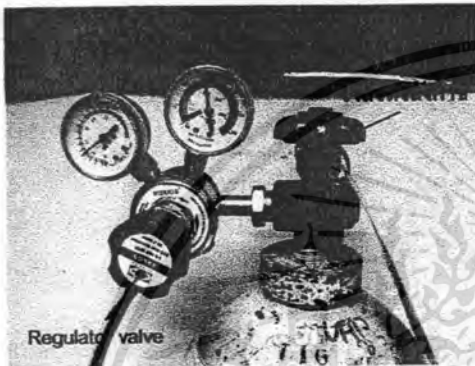


ภาพแสดง speedy valve

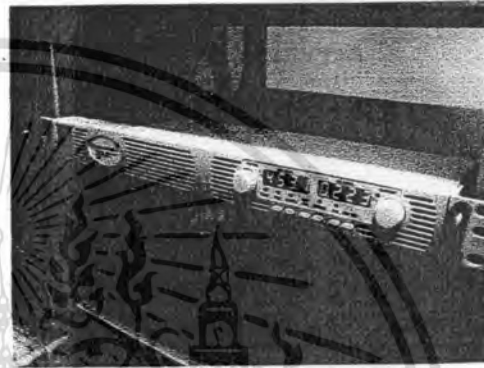
15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พิรานีเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงการทำงานอยู่ที่ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิ่งเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก 10^{-1} – 10^{-6} ทอร์
16. การป้อนก๊าซอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้มีก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุดและใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนก๊าซแล้วสูบออกจำนวน 3 ครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า การฟลัชด้วยอาร์กอนมีขั้นตอนดังนี้
- เปิดวาล์วที่หัวถังก๊าซ เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดสปีดวาล์ว (speedy valve) และเปิดวาล์วเข็ม (needle valve) สำหรับวาล์วเข็มให้เปิดขึ้นเล็กน้อยก็พอในช่วงแรก หมุนทวนเข็มนาฬิกา คือ เปิด (หมุนตามเข็มนาฬิกา คือ ปิด) เพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที
 - ปิดสปีดวาล์วแล้วก๊าซภายในห้องสุญญากาศจะถูกสูบออกไปจนความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 1)
 - เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที
 - ปิดสปีดวาล์วเพื่อสูบก๊าซภายในอีกครั้งจนความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 2)
 - เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันเท่ากับ 6.5 ทอร์ แล้วรอประมาณ 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปิดสปีดวาล์วเพื่อสูบก๊าซภายในอีกครั้งจนความดันลดลงถึง 3×10^{-3} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอน เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะประมาณได้ว่าภายในห้องสุญญากาศมีเพียงโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา
- เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้ง โดยควบคุมการป้อนก๊าซผ่านวาล์วรูเข็มจนความดันภายในมีค่าประมาณ 2×10^{-3} ทอร์



ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

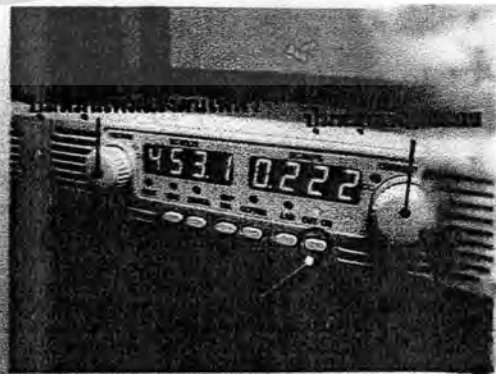


ภาพแสดง power supply

17. เปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
18. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม ON เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ อยู่ทางซ้ายมือสุดของเครื่อง)
19. ในเบื้องต้นหมุนปุ่มเพิ่มกระแสไปก่อน เมื่อเพิ่มไปถึงปริมาณหนึ่ง เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะสลับไปสู่โหมดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเองโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะสังเกตได้จากถึงแม้ว่าจะหมุนเพิ่มกระแสเข้าไปแต่จะไม่มีกระแสเพิ่มขึ้นอีก นั่นคือเครื่องสลับเข้าสู่โหมดต้องเพิ่มแรงดัน จึงต้องเปลี่ยนไปหมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแทน



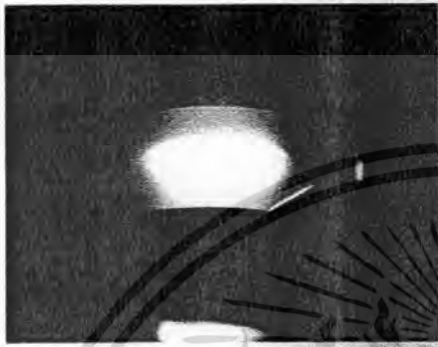
ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply



ภาพแสดงปุ่ม ON ที่ใช้ปรับเพิ่มกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20. หลังจากมาใช้ปั๊มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้ว ให้หมุนเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ซ้ำๆ จนกระทั่งพลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีน้ำเงินอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่ เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสถานะยังไม่เหมาะสม



ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางลงบนฐานรอง เช่นแรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป่ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบลงบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีสีออกไปทางสีดำ มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้ก่อน เมื่อพลาสมามีพลังงานและสถานะที่เหมาะสม จึงเปิดชัตเตอร์ออกแล้วทำการเคลือบฟิล์มต่อไป

21. เมื่อพลาสมาติดให้ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยัลด์ซ์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับเป่าที่เป็นทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่อยู่ที่ระดับ 3.6×10^{-7} ทอร์ หรือตามที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบลงบนฐานรอง เนื่องจากอะตอมของเป่าบางส่วนชนกันเองจนกระเจิงออกไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนภายใน chamber แบบละเอียด เมื่อเข็มเคลือบฟิล์มจะปรับความดันผ่านวาล์วตัวนี้เพียงวาล์วเดียวเท่านั้น



ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

22. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการเฝ้าระวังการติ๊กของเป้าหมาย ในอนาคตข้างหน้าใช้ประโยชน์จากการสปีดเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป่าสะอาด เรียกขั้นตอนนี้ว่า การเตรียมตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปัตเตอร์ริง (pre sputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชุดเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่
ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆ ที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่างเช่น
การเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆ ดังนี้



ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

แรงดันไฟฟ้า: 360-370 โวลต์

กระแส: 0.08 - 0.09 แอมแปร์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ 3.6×10^{-3} ทอร์

ระยะระหว่างเป้ากับฐานรองรับ 8-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์ม 6 นาที

23. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้า และความดันก๊าซในห้อง
สุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่านวาล์วรูเข็มเท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้
ความหนาตามเวลาที่ต้องการแล้ว ให้หมุนชุดเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุน
ลดแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสวิตช์ลมเล็กทางซ้ายของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของ
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตช์สีดำ
24. หยุดการป้อนก๊าซอาร์กอนโดยปิดสปีดวาล์วด้วยเรกูลเตอร์วาล์ว (กดพร้อมกับหมุนเข้า คือ
เปิด หมุนออก คือ ปิด) และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
25. ปิดวาล์วมีสี่ (ดึงกัน โยกเข้าหาตัว)
26. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอ
ฟุ้งกระจาย
27. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
28. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นหมุนน็อตหางปลาที่ฝาหน้าห้อง
สุญญากาศออกให้หมดเหลือไว้แต่น็อตตัวที่เป็นมือจับ (ที่ต้องถอดออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิด
ลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อต
หางปลาออกก่อน เกลีสว น็อต จะ ถูก ดัน จน แน่น ทำให้ หมุน น็อต
ออกยากในภายหลัง) หมุนเปิดลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ แล้วจะได้
ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะเด็นออกมาเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ
(เสียงคังปัก)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. เปิดฝาหน้าออก นำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ (ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย สำหรับการทำงานครั้งต่อไป
30. หลังจากสับสวิทช์ (DIFFSTAK ON) ลงแล้ว 20 นาที จึงปิดบีม โรตารี

3.2.3 วิธีการแอนนีส (จามนิตย์และคณะ, 2543; จูตินัย, 2551)

1. นำฟิล์มบางคอปเปอร์ที่เตรียมได้จากการเคลือบด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง เข้าเตาอบภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
2. เมื่ออบเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ทำการปิดสวิทช์เตา จากนั้นรอให้เตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำสารตัวอย่างออก
3. ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

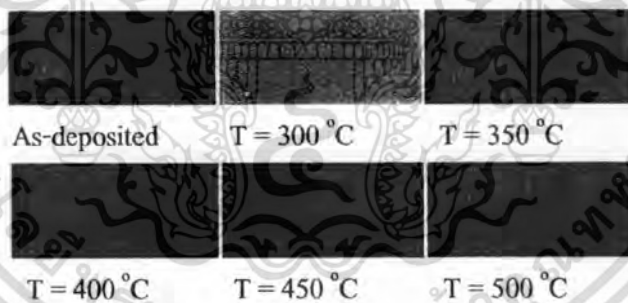
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งจุดภาค และเชิงมหภาค อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและศึกษาสมบัติทางแสงด้วย

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

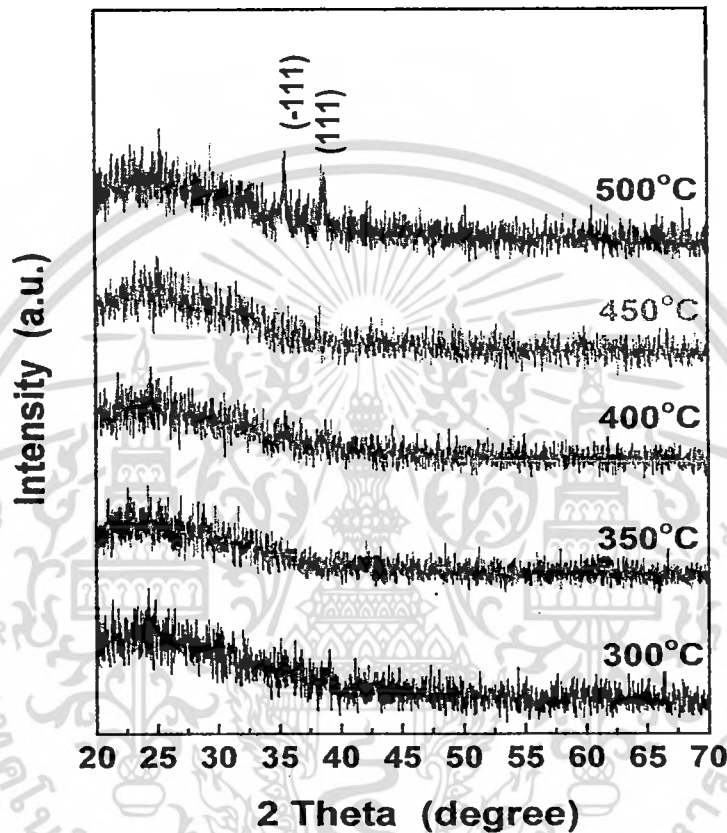
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงจะแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

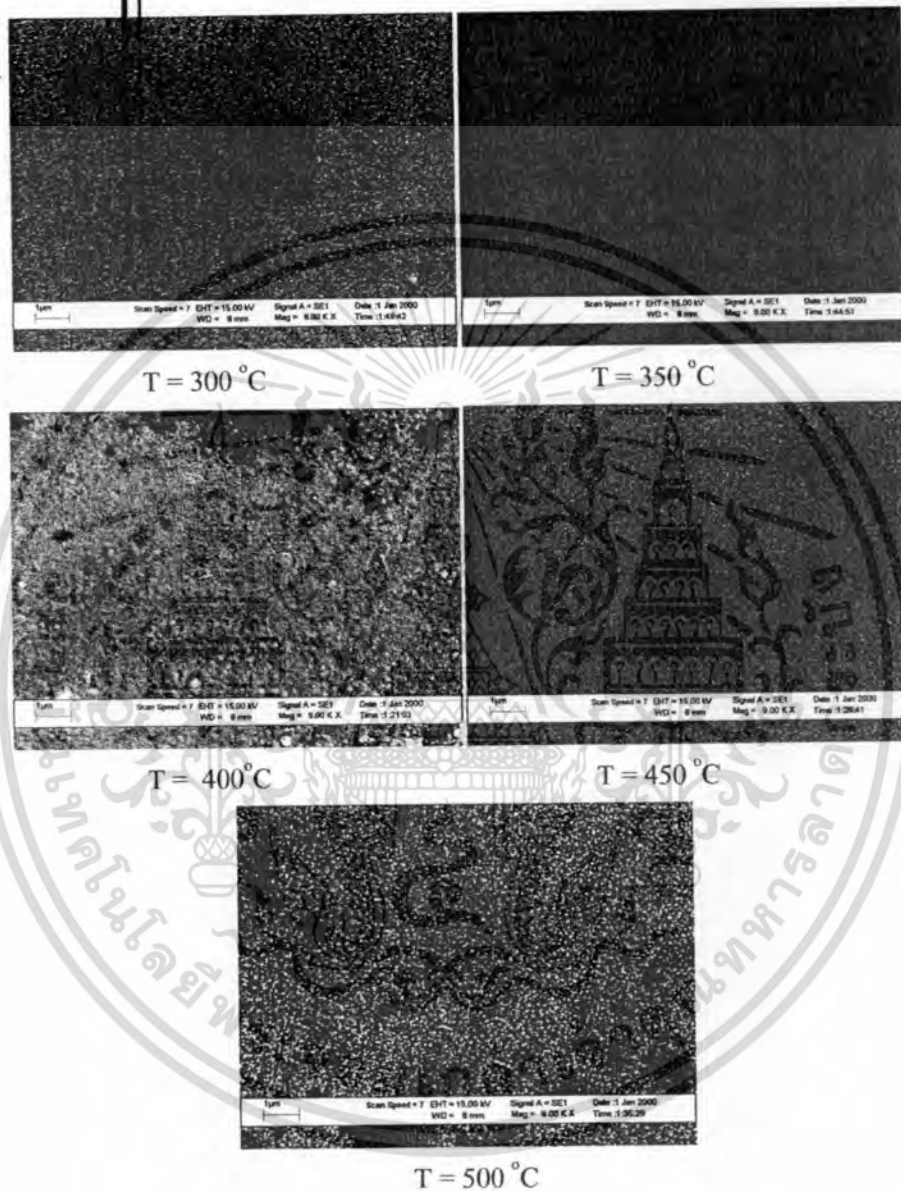


ภาพที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu จะแสดงดังภาพที่ 4.2 จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เกิดระนาบการเลี้ยวเบนคือ (-111) และ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกเมื่อทำการแอนนिलฟิล์มโลหะ Cu ในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450 ไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าฟิล์มบางเป็นอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

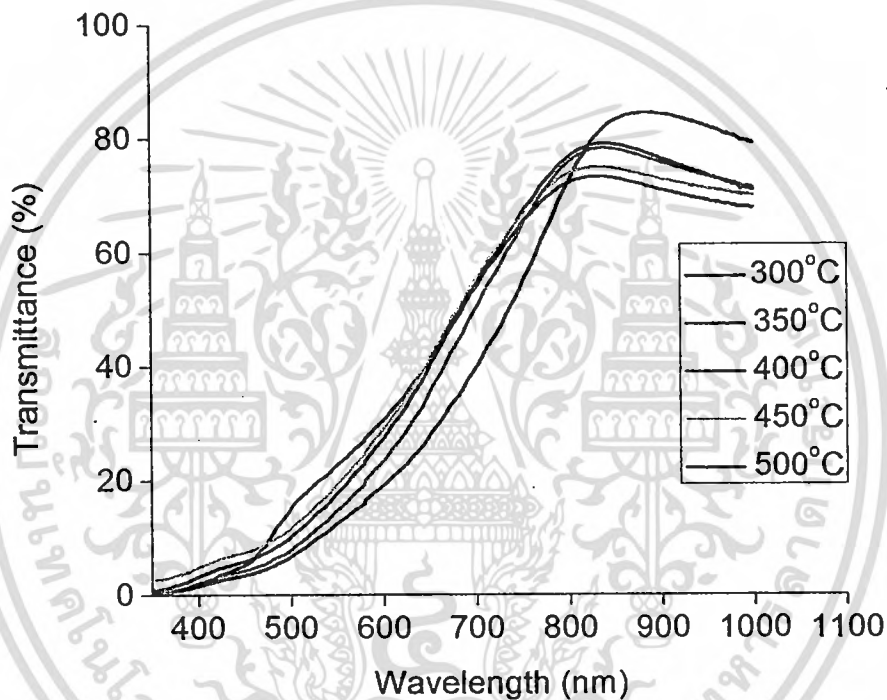


ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังปรากฏในภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อทำการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะเห็นว่าบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็ก ค่อนข้างสม่ำเสมอ มีรูพรุนบ้าง แต่ที่แอนนिलอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางมีเกรนขนาดใหญ่กว่าการแอนนिलที่อุณหภูมิต่ำอื่นๆ

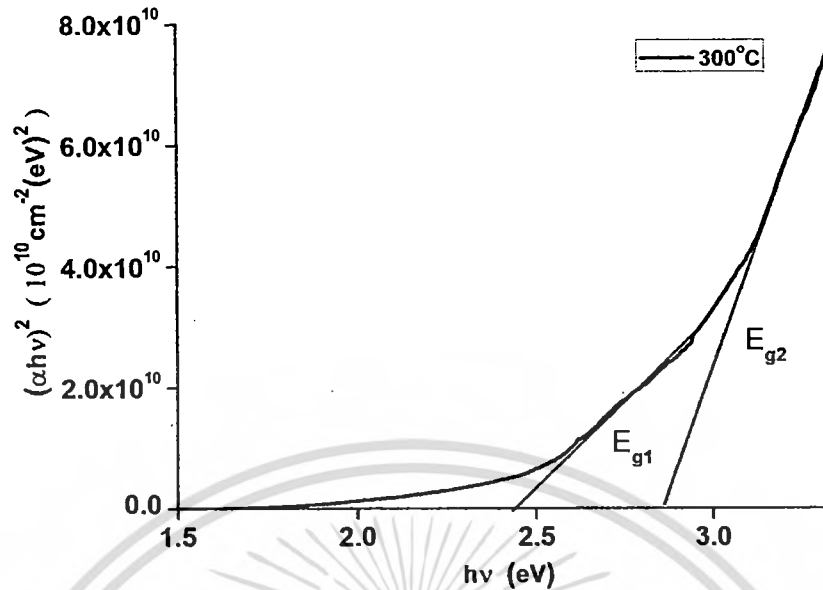
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



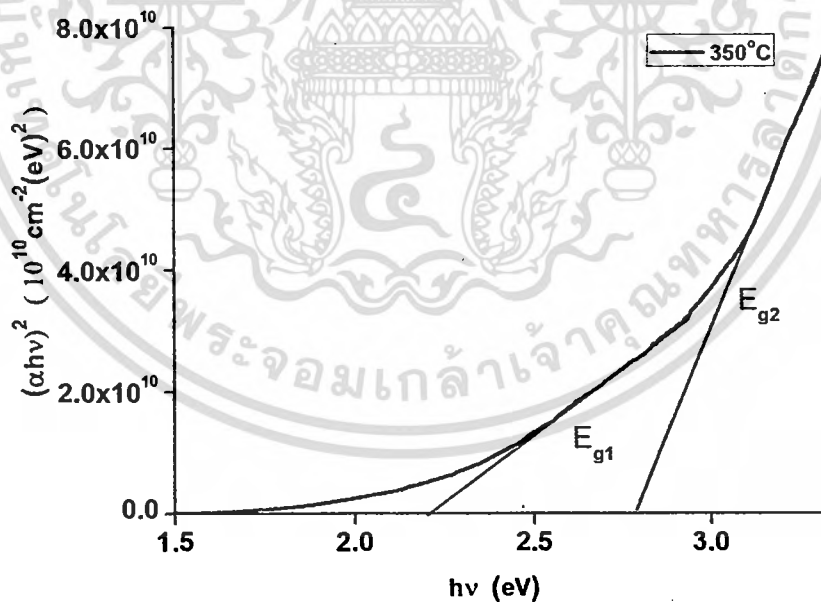
ภาพที่ 4.4 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

จากภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ขอบการดูดกลืนแสงจะเลื่อนจาก 438 นาโนเมตร ไปเป็น 444 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนिलเพิ่มจาก 300 องศาเซลเซียส ไปเป็น 400 องศาเซลเซียส ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงอยู่ในช่วง 75-85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่นแสง 850 นาโนเมตร จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานดังปรากฏในภาพที่ 4.5-4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

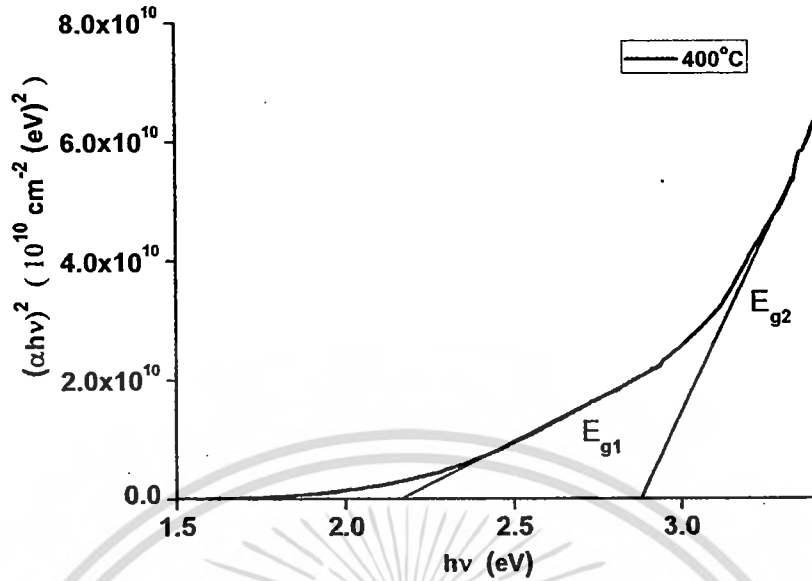


ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

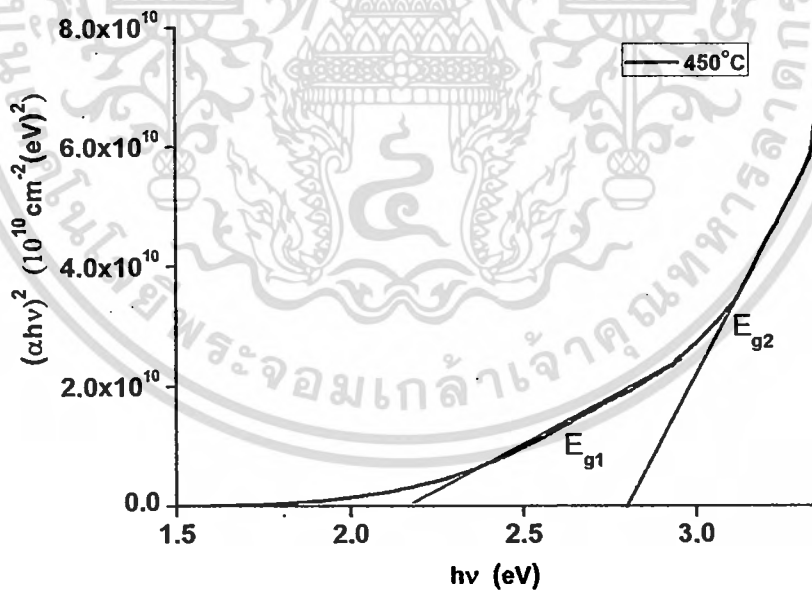


ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

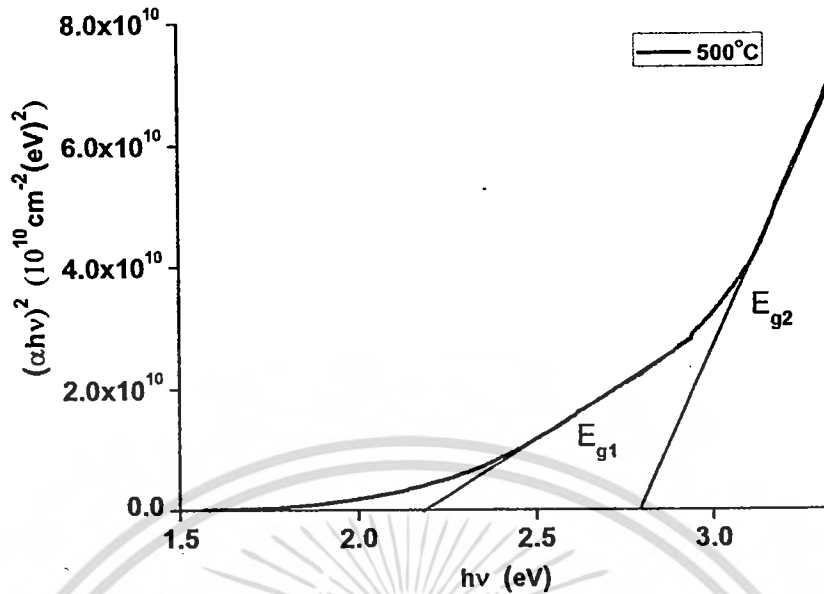


ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

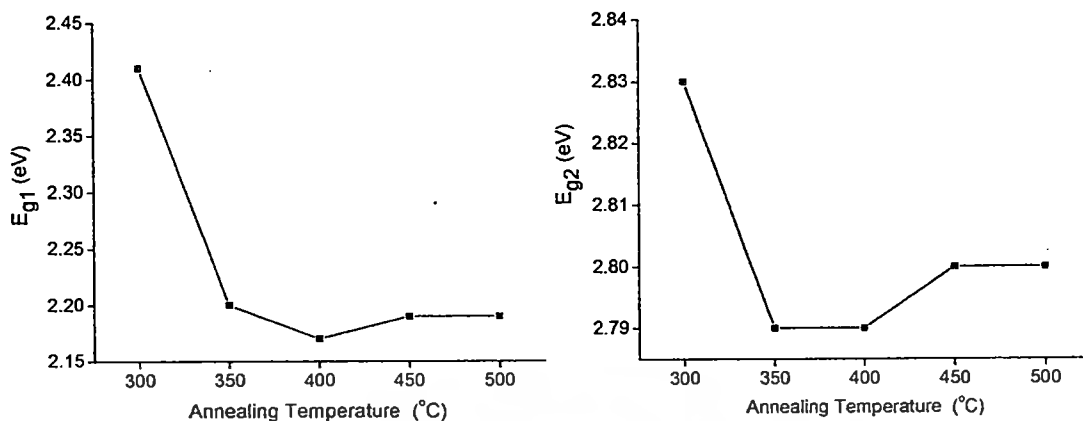
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

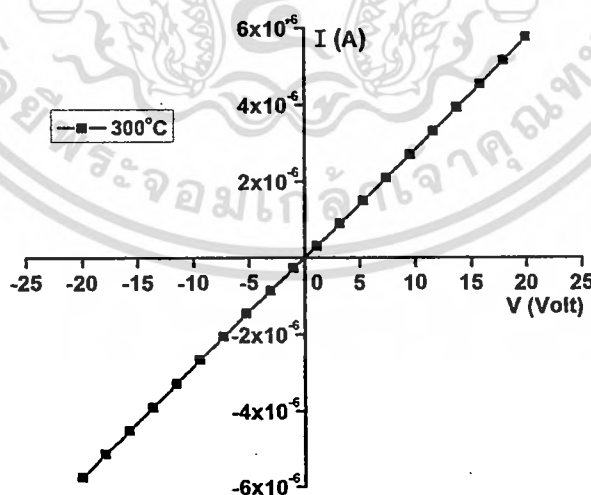
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Energy Gap (eV)	
	E_{g1}	E_{g2}
300	2.41	2.83
350	2.20	2.79
400	2.17	2.79
450	2.19	2.80
500	2.19	2.80



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_{g1}) และ (E_{g2}) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

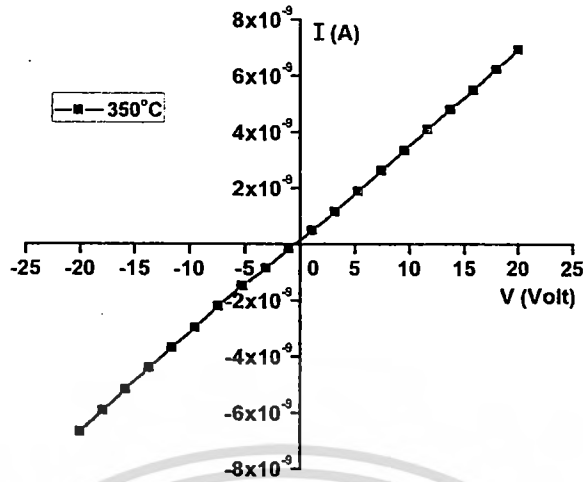
4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

4.3.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

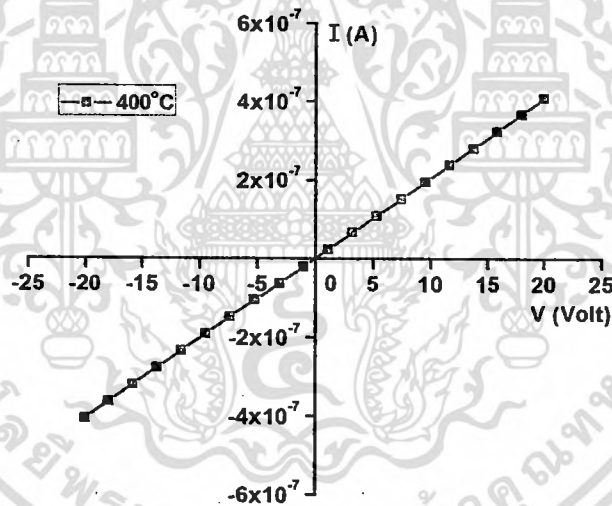


ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

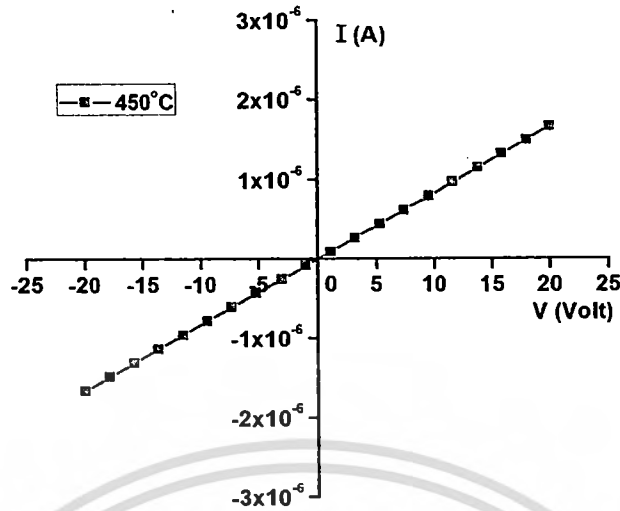


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

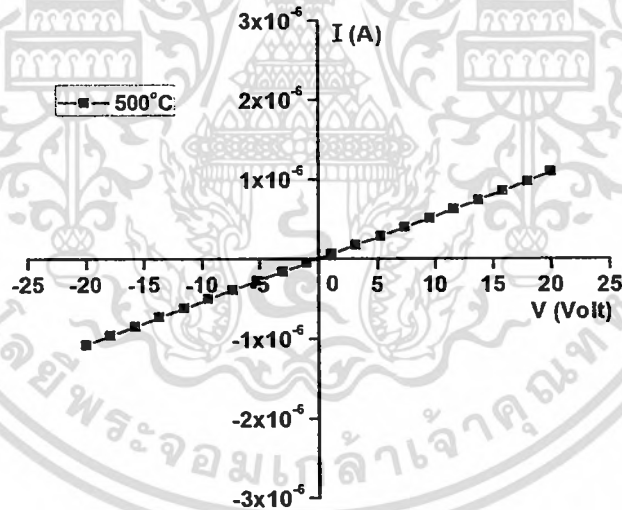


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

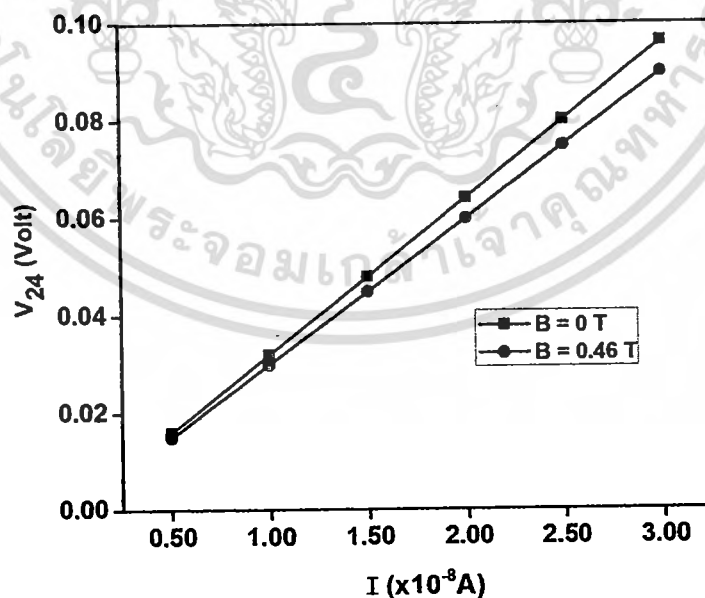
จากภาพที่ 4.11-4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งชั่วโมงจะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทานแผ่น (Sheet Resistance: R_{sh}) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการออกซิเดชัน เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง โดยความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางหน่วย (Ω/sq)

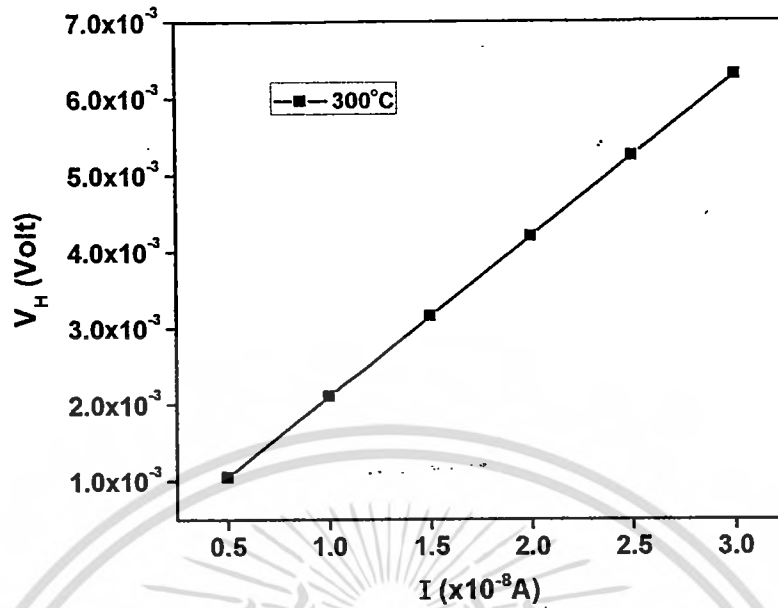
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	R_{sh} (Ω/sq)
300	9.90×10^6
350	9.90×10^9
400	1.50×10^8
450	3.75×10^7
500	6.00×10^7

4.3.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

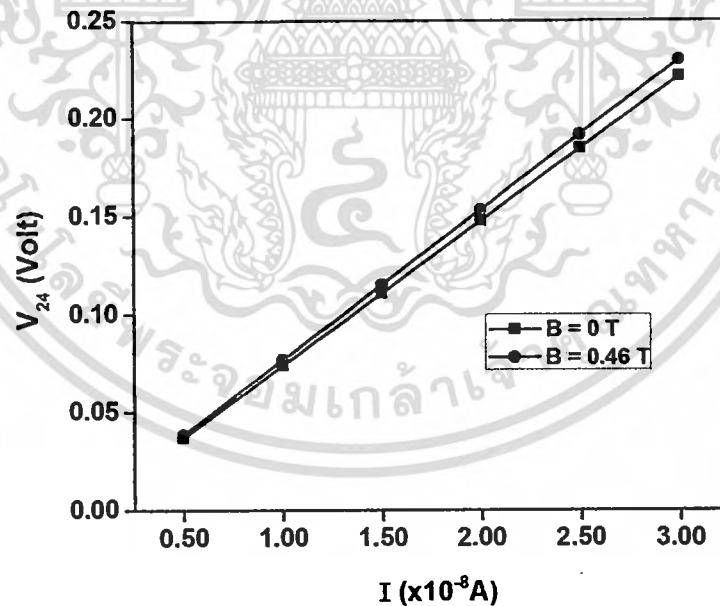


ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

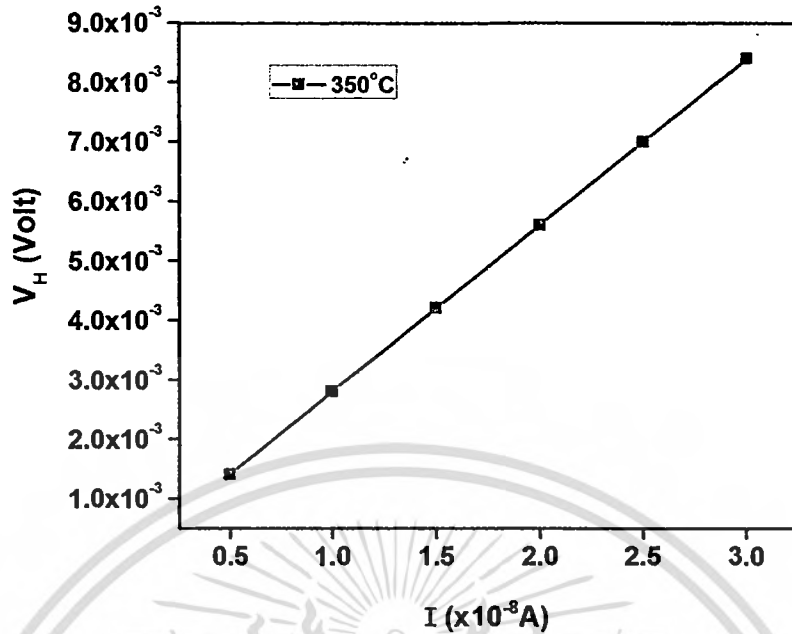


ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

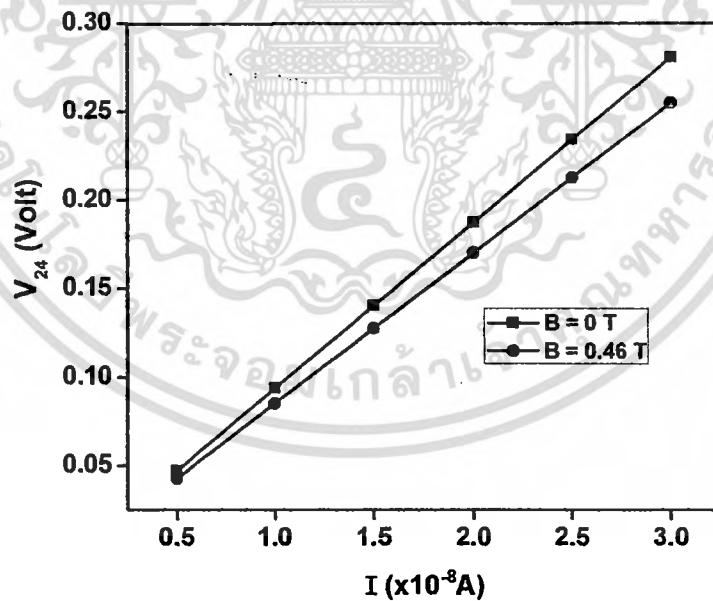


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

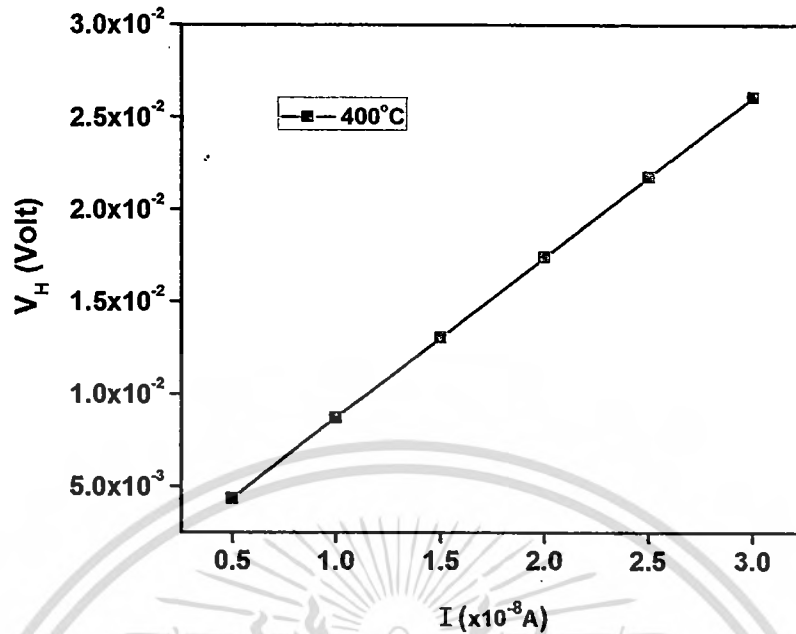


ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

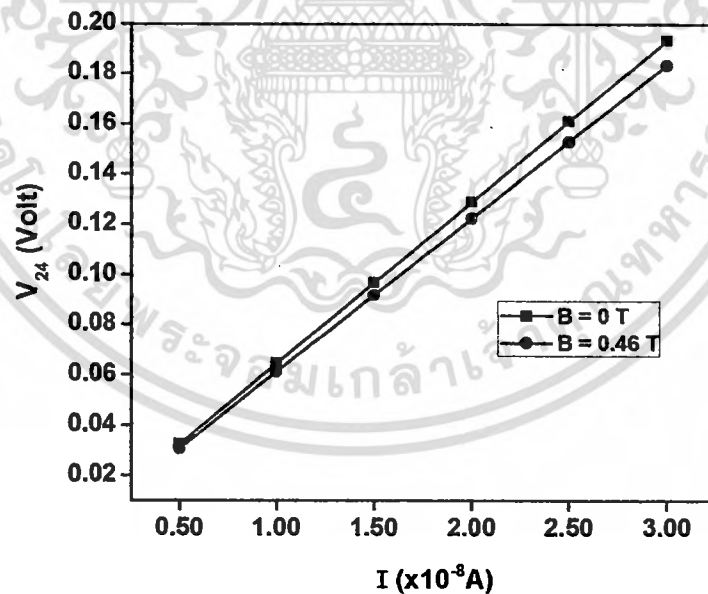


ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

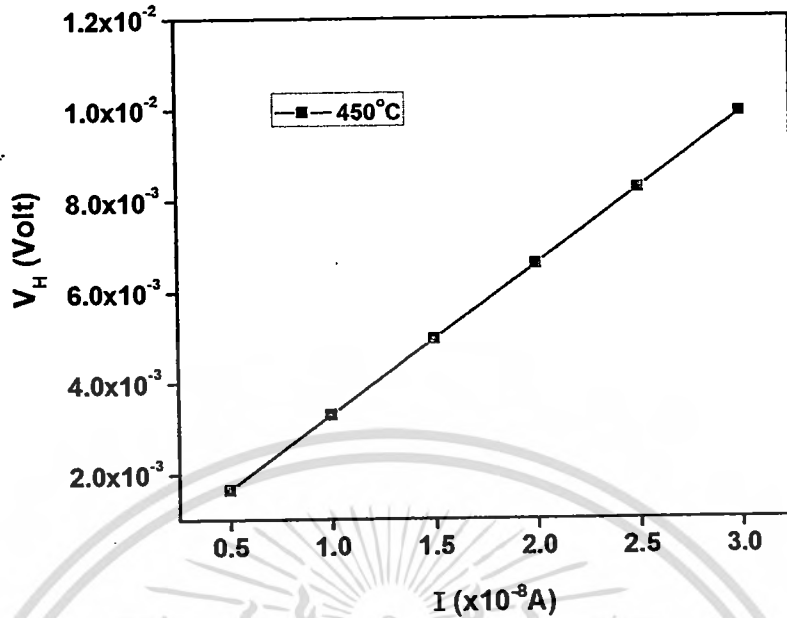
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



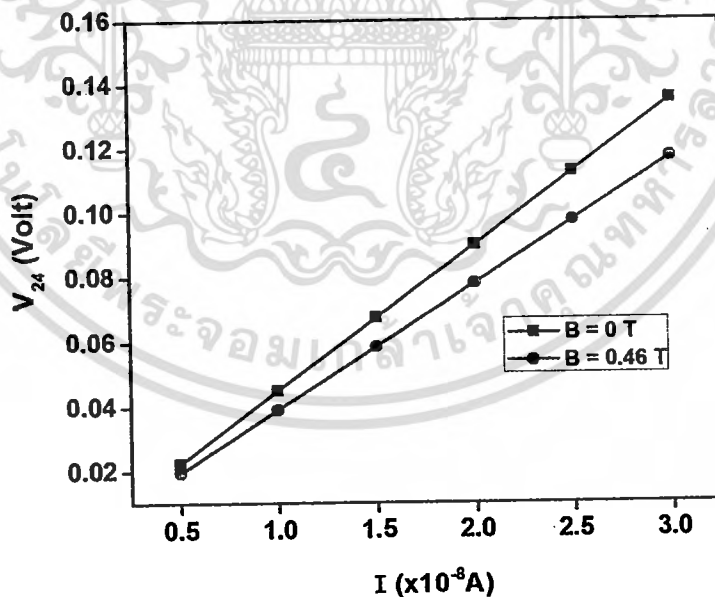
ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

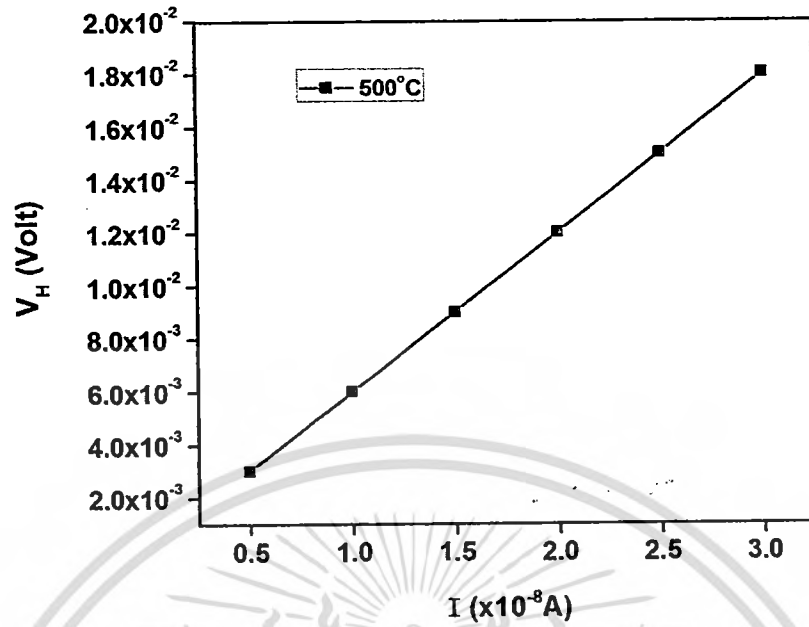


ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

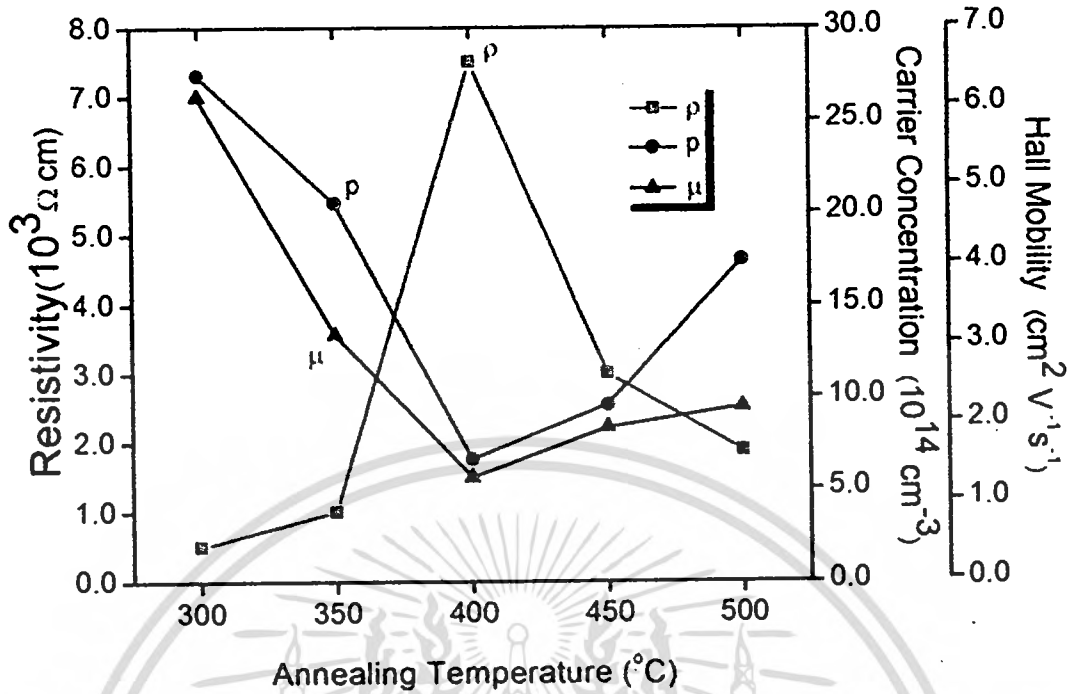


ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

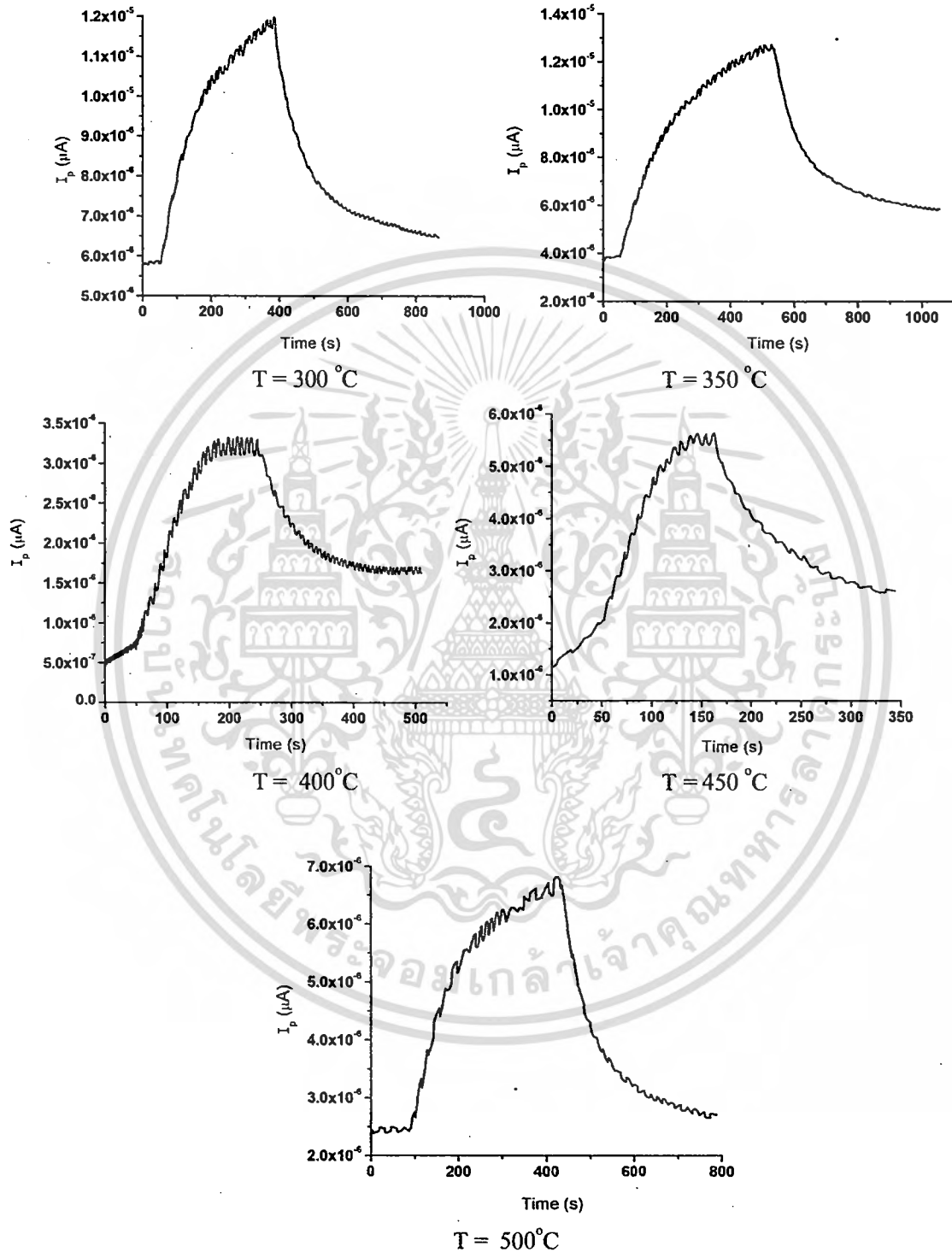
Annealing Temperature ($^{\circ}$ C)	Resistivity (Ω .cm)	Hall Constant (R_H)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V.s})$)
300	5.00×10^2	2.88×10^3	2.74×10^{15}	6.09
350	1.00×10^3	3.04×10^3	2.05×10^{15}	3.09
400	7.50×10^3	9.46×10^3	6.61×10^{14}	1.26
450	3.00×10^3	6.52×10^3	9.54×10^{14}	1.91
500	1.88×10^3	3.59×10^3	1.74×10^{15}	2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



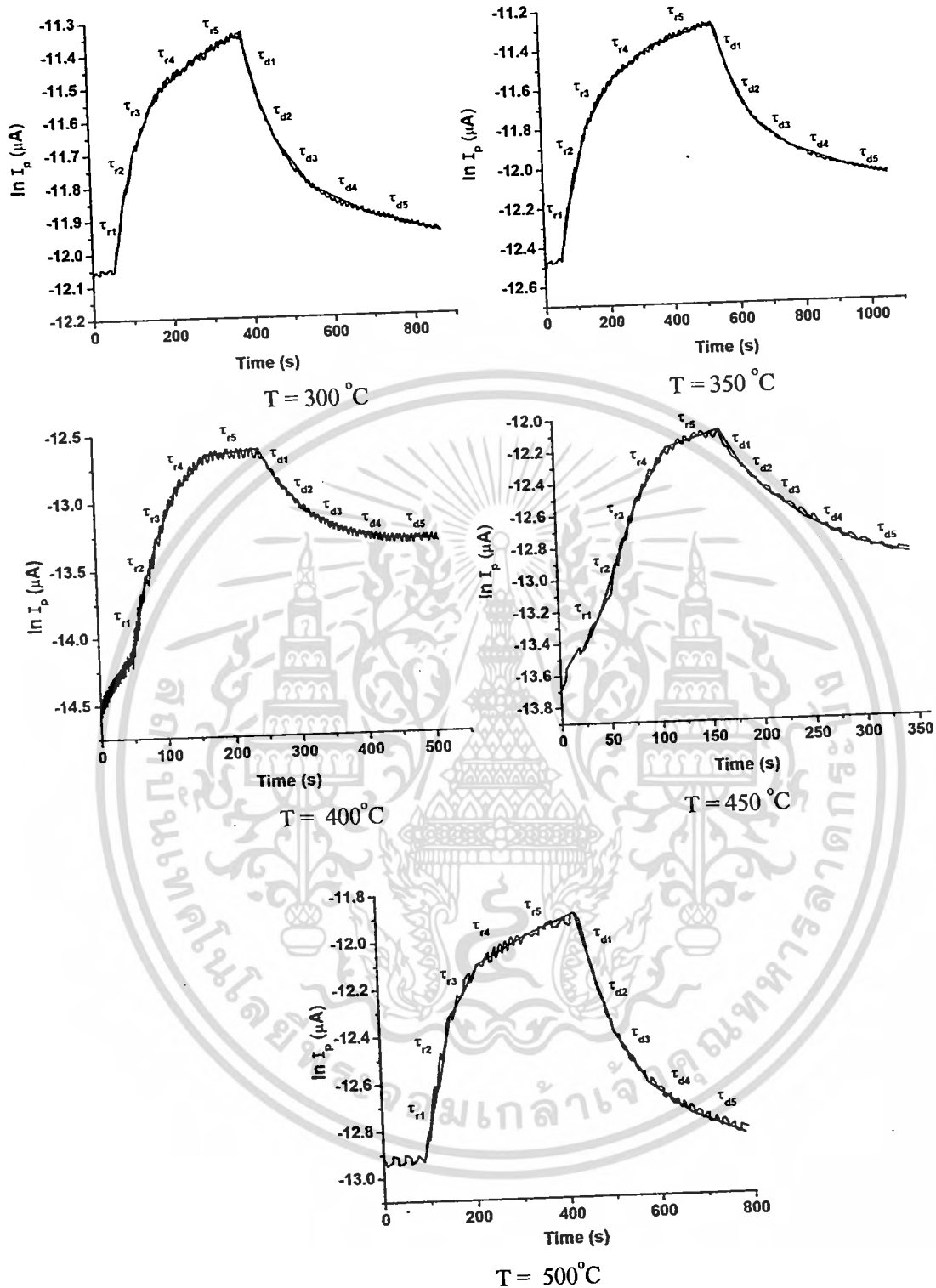
ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

4.3.3 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



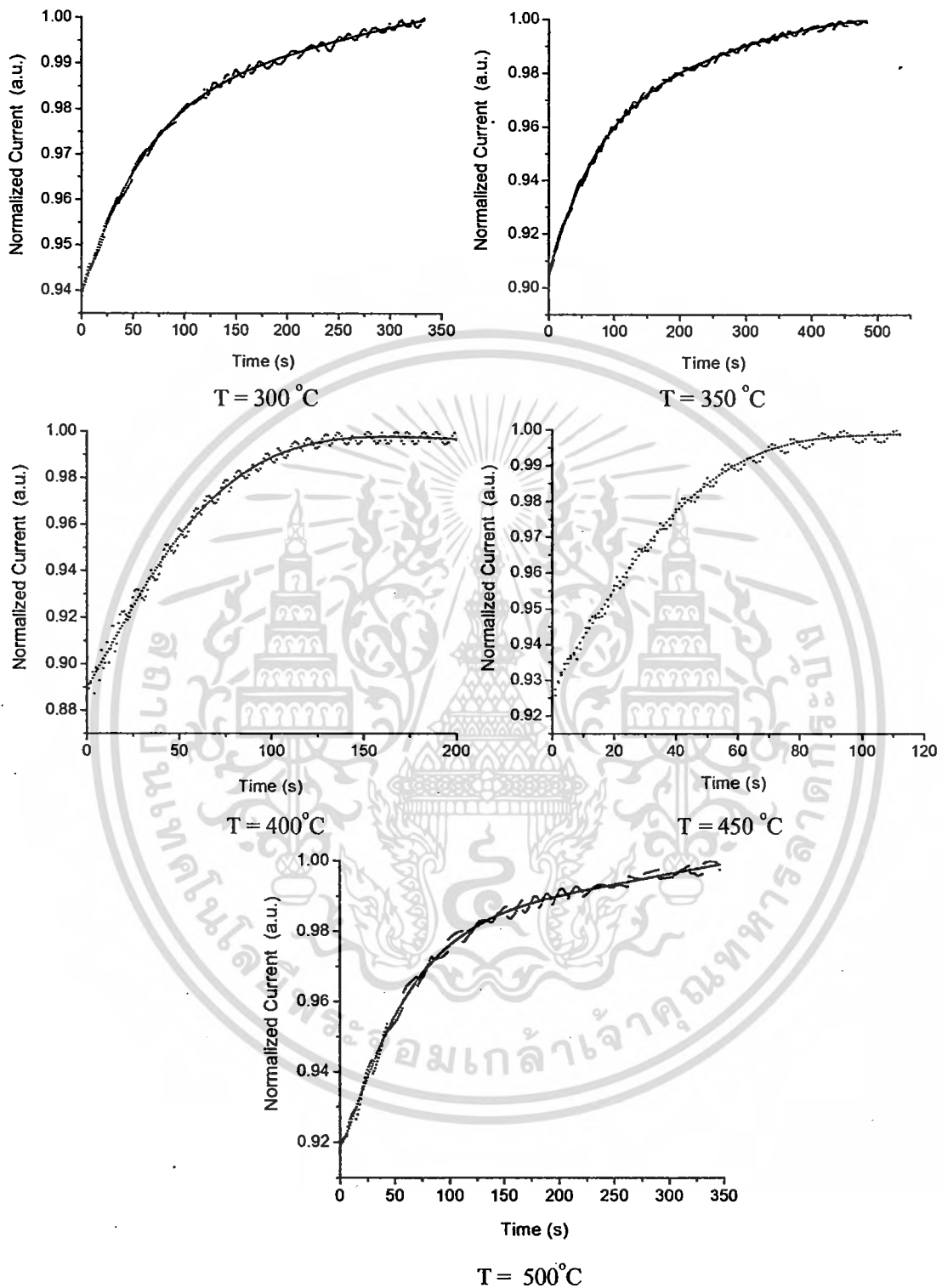
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



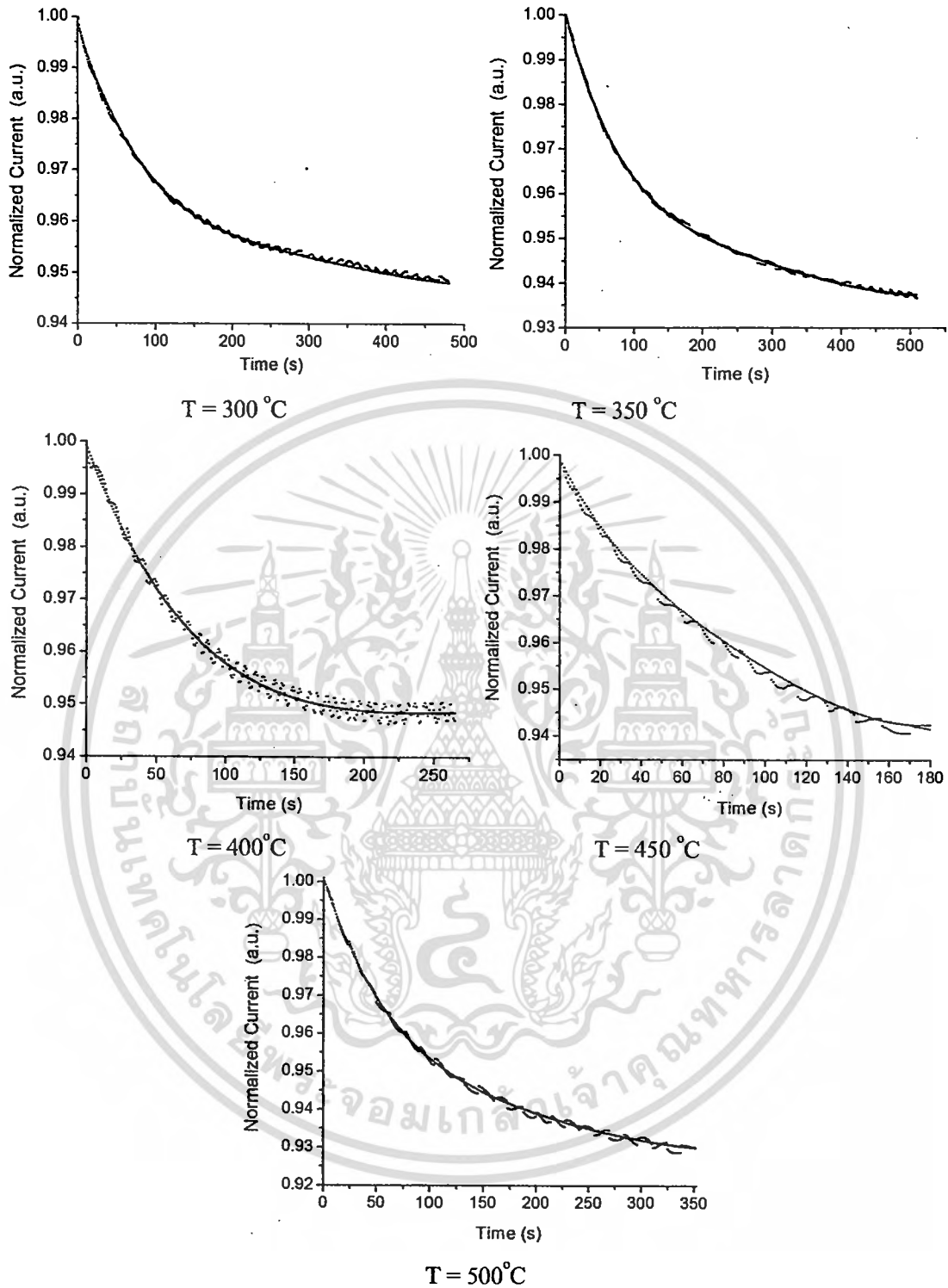
ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 การปิดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Annealing Temperature (°C)	Decay Time (s)					Rise Time (s)				
	A_1 τ_{d1}	A_2 τ_{d2}	A_3 τ_{d3}	A_4 τ_{d4}	A_5 τ_{d5} β	A_1 τ_{r1}	A_2 τ_{r2}	A_3 τ_{r3}	A_4 τ_{r4}	A_5 τ_{r5} β
300	$A_1 = 0.7936$ $\tau_{d1} = 204.92$	$A_2 = -4.085$ $\tau_{d2} = 4106.5$	$A_3 = 13.54$ $\tau_{d3} = 980.39$	$A_4 = -20.49$ $\tau_{d4} = 2478.55$	$A_5 = 11.24$ $\tau_{d5} = 3045.85$ $\beta = 0.3064$	$A_1 = 0.568$ $\tau_{r1} = 135.5$	$A_2 = -2.389$ $\tau_{r2} = 254.45$	$A_3 = 5.759$ $\tau_{r3} = 254.45$	$A_4 = -5.759$ $\tau_{r4} = 531.91$	$A_5 = -0.00347$ $\tau_{r5} = 1558.25$ $\beta = 0.1831$
350	$A_1 = 0.8785$ $\tau_{d1} = 186.57$	$A_2 = -4.223$ $\tau_{d2} = 344.83$	$A_3 = 10.88$ $\tau_{d3} = 699.3$	$A_4 = -9.716$ $\tau_{d4} = 1306.43$	$A_5 = 3.181$ $\tau_{d5} = 2580.87$ $\beta = 0.01509$	$A_1 = 0.202$ $\tau_{r1} = 104.82$	$A_2 = -0.4991$ $\tau_{r2} = 204.92$	$A_3 = -1.108$ $\tau_{r3} = 925.93$	$A_4 = -1.108$ $\tau_{r4} = 925.93$	$A_5 = -0.06744$ $\tau_{r5} = 2035.52$ $\beta = 0.802$
400	$A_1 = 0.2305$ $\tau_{d1} = 186.57$	$A_2 = -0.03207$ $\tau_{d2} = 197.63$	$A_3 = -0.5493$ $\tau_{d3} = 361.01$	$A_4 = 0.6142$ $\tau_{d4} = 877.19$	$A_5 = 0.736$ $\tau_{d5} = 65149.13$ $\beta = 0.7978$	$A_1 = -0.3079$ $\tau_{r1} = 40.32$	$A_2 = 0.7765$ $\tau_{r2} = 60.98$	$A_3 = 0.8398$ $\tau_{r3} = 574.71$	$A_4 = 0.8398$ $\tau_{r4} = 574.71$	$A_5 = -2.868$ $\tau_{r5} = 8378.16$ $\beta = 0.9177$
450	$A_1 = 9.116$ $\tau_{d1} = 126.26$	$A_2 = -71.36$ $\tau_{d2} = 193.42$	$A_3 = 96.84$ $\tau_{d3} = 249.38$	$A_4 = -39.92$ $\tau_{d4} = 442.48$	$A_5 = 6.323$ $\tau_{d5} = 1003.36$ $\beta = -0.08074$	$A_1 = -2.416$ $\tau_{r1} = 44.68$	$A_2 = 7.404$ $\tau_{r2} = 61.24$	$A_3 = 3.203$ $\tau_{r3} = 207.46$	$A_4 = 3.203$ $\tau_{r4} = 207.46$	$A_5 = 0.4326$ $\tau_{r5} = 1362.68$ $\beta = 0.6647$
500	$A_1 = 0.5608$ $\tau_{d1} = 120.77$	$A_2 = -1.987$ $\tau_{d2} = 208.33$	$A_3 = 4.071$ $\tau_{d3} = 414.94$	$A_4 = -3.775$ $\tau_{d4} = 884.96$	$A_5 = 2.131$ $\tau_{d5} = 1504.95$ $\beta = 0.1459$	$A_1 = 0.4195$ $\tau_{r1} = 94.61$	$A_2 = -0.6449$ $\tau_{r2} = 151.96$	$A_3 = -0.8167$ $\tau_{r3} = 1149.95$	$A_4 = -0.8167$ $\tau_{r4} = 1149.95$	$A_5 = -0.2512$ $\tau_{r5} = 1460.01$ $\beta = 0.6022$

ตารางที่ 4.4 ค่าช่วงชีวิตของพหุคูณที่คำนวณได้จากกราฟวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรัศมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยา

ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

หมายเหตุ $V_a = 20$ โวลต์, $\mu = 5$ (เซนติเมตร²/โวลต์-วินาที), $W = 1.2$ เซนติเมตร, $L = 0.4$ เซนติเมตร

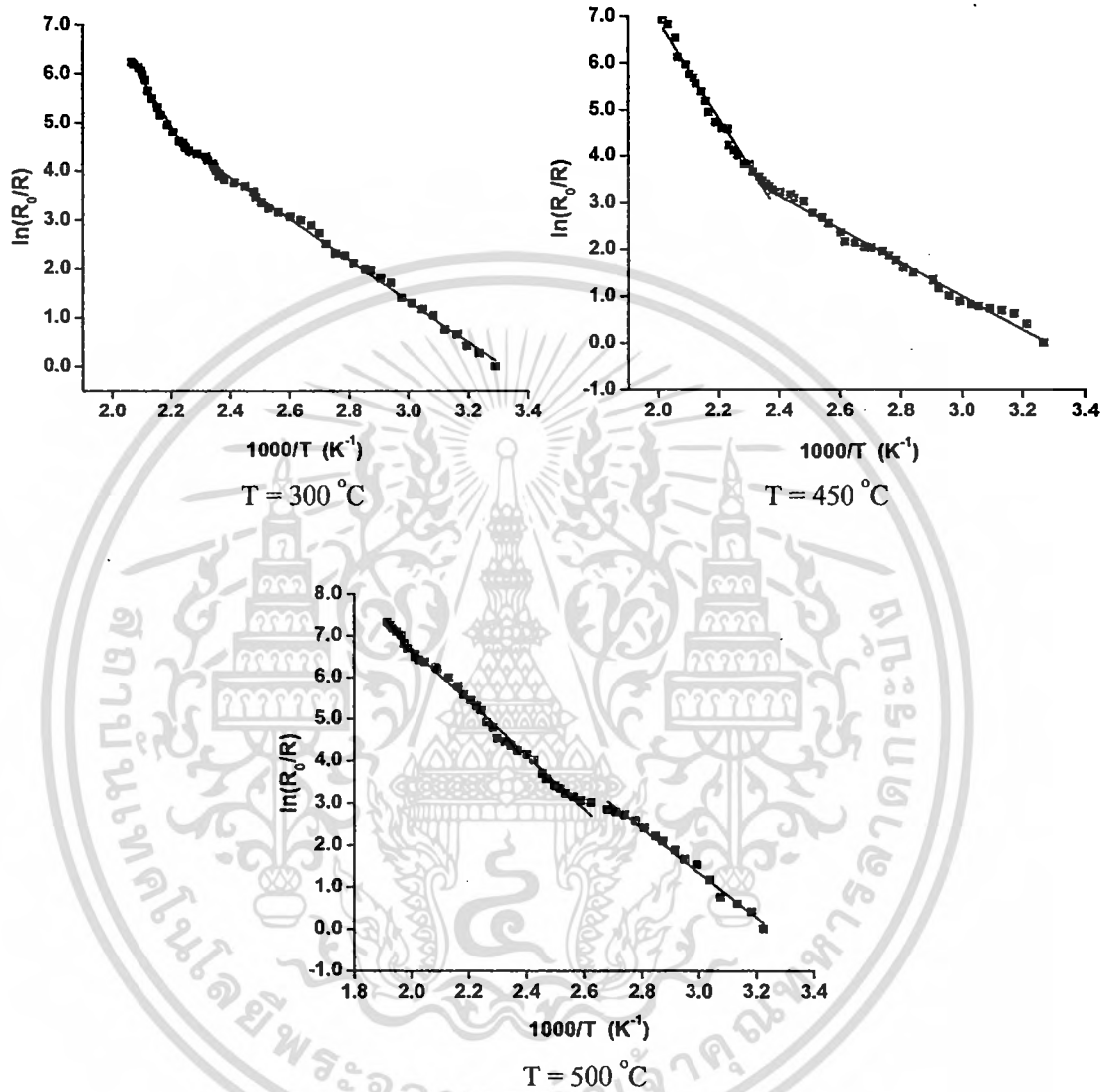
Annealing Temperature (°C)	Decay Time (s)					Rise Time (s)				
	σ_1 I_1	σ_2 I_2	σ_3 I_3	σ_4 I_4	σ_5 I_5	σ_1 I_1	σ_2 I_2	σ_3 I_3	σ_4 I_4	σ_5 I_5
300	$\sigma_1 = 2.498 \times 10^{11}$ $I_1 = 1.199 \times 10^5$	$\sigma_2 = 1.976 \times 10^{11}$ $I_2 = 9.485 \times 10^6$	$\sigma_3 = 1.637 \times 10^{11}$ $I_3 = 7.856 \times 10^6$	$\sigma_4 = 1.480 \times 10^{11}$ $I_4 = 7.105 \times 10^6$	$\sigma_5 = 1.419 \times 10^{11}$ $I_5 = 6.812 \times 10^6$	$\sigma_1 = 1.215 \times 10^{11}$ $I_1 = 5.831 \times 10^6$	$\sigma_2 = 1.549 \times 10^{11}$ $I_2 = 7.434 \times 10^6$	$\sigma_3 = 1.939 \times 10^{11}$ $I_3 = 9.306 \times 10^6$	$\sigma_4 = 2.188 \times 10^{10}$ $I_4 = 1.050 \times 10^6$	$\sigma_5 = 2.333 \times 10^{11}$ $I_5 = 1.120 \times 10^5$
350	$\sigma_1 = 2.592 \times 10^{11}$ $I_1 = 1.244 \times 10^5$	$\sigma_2 = 1.919 \times 10^{11}$ $I_2 = 9.210 \times 10^6$	$\sigma_3 = 1.630 \times 10^{11}$ $I_3 = 7.825 \times 10^6$	$\sigma_4 = 1.449 \times 10^{11}$ $I_4 = 6.953 \times 10^6$	$\sigma_5 = 1.284 \times 10^{11}$ $I_5 = 6.163 \times 10^6$	$\sigma_1 = 8.025 \times 10^{10}$ $I_1 = 3.852 \times 10^6$	$\sigma_2 = 1.257 \times 10^{11}$ $I_2 = 6.034 \times 10^6$	$\sigma_3 = 1.752 \times 10^{11}$ $I_3 = 8.410 \times 10^6$	$\sigma_4 = 2.163 \times 10^{11}$ $I_4 = 1.038 \times 10^5$	$\sigma_5 = 2.450 \times 10^{11}$ $I_5 = 1.176 \times 10^5$
400	$\sigma_1 = 6.871 \times 10^{10}$ $I_1 = 3.298 \times 10^6$	$\sigma_2 = 5.100 \times 10^{10}$ $I_2 = 2.448 \times 10^6$	$\sigma_3 = 4.385 \times 10^{10}$ $I_3 = 2.105 \times 10^6$	$\sigma_4 = 3.846 \times 10^{10}$ $I_4 = 1.846 \times 10^6$	$\sigma_5 = 3.413 \times 10^{10}$ $I_5 = 1.638 \times 10^6$	$\sigma_1 = 1.565 \times 10^{10}$ $I_1 = 7.511 \times 10^7$	$\sigma_2 = 2.758 \times 10^{10}$ $I_2 = 1.324 \times 10^6$	$\sigma_3 = 4.471 \times 10^{10}$ $I_3 = 2.146 \times 10^6$	$\sigma_4 = 6.229 \times 10^{10}$ $I_4 = 2.990 \times 10^6$	$\sigma_5 = 6.829 \times 10^{10}$ $I_5 = 3.278 \times 10^6$
450	$\sigma_1 = 1.156 \times 10^{11}$ $I_1 = 5.547 \times 10^6$	$\sigma_2 = 8.883 \times 10^{10}$ $I_2 = 4.264 \times 10^6$	$\sigma_3 = 7.390 \times 10^{10}$ $I_3 = 3.547 \times 10^6$	$\sigma_4 = 6.475 \times 10^{10}$ $I_4 = 3.108 \times 10^6$	$\sigma_5 = 5.692 \times 10^{10}$ $I_5 = 2.732 \times 10^6$	$\sigma_1 = 4.271 \times 10^{10}$ $I_1 = 2.050 \times 10^6$	$\sigma_2 = 6.060 \times 10^{10}$ $I_2 = 2.909 \times 10^6$	$\sigma_3 = 8.340 \times 10^{10}$ $I_3 = 4.003 \times 10^6$	$\sigma_4 = 9.696 \times 10^{10}$ $I_4 = 4.654 \times 10^6$	$\sigma_5 = 1.132 \times 10^{11}$ $I_5 = 5.434 \times 10^6$
500	$\sigma_1 = 1.380 \times 10^{11}$ $I_1 = 6.624 \times 10^6$	$\sigma_2 = 1.025 \times 10^{11}$ $I_2 = 4.919 \times 10^6$	$\sigma_3 = 7.902 \times 10^{10}$ $I_3 = 3.793 \times 10^6$	$\sigma_4 = 6.698 \times 10^{10}$ $I_4 = 3.215 \times 10^6$	$\sigma_5 = 5.885 \times 10^{10}$ $I_5 = 2.825 \times 10^6$	$\sigma_1 = 5.058 \times 10^{10}$ $I_1 = 2.428 \times 10^6$	$\sigma_2 = 7.790 \times 10^{10}$ $I_2 = 3.739 \times 10^6$	$\sigma_3 = 1.017 \times 10^{11}$ $I_3 = 4.883 \times 10^6$	$\sigma_4 = 1.198 \times 10^{11}$ $I_4 = 5.748 \times 10^6$	$\sigma_5 = 1.309 \times 10^{11}$ $I_5 = 6.284 \times 10^6$

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยา

ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

หมายเหตุ $V_a = 20$ โวลต์, $\mu = 5$ (เซนติเมตร²/โวลต์-วินาที), $W = 1.2$ เซนติเมตร, $L = 0.4$ เซนติเมตร

4.3.4 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(R_0/R)$ กับอุณหภูมิ (T) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

Annealing Temperature (°C)	Activate Energy (eV)	
	E _{a1}	E _{a2}
300	0.865	0.362
450	0.882	0.308
500	0.554	0.457

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ฟิล์มบางที่ได้มีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงเข้ม

จากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิก ปรากฏระนาบ (-111) และ (111) ที่อุณหภูมิแอนนัล 500 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 450 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าฟิล์มบางเป็นอะมอร์ฟัส

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์พบว่า มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบาง เกรนที่ได้มีขนาดเล็ก มีรูพรุนบ้าง แต่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางที่ได้มีเกรนขนาดใหญ่กว่าฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ พบว่าขอบการดูดกลืนแสงจะเลื่อนจาก 438 นาโนเมตร ไปเป็น 444 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงอยู่ในช่วงประมาณ 75-85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร

จากการวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ พบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.90×10^9 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิแอนนัล 350 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 6.00×10^7 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิแอนนัล 500 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์มีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนัล 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ทั้งความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนไปตามเวลา พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคืนขึ้น กระแสโฟโตพาจันและกระแสโฟโตบาลงสามารถพิกกราฟได้ด้วยสมการมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตค่อนข้างยาว จำนวนหลายค่า เช่น กรณีฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีค่าช่วงชีวิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณียุติทุกสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 204.92, 406.5, 980.39, 2478.55 และ 3045.85 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องหลัก ประพตัตว์เป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{10} - 10^{11} ต่อตาราง เซนติเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นค่าช่วงชีวิตมีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีสสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ค่าช่วงชีวิตจะกลับเพิ่มสูงขึ้นอีก

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 35 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศาเซลเซียส สามารถที่จะคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ ฟิล์มบางของทุกอุณหภูมิแอนนีส แสดงค่าพลังงานกระตุ้นจำนวน 2 ค่า พลังงานกระตุ้นนี้จะเกี่ยวข้องกับ ระดับพลังงานของกับดักพาหะที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์

5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เรียนรู้วิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จาก ปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์ม โลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
2. ได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาด ของช่องว่างแถบพลังงาน
3. ได้เรียนรู้การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์
4. ได้เรียนรู้วิธีการวัดคุณสมบัติไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์และ สามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกจะรังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอย เพราะจะทำให้ ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอ
2. เวลาทำความสะอาดเครื่องสเปกโตรริง ควรเช็ดด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. เวลานำไปเข้าตู้อบเพื่อทำการอบขึ้นสารเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงเพื่อทำให้เกิดออกไซด์ เมื่อทำการอบเสร็จแล้วควรทิ้งไว้ให้อุณหภูมิของเครื่องลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศา เซลเซียส แล้วจึงนำชิ้นสารออกมา เพราะถ้าเก็บชิ้นสารที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ฟิล์มบางเกิด การหลุดร่อน
4. การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ เราควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบาง หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ติดต่อแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1 ชื่อบทความวิจัย “Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Prepared by Oxidation of Thermally Evaporated Cu Thin Films” ตีพิมพ์ใน Proceeding in International Symposium on Fundamental and Applied Science (ISFAS 2015), 22-24 March 2015, Osaka, Japan. โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

ABSTRACT

In this paper, 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 Cu₂O 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 $8.53 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$, $7.60 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and $6.22 \text{ cm}^2/\text{V-s}$, respectively. Impedance spectroscopy of Ag/CuO/ITO structure was performed at different temperatures in the range 25-90°C. Impedance spectra are well modeled in term of electrical equivalent circuit with a grain resistance (R_g) and constant phase element impedance (Z_{CPE}). The conductance data of the Ag/CuO/ITO structure, corresponding to the universal Jonscher's power law, are well explained by hopping process occurs between neighboring sites with activation energy equals to 0.114 eV.

Keywords: CuO Films, XRD, SEM, Optical Properties, Impedance Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ โดยผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ในนโยบายด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 [1,2]. Copper oxides are reported to be composed of two oxide phases, namely, cupric oxide (CuO) and cuprous oxide (Cu₂O) 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 [3]. A meta-stable copper oxide, Cu₄O₃, which is an intermediate compound between the previous two, has also reported [1]. 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 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 low cost thin film solar cells. Moreover, impedance spectroscopy of Ag/CuO/ITO structure, which CuO obtained from Cu films oxidized at 500°C, were also investigated at various temperatures in the range 25-90°C with the aim of understanding the conduction mechanism.

Experimental Details

Copper thin films were grown on glass substrates by thermal evaporation in vacuum better than 5×10^{-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 220-1,000 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. Impedance spectroscopy was carried out by

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาต์เหินาไปเซประเษนดานการการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Agilent E4980A Precision LCR Meter with frequency range 10 kHz- 2 MHz and temperature range 25-90°C.

Results and Discussion

The XRD patterns of the as-grown and thermally oxidized Cu films at different temperatures ranging 100-500°C were shown in Fig. 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 Cu₂O in agreement with the literature reported [2]. 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). Fig. 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.

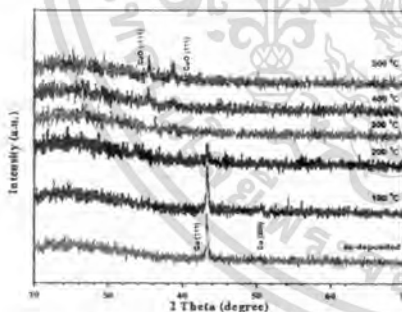


Fig. 1 XRD patterns of the films.



Fig. 2 SEM micrograph of the films oxidized at 500°C.

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, carrier concentration and mobility against oxidation temperature are shown in Fig. 3. Resistivity value of the as-deposited and the Cu films oxidized at 100°C is very low ($\sim 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$). 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 $10^3 \Omega\cdot\text{cm}$. The carrier concentration initially decreases

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 cm²/V·s when the oxidation temperature increases from 100 to 500°C.

Fig. 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 (hν) to estimate the energy gap (E_g). Fig. 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 Fig. 6. The E_g value initially increases up to the maximum value 2.23 eV at oxidation temperature 300°C and then decrease to the minimum value 2.10 eV at oxidation temperature 500°C.

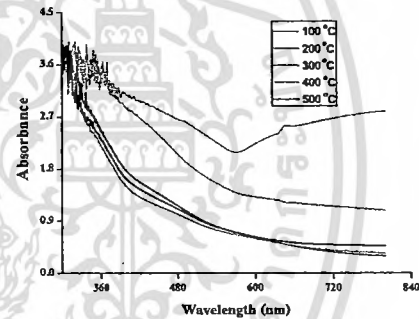
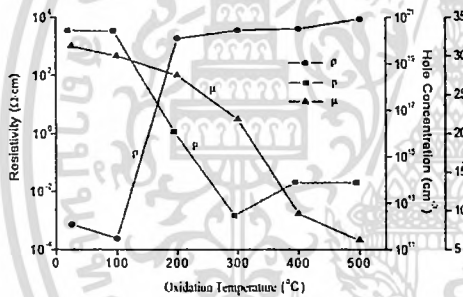


Fig. 3 Variation of ρ , p and μ of the films.

Fig. 4 Absorption spectra of the films.

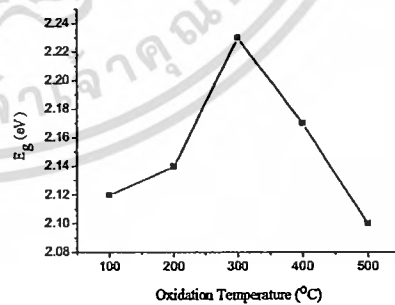
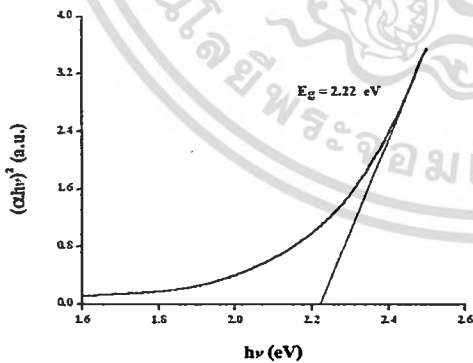


Fig. 5 Plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ of the films oxidized at 300°C.

Fig. 6 Variation of E_g with oxidation temperature.

Frequency dependence of the conductance for Ag/CuO/ITO structure at different temperature are shown in Fig. 7. Each curve in the figure displays a low frequency region, plateau region, which corresponds to the dc conductance of the sample and dispersive region at high frequency which corresponds to the ac conductance. The conductance shows dispersion that shifts to higher frequency

with an increase in temperature. This behavior suggests that the electrical conduction in the material takes place via hopping mechanism governed by Jonscher's universal power law and expressed by following equation:

$$G_{\text{tot}} = G_{\text{dc}} + A\omega^n \quad (1)$$

where 'n' is the frequency exponent in the range $0 < n < 1$. Both G_{tot} and 'A' are thermally activated quantities.

Fig. 8 shows the variation of Z' as a function of frequency at 25-90°C for Ag/CuO/ITO structure. It is observed that the magnitude of Z' decreases on increasing temperature (i.e., negative temperature coefficient of resistance behavior). The plateau region observed in the graph indicates the presence of relaxation process in the material. Fig. 9 shows the variation of Z'' as a function of frequency (usually called as loss spectrum) at higher temperature (25-90°C). This plot is suitable for evaluation of the relaxation frequency of the most resistive component. The loss spectrum has some important features: (a) the appearance of the peak, (b) typical peak broadening, and (c) the value of Z''_{max} decreases and shifts to higher frequency side on increasing temperature. It is seen that the peak maxima shifts towards the high frequency side on the increasing temperature and the relaxation process occurs over several decades of frequency. The broadening of the peak (due to increase in temperature) suggests the presence of temperature dependence of relaxation processes in the material. The relaxation process in the material may possibly be immobile electrons at low temperature and defects at higher temperature.

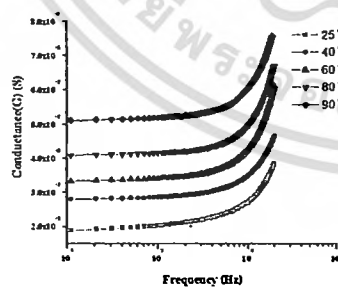


Fig. 7 Variation of ac conductance with frequency.

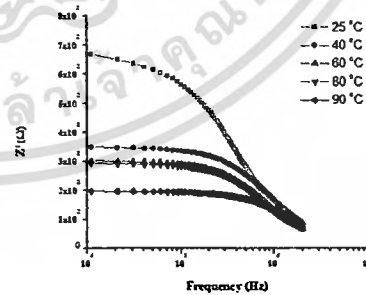


Fig. 8 Variation of real part of impedance with frequency.

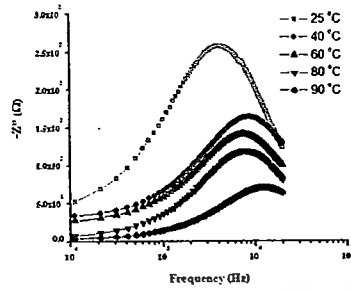


Fig. 9 Variation of imaginary part of impedance with frequency.

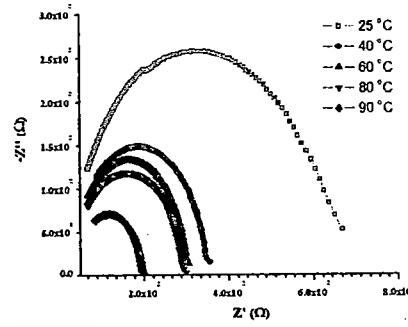


Fig. 10 Cole-Cole plot in the temperature range 25-90°C.

The Cole-Cole plots of the real and imaginary parts of complex impedance (Z' and Z'') are shown in Fig. 10 over the studied frequency range 10 kHz to 2 MHz for the temperature range 25-90°C. The curves have non-zero intersection with real axis in the high frequency region and also, there is a decrease in the size of the plots with rise of temperature. The observed behavior can be explained in accordance with an equivalent circuit model shown in Fig. 11. This model consists of a parallel resistance R_p and constant phase element (CPE) in series with another resistance R_s . The CPE impedance is described by:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{P(j\omega)^n} \quad (2)$$

where ω is angular frequency, P and 'n' are the constant parameters and $0 < n < 1$. The C_p value can be calculated by using the following relation:

$$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p} \quad (3)$$

$$\text{and} \quad \tau = R_p C_p \quad (4)$$

The analysis of the results of the impedance measurements consisted in the determination of the parameters of the equivalent circuit elements on the basis of the simulation curves fitting to the experimental results. The fitting was performed using the non-linear least squares method. The components were calculated with LEVMW software [4].

A single semicircular arc is an indicative of single R_p -CPE element, here the small resistance of value R_s is attributed to the core of CuO grains while R_p and C_p are attributed to the grain boundary effect. The measured capacitance of such circuit is given by [5]

$$C = C_p + \frac{1}{\omega^2 C_p R_p^2} \quad (5)$$

Fig. 12 shows the variation of the capacitance (C) with frequency at different temperatures. The capacitance is found to decrease with increasing frequency for all temperatures. Similar behavior is

also observed for the variation of dielectric loss ($\tan\delta$) with frequency (Fig. 13). This type of behavior suggests a distribution of relaxation times in CuO films. The simple or complex defects that may be present in the films such as microcracks, microvoids, imperfections, defect centers, etc., at sufficiently high concentration give rise to defect states [5].

The real and imaginary components of this simple equivalent circuit are as follows;

$$Z' = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \tag{6}$$

$$Z'' = \frac{-\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \tag{7}$$

These equations predict that the values of Z' and Z'' should decrease with increase in temperature which causes shrinking of Cole-Cole plots, as has been observed in Fig.10.

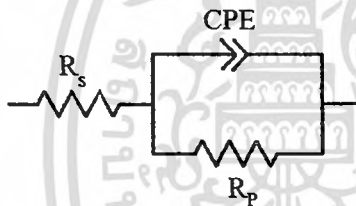


Fig. 11 Equivalent circuit scheme for Ag/CuO/ITO structure.

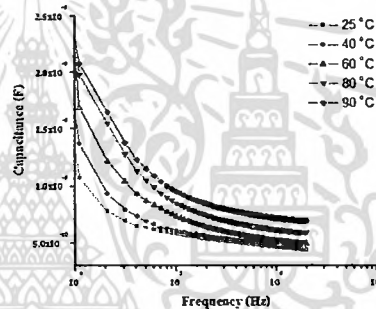


Fig. 12 Variation of capacitance with frequency.

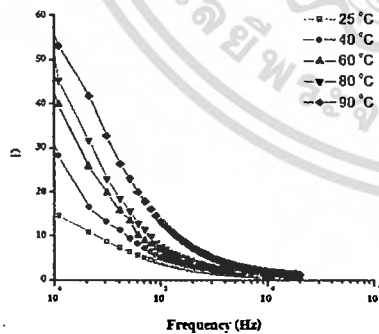


Fig. 13 Variation of dielectric loss with frequency.

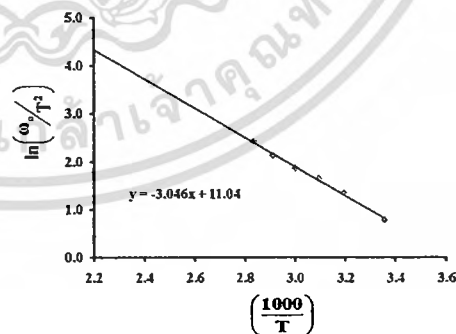


Fig. 14 Arrhenius plot of $\ln(\omega_0/T^2)$ versus $1/T$.

The relaxation frequency is related to the thermal emission depth E_a of the defect and can be expressed by following equation:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = N_{c,v} v_{th} \sigma_{n,p} \exp(-E_a/kT) = 2\xi_0 T^2 \exp(-E_a/kT) \tag{8}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $N_{c,v}$ is the effective density of states in the conduction or valence band, v_{th} is the thermal velocity and $\sigma_{n,p}$ is the electron/hole capture cross section. On the right hand side of Eq. (8), a thermal emission prefactor ξ_0 is introduced, which comprises all temperature independent terms of the thermal velocity v_{th} and the effective density of states $N_{c,v}$. The bulk trap level of Eq. (8) can be obtained from the slope of Arrhenius plot of $\ln(\omega_0/T^2)$ versus $1/T$ as the activation energy E_a (Fig. 14). The calculated values of E_a , ξ_0 and σ_p are 0.114 eV, $2.36 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$ and $1.94 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2}$, respectively.

Conclusions

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 ac impedances of Ag/CuO/ITO structure were studied at different temperatures ranging 25-90°C. Impedance spectra are well modeled in term of electrical equivalent circuit consisting of a parallel resistance R_p and constant phase (CPE) in series with another resistance R_s . The conductance data of the Ag/CuO/ITO structure are well explained by hopping process occurs between neighboring sites with activation energy equals to 0.114 eV.

REFERENCES

- [1] Ooi, P.K., Abdullah, S.S., Ng, M.J., Abu Hassan, H. and Hassan, Z. 2013. Effect of Oxygen Percentage on the Growth of Copper Oxide Thin Films by Reactive Radio Frequency Sputtering, *Mater. Chem. Phys.*, 140, 243-248.
- [2] Isah, K.U., Muhammad Bakeko, M., Ahmadu, U., Uno, U.E., Kimpa, M.I. and Yabagi, J.A. 2013. Effect of Oxidation Temperature on the Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared from Thermally Oxidized Evaporated Copper Thin Films, *IOSR Journal of Applied Physics*, 3(2), 61-66.
- [3] Cho, S. 2013. Optical and Electrical Properties of CuO Thin Films Deposited at Several Growth Temperatures by Reactive RF Magnetron Sputtering, *Met. Mater. Int*, 19(6), 1327-1331.
- [4] Barsoukov, E. and Macdonald, J.R. 2005. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment and Application*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[5] Tewari, S., Bhattacharjee, A. and Sahay, P.P. 2009. Structural, Dielectric and Electrical Studies on Thermally Evaporated CdTe Thin Films, *J. Mater. Sci.*, 44, 534-540.

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 $8.53 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, $7.60 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and $6.22 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 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 3.87Ω , 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงวนเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ โดยไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 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 5×10^{-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 Bruker D 8 diffractometer using $\text{CuK}\alpha$ 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Impedance spectroscopy was carried out by Agilent E4980A Precision LCR Meter with frequency range 10 kHz- 2 MHz and temperature range 25-60°C.

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.

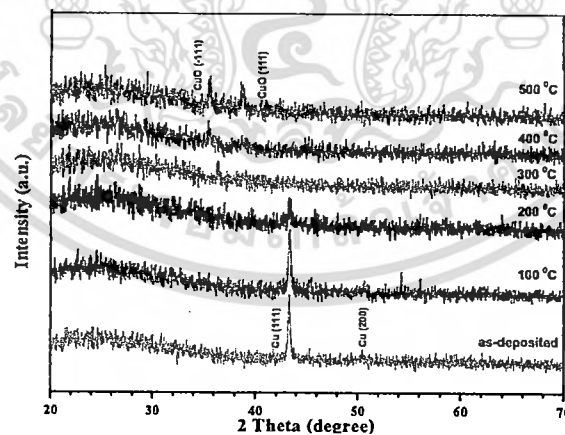


Figure 1. XRD patterns of Cu-O films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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 ($\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$). 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 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$. 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 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 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 estimate 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 maximum value 2.23 eV at oxidation temperature 300°C and then decrease to the minimum value 2.10 eV at oxidation temperature 500°C.

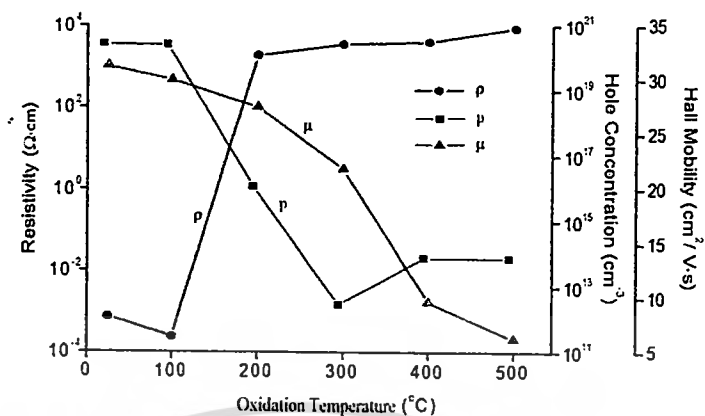


Figure 3. Variation of ρ , p and μ of Cu-O films.

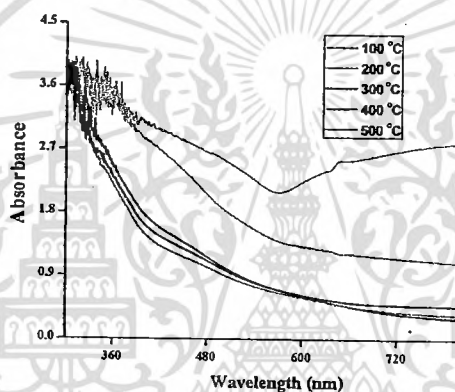


Figure 4. Absorption spectra of Cu-O films.

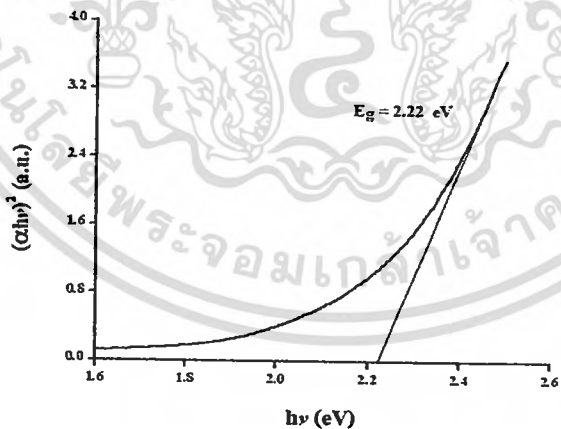


Figure 5. Plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ of Cu-O films oxidized at 300°C .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

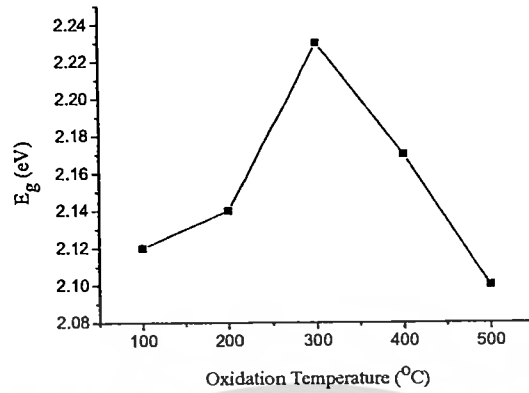


Figure 6. Variation of E_g with oxidation temperature.

Device characteristics

In the literature reviews, CdS compound has a higher resistivity than CuO and carrier concentration of CdS ($<10^{14} \text{ cm}^{-3}$) is lower than CuO ($>10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 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 at a forward bias V , based on the thermionic emission (TE) mechanism, is given by the relation (Rhoderick and Willam, 1988)

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

and

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

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, $A^* = 4\pi q m_e k^2 / h^3$ is the effective Richardson constant of $20 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(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, $\ln I$ - $\ln V$ plot is presented in Figure 9. It is evident from $\ln I$ - $\ln V$ plot that forward bias characteristics show three regions. The first region ($V < 0.1V$) I-V characteristics comply with the linear ohmic behavior ($I \sim V$), 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 ($I \sim \exp \alpha V$). 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).

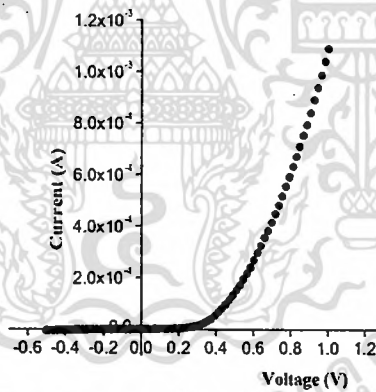


Figure 7. I-V plot of CdS/CuO diode.

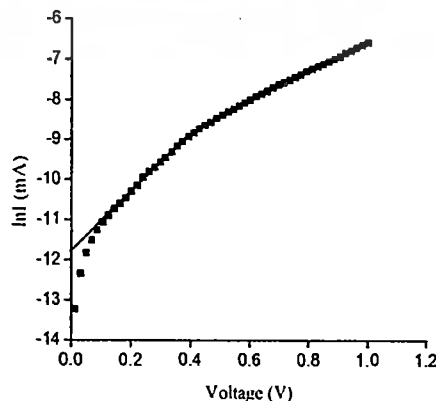


Figure 8. $\ln I$ - V plot of CdS/CuO diode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA'T^2} \right) \quad (5)$$

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

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

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 $dV/d(\ln I)$ - 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 $\ln I$ - 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 be 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 $dV/d(\ln I)$ - I and $H(I)$ - I plots are in good agreement with each other. This case shows the consistency of Cheung's approach.

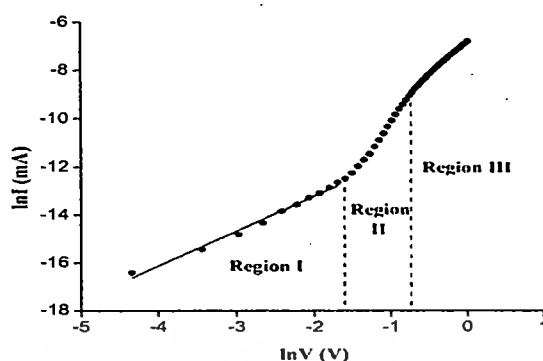
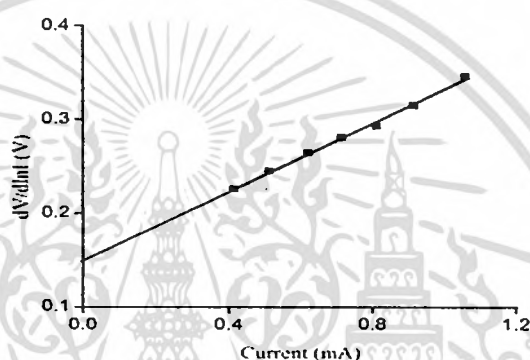
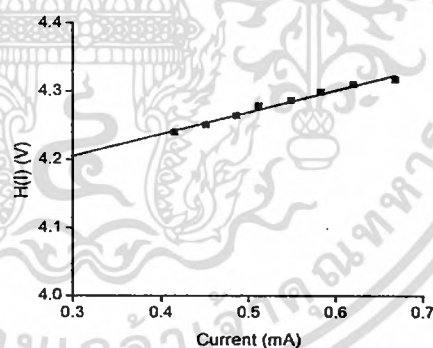
Figure 9. $\ln I$ - $\ln V$ plot of CdS/CuO diode.Figure 10. $dV/d(\ln I)$ - I plot of CdS/CuO diode.Figure 11. $H(I)$ - I plot of CdS/CuO diode.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคำนวณว่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 consistency with the results observed in d.c. transport studies corresponding to SCLC conduction controlled by single energy trap level.

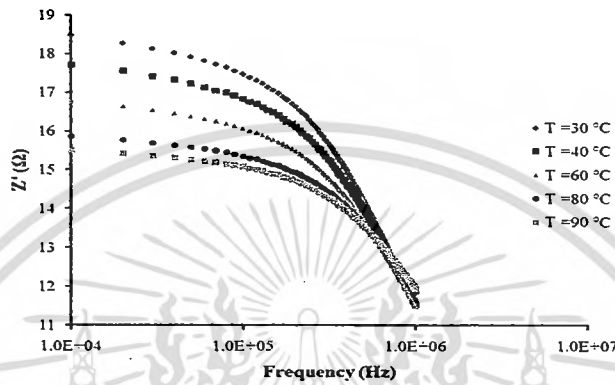


Figure 12. Z' -f plot of CdS/CuO diode.

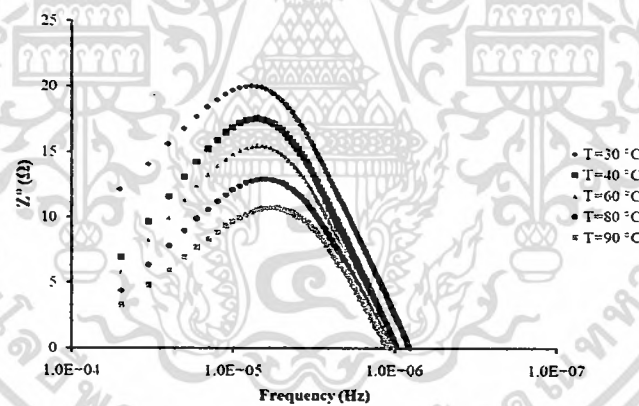


Figure 13. Z'' -f plot of CdS/CuO diode.

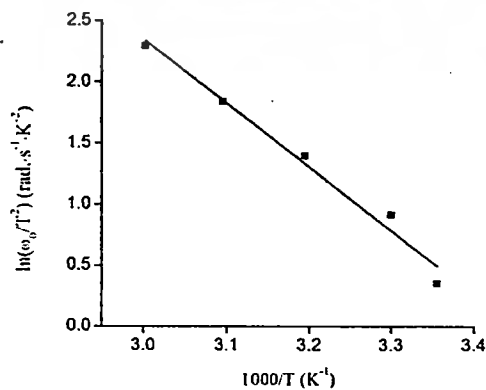


Figure 14. Arrhenius plot of $\ln(\omega_0/T^2)$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 Cu₂O 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 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 TiO₂ films with deposition temperature and electrical properties of nanostructure n-TiO₂/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*

- 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 Cu₂O and CuO obtained by thermal oxidation of Cu thin films on SiO₂/Si substrates. *Thin Solid Films* 520: 6368-6371. DOI 10.1016/j.tsf.2012.06.043.
- 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.

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 et al., 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, 167-186 .
- Cullity, B.D., 1956. *Elements of X-Ray Diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Gaewdang, T. and Wongcharoen, Ng. 2015. Heterojunction Properties of p- $\text{CuO}/\text{n-CdS}$ Diode. *Advanced Materials Research*, 1098, 1-5.
- Gaewdang, T., Wongcharoen, Ng. Ariyarat, A., Nopparuchikun, A., Wongcharoen, T. and Poo-Rakkiat, C. 2011. Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics of $\text{CdZnS}/\text{CuAlO}_2$ 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- $\text{CuO}/\text{n-Si}$ Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron Sputtering. *J. Appl. Phys.* 111, 084507-1- 84507-4.
- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 97, 143510-1- 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction. *App. Phys. Lett.* 90, 243106-1- 243106-3.
- Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 87, 243512-1- 243512-3.
- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Lays. *Appl. Phys. Lett.* 102, 072103-1- 072103-3.
- 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*, vol. 350, 2012, p. 012027.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 99, 113301-1-113301-3.
- Jayathilaka, C., Kapaklis, V. Siripala, W., Jayanetti, S. 2015. Improved Efficiency of Electrodeposited p- $\text{CuO}/\text{n-Cu}_2\text{O}$ Heterojunction Solar Ccell. *Applied Physics Express.* 8(6), 065503.

- Jeong, S., 2010. Thin zinc oxide and cuprous oxide films for photovoltaic applications. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, USA.
- Jeong, S.S., Mittiga, A., Salza, E., Masci, A. and Passerini, S. 2008. Electrodeposited ZnO/Cu₂O Heterojunction Solar Cells. *Electrochimica Acta*. 53(5), 2226-2231.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of Cu₂ZnSnS₄ Film Prepared by Sulfurization Method. *J. Elec. Matter*. 41(8), 2204-2209.
- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN. *Appl. Phys. Lett.* 68(13), 1808-1810.
- Kittel, C., 1971. *Introduction to Solid State Physics*, 4th ed., New York: John, Wiley & Son.
- Kittel, C., 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. United States of America : John Wiley & Sons Inc.
- Korzhavyi, P.A. and Johansson, B., 2011. Literature Review on the Properties of Cuprous oxide Cu₂O and the Process of Copper Oxidation. Technical Report Submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si. *Appl. Phys. Lett.* 100, 153509-1- 153509-4.
- Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes. 102., 193511- 1193511-3.
- Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis. *J. Appl. Phys.* 113, 153709-1- 153709-8.
- Minami, T., Nishi, Y., Miyata, T. and Nomoto, J., 2011. High Efficiency Oxide Solar Cells With ZnO/Cu₂O 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.
- Muhibbullah, M., 2012. Deposition of Copper Oxide Thin Films by Chemical Techniques. Thesis for Doctor of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Japan.
- 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*. Volume

- Rakhshani, A.E., 1986. Preparation, Characteristics and Photovoltaic Properties of Cuprous Oxide: A Review. *Solid State Elec.* 29(1):7-17.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules. *Chin. Phys. B*, 21(3), 038104-1- 038140-7.
- Runyan, W.R., 1975. *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombay, New York.
- Schroder D.K. 1975. *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley & Sons. Inc New York.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution. *J. Appl. Phys.* 83(4), 2104-2111.
- Sze, S.M., 1981. *Physic of Semiconductor Devices*, 2nd ed., pp.8-11, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Wijesundera, R.P. 2010. Fabrication of the CuO/Cu₂O 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.
- งานนิศย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งานนิศย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัชสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งานนิศย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัชสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งานนิศย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ . 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

ฐิตินกร จรรยาธรรม. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

ฐิตินัย แก้วแดง. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2531.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. ประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปรงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

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

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

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ

เอกสารนี้เป็นวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูสิต เครื่องงาม, 2535. โพลีคริสเตลฟอสฟอรัส. กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยูเคชั่น

วีรชัย ธิภา, 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศุกฤษฏี เกิดแสง, 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

CdTe. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา, 2545. การออกแบบ

และการสร้างอันบาลานซ์ แมกนีตรอนคาโทด สำหรับระบบสปัตเตอร์ริง. รายงานวิจัยเสนอต่อ กองทุนต้นตราบารณณ์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

สมเกียรติ สุภเดช, 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟอสฟอรัส, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CuO

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.80-1268

Pattern : 80-1268

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Cu O	2th	l	h	k	l
	32.548	7	1	1	0
	35.466	37	0	0	2
Copper Oxide	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
Lattice : Monoclinic	Mol. weight = 79.55	53.534	10	0	2
		56.773	1	0	2
S.G. : C2/c (15)	Volume [CD] = 81.03	58.376	14	2	0
		61.567	19	-1	1
a = 4.68330	Dx = 6.520	65.870	14	0	2
		66.292	14	-3	1
b = 3.42080	Beta = 99.57	67.987	9	1	1
		68.175	16	2	2
c = 5.12940		68.951	<1	-2	2
		71.725	<1	-3	1
a/b = 1.36907	Z = 4	72.498	6	3	1
	U/cor = 4.00	73.045	<1	2	2
c/b = 1.49947		75.059	5	0	0
		75.298	8	-2	2
		79.812	<1	0	2
		80.191	2	-2	0
ICSD COLLECTION CODE : 069094		82.397	4	-3	1
TEMPERATURE FACTOR : ATF		83.184	4	2	2
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 11.		83.701	4	3	1
REMARKS FROM ICSD : REM RVP.		83.701	4	4	0
		86.602	1	-4	0
		86.811	1	-2	2
		88.096	<1	1	1
		89.877	5	-1	3

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 : CuK α 1

Filter : Not specified

Lambda : 1.54060

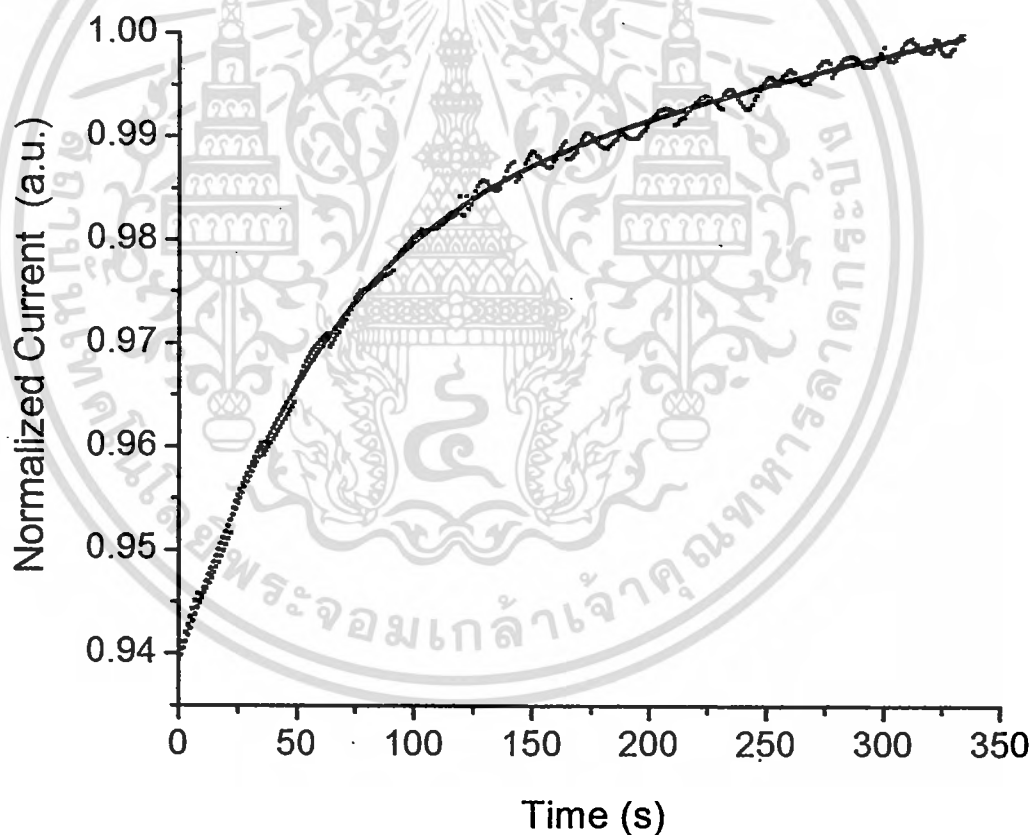
d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ Filter : Not specified การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบสิ่งนี้ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300°C rise time

$$Y = a \cdot (1 - \exp(-x/135.5)) + b \cdot (1 - \exp(-x/254.4)) + c \cdot (1 - \exp(-x/531.9)) + d \cdot (1 - \exp(-x/1062.1)) + e \cdot (1 - \exp(-x/1558))^g + 0.94$$

a	0.568	τ_1 (s)	135.5
b	-2.389	τ_2 (s)	254.4
c	5.759	τ_3 (s)	531.9
d	-5.177	τ_4 (s)	1062.1
e	-0.00347	τ_5 (s)	1558
g	0.1831		



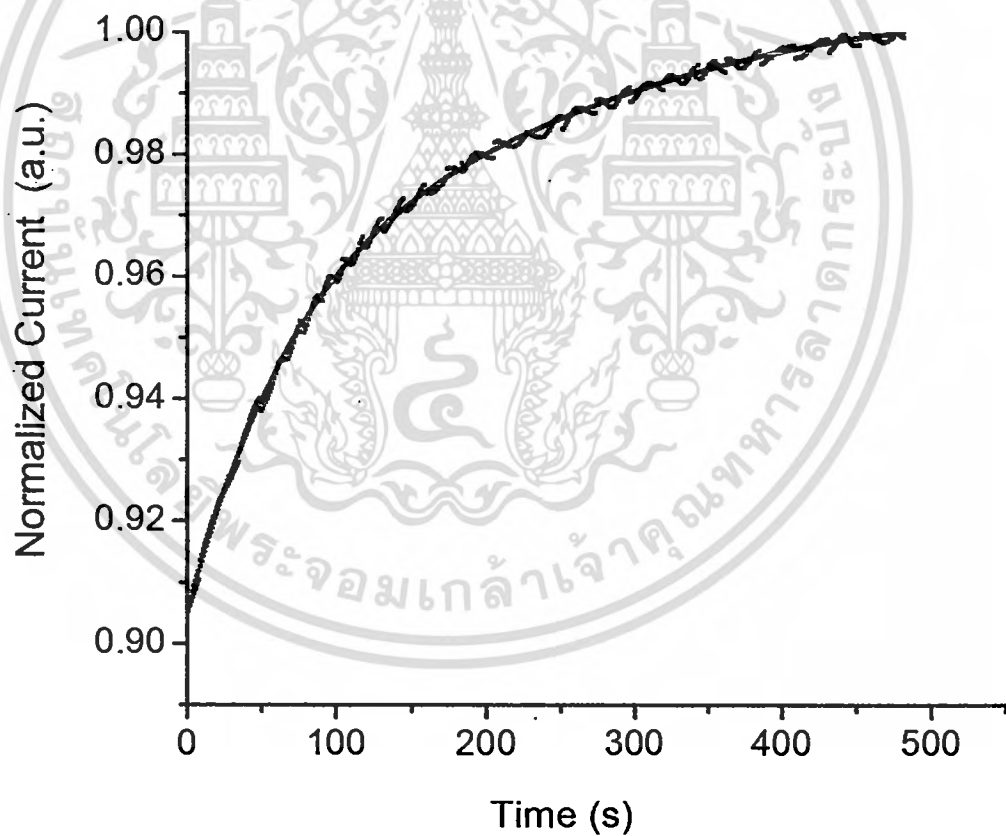
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

350 °C rise time

$$Y = a \cdot (1 - \exp(-x/104.8)) + b \cdot (1 - \exp(-x/204.9)) + c \cdot (1 - \exp(-x/476.2)) + d \cdot (1 - \exp(-x/925.9)) + e \cdot (1 - \exp(-x/2035.5))^g + 0.905$$

a	0.202	τ_1 (s)	104.8
b	-0.4991	τ_2 (s)	204.9
c	1.281	τ_3 (s)	476.2
d	-1.108	τ_4 (s)	925.9
e	-0.06744	τ_5 (s)	2035.5
g	0.802		



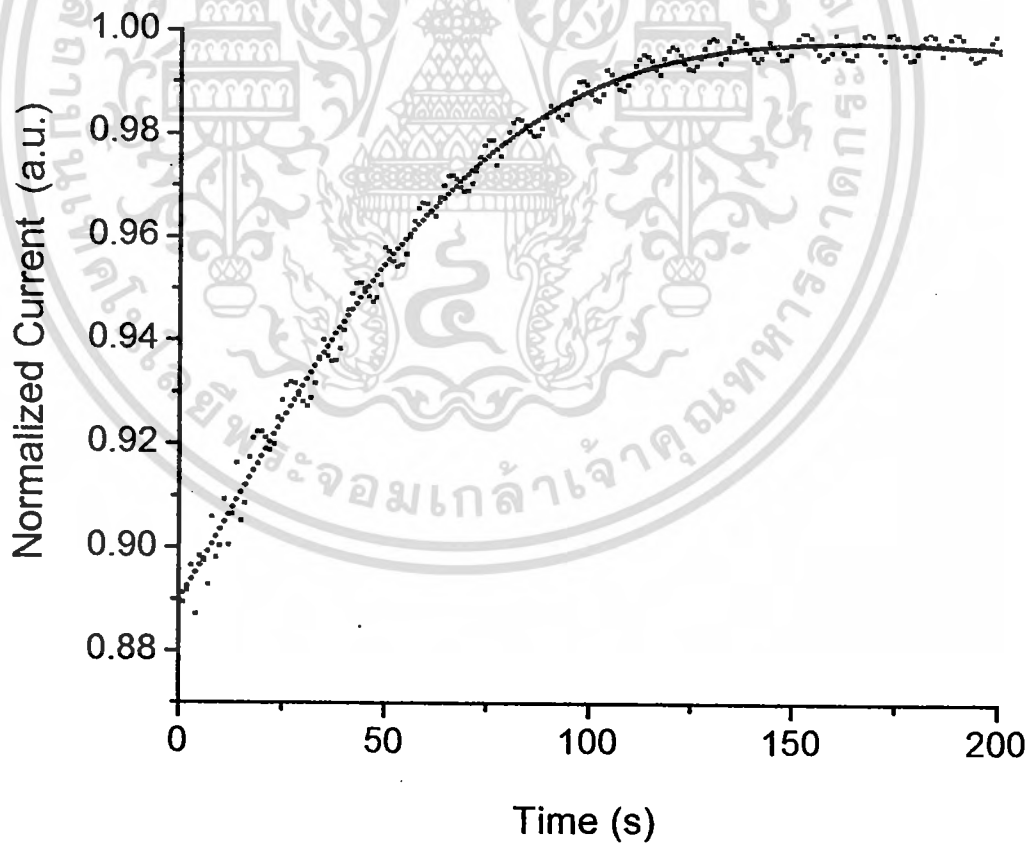
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C rise time

$$Y = a * (1 - \exp(-x/40.32258064516)) + b * (1 - \exp(-x/60.97560975610)) + c * (1 - \exp(-x/136.98630136968)) + d * (1 - \exp(-x/574.71264367816)) + e * (1 - \exp(-x/8378.15647045024))^g + 0.89$$

a	-0.3079	τ_1 (s)	40.3
b	0.7765	τ_2 (s)	60.9
c	-0.6377	τ_3 (s)	136.9
d	0.8398	τ_4 (s)	574.7
e	-2.868	τ_5 (s)	8378.1
g	0.9177		



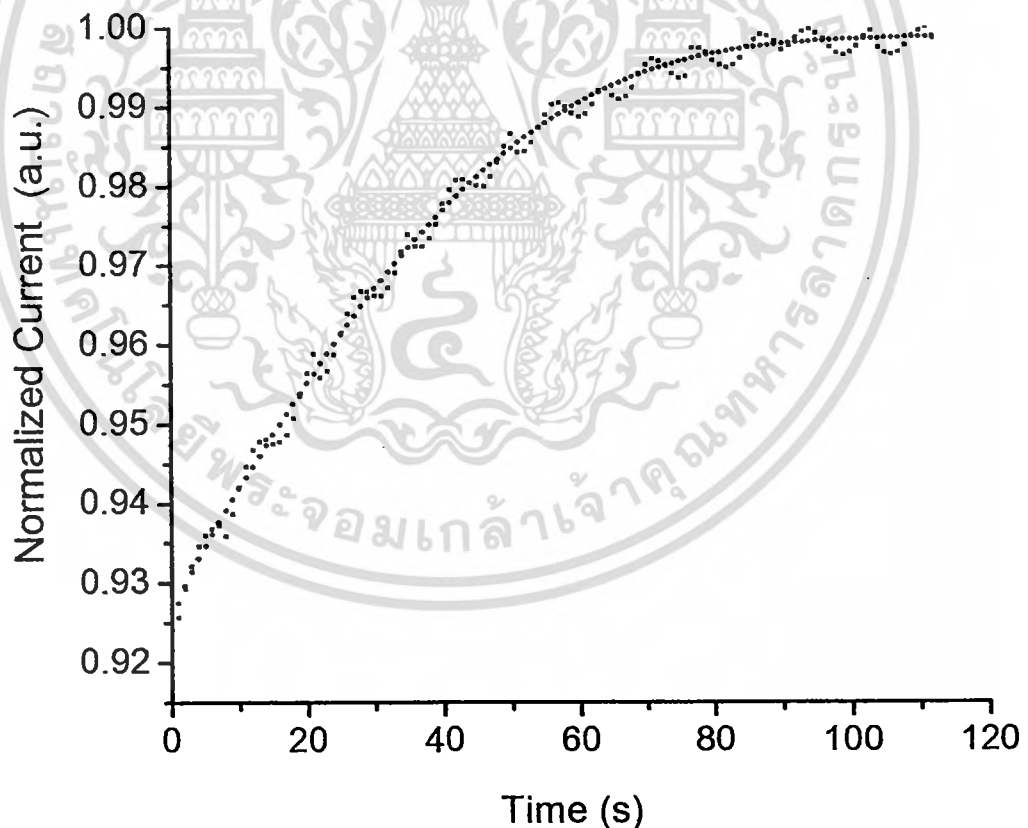
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450 °C rise time

$$Y = a \cdot (1 - \exp(-x/44.6)) + b \cdot (1 - \exp(-x/61.2)) + c \cdot (1 - \exp(-x/92.2)) + d \cdot (1 - \exp(-x/207.4)) + e \cdot (1 - \exp(-x/1362.6))^g + 0.924$$

a	-2.416	τ_1 (s)	44.6
b	7.404	τ_2 (s)	61.2
c	-7.591	τ_3 (s)	92.2
d	3.203	τ_4 (s)	207.4
e	0.4326	τ_5 (s)	1362.6
g	0.6647		



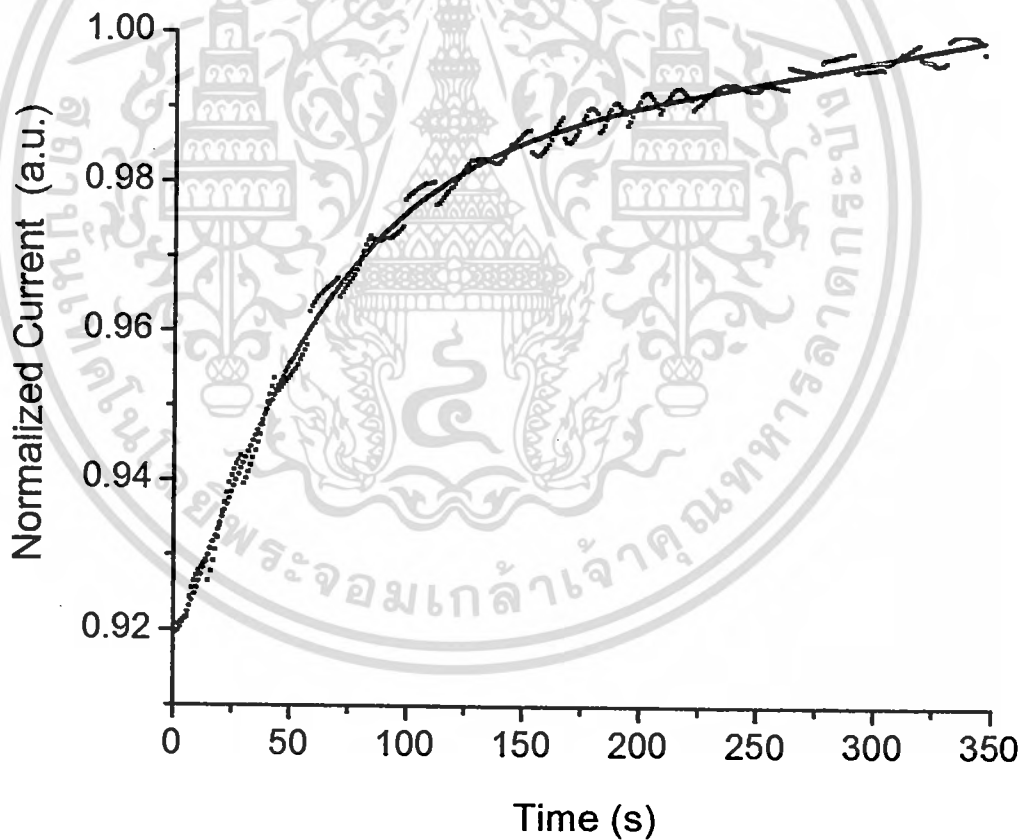
ภาพกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500 °C rise time

$$Y = a \cdot (1 - \exp(-x/94.6)) + b \cdot (1 - \exp(-x/151.9)) + c \cdot (1 - \exp(-x/434.7)) + d \cdot (1 - \exp(-x/1149.9)) + e \cdot (1 - \exp(-x/1460)) \cdot g + 0.921$$

a	0.4195	τ_1 (s)	94.6
b	-0.6449	τ_2 (s)	151.9
c	1.018	τ_3 (s)	434.7
d	-0.8167	τ_4 (s)	1149.9
e	-0.2512	τ_5 (s)	1460.0
g	0.6022		



ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

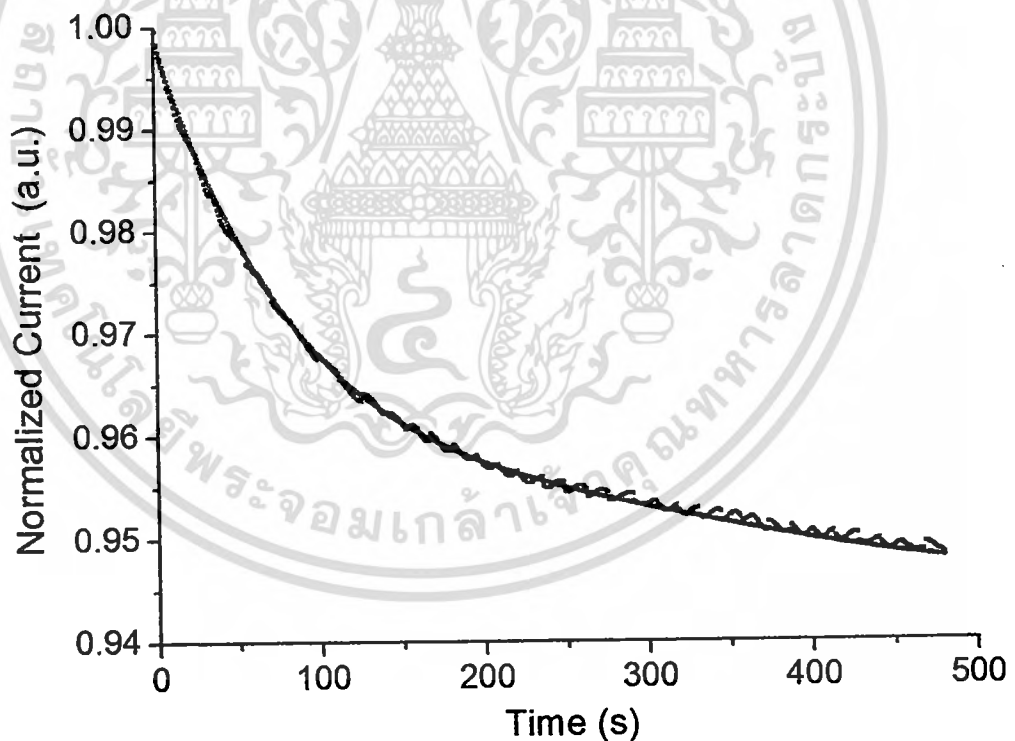
300 °C decay time

$$Y=(a*\exp(-x/204.91803278689))+(b*\exp(-x/406.50406504065))+$$

$$(c*\exp(-x/980.39215686275))+(d*\exp(-x/2478.55430884274))+$$

$$(e*\exp(-x/3045.84607512275))^g$$

a	0.7936	τ_1 (s)	204.9
b	-4.085	τ_2 (s)	406.5
c	13.54	τ_3 (s)	980.3
d	-20.49	τ_4 (s)	2478.5
e	11.24	τ_5 (s)	3045.8
g	0.3064		



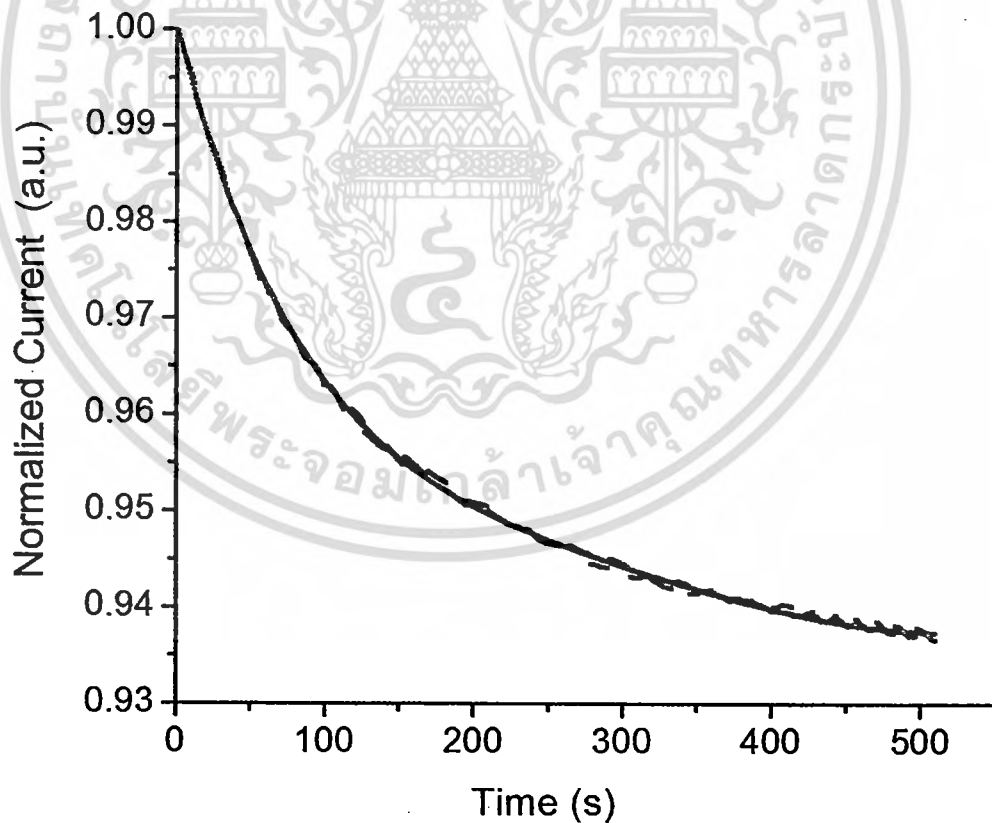
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิมัลไลซ์ชาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

350 °C decay time

$$Y=(a*\exp(-x/186.56716417910))+(b*\exp(-x/344.82758620690))+(c*\exp(-x/699.30069930070))+(d*\exp(-x/1306.42617973550))+(e*\exp(-x/2580.87161196079)^g)$$

a	0.8785	τ_1 (s)	186.5
b	-4.223	τ_2 (s)	344.8
c	10.88	τ_3 (s)	699.3
d	-9.716	τ_4 (s)	1306.4
e	3.181	τ_5 (s)	2580.8
g	0.01509		



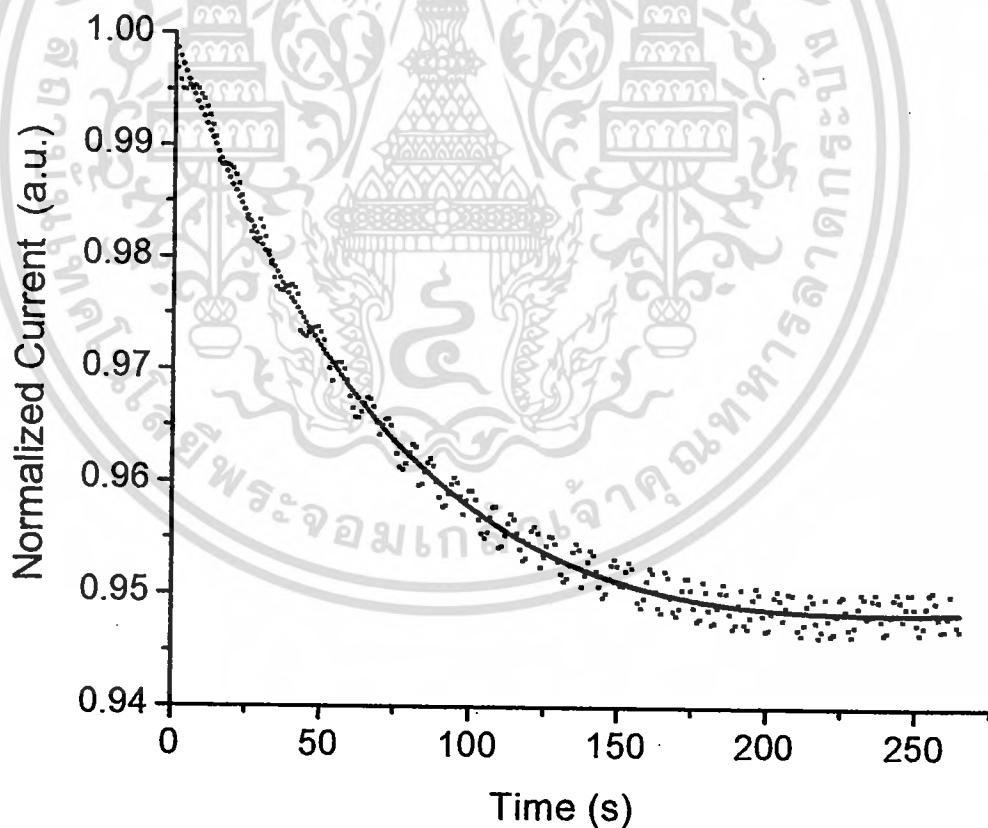
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C decay time

$$Y=(a*\exp(-x/135.8695652174))+(b*\exp(-x/197.6284584980))+(c*\exp(-x/361.0108303249))+(d*\exp(-x/877.1929824561))+(e*\exp(-x/65149.1263502157)^g)$$

a	0.2305	τ_1 (s)	135.8
b	-0.03207	τ_2 (s)	197.6
c	-0.5493	τ_3 (s)	361.0
d	0.6142	τ_4 (s)	877.1
e	0.736	τ_5 (s)	65149.1
g	0.7978		



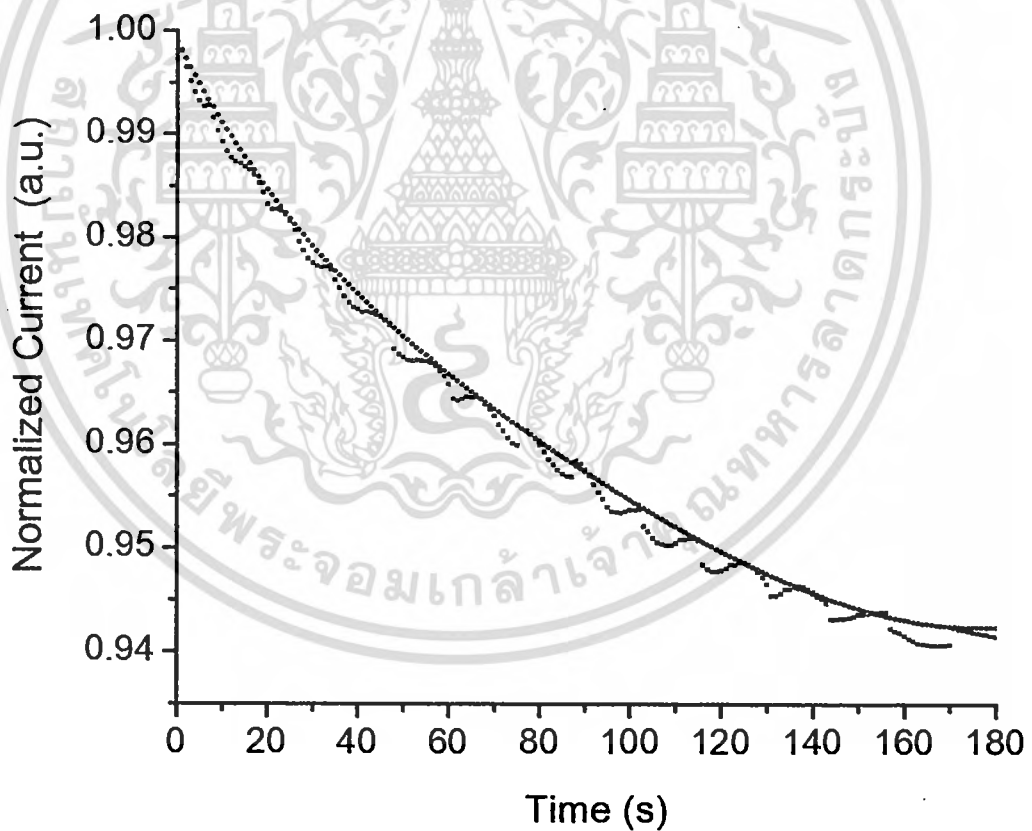
ภาพการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450 °C decay time

$$Y=(a*\exp(-x/126.2626263))+(b*\exp(-x/193.4235977))+(c*\exp(-x/249.3765586))+(d*\exp(-x/442.4778761))+(e*\exp(-x/1003.359247)^g)$$

a	9.116	τ_1 (s)	126.2
b	-71.36	τ_2 (s)	193.4
c	96.84	τ_3 (s)	249.3
d	-39.92	τ_4 (s)	442.4
e	6.323	τ_5 (s)	1003.3
g	-0.08074		



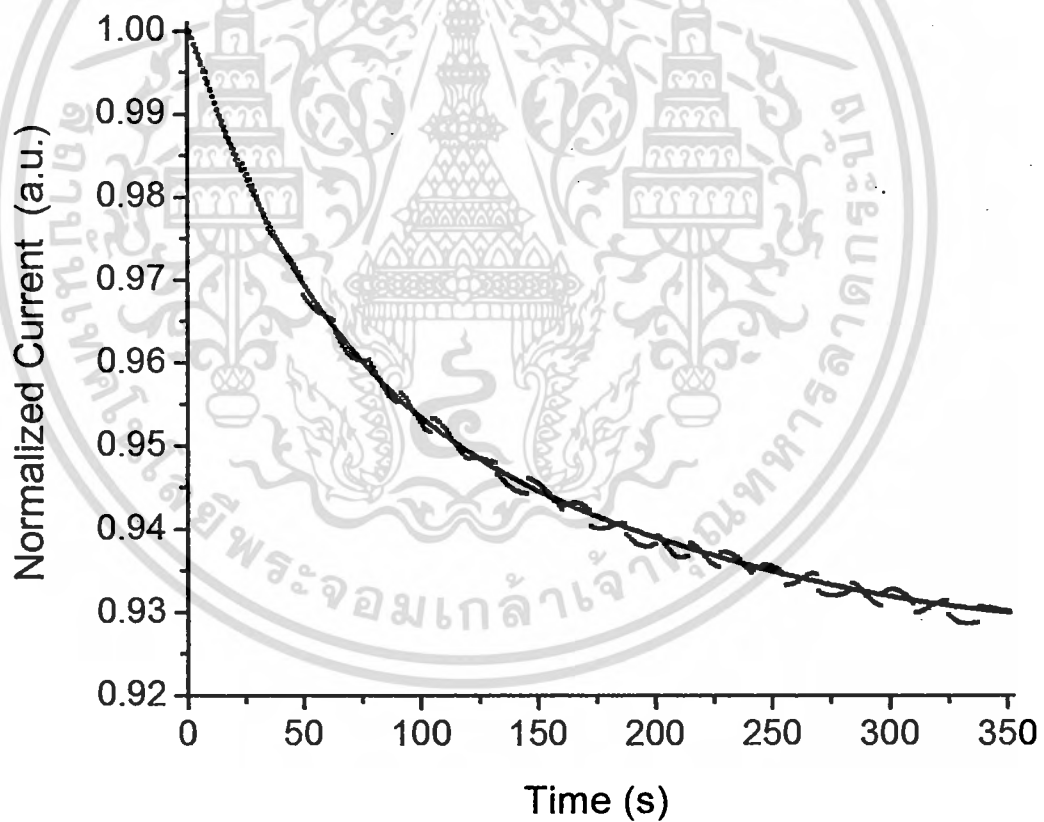
ภาพกราฟที่ตีความความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอมป์มิลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500 °C decay time

$$Y=(a*\exp(-x/120.7729469))+(b*\exp(-x/208.3333333))+(c*\exp(-x/414.9377593))+(d*\exp(-x/884.9557522))+(e*\exp(-x/1504.952045)^g)$$

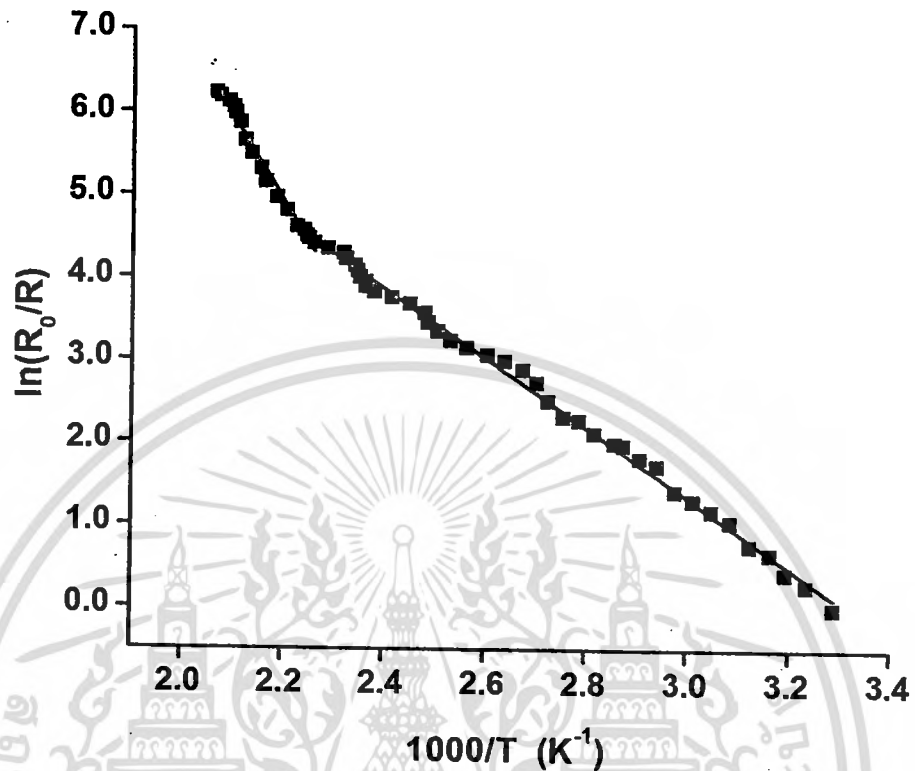
a	0.5608	τ_1 (s)	120.7
b	-1.987	τ_2 (s)	208.3
c	4.071	τ_3 (s)	414.9
d	-3.775	τ_4 (s)	884.9
e	2.131	τ_5 (s)	1504.9
g	0.1459		



ภาพกราฟความสัณพันธ์ระหว่างกระแสแอมป์มิลลิกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300°C



ภาพกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

$$E_a = \frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (10.0335)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

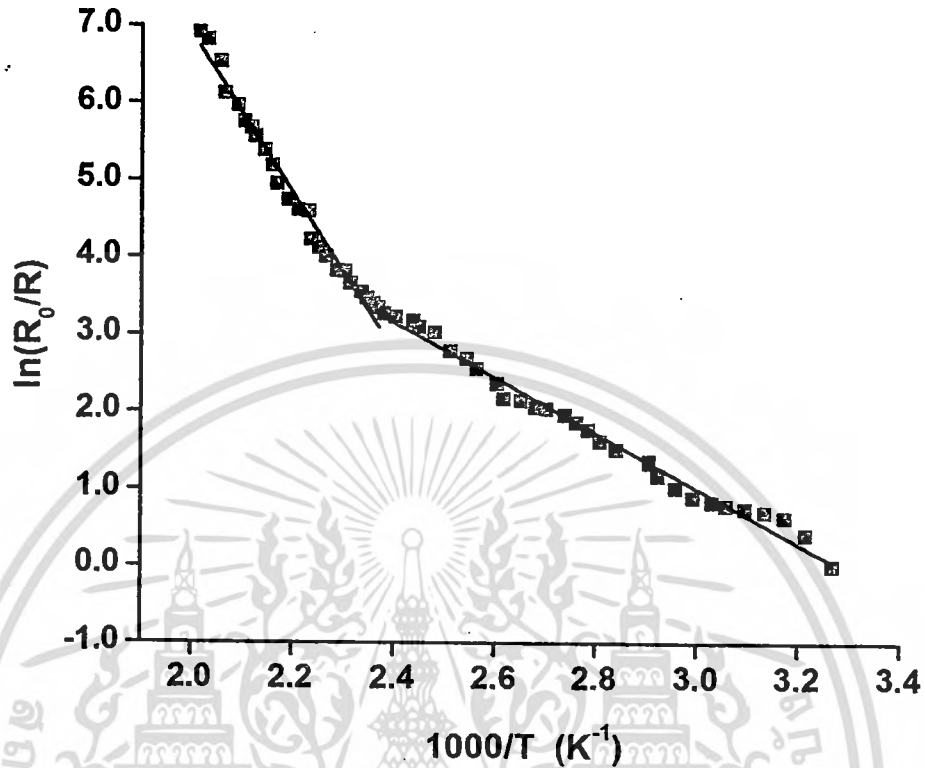
$$E_1 = 0.86539 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (4.20526)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.3627 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450°C



ภาพกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

$$E_a = \frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (10.29797)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

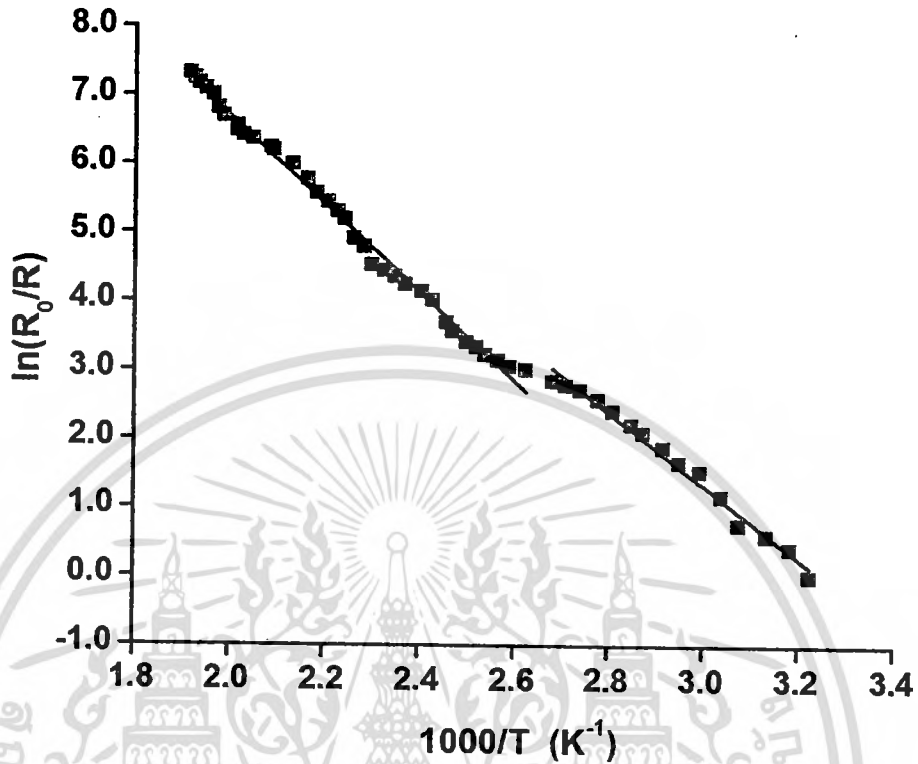
$$E_1 = 0.8882 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (3.57145)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.30804 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500°C



ภาพกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

$$E_a = \frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (6.42514)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = 0.55417 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (5.30112)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.45722 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1 รอบ 6 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2558

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)
 แหล่งเงินรายได้ (ประเภทส่งเสริมนักวิจัย)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเป็คเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

(ภาษาอังกฤษ) Preparation of CuO Thin Films by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Films for Solar Cell Application

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัย/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/ 2557 ถึงวันที่ 31/ มีนาคม/ 2558

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

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 50,000.00 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) 19 พฤศจิกายน 2557

งวดที่ 2 บาท % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย	15,000.00	4,770.00	10,230.00
ค่าวัสดุ	35,000.00	2,628.40	32,371.60
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน : ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000.00	7,398.40	42,601.60

(รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัย/ผู้รับทุน

๒๐ / ๖๓ ๕ - ๕๘

(นางพูนทรัพย์ วิสัยเกษม)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน

17 เม.ย. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 781-788.
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-CuAlO₂ 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≤x≤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.

15. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparuchikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Fabrication and Characterization of Heterojunction of CdS Thin Films and CuAlO₂ Ceramic Pill Substrate" *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 22(2), 2012, pp. 125-129.
16. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, "Thermoelectric Properties of Ni-Doped CuAlO₂" *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 SnO₂ 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.
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.

เอกสารนี้เป็นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมวิจัย

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-CuFeO₂ 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 CuAlO₂ Delafossite” *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction” *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 781-788.
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-CuAlO₂ 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≤x≤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.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

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

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.
4. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0≤x≤1) Thin Films" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2070-2077.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, C. Thaisatuen, W. Bunkua, A. Ariyaritand and T. 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.