

การศึกษาลักษณะที่ปรากฏซึ่งมีบางคุณสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้จากปฏิกิริยา
ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu
CHARACTERIZATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS
OBTAINED BY THERMAL OXIDATION OF Cu METALLIC FILMS

นางสาววรรณนิศา สุภักดิ์
นางสาววดีพัชร ใบเวียง
นางสาวสุวิภา ทักนิ่ม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา
ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

CHARACTERIZATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS
OBTAINED BY THERMAL OXIDATION OF Cu METALLIC FILMS

นางสาววรรณนิศา สุขกรี

นางสาววลัยพัชร ใจเรื่อน

นางสาวศวิตา ทศนิยม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**CHARACTERIZATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS
OBTAINED BY THERMAL OXIDATION OF Cu METALLIC FILMS**

Miss Wannisa Sukkree

Miss Walaipat Jairuan

Miss Sawita Thusniyom

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**





หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

CHARACTERIZATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS
OBTAINED BY THERMAL OXIDATION OF Cu METALLIC
FILMS

ชื่อนักศึกษา นางสาววรรณนิศา สุขกรี
นางสาววลัยพัชร ใจเรื่อน
นางสาวศวิตา ทศนิยม

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาตาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu
ชื่อนักศึกษา	นางสาววรรณนิศา สุขกรี นางสาวลย์พัชร ใจเรื่อน นางสาวศวิตา ทศนิยม
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มโลหะ Cu ด้วยความร้อนในบรรยากาศความดันปกติ ฟิล์มโลหะ Cu นี้เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปิตเตอร์ริงเคลือบบนกระจกสไลด์ กระบวนการออกซิเดชันกระทำในอากาศที่อุณหภูมิในช่วง 300-500 องศาเซลเซียส จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า เฟสเดี่ยวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลินิกเกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิแอนนีสสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้อุณหภูมิแอนนีสต่ำกว่าค่านั้น ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอะมอร์ฟัสและเกรนมีขนาดเล็กมาก สัมประสิทธิ์ของฮอลล์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 2.17 และ 2.83 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าฟิล์มบางมีสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีขึ้น จากผลการวัดกระแสขาหลงจะพิตกราฟได้ดีโดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ส่งผลให้ได้ช่วงชีวิตแบบยาวจำนวนหลายค่า ความหนาแน่นของกักตักพาหะสามารถคำนวณหาได้จากกระแสขาหลงเช่นเดียวกัน

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO, สมบัติทางไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

Title	Characterization of Copper Oxide Thin Films Obtained by Thermal Oxidation of Cu Metallic Films
Students	Miss Wannisa Sukkree Miss Walaipat Jairuan Miss Sawita Thusniyom
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

ABSTRACT

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 function 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

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา ตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาววรรณนิศา สุขกรี

นางสาวลย์พัชร ใจเรื่อน

นางสาวศวิตา ทศนิยม

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	หน้า
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญรูป	VIII
	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
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 ปฏิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน	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 ขั้วบกพร่องผลึกแบบจุด	21
2.8.2 ขั้วบกพร่องผลึกเชิงเส้น	21
2.8.3 ขั้วบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	22
2.9.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	22
2.9.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	24
2.9.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	25
2.9.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	26
2.9.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	31
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	33
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสกลาง	40
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	41
2.11 หลักการสปีดเตอร์ริง	42
2.11.1 โกล์วดิสซาร์จ	42
2.11.2 สปีดเตอร์ริง	44
2.11.2.1 ยึดการสปีดเตอร์ริง	44
2.11.2.2 ดิซีไคโอดสปีดเตอร์ริง	46
2.11.2.3 ดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	47
2.11.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสซาร์จ	50
2.12 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	51
2.12.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดิซีแมกนีตรอน	51
2.12.2 การให้ความเย็นที่เป้า	51
2.12.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอร์ริงเฉพาะผิวเป้า	51
2.12.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	53
2.13 คุณสมบัติทางพลาสมา	56
2.13.1 หัววัดลางมัวร์	56
2.13.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	56
2.13.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	58
2.13.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา	59
2.13.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	59

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	2
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	21
2.8.2 ซ็อบกพร่องผลึกเชิงเส้น	21
2.8.3 ซ็อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	60
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	60
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	60
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	60
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้	61
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	61
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านแสงโดยใช้เครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	61
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	62
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าเชิงแสง	62
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	63
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงานกระตุ้น	63
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	64
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	64
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบาง ด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	65
3.2.3 วิธีการแอนนัล	71
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	72
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน ของฟิล์มโลหะ Cu	72
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	73
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	74
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	75
4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธี ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	80
4.3.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	80
4.3.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดย วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	83
4.3.3 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	89
4.3.4 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	95
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	97
5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ	97
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	99
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	105
ประวัติผู้เขียน	120

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	10
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดค้ของธาตุชนิดต่างๆ	45
ตารางที่ 4.1 ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	79
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีวิธีการออกซิเดชัน เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง โดยความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางหน่วย (Ω /sq)	82
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	88
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	93
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	94
ตารางที่ 4.6 พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	96

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ	5
รูปที่ 2.2 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
รูปที่ 2.3 การบอกระนาบต่างๆ ของผลึก	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	12
รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสของระบบ CuO	13
รูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
รูปที่ 2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	17
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
รูปที่ 2.11 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	19
รูปที่ 2.12 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	20
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	22
รูปที่ 2.14 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
รูปที่ 2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	24
รูปที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	25
รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	26
รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
รูปที่ 2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	31
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	33

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 ระดับพลังงานของกัปดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ($E_{e,0}$) และกัปดักพาหะชนิดจับโฮล ($E_{h,0}$) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ	34
รูปที่ 2.22 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	37
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	37
รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	40
รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	41
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของการโกล์วดีสซาร์จ	43
รูปที่ 2.27 การเกิดสปีดเตอร์ริงที่ผิวเป้า	44
รูปที่ 2.28 การสปีดเตอร์ริงโดยดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	46
รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	48
รูปที่ 2.30 ความต่างศักย์ของการดิสซาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทโรดโคแอคเซียลทรงกระบอก	50
รูปที่ 2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	54
รูปที่ 2.32 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	55
รูปที่ 2.33 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	55
รูปที่ 2.34 หัววัดเดี่ยวกลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	56
รูปที่ 2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	57
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	61
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (Helium)	61
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	62
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	62

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	63
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	63
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	64
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	72
รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	73
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	74
รูปที่ 4.4 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuO ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	75
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	76
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	76

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	77
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	77
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	78
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และ (E_{g2}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	79
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	80
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	80
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	81

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	81
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	82
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	83
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	83
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	84
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	84
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	85

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	85
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 4500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	86
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	86
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	87
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	87
รูปที่ 4.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	88
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	89

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	90
รูปที่ 4.29 การพิศกรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	91
รูปที่ 4.30 การพิศกรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	92
รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(R_0/R)$ กับอุณหภูมิ (T) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนยังมีราคาแพงอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่มีราคาถูกและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อทดแทนซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ Te, In และ Ga ล้วนเป็นธาตุหายาก มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอร์วัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อาจเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นั้นมีปริมาณมากบนโลก ราคาถูก และไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเตรียมให้เป็นสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet chemical process) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคำนึงถึงคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวแล้ว สารประกอบคิวปริกออกไซด์ (CuO) กับคิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด ได้มีการนำเอาสารประกอบ Cu₂O ไปใช้เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดฟิล์มบางและเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Jeong, 2010) สารประกอบ Cu₂O ที่เตรียมจากสารละลายของคอปเปอร์อะซิเตตกับโซเดียมอะซิเตตจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความต้านทานสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพีถึง 2 เท่า ในเชิงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ Cu₂O จะใช้ประสิทธิภาพสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ (Rakhshani, 1986) ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงพยายามประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายๆชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O/ZnO ก่อนข้างโคคเค่น ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (rf magnetron sputtering) ให้เคลือบลงบนแผ่นสารประกอบ Cu₂O ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของแผ่นโลหะ Cu จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O/ZnO มีประสิทธิภาพในการ

แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในระดับ 3.85 เปอร์เซ็นต์ (Minami et al., 2011)

เข็มนาโน (nanorods) และ ลวดนาโน (nanowires) ของสารประกอบ Cu_2O จะมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.61 และ 2.69 อิเล็กตรอน โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว (2.17 อิเล็กตรอน โวลต์) อย่างมาก ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงขึ้นนี้เป็นผลทางควอนตัมของขนาดอนุภาค (quantum size effect) ซึ่งเกิดจากเข็มนาโนและลวดนาโนมีขนาดเล็กมากจนประพืดตัวกลายเป็นวัสดุใน 1 มิติ ทั้งสารประกอบ Cu_2O และ CuO สามารถประดิษฐ์ให้เป็นอนุภาคนาโนได้ ซึ่งวัสดุนาโนจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แปลกใหม่และน่าสนใจในเชิงการวิจัยพื้นฐาน

สำหรับสารประกอบ CuO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.2-1.9 อิเล็กตรอน โวลต์ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจจับแก๊สต่างๆ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก สิ่งประดิษฐ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ วาริสเตอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO สามารถเตรียมได้จากหลายวิธีเช่น วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีอะโนดิกออกซิเดชัน (anodic oxidation) วิธีแอททีฟสปัตเตอร์ริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มีเฟสของ Cu , Cu_2O ปะการวมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดี่ยวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ในช่วงอุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสม

ในโครงการพิเศษนี้สนใจที่จะเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มโลหะ Cu ด้วยความร้อนในอากาศความดันปกติ จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์อันได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มโลหะ Cu ด้วยความร้อนในอากาศความดันปกติ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 1.3.2 ทำการแอนนัลฟิล์มโลหะ Cu ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
- 1.3.3 นำฟิล์มบางไปทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.3.4 นำฟิล์มบางไปทำการถ่ายภาพพื้นผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางแสง ได้แก่ การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการวัดการส่งผ่านแสง
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลจากผลงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์
- 1.4.2 ทำการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 1.4.3 ทำการแอนนัลฟิล์มโลหะ Cu ในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม
- 1.4.5 นำฟิล์มบางไปทำการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ JOEL รุ่น JSM-6400
- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation ($\text{He } \lambda \text{ ions } \alpha$) ช่วง 200-1000 นาโนเมตร
- 1.4.7 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.9 เขียนรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

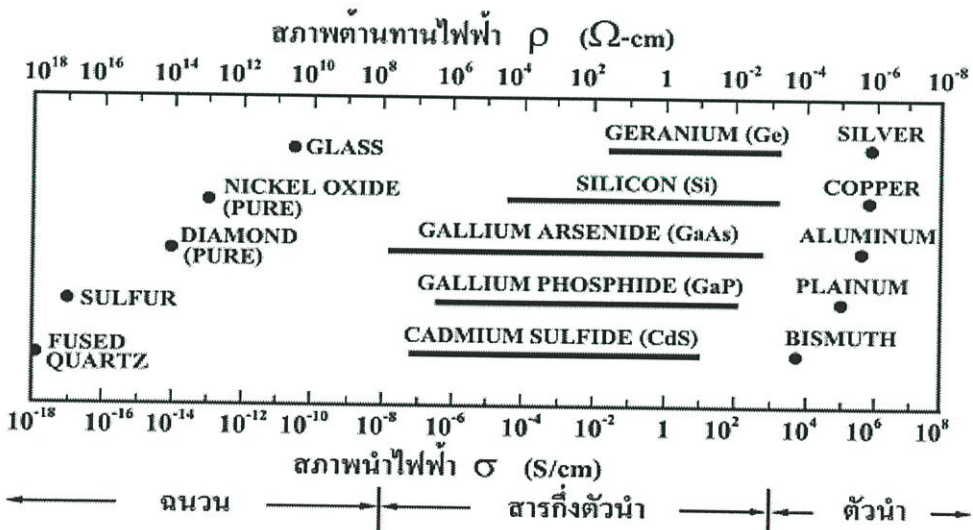
- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มโลหะ Cu โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรืง
- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของ โครงสร้างผลึก และความไม่สมมาตรของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบาง และเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ต่อไป

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

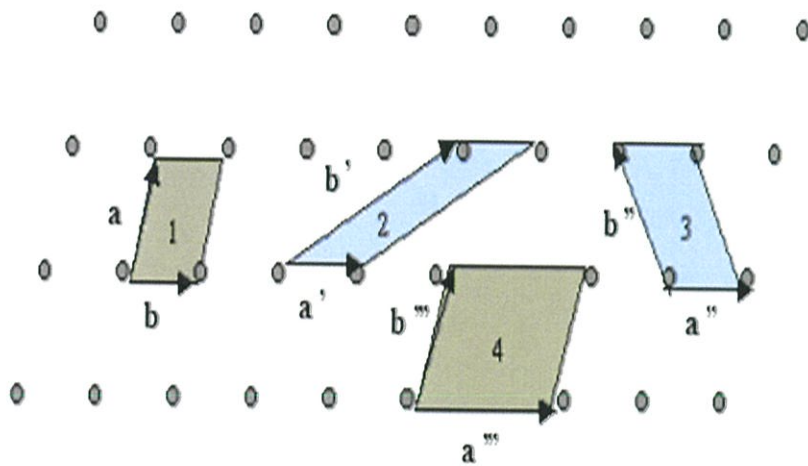
วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำคังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน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



รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

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

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกัน ก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1





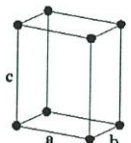
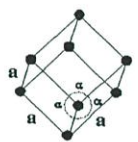
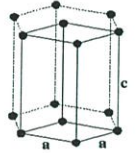
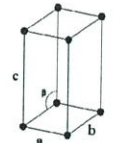
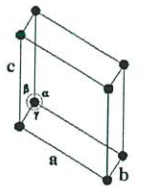
รูปที่ 2.2 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

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

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)	$a = b \neq c$ $\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

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

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

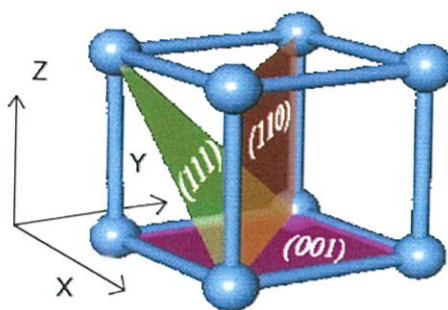
การระบุตำแหน่ง

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 $[\bar{2}1]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุระนาบจะใช้อักษร $(h k l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

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

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใด ให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (—) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (—) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.3 การบอกระนาบต่างๆ ของผลึก

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

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	(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, ∞	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

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

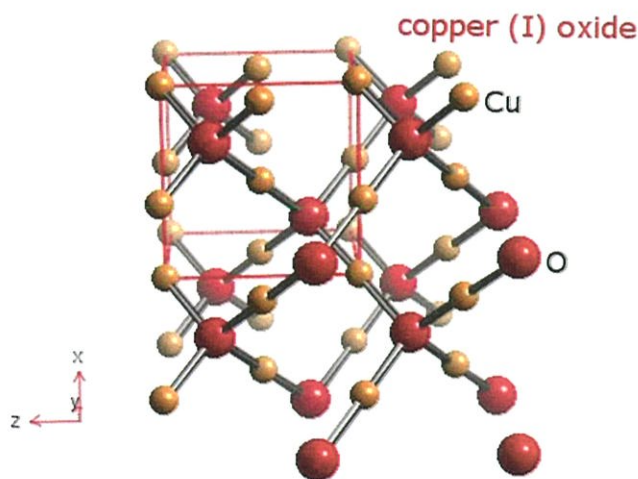
$$i = -(h+k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ($1\bar{1}20$) ในระบบเฮกซะโกนัลเฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกัน นั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่นทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ดิซิมเมทรีทรอนสปัตเตอร์ริง คือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบ

ฟิล์มบางที่เรียกว่าสปีดเตอริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

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

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากชั้นแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับชั้นแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ชั้นแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ชั้นแลตทิซที่สองจะอยู่เอียงไปในแนวทะแยงมุมของชั้นแลตทิซแรกเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ของความยาวเส้นทะแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอม 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



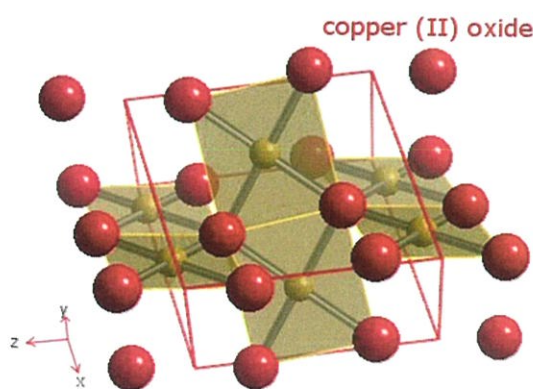
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O

สารประกอบ CuO มีสีดำพบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอม

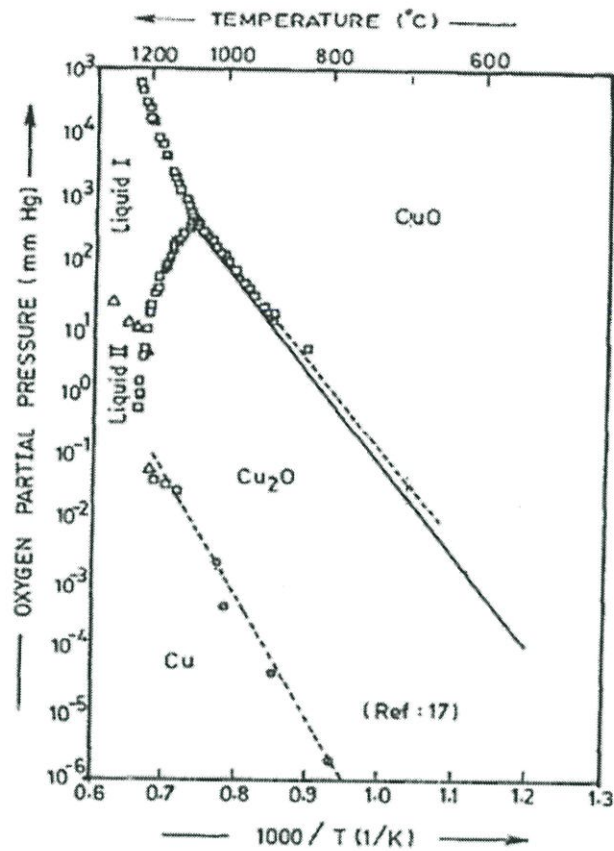
ของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูป มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนेट อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

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

รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu, Cu_2O และ CuO



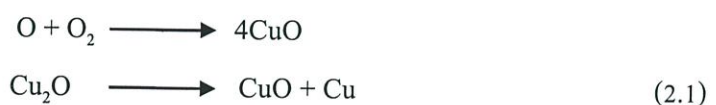
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO



รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

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

ผลิตภัณฑ์ขั้นของสารประกอบ Cu_2O สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ Cu โดยอาศัยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 1,273-1,773 เคลวิน และในช่วงเวลานานหลายนาทีจนถึงหลายชั่วโมงขึ้นอยู่กับความหนาของสารตั้งต้น มูซา และเพื่อนร่วมงาน (Musa, 1998) ทำการเตรียมสารประกอบ Cu_2O ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนในเตาเผาที่ความดันบรรยากาศปกติ โดยใช้แผ่นโลหะ Cu เป็นสารตั้งต้นใช้อุณหภูมิในช่วง 473-1,323 เคลวิน พบว่า เฟสของสารประกอบ Cu_2O เกิดขึ้นก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเฟสของสารประกอบ CuO ตามมาภายหลัง การเกิดเฟสของสารประกอบ CuO จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,273 เคลวิน สามารถอธิบายได้ดังสมการ



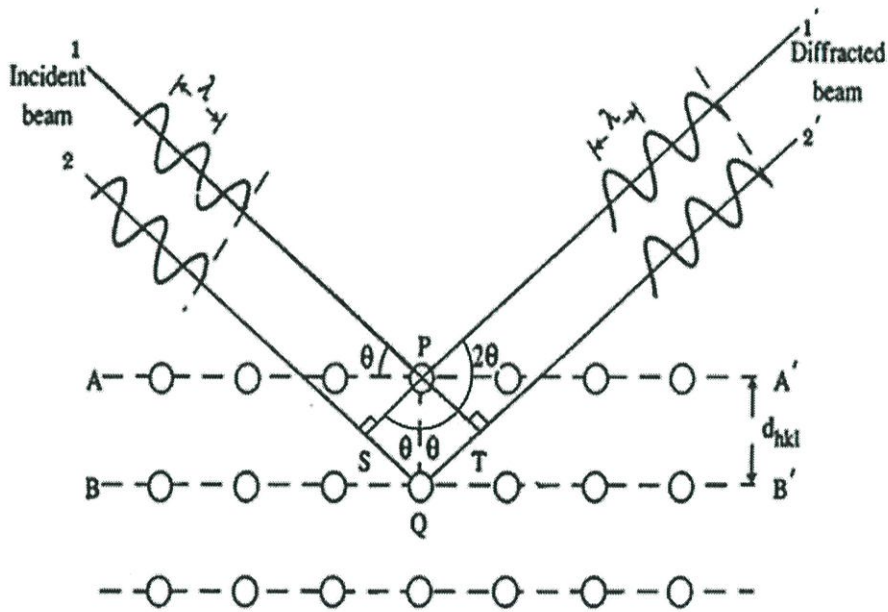
สำหรับเฟสของสารประกอบ CuO ที่ไม่ต้องการสามารถที่จะกำจัดออกไปได้โดยการกัดออกด้วยสารละลายของ FeCl_3 , HCl และสารละลายของ HNO_3 กับ NaCl ฟิล์มบางที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,323 เคลวิน พบว่าเป็นเฟสเดี่ยวของสารประกอบ Cu_2O โดยการตรวจสอบด้วย XRD และ SEM ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเป็นเฟสผสมของสารประกอบ Cu_2O และ CuO เสมอ แสดงว่ายิ่งอุณหภูมิจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าต่ำลง ปริมาณของเฟส Cu_2O ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งลดลงด้วยจากข้อบ่งชี้ทางอุณหพลศาสตร์ระบุได้ว่าการระงับเฟสของสารประกอบ 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 (ฐิตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; คูสัต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยวิธี $0-2\theta$ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ในปี ค.ศ.1912 แบรกก์ (Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

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

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



รูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน 2θ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีก (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

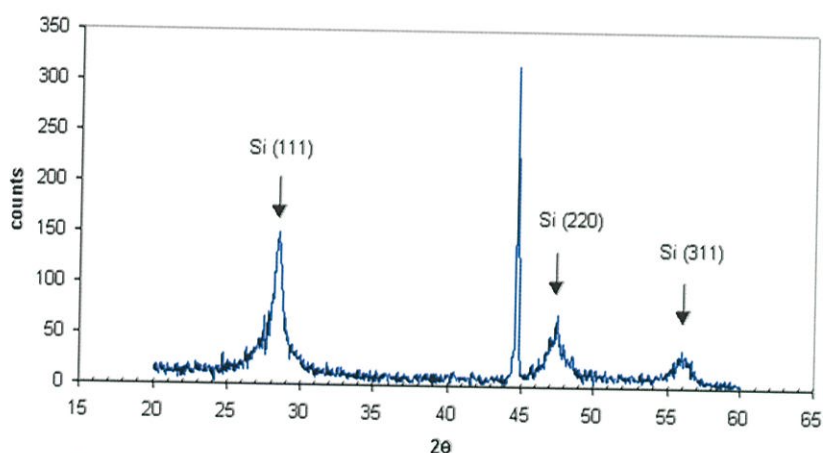
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

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

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.4)

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

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



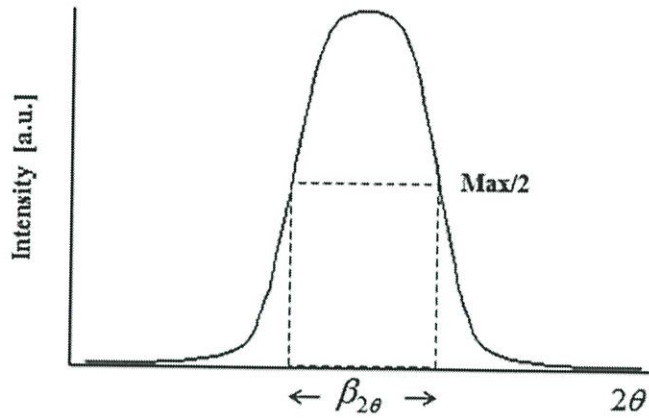
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.5.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.9 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.5)$$

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



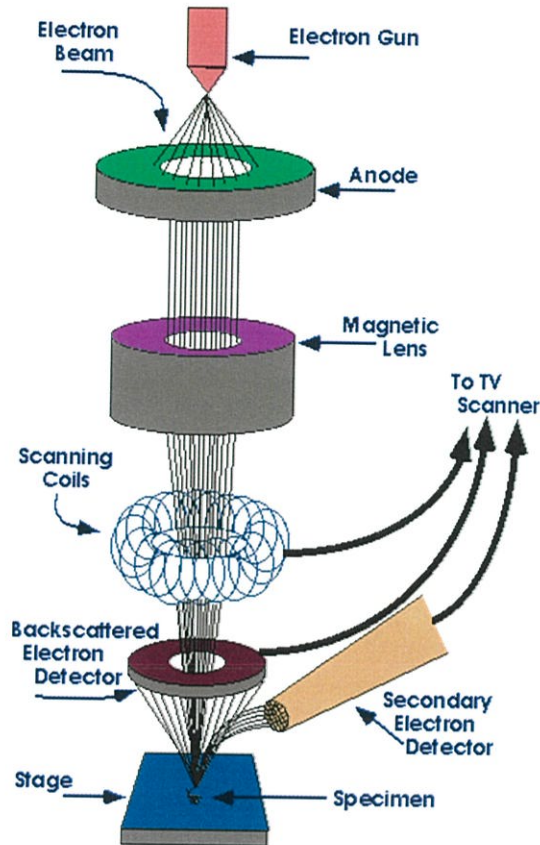
รูปที่ 2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; คูสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

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

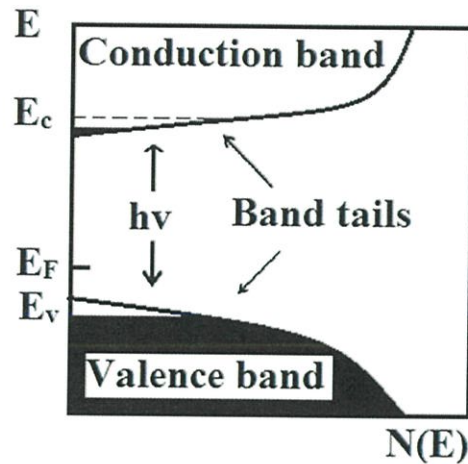
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกระดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

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



รูปที่ 2.11 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออแบ็ก (urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความสัมพันธ์

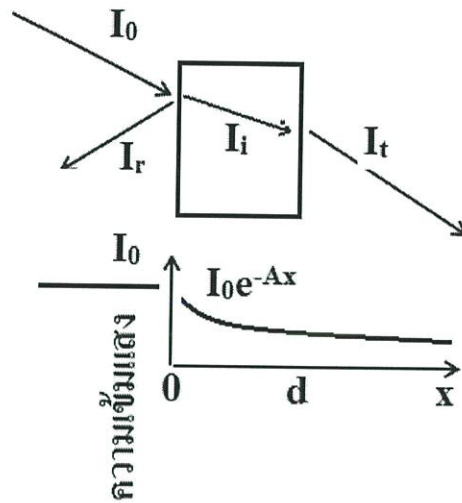
$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E-E_0)}{K_B T}\right] \quad (2.6)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน K_B คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.6) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลาดส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะดูเขาสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดคู่รวม

2.8 การส่งผ่านแสง (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; คูสิต, 2535;

Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูป



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

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

ถ้าแสงตกกระทบบนฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.8)$$

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) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวกแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปหรืออาจจะเรียกว่าอีกอย่างว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบช็อตตี้ (schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงสร้างผลึกแต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก แต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีค่าอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) การผิดรูปของโครงสร้างผลึกแบบเฟรเนเคิล (frenkel disorder) คือ จะเกิดลักษณะ (ก) และ (ข) ร่วมกันโดยมีจำนวนเท่าๆ กัน
- ง) การผิดรูปของโครงสร้างผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (anti structure disorder) คือจะเกิดลักษณะของอะตอมตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไปเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงสร้างผลึกทำให้ลักษณะของโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.8.2 ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้น

ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน (dislocation) เกิดจากความผิดปกติของจุดของโครงสร้างผลึกตั้งแต่สองจุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู

2.8.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ คือการเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (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; วีรัชย์, 2547; คุสิต, 2535)

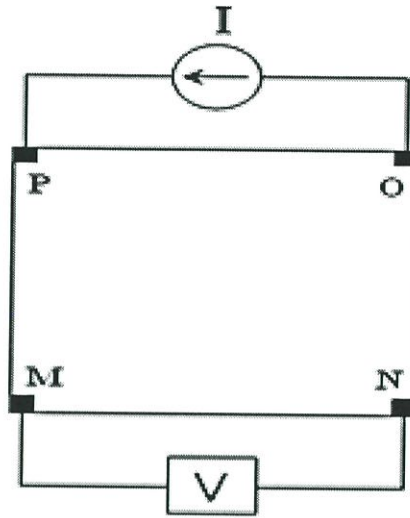
จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.9.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่างรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.14 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค
แวนเดอร์เพาว์

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

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

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า 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)

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

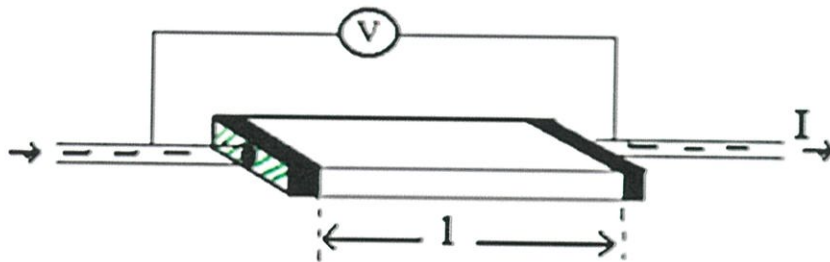
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.9.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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



รูปที่ 2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

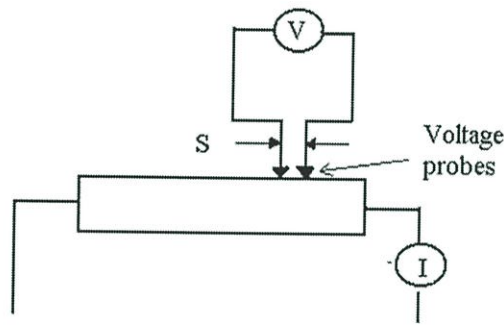
$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.17)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่)

ตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.9.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

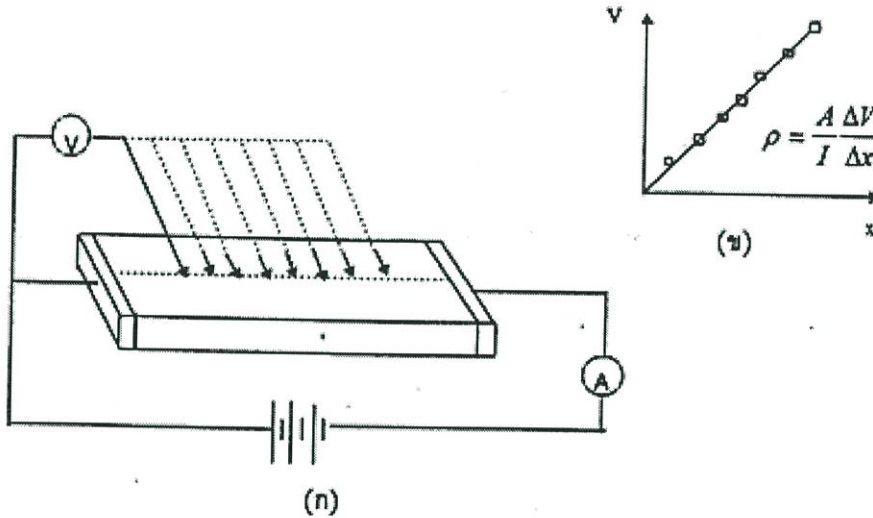
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 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 เป็นรูป

ถูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้ว โดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.18)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.19)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

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

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

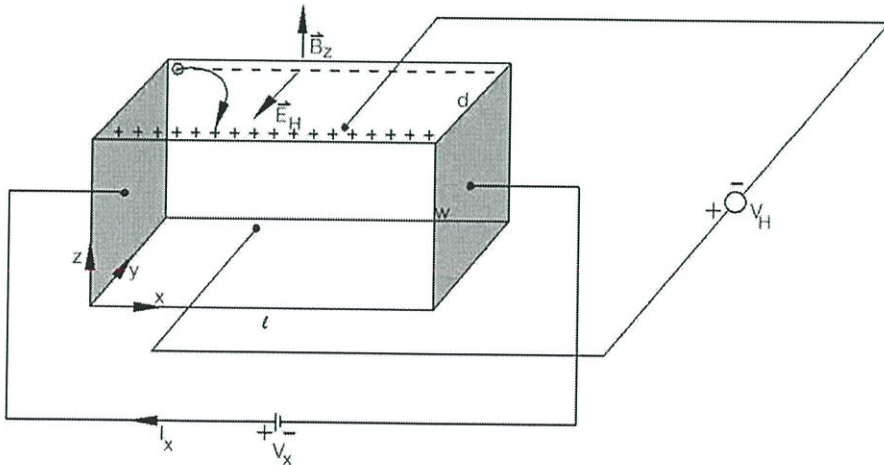
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.21)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.22)$$

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



รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง 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)

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

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

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

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิมเพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.29) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

เมื่อ
$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.31)$$

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

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

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 การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ 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)

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

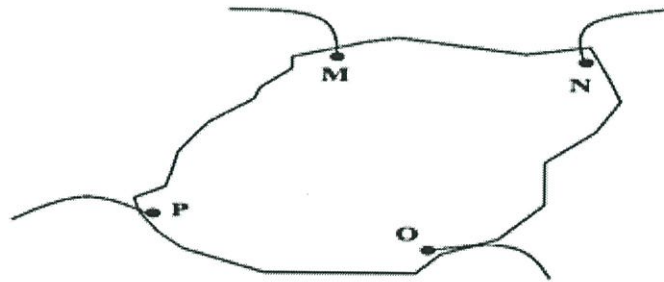
สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.9.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คุณิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สาธารณสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายอย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพติดตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.43)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

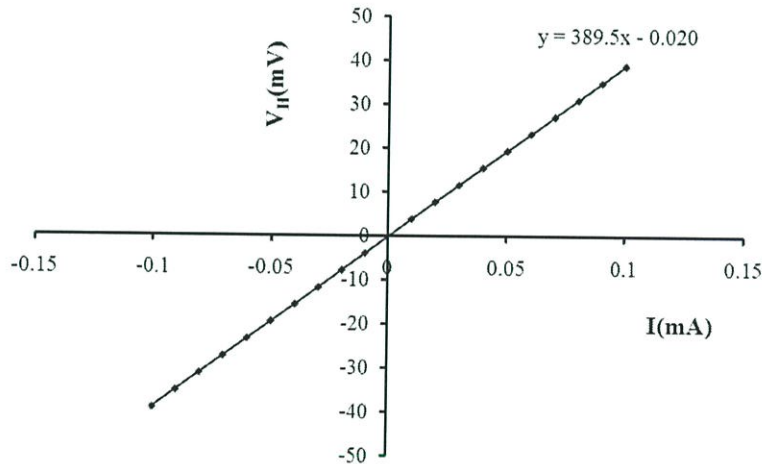
d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.45) จะได้ว่า

$$R_H = 10^8 \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.45)$$

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



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

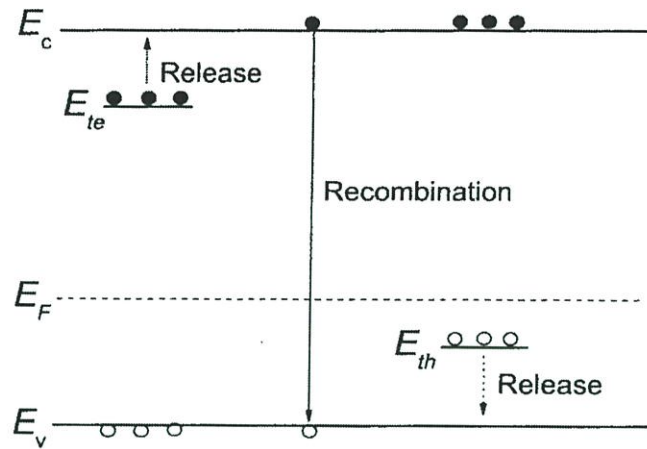
$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.47)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.21 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{h}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{e}) (Jiang, 2012) คำว่า การปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อย (release) จะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัว (recombination) แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัว (recombination) ใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.21 ระดับพลังงานของกักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดที่บและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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) เกิดมาจากกักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

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

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

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

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

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

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

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

- โดยที่ V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
 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_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

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

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

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

เมื่อ

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

ดังนั้น

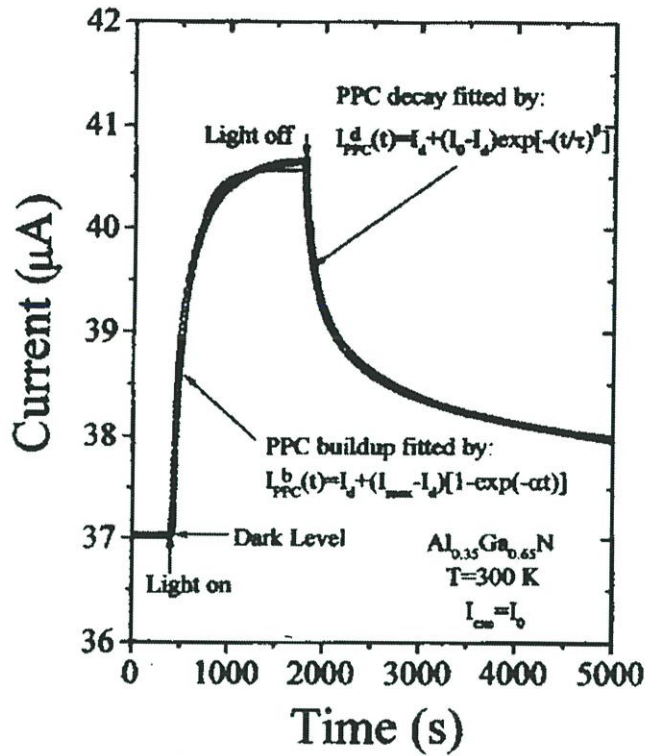
$$\begin{aligned} E_t &= \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} \\ &= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned} \quad (2.59)$$

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 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)

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



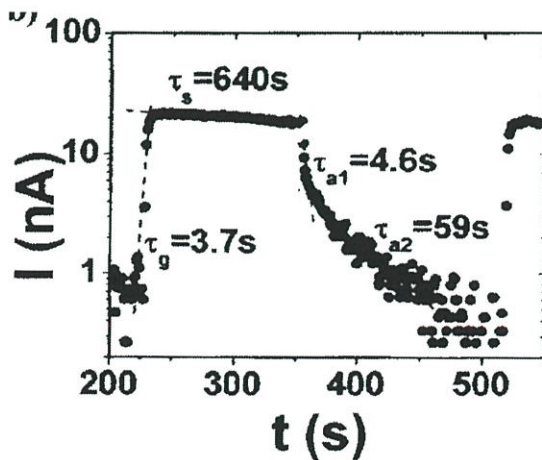
รูปที่ 2.22 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.60-2.61) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \tag{2.62}$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลงในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด

ดังนั้นกระแสไฟโตขาของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 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 ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

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

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

สมการที่ (2.64) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

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

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

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

จากสมการที่ (2.69) สามารถที่จะหาค่า

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

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

กับศักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับศักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

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

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

สมการที่ (2.69) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

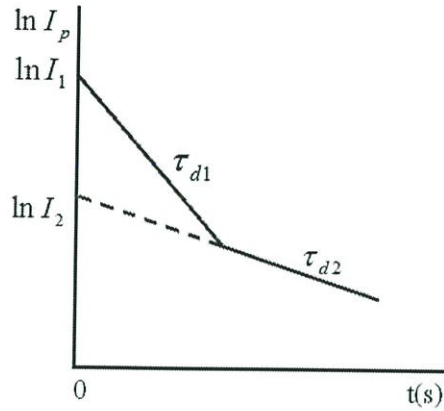
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.72)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิศกรรภาพของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

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

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสชาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

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

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะของฟิล์มบางได้ดังนี้ คือ

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

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

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

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

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

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

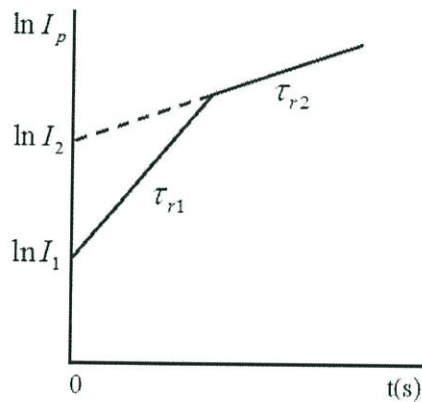
$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.78)$$

และ

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

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

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

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

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

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

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 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.75), (2.77), (2.78) และ (2.79) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.11 หลักการสเปกโตรริง (ภารุจ, 2539; ธนุสิทธิ์, 2538; จูตินัย, 2556)

ดิซีแมกนีตรอนสเปกโตรริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสเปกโตรริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสเปกโตรริงและหลักการที่เกี่ยวข้องกับหัวดิซีแมกนีตรอนสเปกโตรริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.11.1 โกล์วดิซาร์จ

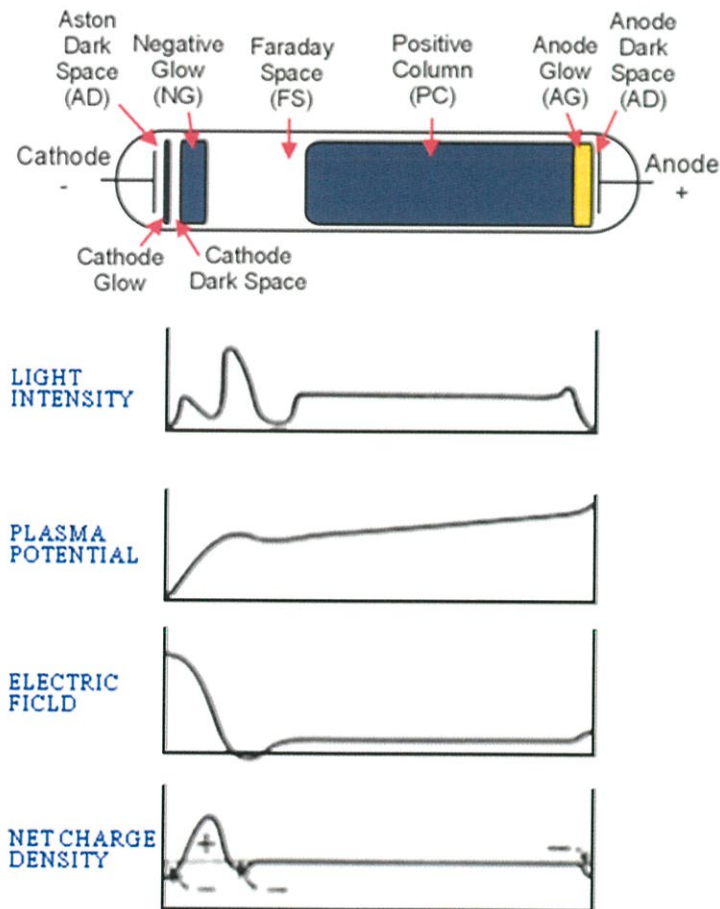
สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดิซีแมกนีตรอนสเปกโตรริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.86)$$

โดย	W_i	คือ	พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
	m	คือ	มวลของอิเล็กตรอน
	v	คือ	ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโค้วดิสซาร์จก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การโค้วดิสซาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสถานะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายใน ภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนดดังแสดงในรูปที่ 2.26



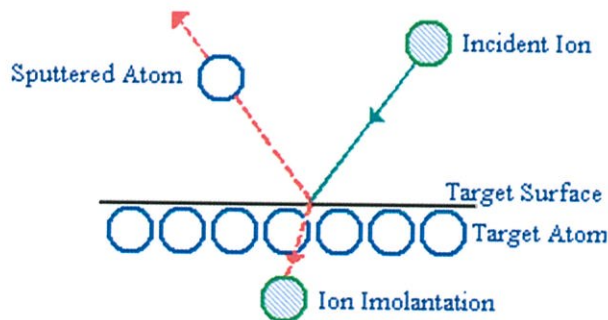
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของการโค้วดิสซาร์จ

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการ

เคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การ โกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการ discharge ให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของ โกลว์ discharge แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7 การเรืองแสงในสถานะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในสถานะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการ discharge ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการ โกลว์ discharge สามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.11.2 สปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า

2.11.2.1 ยี่ลด์การสปัตเตอร์ริง (sputtering yields)

ยี่ลด์ของการสปัตเตอร์ริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.84 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ริง

$$\text{ยี่ลด์ของการสปัตเตอร์ริง} = \frac{\text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า}}{\text{ไอออนที่ชนเป้า}} \quad (2.84)$$

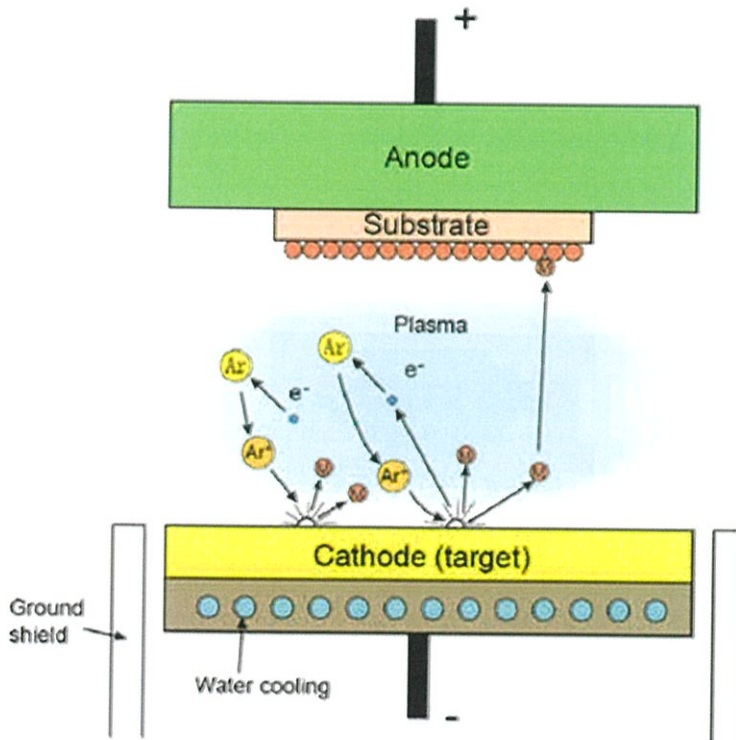
การสputtering แสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่า yield ของการสputtering ของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสputtering (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอน โวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม yield ของการสputtering จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่า yield ของธาตุชนิดต่างๆ

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

2.11.2.2 ดีซีไดโอดสเปคโตริง

ในระบบดีซีไดโอดสเปคโตริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทด และแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสเปคโตริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเปคโตริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสเปคโตริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโคล์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะวาอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเปคโตริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.28 การสเปคโตริงโดยดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริง

2.11.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปีดเตอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปีดเตอริง 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

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

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

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

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

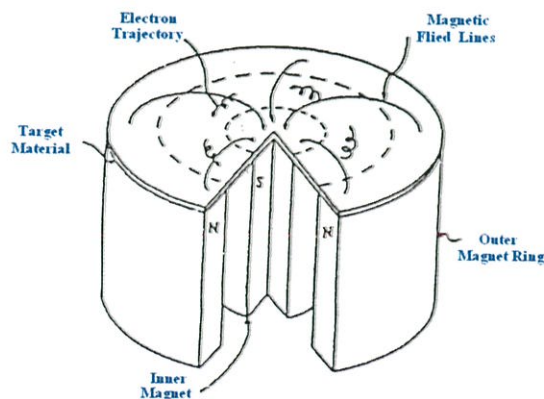
$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.89)$$

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) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื่อนลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในรูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้น โดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

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

จะได้ว่า

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

แทนค่า (2.91) ลงใน (2.87) จะได้

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

โดยจะไดรัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

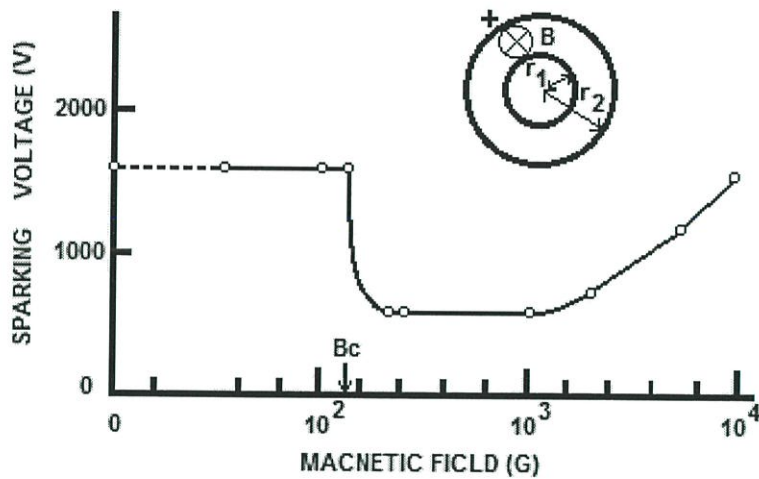
$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{v}}{B} \quad (2.94)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสรจ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสรจเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.95

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

โดย	v_c	คือ	ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
	L	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.11.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสราร์จ



รูปที่ 2.30 ความต่างศักย์ของการดิสราร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.30 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสราร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสราร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสราร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

2.12 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง (ภารุจ, 2539; ธนุสิทธิ์, 2538; จิตินัย, 2556)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปีดเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.12.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกใช้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ดังต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม
2. เป็นวัสดุที่มีการยึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป่าให้มีค่าน้อยลง

2.12.2 การให้ความเย็นที่เป่า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปีดเตอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป่ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป่าและความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวเป่าในขณะที่เกิดการสปีดเตอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป่าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป่า และ โอริง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป่าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังในการร้าวซึมออกมาของน้ำ

2.12.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะผิวเป่า

บริเวณของเป่าจะถูกล้อมรอบด้วยกำบังบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า กราวด์ชีลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชีลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปีดเตอริงเกิดที่เป่าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป่าและตัวยึดเป่าอาจจะถูกสปีดเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป่าและกราวด์ชีลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมืด

(dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโก่งตัวของดิซชาร์จ์ในพื้นที่ว่างนี้ ในบางโอกาสพบว่าตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งสกปรกชิ้นเล็กจะทำให้เกิดการโก่งตัวของดิซชาร์จ์เฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิซชาร์จ์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นขอบที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆ ต้องกำจัดออกไปเสียก่อน และเนื่องจากความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างเป้าและกรวดซ์ลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบ และภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมืดจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิซชาร์จ์ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.96

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_c) แสดงโดย

$$P_c/P \cong [1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \quad (2.96)$$

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

โดย
จะได้ว่า

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

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

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

และความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิซชาร์จ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมืดกับความต่างศักย์ของการดิซชาร์จ์ขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมืดและความต่างศักย์ของการดิซชาร์จ์มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 2.98

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

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

ความหนาของบริเวณมีด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไฮลด์ ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์

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

เมื่อการขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมีดถูกแทนลงในสมการ (2.97) จะได้ความสัมพันธ์

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

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์
 n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

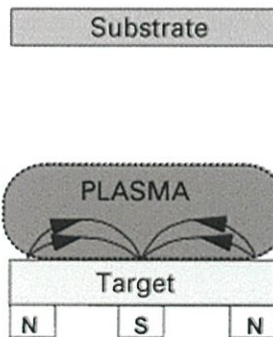
2.12.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบ 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)

ในกรณีดีซาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออน

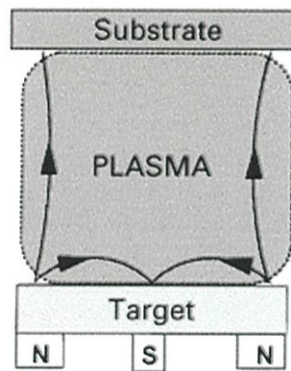
บวกรังที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะไม่ถูกกักโดยสนามแม่เหล็กและจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ขั้วคาโทด และเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าทำให้เกิดการสปัตเตอร์ของเป้าและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการคิซซาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า และจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น พิล์มบางที่ปลุกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลุก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำ เป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

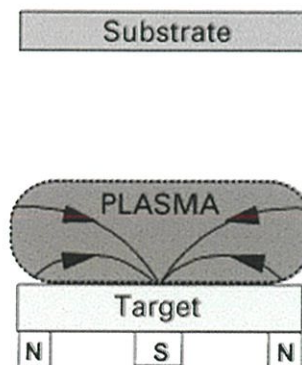
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ จึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไอออนมีค่าสูงโดยได้รับจากพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยวิน โควส์และชาวัวร์ด์ และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมามีที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณี

แมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า และอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตามอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอน โวลต์ เป็นที่พึงปรารถนา โดยปราศจากการนำไปสู่ความเค้นที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

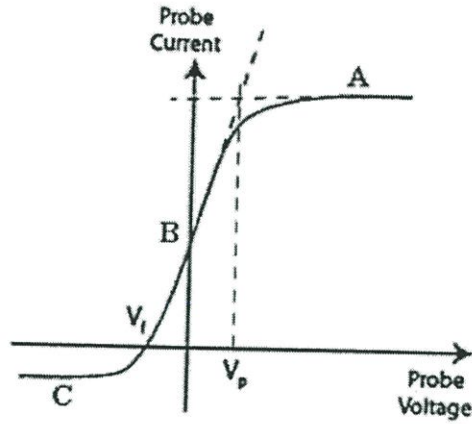


รูปที่ 2.32 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ เป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2



รูป 2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาชิท อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} eAn_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.101)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัว (I_{se})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_e = eAn_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.102)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอย (V_p) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัดและจะสร้างพลาสมาชิทขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านขอบชิทจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณกระแสไอออนอิมิตัว (I_{is}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออนจะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.103)$$

2.13.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.100) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (2.104)$$

หรือจะหาค่า จากการรวมสมการที่ (2.99) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.100) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

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

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

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

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I = 0$)

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

จะได้ว่า

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

หน่วยของ kT_e/e คือโวลต์ ดังนั้น สามารถหา kT_e 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

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

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

2.13.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์ $r = mv_{\perp} / eB$ เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลรวมของสนามแม่เหล็กสามารถละลายได้ในกรณีที่ $r \gg a$ เมื่อ a คือ ขนาดของหัววัด

เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะว่าโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิมิต์แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ ที่ถูกวัด โดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ที่วัด โดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์จะได้รับผลกระทบน้อยมาก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ได้แก่ศึกษาโครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2551; งามนิตย์, 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
- ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

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

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

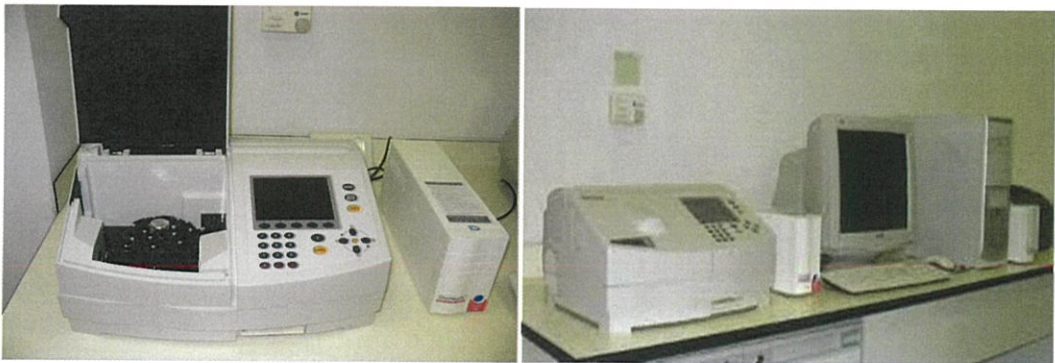
ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบาง โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน Cu K_α มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

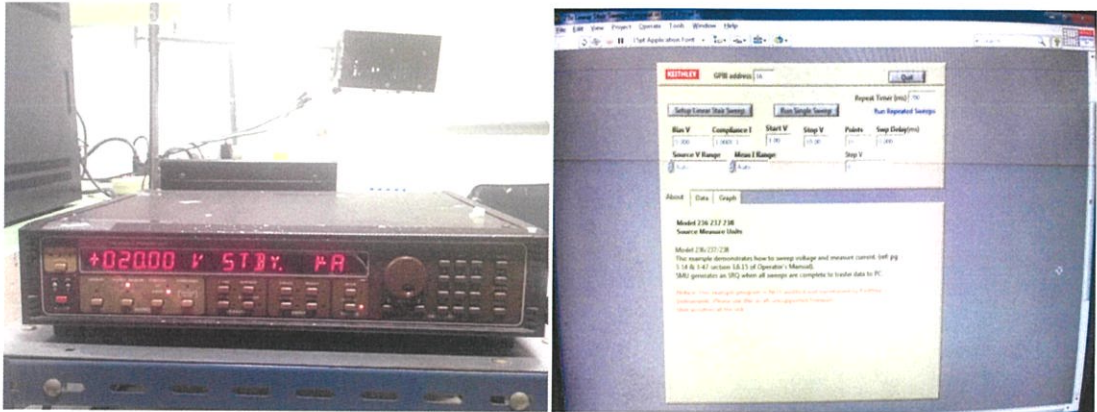
ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation (Helelion) ความยาวคลื่นแสงในช่วง 200-1,000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (Helelion)

3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

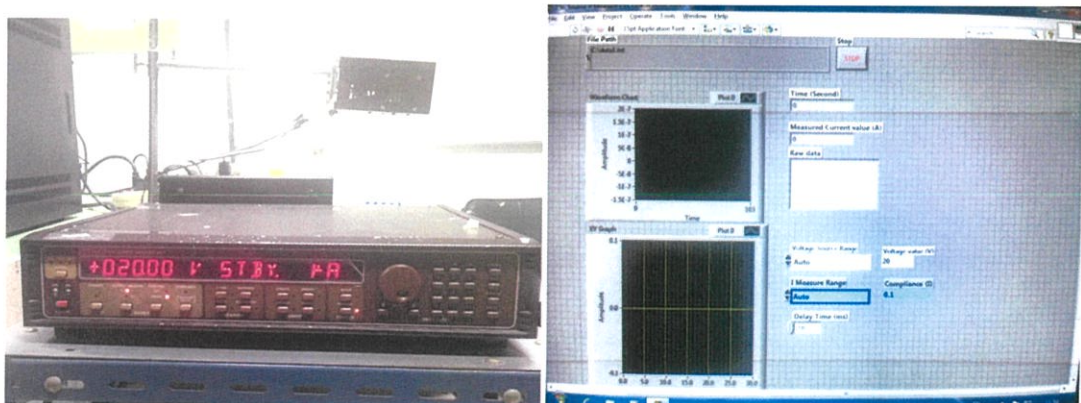
- อิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น

3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

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



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 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

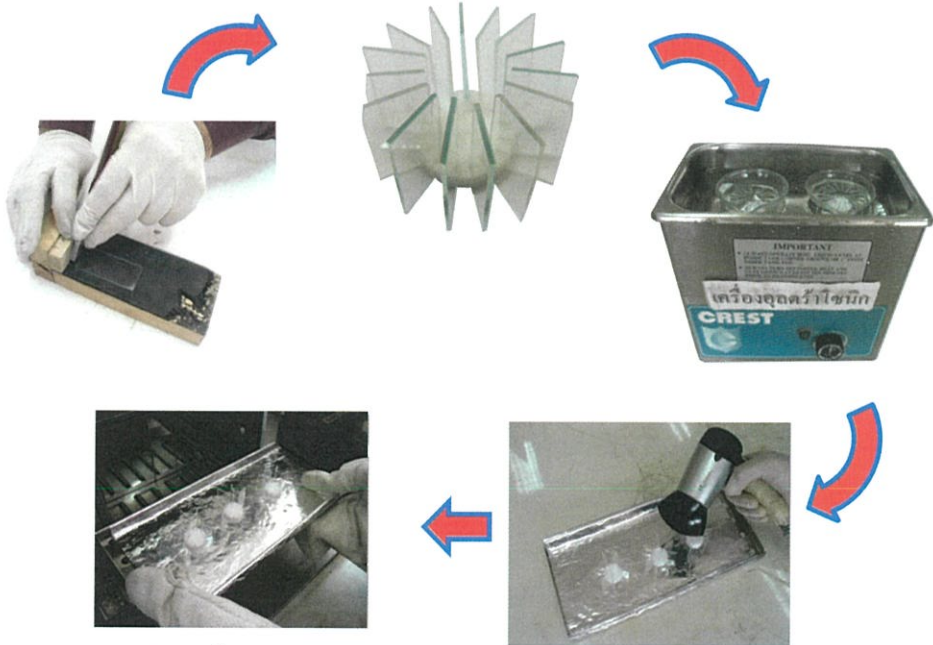


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

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

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

1. นำแผ่นกระจกใสไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างกระจกใสด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างกระจกใสด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกใสในน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกใสไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

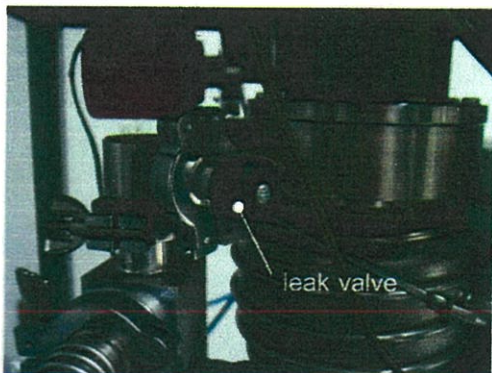


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็น คิงสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำรอเอาไว้ แต่ยังไม่ต้องคิงสวิตช์ปั๊มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบไปเลย) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกรวดซิลด์ (โลหะทรงกระบอกมีรูตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกรวดซิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชัตเตอร์และกราน์ซิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ยกผ่านห้องสุญญากาศปิดเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมกับหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



ภาพแสดง leak valve



ภาพแสดงคันบังคัป shutter ที่อยู่ภายใน

8. ปิดชัตเตอร์ (คันบังคัปอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป่าเอาไว้ก่อน

9. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อเปิดการทำงานมาตรฐานวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (Rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (Roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ (*roughing valve) เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน)
13. ปิดวาล์วหยาบและเปิดวาล์วหลังโดยปรับตำแหน่งวาล์วไปที่ backing เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศผ่านทางปั๊มไอฟุ้งกระจาย เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นเพื่อระบายความร้อน จากนั้น โยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ใช้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)

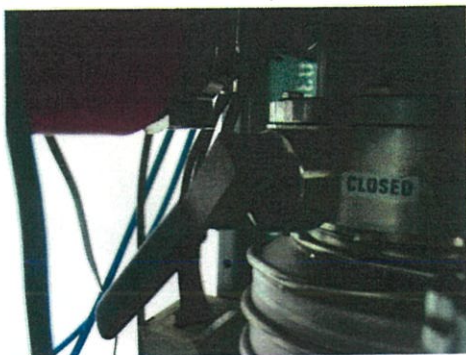


ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรฐานวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)

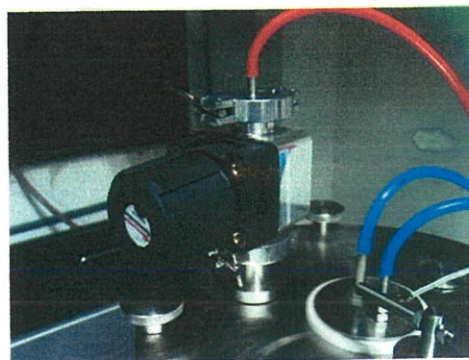


ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

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



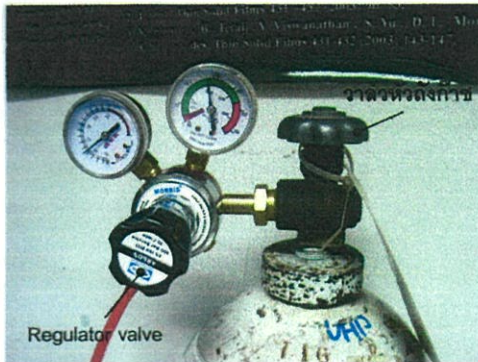
ภาพแสดง butterfly valve ในตำแหน่ง open



ภาพแสดง speedy valve

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

- ปิดสปีดิวาล์วเพื่อสูบก๊าซภายในอีกครั้งจนความดันลดลงถึง 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลักซ์ด้วยอาร์กอน เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะประมาณได้ว่าภายในห้องสุญญากาศมีเพียงโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา
- เปิดสปีดิวาล์วเพื่อป้อนก๊าซอาร์กอนอีกครั้งโดยควบคุมการป้อนก๊าซผ่านวาล์วรูเข็มจนความดันภายในมีค่าประมาณ 2×10^{-3} ทอร์



ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

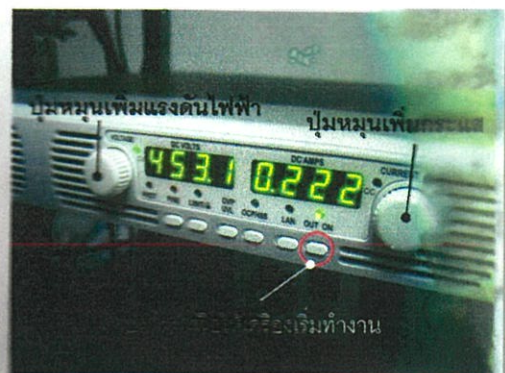


ภาพแสดง power supply

- เปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
- กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม ON เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ อยู่ทางซ้ายมือสุดของเครื่อง)
- ในเบื้องต้นหมุนปุ่มเพิ่มกระแสไปก่อน เมื่อเพิ่มไปถึงปริมาณหนึ่ง เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะสลับไปสู่วโหมคเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเองโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะสังเกตได้จากถึงแม้ว่าจะหมุนเพิ่มกระแสเข้าไปแต่จะไม่มีกระแสเพิ่มขึ้นอีก นั่นคือเครื่องสลับเข้าสู่โหมคต้องเพิ่มแรงดัน จึงต้องเปลี่ยนไปหมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแทน



ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply



ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

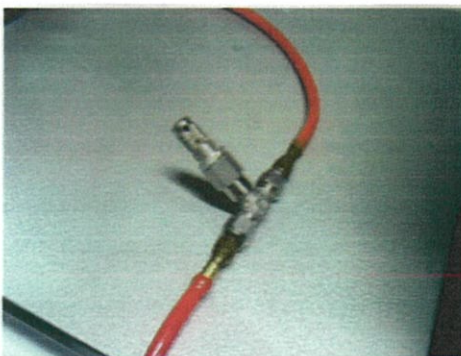
20. หลังจากมาใช้ปั๊มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้ว ให้หมุนเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ซ้ำๆ จนกระทั่งพลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีน้ำเงินอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่ เพราะเป็นช่วงที่พลาสมาไม่เสถียรยังไม่เหมาะสม



ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางลงบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบลงบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีสีออกไปทางสีดำ มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้ก่อน เมื่อพลาสมาเริ่มมีพลังงานและสถานะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออกแล้วทำการเคลือบฟิล์มต่อไป

21. เมื่อพลาสมาติดให้ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตออร์ริงยี่ห้อของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับเป้าที่เป็นทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่อยู่ในระดับ 3.6×10^{-3} ทอร์ หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรอง เนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนกระเจิงออกไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสนั้นแปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย

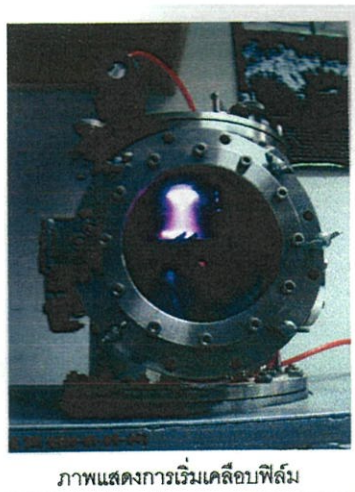


ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนภายใน chamber แบบละเอียด เมื่อเริ่มเคลือบฟิล์มจะปรับความดันผ่านวาล์วตัวนี้เพียงวาล์วเดียวเท่านั้น



ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

22. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์จริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาด เรียกขั้นตอนนี้ว่า การเตรียมตัวสปัตเตอร์จริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ 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 และความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่านวาล์วรูเข็มเท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามเวลาที่ต้องการแล้ว ให้หมุนชัตเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนลดแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสีเขียวบนแผงหน้าของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิทช์สีดํา
24. หยุดการป้อนก๊าซอาร์กอน โดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูลเตอร์วาล์ว (กดพร้อมกับหมุนเข้า คือ เปิด หมุนออก คือ ปิด) และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
25. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าหาตัว)
26. โยกสวิทช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
27. ปิดสวิทช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรการวัดความดันทั้งหมด

28. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นหมุนน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมดเหลือไว้แต่น็อตตัวที่เป็นมือจับ (ที่ต้องถอดออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนเปิดลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ แล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะดึงออกมาเอง (เสียงดังปึก)
29. เปิดฝาหน้าออก นำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ (ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อยสำหรับการทำงานครั้งต่อไป
30. หลังจากสับสวิทช์ (DIFFSTAK ON) ลงแล้ว 20 นาที จึงปิดปั๊ม โรตารี

3.2.3 วิธีการแอนนีย์ล (งามนิตย์และคณะ, 2543; จูตินัย, 2551)

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

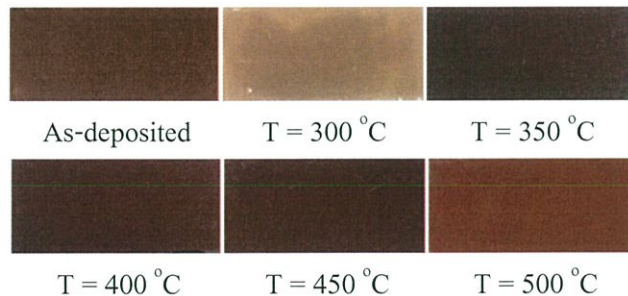
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งจุลภาค และเชิงมหภาค อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและศึกษาสมบัติทางแสงด้วย

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

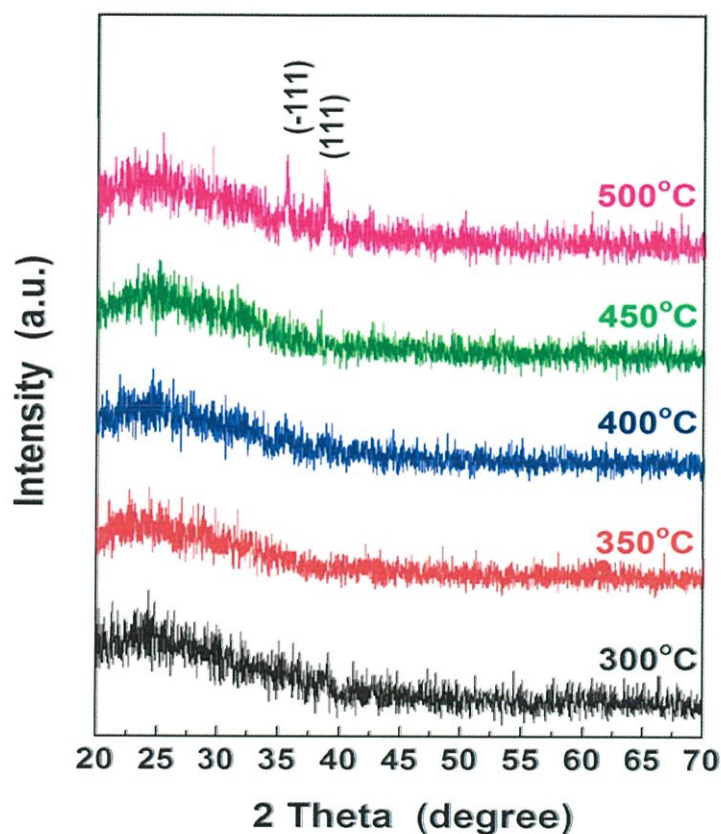
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงจะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

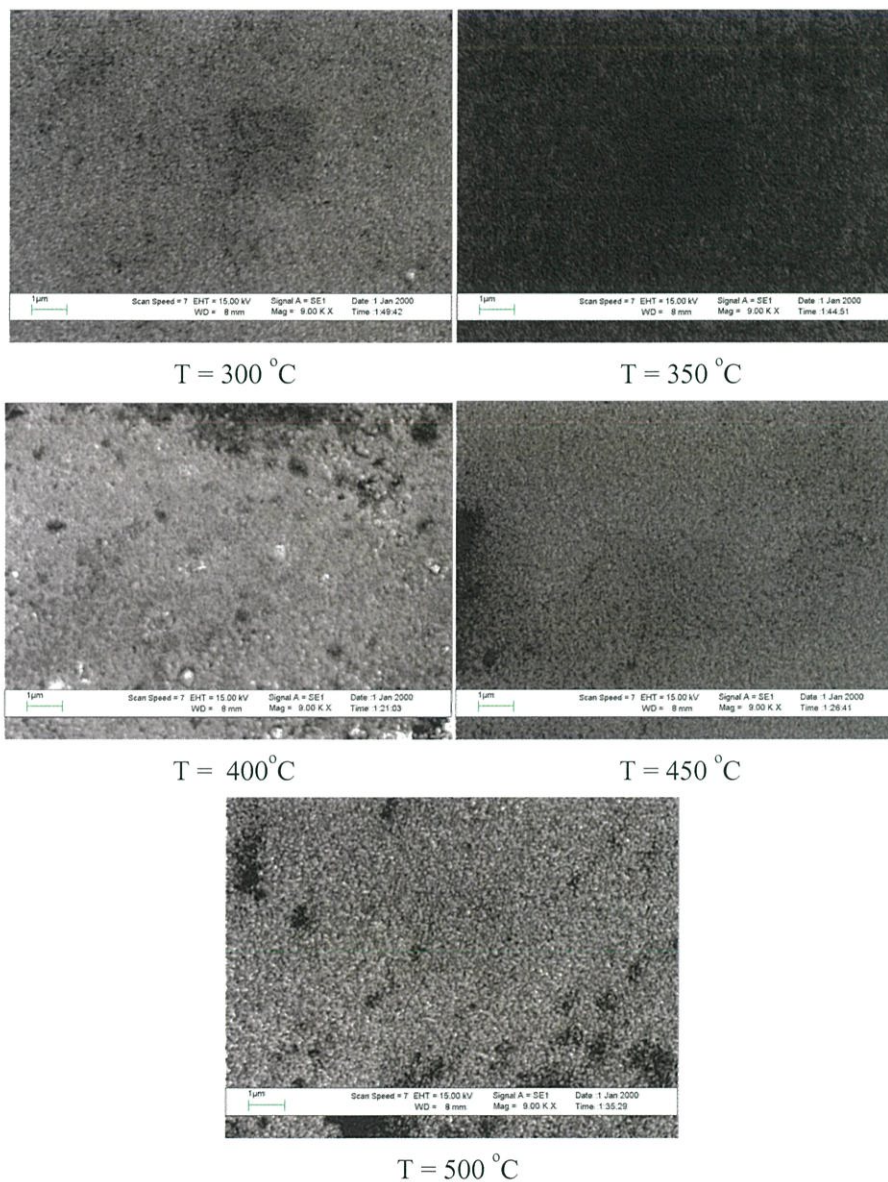
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu จะแสดงดังรูปที่ 4.2 จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เกิดกระบวนการเลี้ยวเบนคือ (-111) และ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกเมื่อทำการแอนนัลฟิล์มโลหะ Cu ในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450 ไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าฟิล์มบางเป็นอะมอร์ฟัส

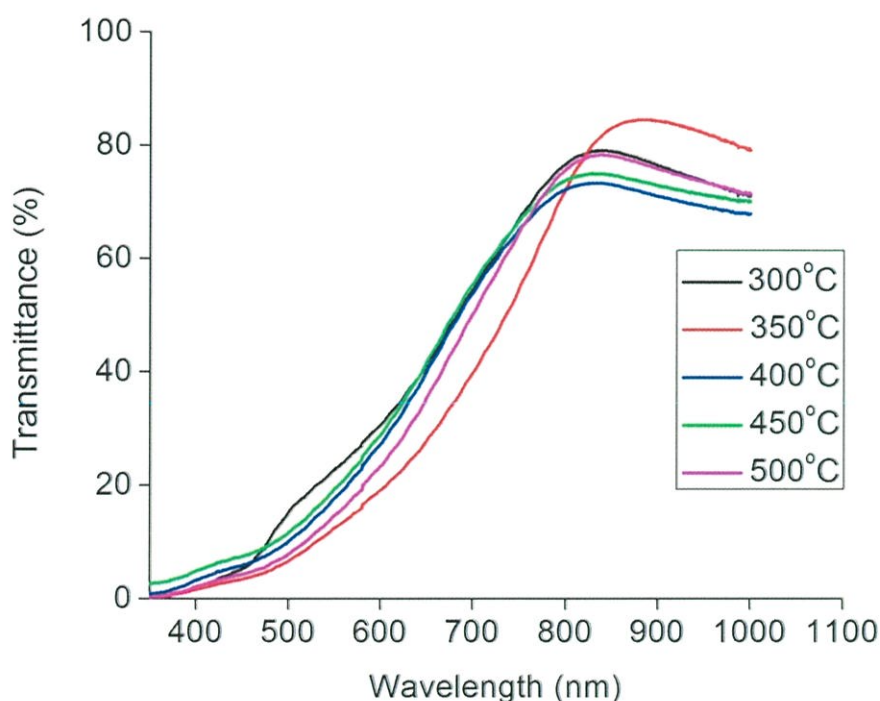
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

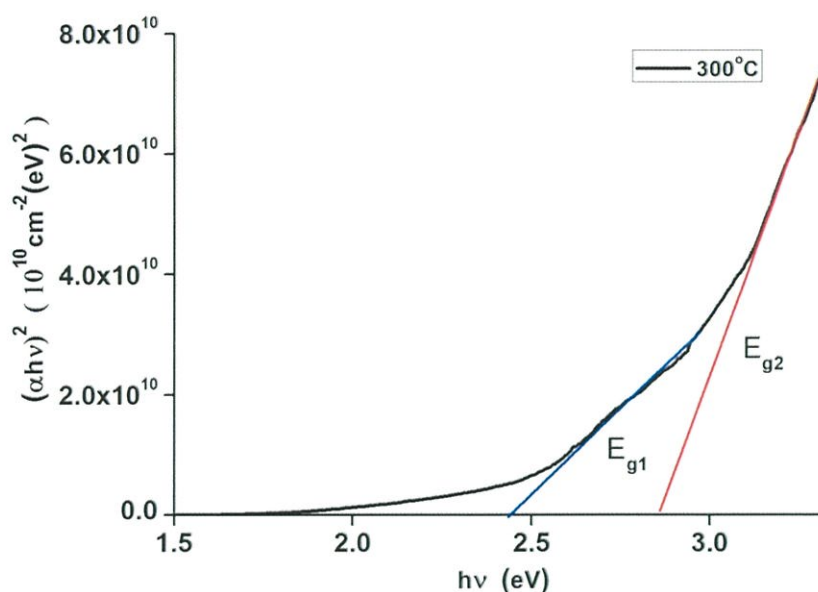
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังปรากฏในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อทำการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะเห็นว่าบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็ก ก่อนข้างสม่ำเสมอ มีรูพรุนบ้าง แต่ที่แอนนัลอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางมีเกรนขนาดใหญ่กว่าการแอนนัลที่อุณหภูมิต่ำอื่นๆ

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

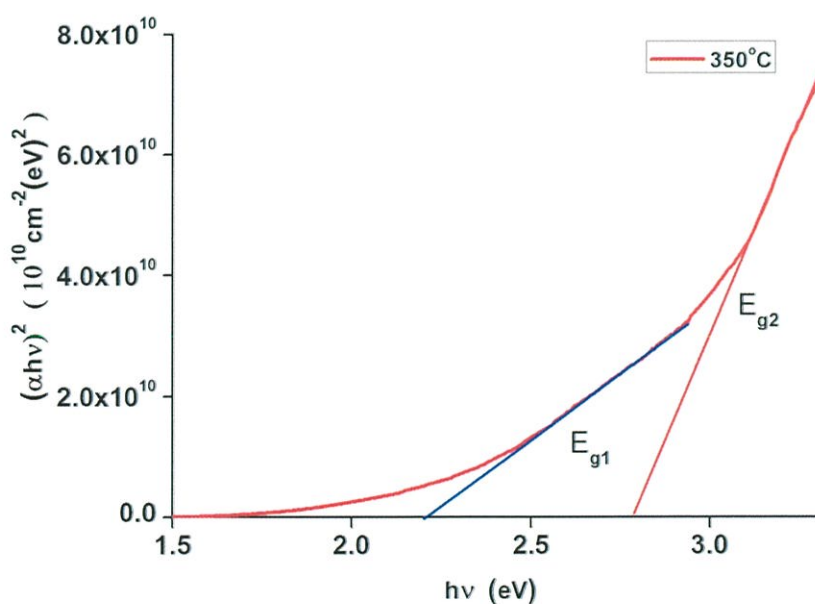


รูปที่ 4.4 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

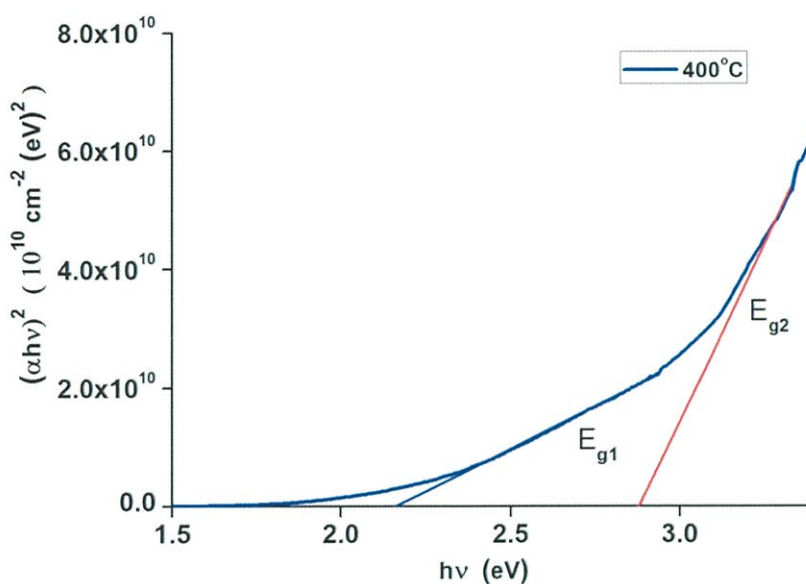
จากรูปที่ 4.4 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ขอบการดูดกลืนแสงจะเลื่อนจาก 438 นาโนเมตร ไปเป็น 444 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มจาก 300 องศาเซลเซียส ไปเป็น 400 องศาเซลเซียส ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงอยู่ในช่วง 75-85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่นแสง 850 นาโนเมตร จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานดังปรากฏในรูปที่ 4.5-4.9



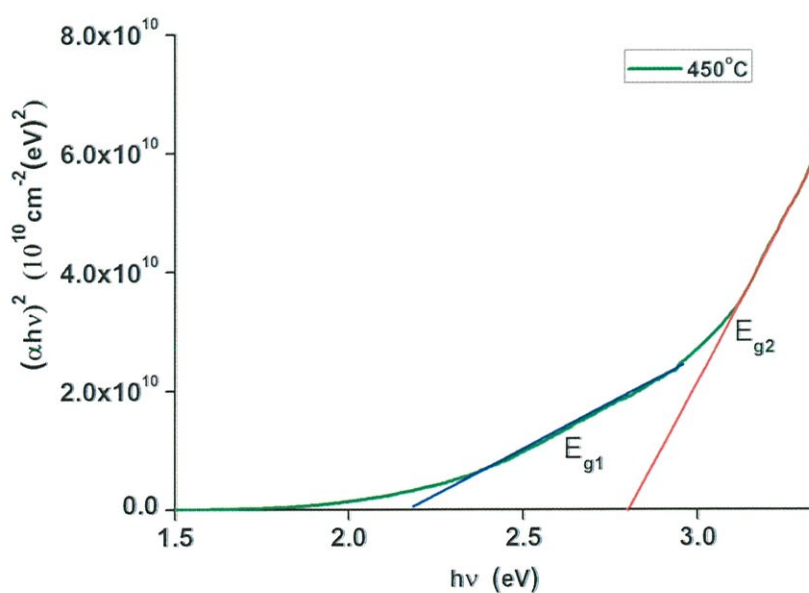
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



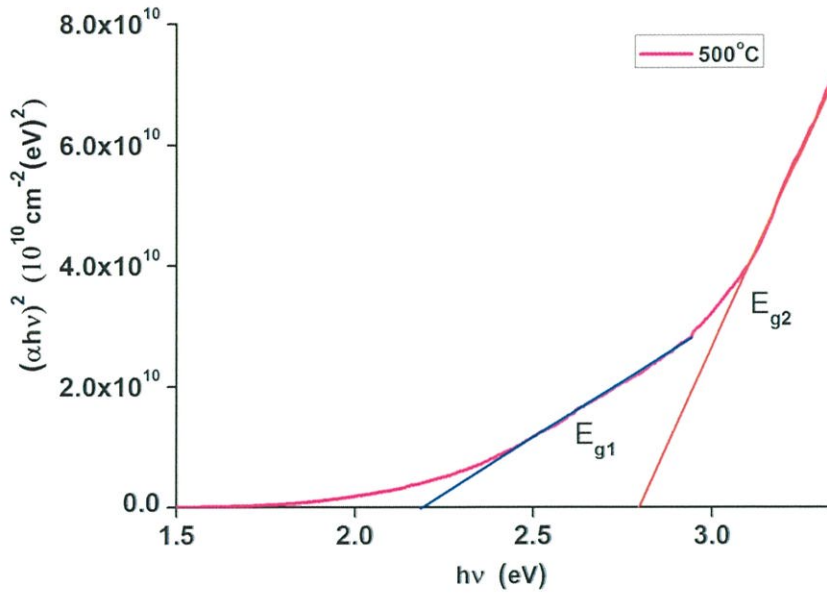
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



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



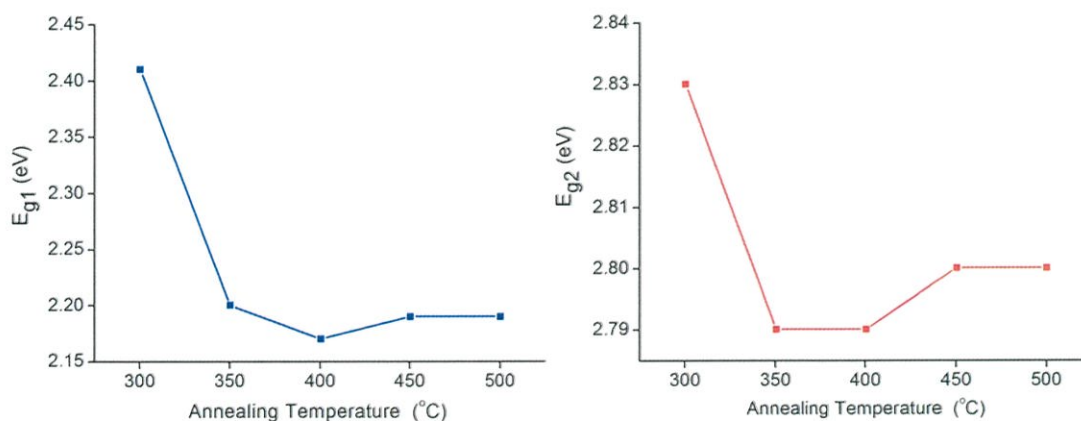
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



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

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

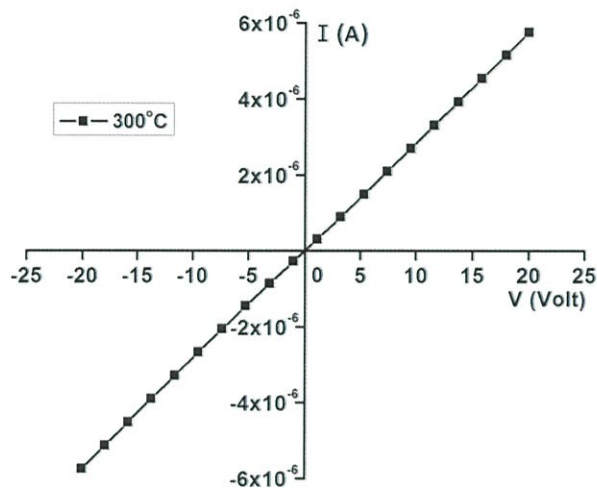
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Energy Gap (eV)	
	E_{g1}	E_{g2}
300	2.41	2.83
350	2.20	2.79
400	2.17	2.79
450	2.19	2.80
500	2.19	2.80



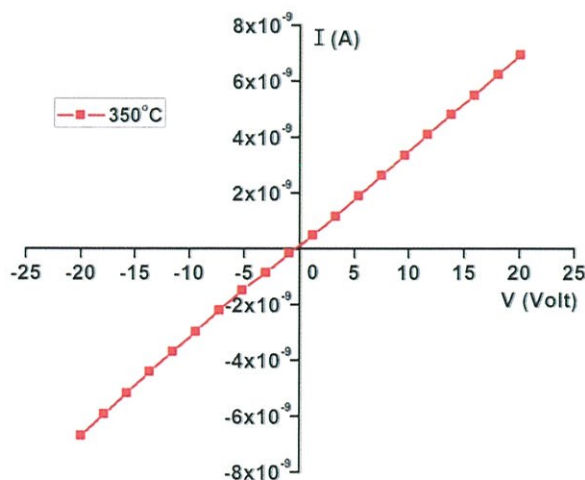
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_{g1}) และ (E_{g2}) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่เตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

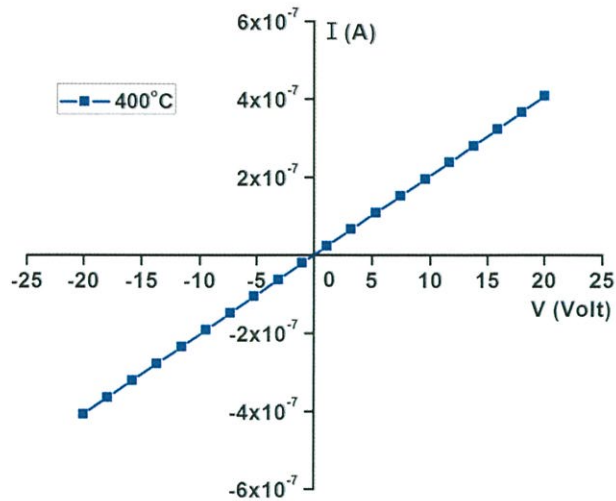
4.3.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



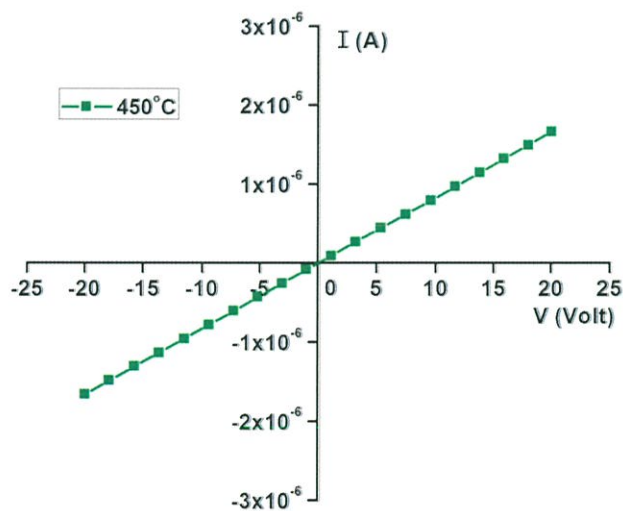
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



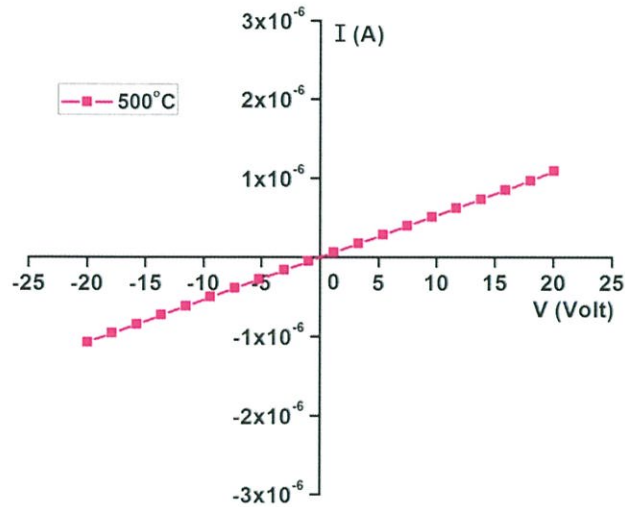
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



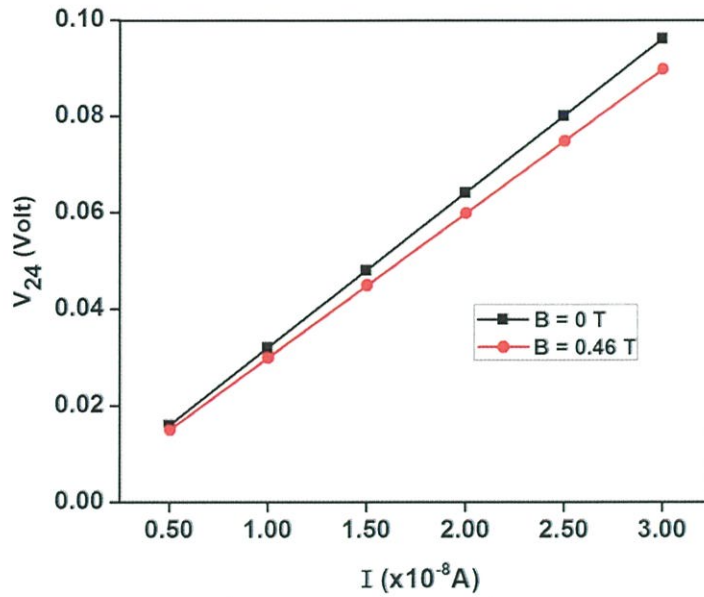
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

จากรูปที่ 4.11-4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงจะได้อ่านค่าความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทานแผ่น (Sheet Resistance: R_{sh}) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

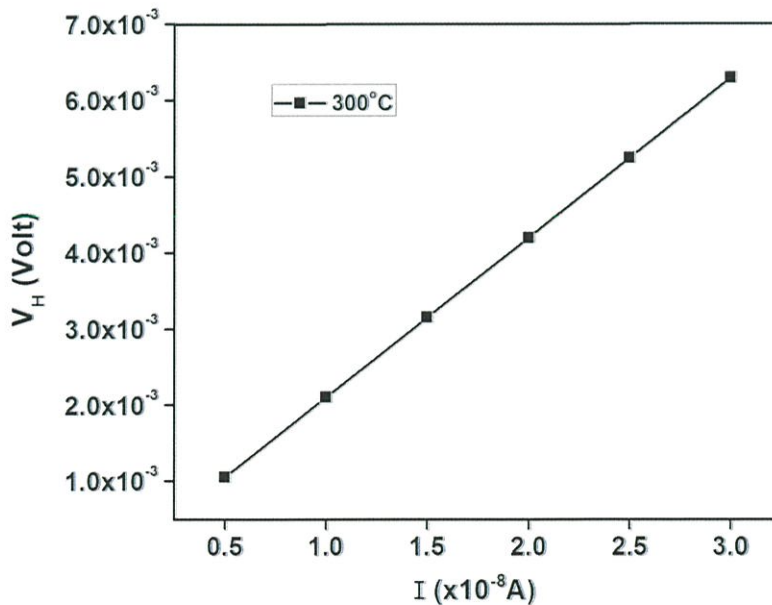
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการออกซิเดชัน เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงโดยความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางหน่วย (Ω/sq)

Annealing Temperature (°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

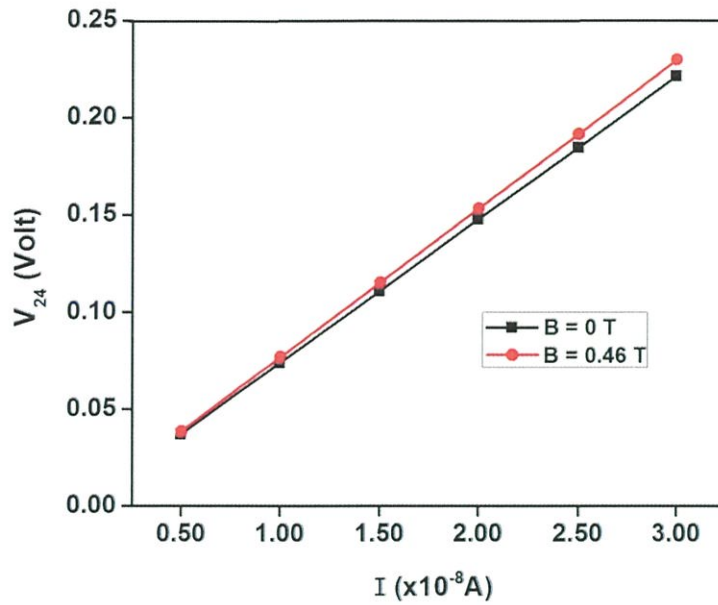
4.3.2 กราฟและผลการศึกษารากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



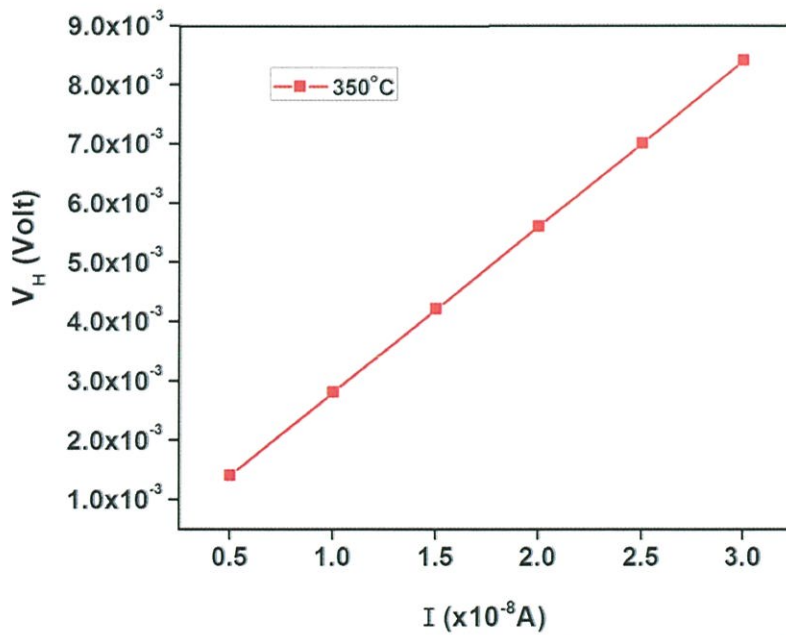
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



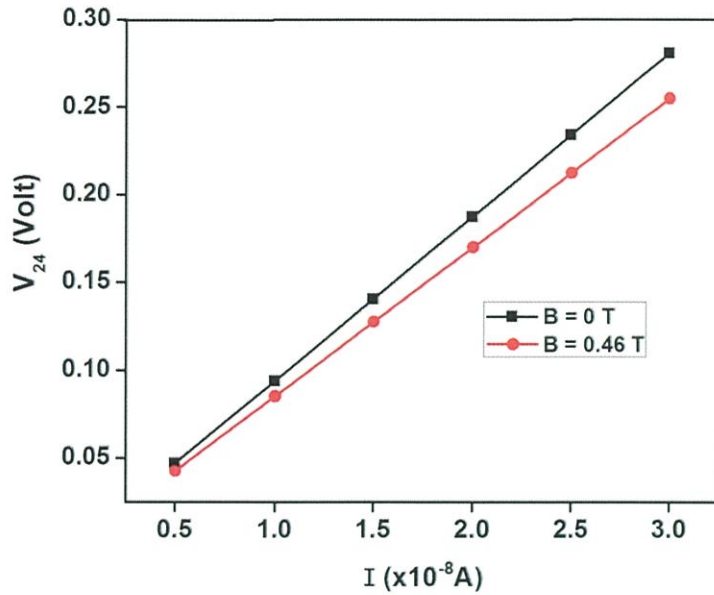
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



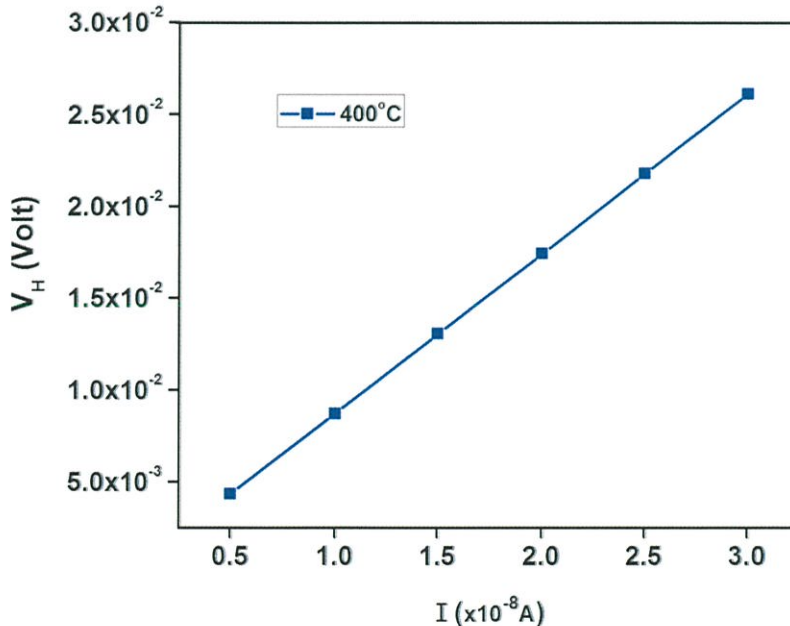
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



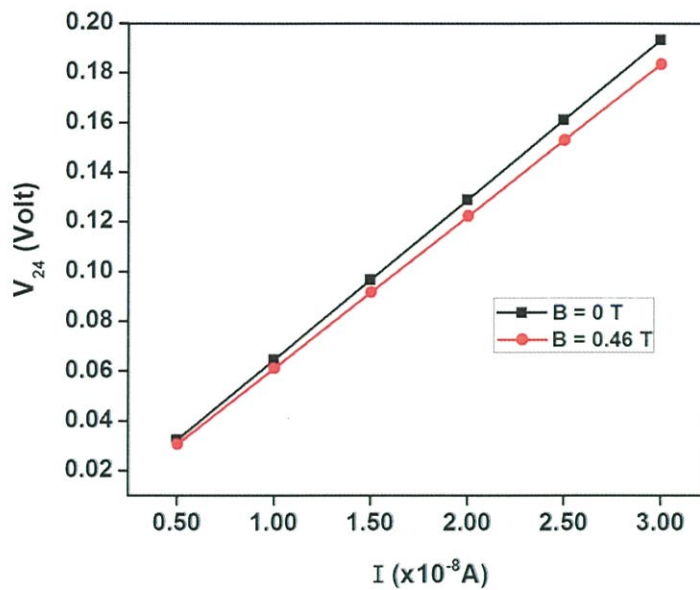
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



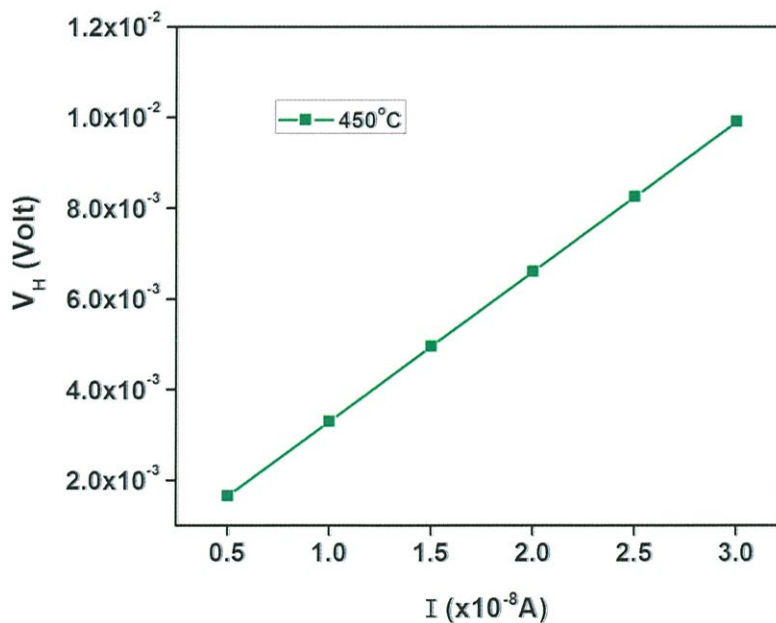
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



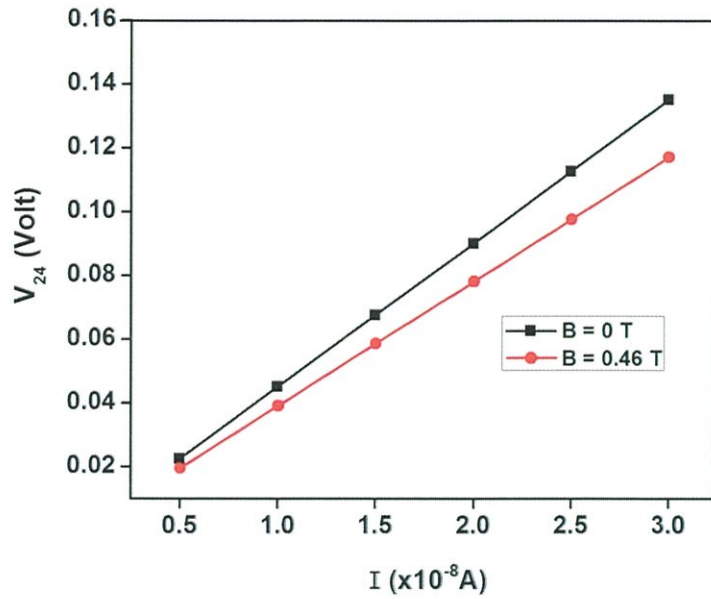
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



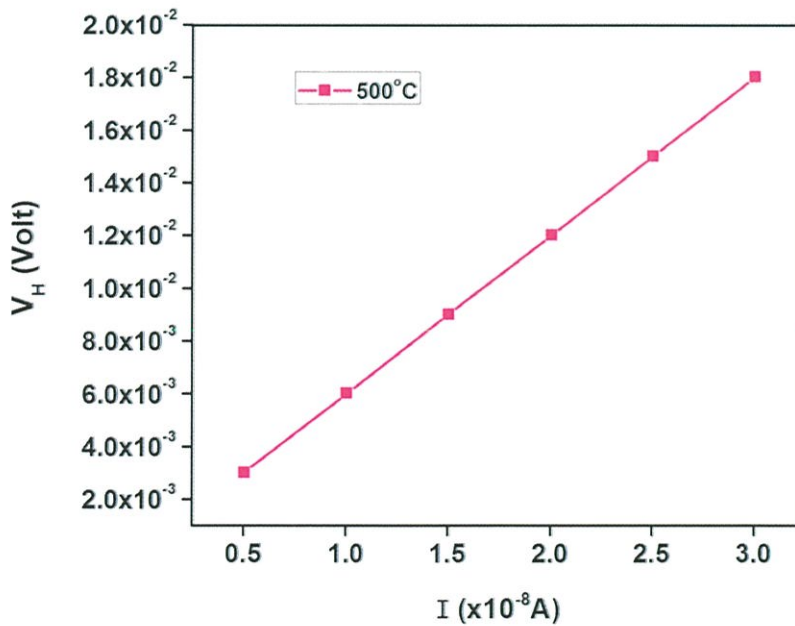
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



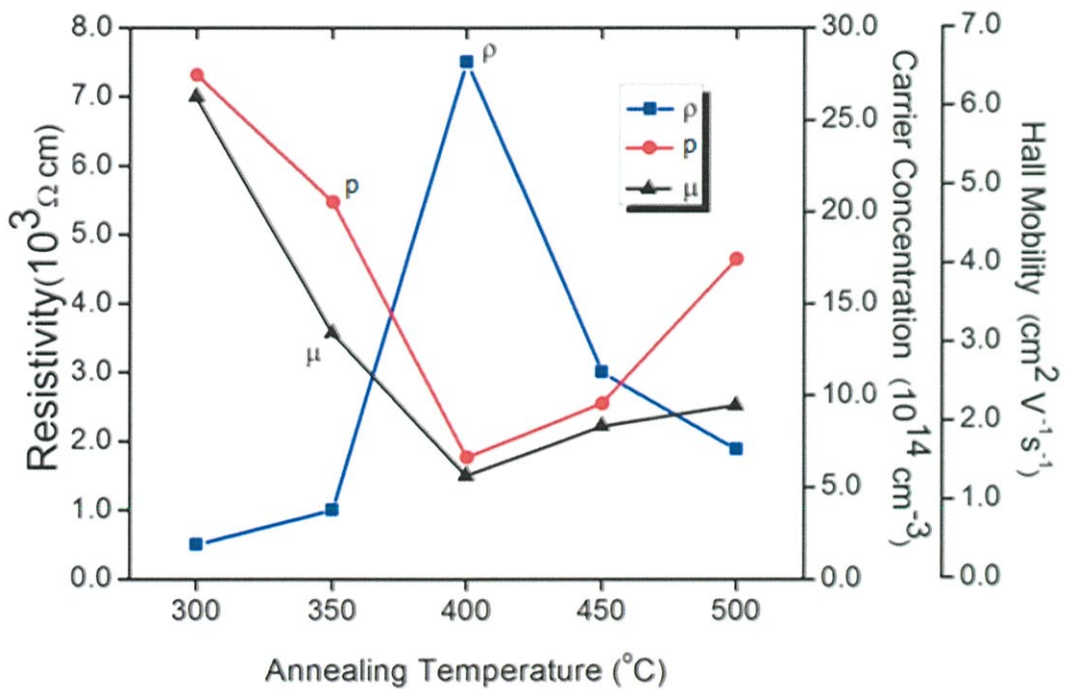
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

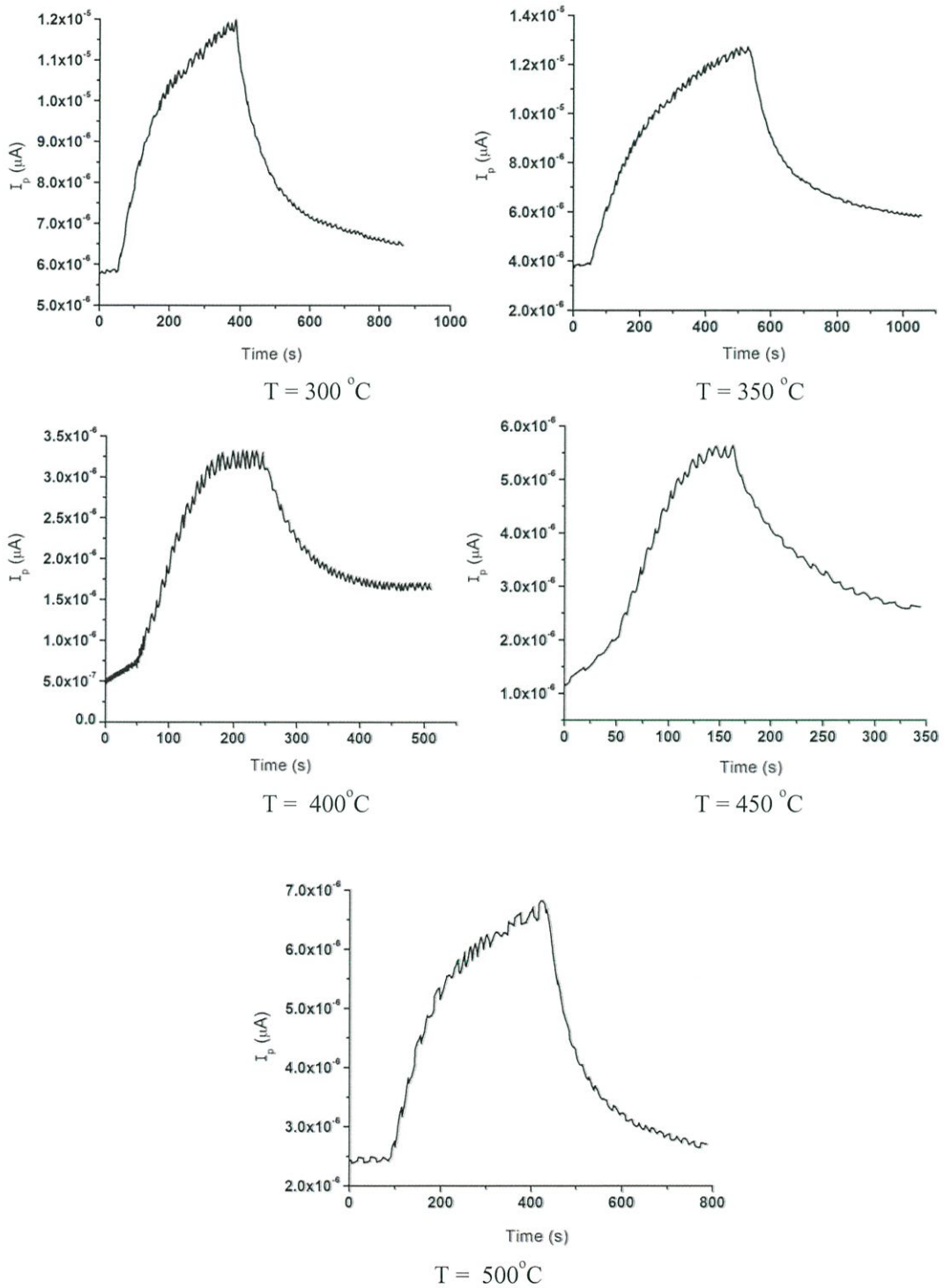
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

Annealing Temperature (°C)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Constant (R_H)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)
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

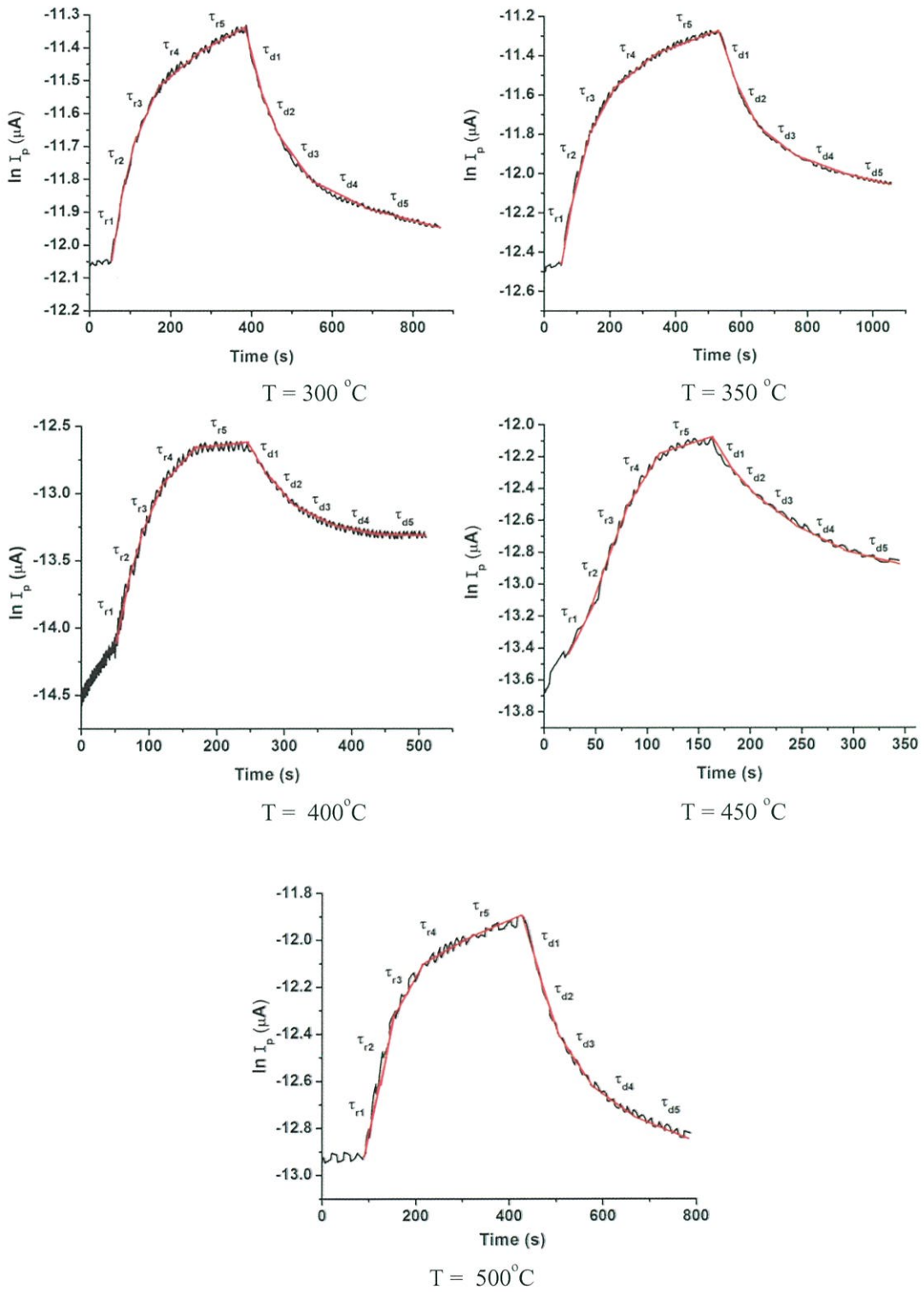


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

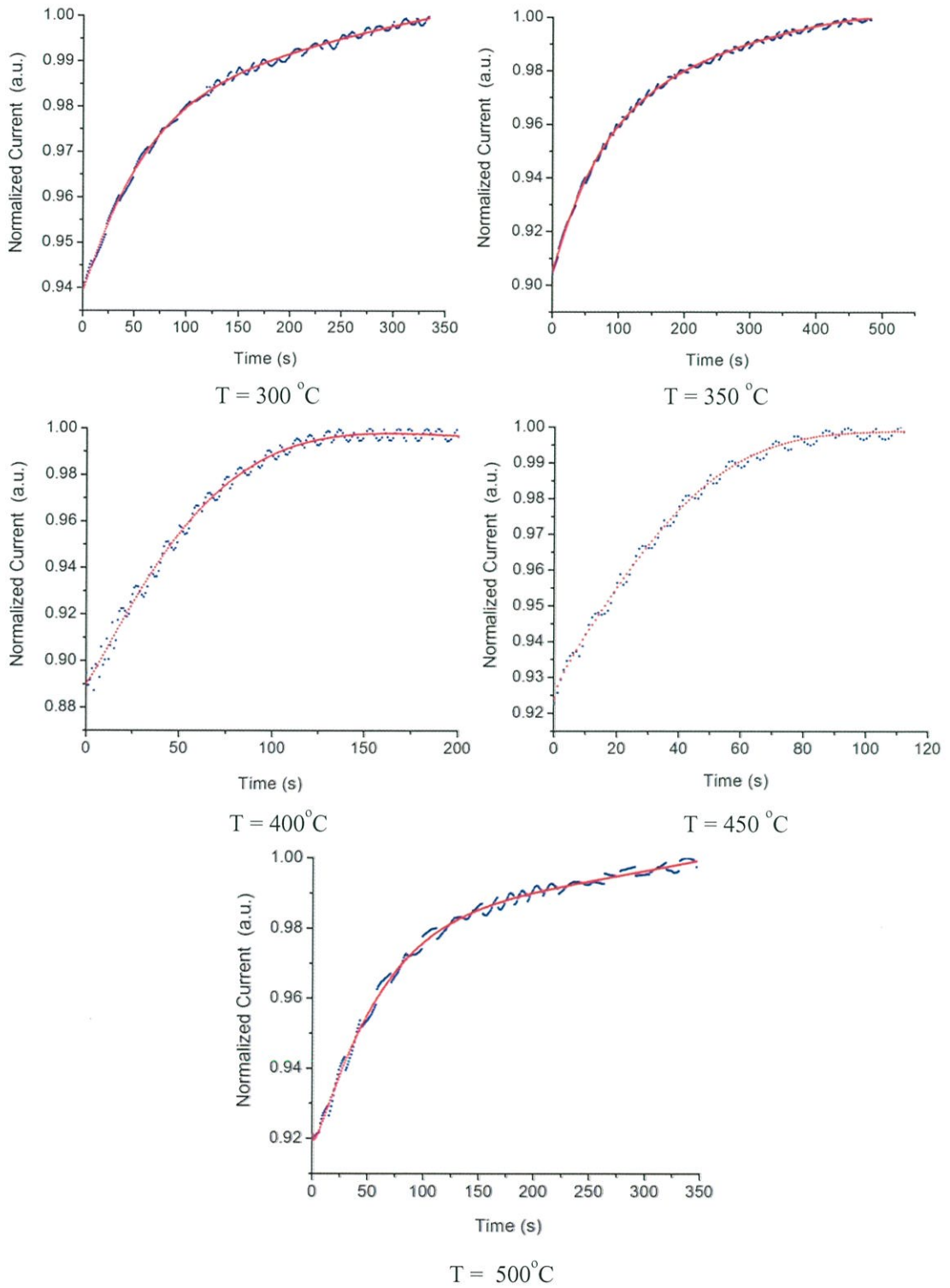
4.3.3 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



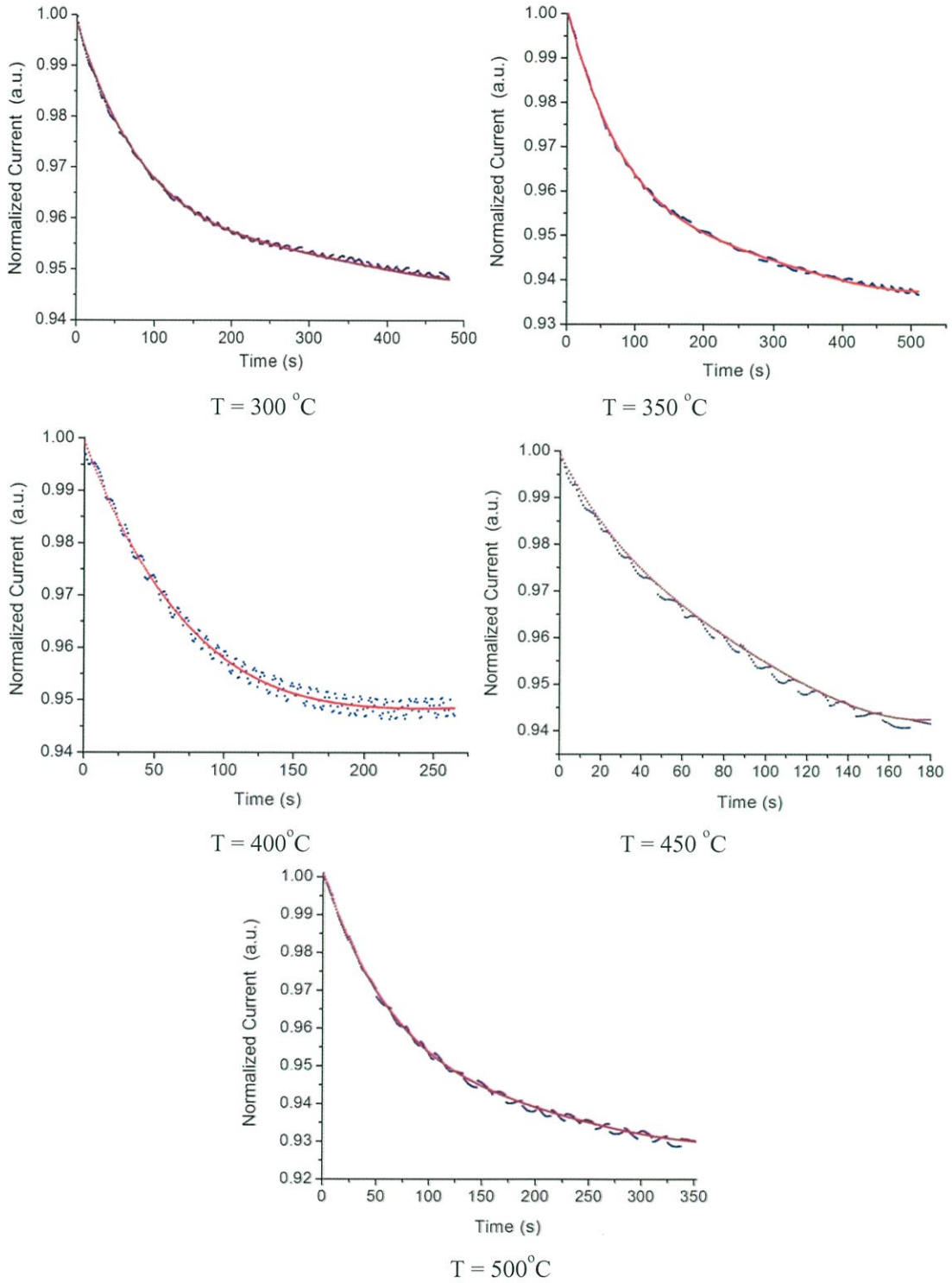
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตโนสเกลลอกลาทิมขรรษชาติ ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยา ออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



รูปที่ 4.29 การพืตกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



รูปที่ 4.30 การพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

Annealing Temperature (°C)	Decay Time (s)					Rise Time (s)				
300	$A_1 = 0.7936$ $\tau_{d1} = 204.92$	$A_2 = -4.085$ $\tau_{d2} = 406.5$	$A_3 = 13.54$ $\tau_{d3} = 980.39$	$A_4 = -20.49$ $\tau_{d4} = 2478.55$	$A_5 = 11.24$ $\tau_{d5} = 3045.85$ $\beta = 0.3064$	$A_1 = 0.568$ $\tau_{d1} = 135.5$	$A_2 = -2.389$ $\tau_{d2} = 254.45$	$A_3 = 5.759$ $\tau_{d3} = 531.91$	$A_4 = -5.177$ $\tau_{d4} = 1062.18$	$A_5 = -0.00347$ $\tau_{d5} = 1558.25$ $\beta = 0.1831$
350	$A_1 = 0.8785$ $\tau_{d1} = 186.57$	$A_2 = -4.223$ $\tau_{d2} = 344.83$	$A_3 = 10.88$ $\tau_{d3} = 699.3$	$A_4 = -9.716$ $\tau_{d4} = 1306.43$	$A_5 = 3.181$ $\tau_{d5} = 2580.87$ $\beta = 0.01509$	$A_1 = 0.202$ $\tau_{d1} = 104.82$	$A_2 = -0.4991$ $\tau_{d2} = 204.92$	$A_3 = 1.281$ $\tau_{d3} = 476.19$	$A_4 = -1.108$ $\tau_{d4} = 925.93$	$A_5 = -0.06744$ $\tau_{d5} = 2035.52$ $\beta = 0.802$
400	$A_1 = 0.2305$ $\tau_{d1} = 135.87$	$A_2 = -0.03207$ $\tau_{d2} = 197.63$	$A_3 = -0.5493$ $\tau_{d3} = 361.01$	$A_4 = 0.6142$ $\tau_{d4} = 877.19$	$A_5 = 0.736$ $\tau_{d5} = 65149.13$ $\beta = 0.7978$	$A_1 = -0.3079$ $\tau_{d1} = 40.32$	$A_2 = 0.7765$ $\tau_{d2} = 60.98$	$A_3 = -0.6377$ $\tau_{d3} = 136.98$	$A_4 = 0.8398$ $\tau_{d4} = 574.71$	$A_5 = -2.868$ $\tau_{d5} = 8378.16$ $\beta = 0.9177$
450	$A_1 = 9.116$ $\tau_{d1} = 126.26$	$A_2 = -71.36$ $\tau_{d2} = 193.42$	$A_3 = 96.84$ $\tau_{d3} = 249.38$	$A_4 = -39.92$ $\tau_{d4} = 442.48$	$A_5 = 6.323$ $\tau_{d5} = 1003.36$ $\beta = -0.08074$	$A_1 = -2.416$ $\tau_{d1} = 44.68$	$A_2 = 7.404$ $\tau_{d2} = 61.24$	$A_3 = -7.591$ $\tau_{d3} = 92.25$	$A_4 = 3.203$ $\tau_{d4} = 207.46$	$A_5 = 0.4326$ $\tau_{d5} = 1362.68$ $\beta = 0.6647$
500	$A_1 = 0.5608$ $\tau_{d1} = 120.77$	$A_2 = -1.987$ $\tau_{d2} = 208.33$	$A_3 = 4.071$ $\tau_{d3} = 414.94$	$A_4 = -3.775$ $\tau_{d4} = 884.96$	$A_5 = 2.131$ $\tau_{d5} = 1504.95$ $\beta = 0.1459$	$A_1 = 0.4195$ $\tau_{d1} = 94.61$	$A_2 = -0.6449$ $\tau_{d2} = 151.96$	$A_3 = 1.018$ $\tau_{d3} = 434.78$	$A_4 = -0.8167$ $\tau_{d4} = 1149.95$	$A_5 = -0.2512$ $\tau_{d5} = 1460.01$ $\beta = 0.6022$

ตารางที่ 4.4 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

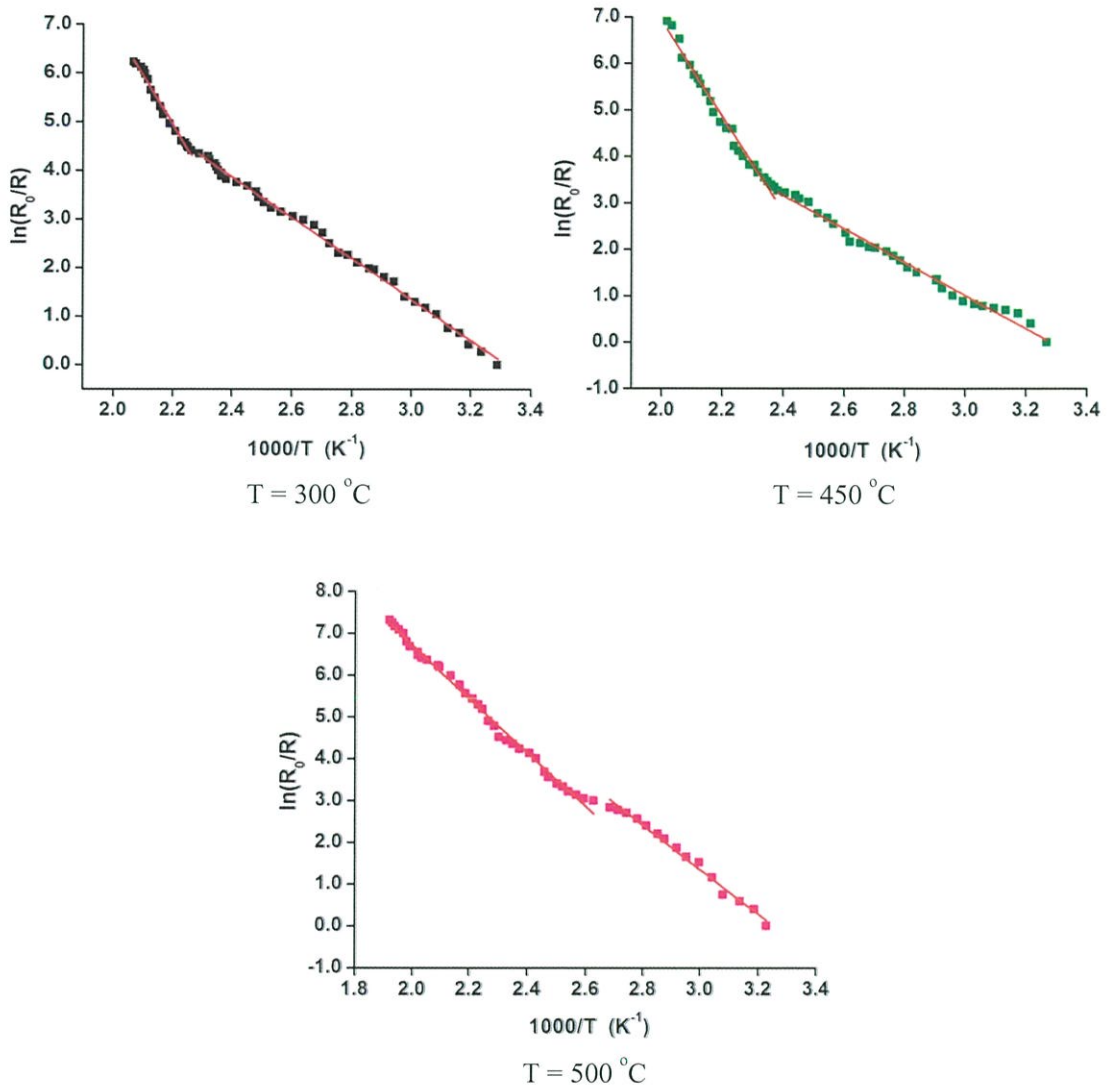
หมายเหตุ $V_a = 20$ โวลต์, $\mu = 5$ (เซนติเมตร)²/(โวลต์-วินาที), $W = 1.2$ เซนติเมตร, $L = 0.4$ เซนติเมตร

Annealing Temperature (°C)	Decay Time (s)					Rise Time (s)				
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 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

หมายเหตุ $V_a = 20$ โวลต์, $\mu = 5$ (เซนติเมตร)²/(โวลต์-วินาที), $W = 1.2$ เซนติเมตร, $L = 0.4$ เซนติเมตร

4.3.4 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu



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

ตารางที่ 4.6 พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu

Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Activate Energy (eV)	
	E_{a1}	E_{a2}
300	0.865	0.362
450	0.882	0.308
500	0.554	0.457

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ฟิล์มบางที่ได้มีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงเข้ม

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ปรากฏระนาบ (-111) และ (111) ที่อุณหภูมิแอนนیل 500 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 450 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าฟิล์มบางเป็นอะมอร์ฟัส

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์พบว่า มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบาง เกรนที่ได้มีขนาดเล็ก มีรูพรุนบ้าง แต่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางที่ได้มีเกรนขนาดใหญ่กว่าฟิล์มบางที่แอนนิลที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ พบว่า ขอบการดูดกลืนแสงจะเลื่อนจาก 438 นาโนเมตร ไปเป็น 444 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงอยู่ในช่วงประมาณ 75-85 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร

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

ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์มีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนิล 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนิลสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ทั้งความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนไปตามเวลา พบว่า พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีขึ้น กระแสโฟโตขาขึ้นและกระแสโฟโตขาลงสามารถพิศกรภาพได้ด้วยสมการมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตก่อนข้างยาวจำนวนหลายค่า เช่น กรณีฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีค่าช่วงชีวิต เท่ากับ 204.92, 406.5, 980.39, 2478.55 และ 3045.85 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกประพุดิตัวเป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{10} - 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตร เมื่ออุณหภูมิแอนนिलเพิ่มขึ้นค่าช่วงชีวิตมีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนिल 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนिलสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ค่าช่วงชีวิตจะกลับเพิ่มสูงขึ้นอีก

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 35 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศาเซลเซียส สามารถที่จะคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ พิล์มบางของทุกอุณหภูมิแอนนिल แสดงค่าพลังงานกระตุ้นจำนวน 2 ค่า พลังงานกระตุ้นนี้จะเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของกับดักพาหะที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์

5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เรียนรู้วิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
2. ได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน
3. ได้เรียนรู้การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
4. ได้เรียนรู้วิธีการวัดคุณสมบัติไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์และสามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกจะรังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอย เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอ
2. เวลาทำความสะอาดเครื่องสปีดเตอร์ริง ควรเช็ดด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. เวลานำไปเข้าคู่อบเพื่อทำการอบขึ้นสารเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงเพื่อทำให้เกิดออกไซด์ เมื่อทำการอบเสร็จแล้วควรทิ้งไว้ให้อุณหภูมิของเครื่องลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำชิ้นสารออกมา เพราะถ้าเก็บชิ้นสารที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ฟิล์มบางเกิดการหลุดร่อน
4. การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ เราควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบาง หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ . 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และจูตินัย แก้วแดง. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ชัยวิทย์ จิตยุทธการ. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: การพิมพ์, 2526.
- จูติกร จรรยาธรรม. การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- จูตินัย แก้วแดง. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2531.

- จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัชสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. ประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- จิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CdS/CdTe$, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออิมพัลชัน CdS/CuO , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- คุณิต เครื่องงาม, 2535. โพลีเมตทฟิสิกส์, กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดดูเคชั่น
- ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน, 2538. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ภารุจ บัณฑิตาวิทย์, 2539. สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- วีรชัย ถิภา, 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $CdS-ZnS$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุกฤษฎี เกิดแสง, 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ $CdTe$, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สมเกียรติ สุขเดช, 2542. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์มิกส์**, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- Bugarinovic et al., 2011 “Cuprous oxide as an active material for solar cells in Solar Cells- NewAspects and Solution” Edited by LeonoidA.Kosyachenko, Intech Open Science Open Minds.
- Cullity, B.D., 1956. Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Kittel, C., 1971. Introduction to Solid State Physics, 4th ed., New York: John, Wiley & Son.
- 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.
- 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.
- 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.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 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. 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 Cu_2O and the process of copper oxidation” Technical Report Submitter 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., Nish, Y., Miyata, T. and Nomoto, J., 2011 “High efficiency oxide solar cells with ZnO/Cu₂O heterojunction fabricated on thermally oxidized Cu₂O sheets” *Appl. Phys. Express*, 4:02301-062304.
- Muhibbullah, M., 2012 “Deposition of copper oxide thin films by chemical techniques” Thesis for Doctor of Engineering Nagoya Institute of Technology, Japan.
- 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., in *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombay, New York, 1975.
- Schroder D.K. “Semiconductor Material and Device Characterization” John Wiley & Sons. Inc New York, 1975.
- 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., *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., pp.8-11, John Wiley & Sons Inc., New York, 1981.

ภาคผนวก

Pattern : 80-1268

Radiation = 1.540600

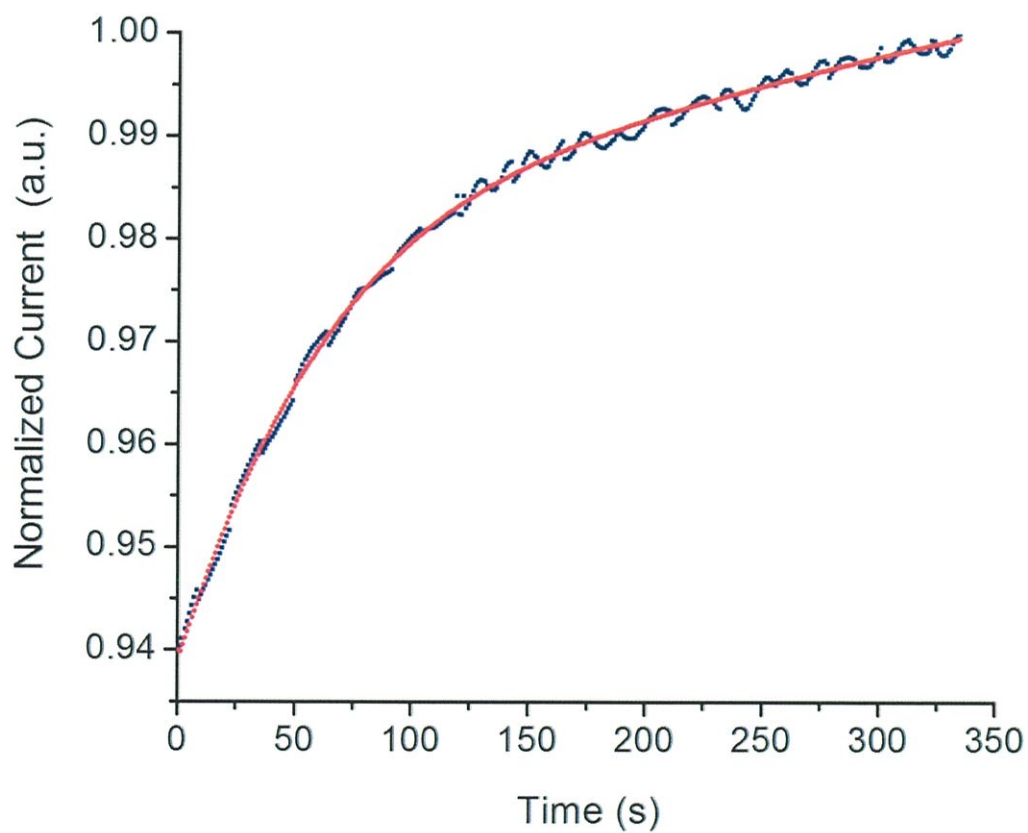
Quality : Calculated

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
		53.534	10	0	2	0
		56.773	1	0	2	1
		58.376	14	2	0	2
		61.567	19	-1	1	3
		65.870	14	0	2	2
		66.292	14	-3	1	1
		67.987	9	1	1	3
		68.175	16	2	2	0
		68.951	<1	-2	2	1
		71.725	<1	-3	1	2
		72.498	6	3	1	1
		73.045	<1	2	2	1
		75.059	5	0	0	4
		75.298	8	-2	2	2
		79.812	<1	0	2	3
		80.191	2	-2	0	4
		82.397	4	-3	1	3
		83.184	4	2	2	2
		83.701	4	3	1	2
		*83.701	4	4	0	0
		86.602	1	-4	0	2
		86.811	1	-2	2	3
		88.096	<1	1	1	4
		89.877	5	-1	3	1
Lattice : Monoclinic Mol. weight = 79.55 S.G. : C2/c (15) Volume [CD] = 81.03 a = 4.68330 Dx = 6.520 b = 3.42080 Beta = 99.57 c = 5.12940 a/b = 1.36907 Z = 4 l/ cor = 4.00 c/b = 1.49947						
ICSD COLLECTION CODE : 069094 TEMPERATURE FACTOR : ATF REMARKS FROM ICSD : REM TEM 11. REMARKS FROM ICSD : REM RVP.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *J. Solid State Chem., volume 89, page 184, (1990) : Brese, N.E., O'Keeffe, M., Ramakrishna, B.L., von Dreele, R.B.						
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				
Photoconductivity						

300°C Rise Time

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

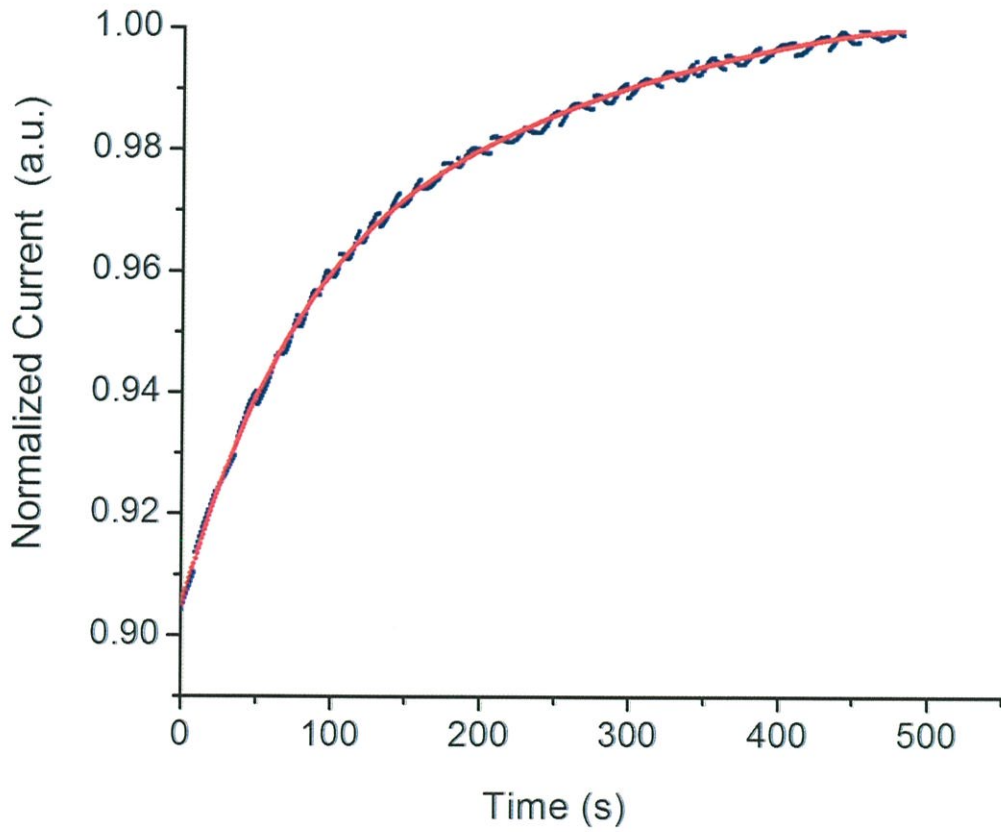
a	0.568	τ_1	135.5
b	-2.389	τ_2	254.4
c	5.759	τ_3	531.9
d	-5.177	τ_4	1062.1
e	-0.00347	τ_5	1558
g	0.1831		



350 °C Rise Time

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

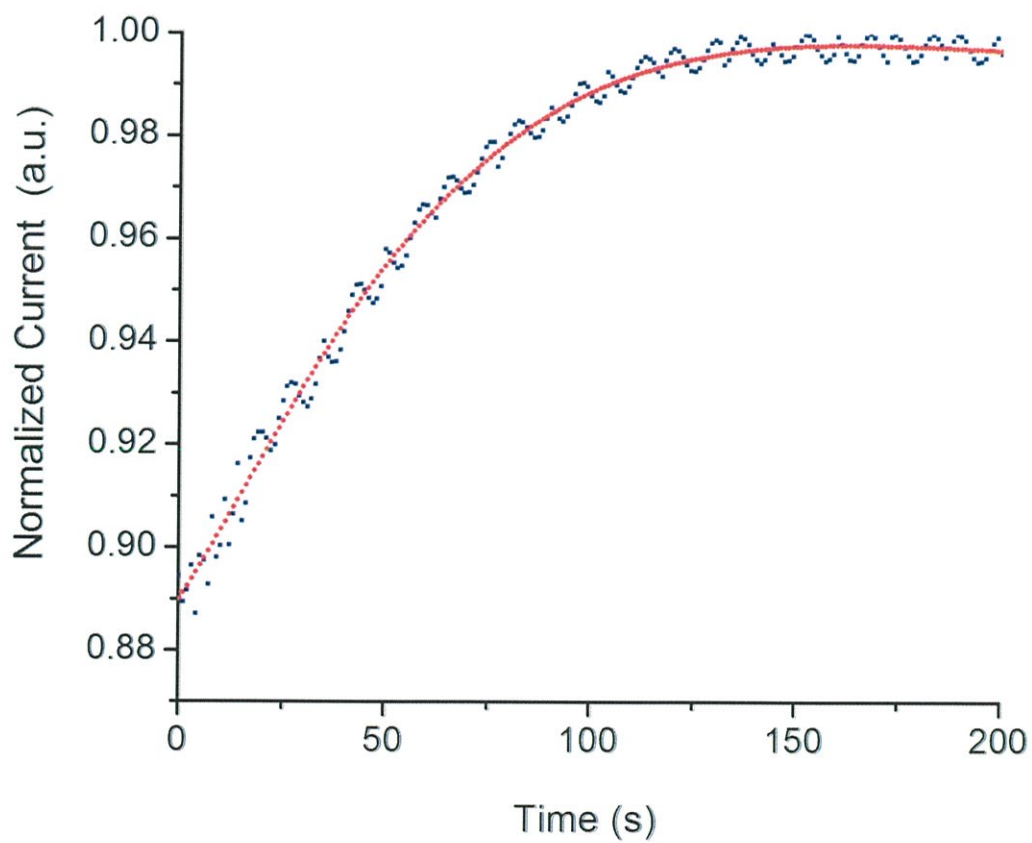
a	0.202	τ_1	104.8
b	-0.4991	τ_2	204.9
c	1.281	τ_3	476.2
d	-1.108	τ_4	925.9
e	-0.06744	τ_5	2035.5
g	0.802		



400 °C Rise Time e

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

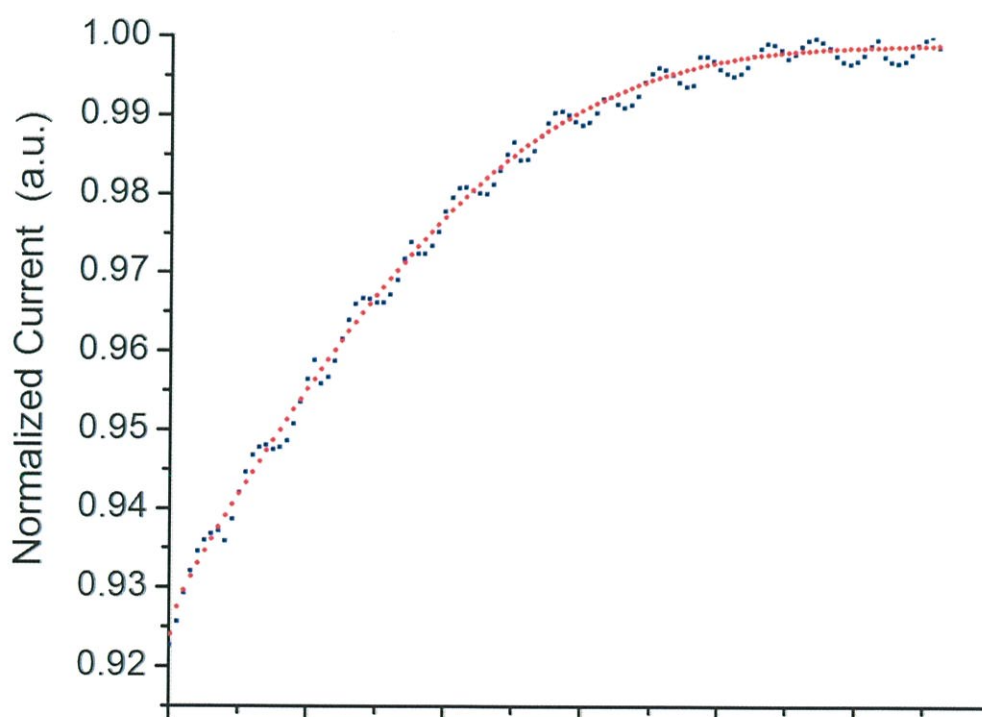
a	-0.3079	τ_1	40.3
b	0.7765	τ_2	60.9
c	-0.6377	τ_3	136.9
d	0.8398	τ_4	574.7
e	-2.868	τ_5	8378.1
g	0.9177		



450 °C Rise Time

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

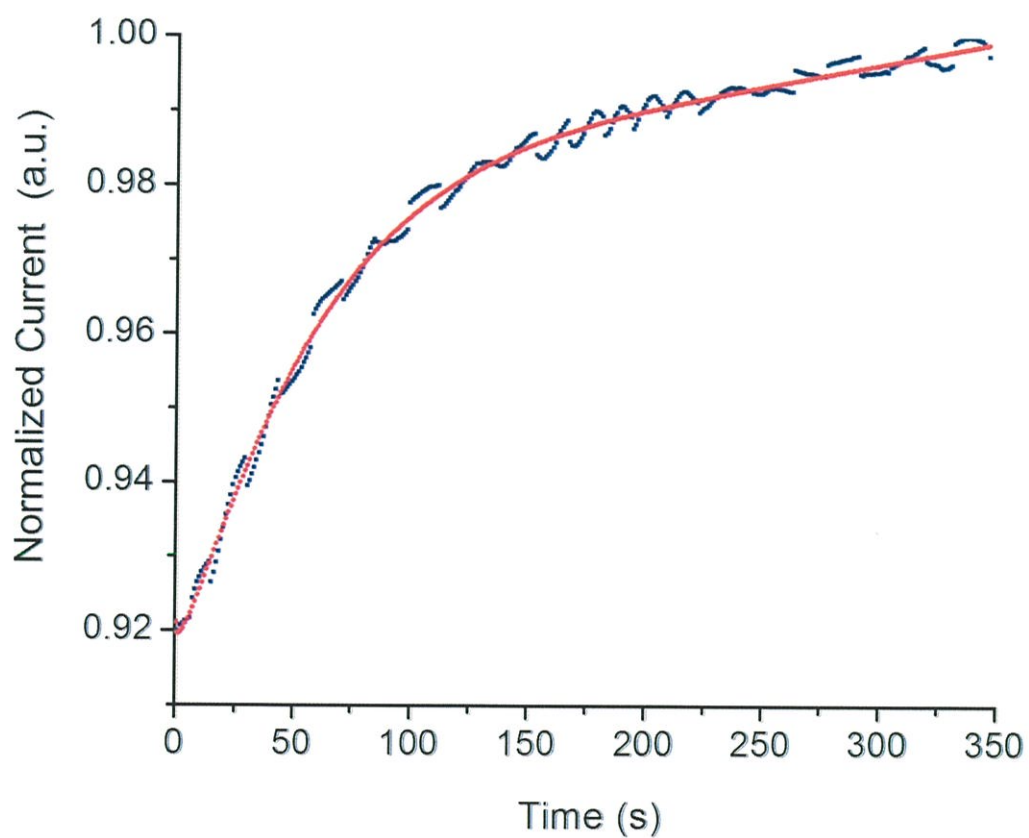
a	-2.416	τ_1	44.6
b	7.404	τ_2	61.2
c	-7.591	τ_3	92.2
d	3.203	τ_4	207.4
e	0.4326	τ_5	1362.6
g	0.6647		



500 °C Rise Time

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

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



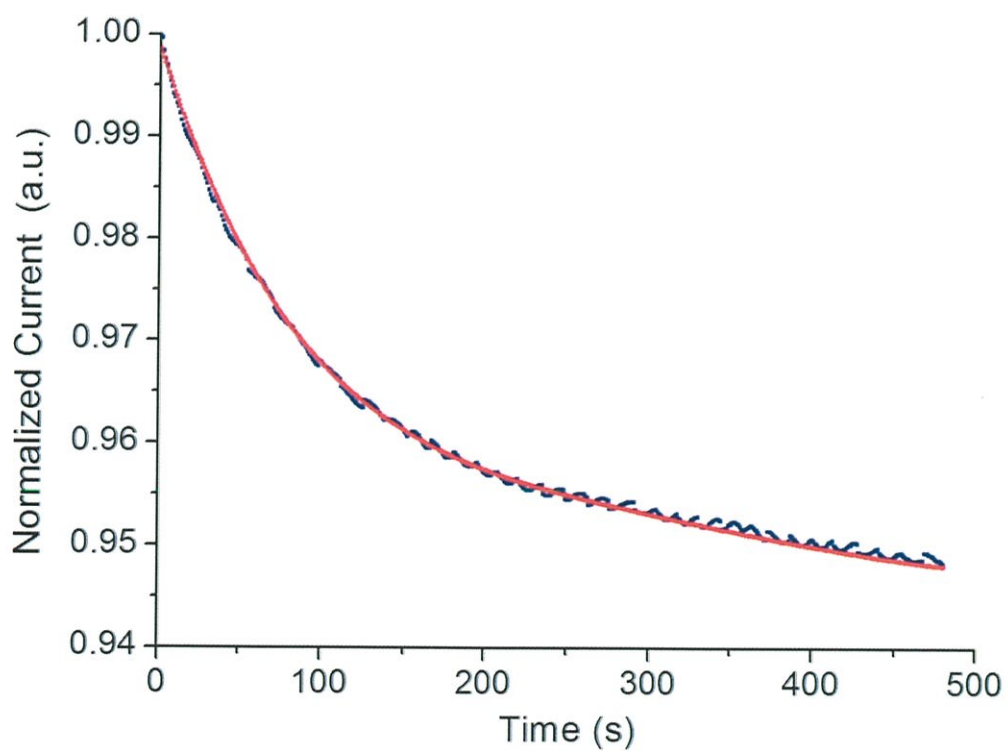
300 °C Decay Time

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

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

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

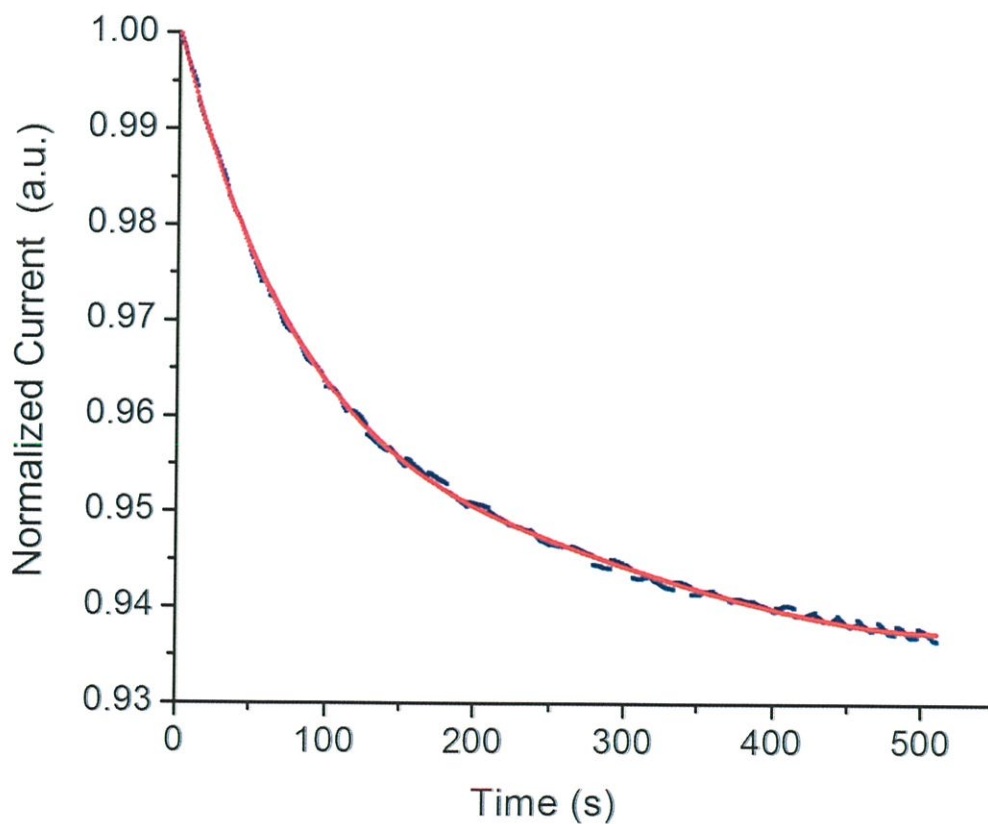
a	0.7936	τ_1	204.9
b	-4.085	τ_2	406.5
c	13.54	τ_3	980.3
d	-20.49	τ_4	2478.5
e	11.24	τ_5	3045.8
g	0.3064		



350 °C Decay Time

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

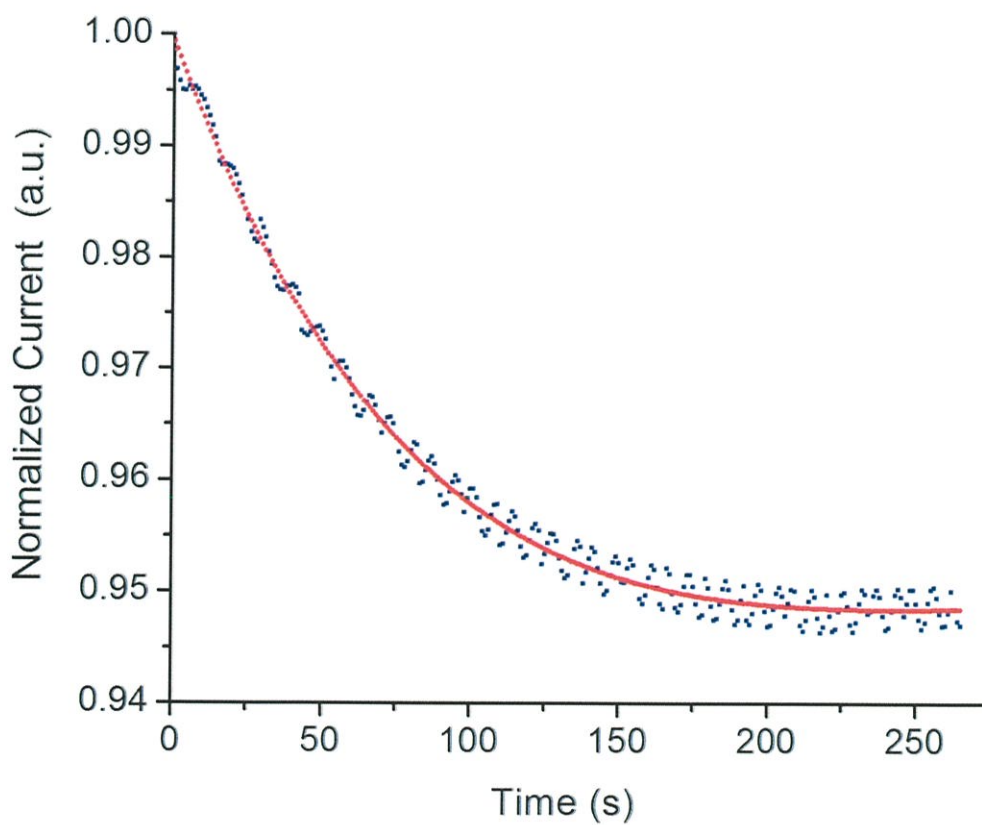
a	0.8785	τ_1	186.5
b	-4.223	τ_2	344.8
c	10.88	τ_3	699.3
d	-9.716	τ_4	1306.4
e	3.181	τ_5	2580.8
g	0.01509		



400 °C Decay Time

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

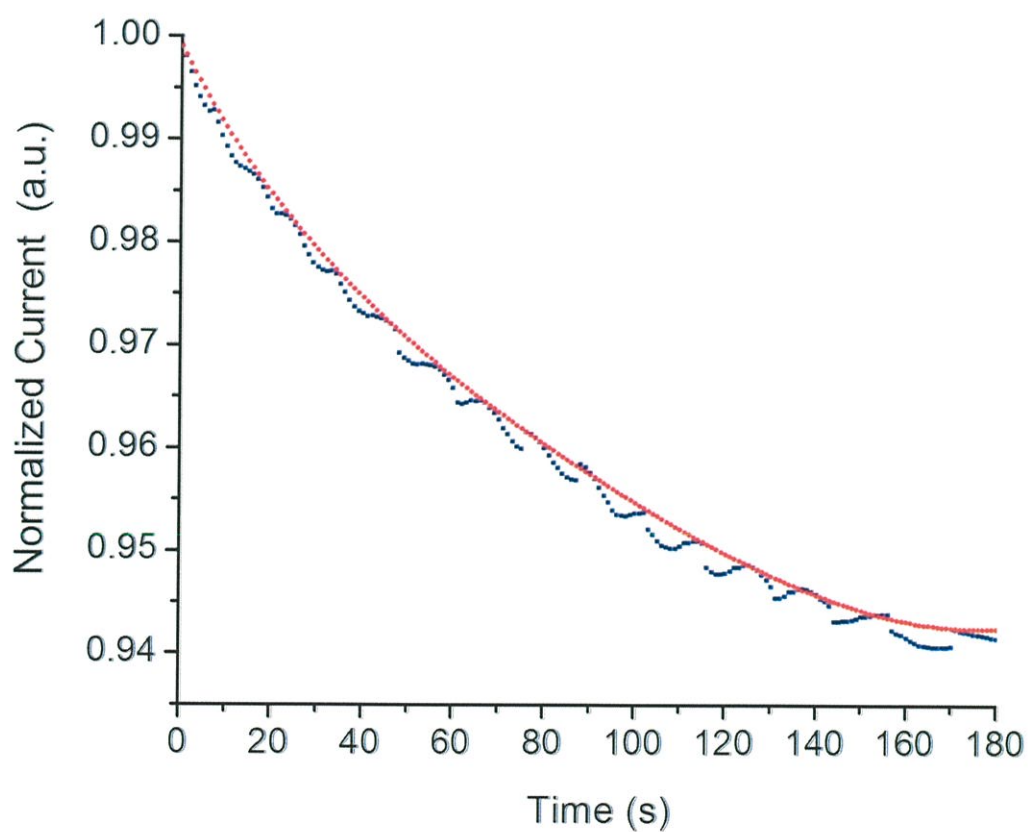
a	0.2305	τ_1	135.8
b	-0.03207	τ_2	197.6
c	-0.5493	τ_3	361.0
d	0.6142	τ_4	877.1
e	0.736	τ_5	65149.1
g	0.7978		



450 °C Decay Time

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

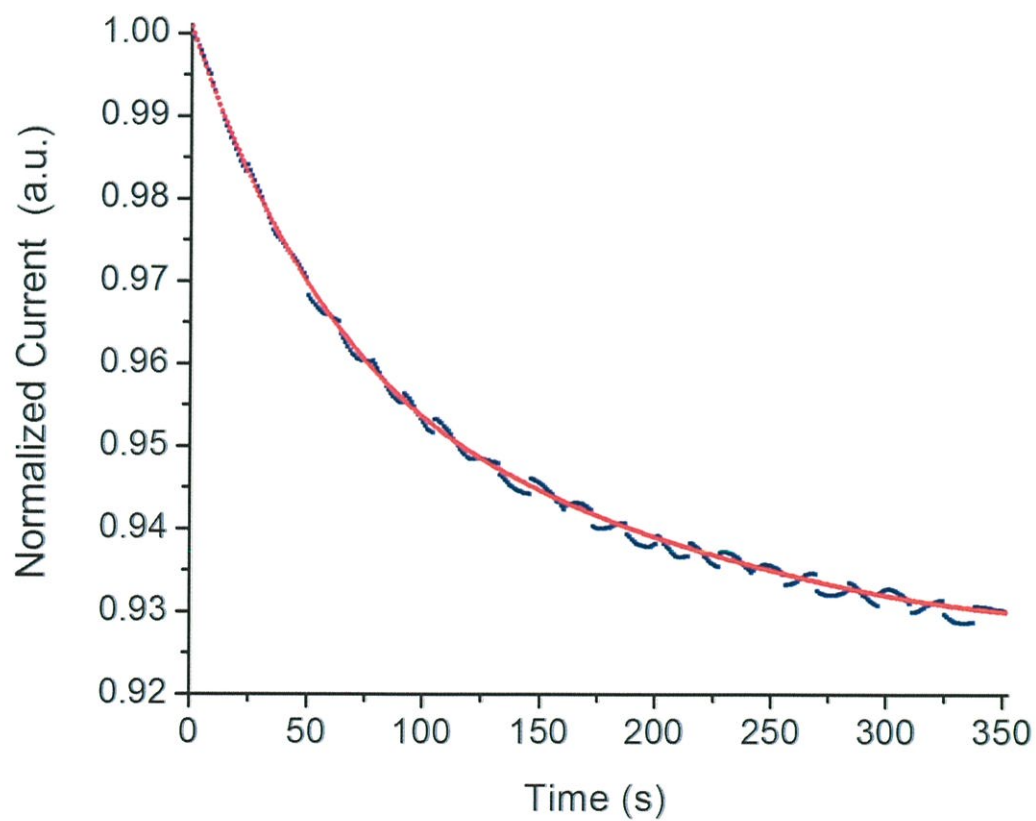
a	9.116	τ_1	126.2
b	-71.36	τ_2	193.4
c	96.84	τ_3	249.3
d	-39.92	τ_4	442.4
e	6.323	τ_5	1003.3
g	-0.08074		



500 °C Decay Time

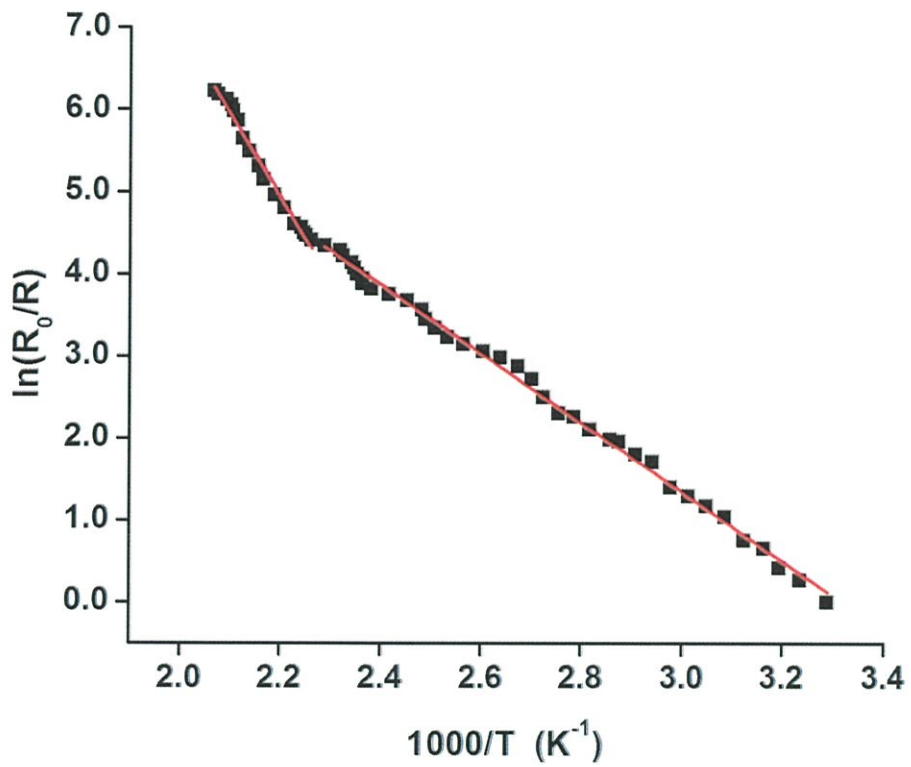
$$Y=(a*\exp(-x/120.7729469))+(b*\exp(-x/208.3333333))+(c*\exp(-x/414.9377593))+ (d*\exp(-x/884.9557522))+ (e*\exp(-x/1504.952045)^g)$$

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



Activate Energy

300°C



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

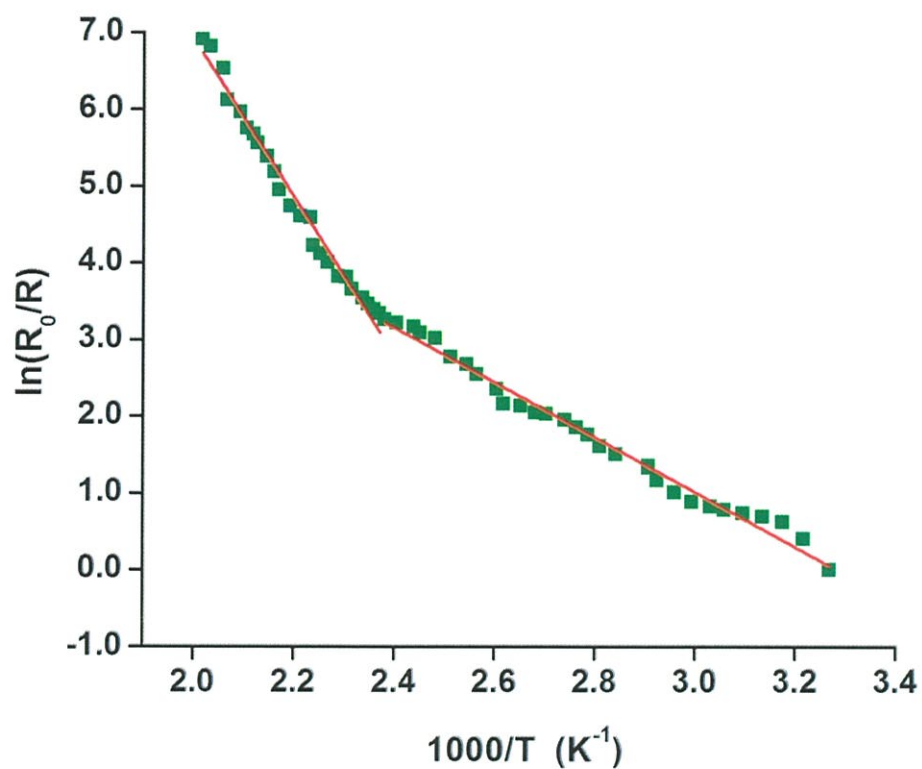
$$E_1 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (10.0335)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

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

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

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

450°C



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

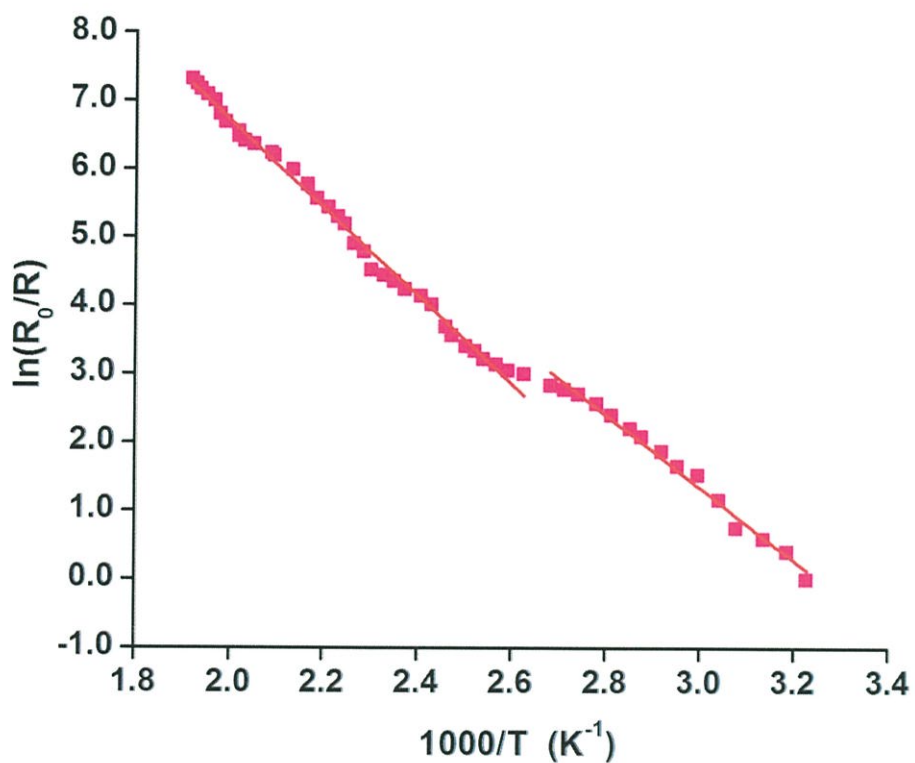
$$E_1 = \frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (10.29797)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

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

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

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

500°C



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

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

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

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

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

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาววรรณนิศา สุขกรี
เกิดเมื่อ	วันที่ 25 เมษายน 2535
ภูมิลำเนา	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีศรีนครปฐมบุรีรัมย์ ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นางสาววลัยพัชร ใจเรือน
เกิดเมื่อ	วันที่ 23 มิถุนายน 2534
ภูมิลำเนา	จังหวัดตาก
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนตากพิทยาคม ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวศวิตา ทศนิยม
เกิดเมื่อ	วันที่ 23 มีนาคม 2534
ภูมิลำเนา	จังหวัดสมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง