

การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธี  
รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็ตเตอริง

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY  
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธี  
รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY  
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING

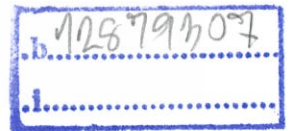


T149063



พรหมพร ชุ่มชัยศิริ  
สุธินี สุรเกษมสวัสดิ์

เลขหมู่.....**149063**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....**27.S.A..2560**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง  
Preparation of Copper Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering

ชื่อนักศึกษา นางสาวพรหมพร ชุ่มชัยศิริ รหัสนักศึกษา 55051562  
นางสาวสุธินี สุรเกษมสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 55051648

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพรหมพร ชุ่มชัยศิริ รหัสนักศึกษา 55051562 นางสาวสุธินี สุรเกษมสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 55051648
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยกำหนดอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า CuO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก และ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเกรนมีขนาดเล็กมาก ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านทางแสงเป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 1.79-2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ จากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี การวัดสภาพนำไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พารามิเตอร์ที่สำคัญทางไฟฟ้าของฟิล์มบางเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของออกซิเจน จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนไปตามเวลา พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์แสดงพฤติกรรมเป็นสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ออร์ัน จากการพืดกราฟได้โดยใช้มัลติเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันส่งผลให้ได้ช่องชีวิตค่อนข้างยาวจำนวนหลายค่าความหนาแน่นของกักพาหะสามารถคำนวณหาได้จากกระแสขาขึ้นและขาลง

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า

<b>Title</b>	Preparation of Copper Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering	
<b>Students</b>	Miss Promporn Chaoomchaisiri	Student ID 55051562
	Miss Sutinee Surakasamsavat	Student ID 55051648
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2015	
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang	

### Abstract

In this special project, copper oxide thin film were prepared by reactive DC magnetron sputtering method on glass substrate with oxygen flow rate 1, 2, 4, 6, 8 and 10 sccm. From XRD patterns, CuO of monoclinic structure and Cu<sub>2</sub>O of cubic structure were presented. SEM and AFM show films with very small grain. From transmittance spectra, direct band gap is varied between 1.79 and 2.55 eV. The positive sign of the Hall coefficient confirmed the p-type conductivity in the films. Electrical conductivity and Hall effect measurements were performed on copper oxide thin films with van der Pauw configuration. Important electrical parameters of films as a function of oxygen flow rate were observed. From transient photoconductivity measurement, persistent photoconductivity behavior was observed in copper oxide thin films. The decay current data are better fitted with multi-exponential function resulting in the several slow decay times. Density of trap states were also observed from the rise current and decay current.

**Keywords :** Copper oxide thin films, Reactive DC magnetron sputtering, Optical properties, Electrical properties

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.รัฐินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ อาจารย์ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมอริกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบคุณคุณพ่อของ นางสาวพิมพ์พร บุญฤทธิ์กุล ที่ให้ความอุปการะอุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาโครงการพิเศษนี้ และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

พรหมพร ช่อมัยศิริ  
สุธินี สุรเกษมสวัสดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$	9
2.2.1 ซ็อกบรื่องผลึก	11
2.2.1.1 ซ็อกบรื่องผลึกแบบจุด	12
2.2.1.2 ซ็อกบรื่องผลึกแบบเชิงเส้น	12
2.2.1.3 ซ็อกบรื่องผลึกแบบแนวระนาบ	14
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	17
2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	17
2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.5.3 ส่วนทางของแถบพลังงาน	20
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	21
2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า	22
2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	23
2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพอร์	24
2.6.3.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.6.4 ปราบกฎการฮอลล์	27
2.6.5 การศึกษาปราบกฎการฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	33
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	35
2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง	43
2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น	44
2.8 พูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	45
2.9 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี	46
2.10 หลักการสปีดเตอร์ริง	47
2.10.1 โกลด์ดิสชาร์จ	47
2.10.1 สปีดเตอร์ริง	49
2.10.2.1 ยิลด์การสปีดเตอร์ริง	49
2.10.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	51
2.10.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	52
2.10.2.3 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ	54
2.11 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	56
2.11.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	56
2.11.2 การให้ความเย็นที่เป้า	56
2.11.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอร์ริงเฉพาะผิวเป้า	56
2.11.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	58
2.12 คุณสมบัติทางพลาสมา	61
2.12.1 หัววัดลางมัวร์	61
2.12.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	62
2.12.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.12.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา	64
2.12.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	64
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	65
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	67
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	67
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	67
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ โดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปัตเตอริง	67
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้	68
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	68
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของ ฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	68
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตร โฟโตมิเตอร์	69
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	69
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง	70
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	70
3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง	71
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปัตเตอริง	71
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	71
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดย วิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปัตเตอริง	72
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	79
4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการ โกลดิสซาร์จ	79

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง	83
4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	86
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	86
4.3.2 ผลการศึกษาธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	87
4.3.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	89
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	91
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	91
4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มนอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	96
4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	98
4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง	102
4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง	109
4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง	111
4.5.5 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง	123
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	129
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง	129
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	131
5.3 ข้อเสนอแนะ	131
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
ภาคผนวก ง	
ภาคผนวกภาพ	

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดของธาตุชนิดต่างๆ	50
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	82
4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	84
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	88
4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	90
4.5 แสดงค่าแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	95
4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	97
4.7 แสดงค่าความต้านทาน ความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	101
4.8 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	108
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นกับอัตราการไหลของออกซิเจน เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีไตของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	120
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH)ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	120
4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	121
4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบแอฟโรส-ชอพลกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	122
4.14 แสดงค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.15 แสดงค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอ็คทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	4
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$	10
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{CuO}$	11
2.5 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ $\text{CuO}$	11
2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	13
2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	13
2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	14
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.11 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	17
2.12 แสดงส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	20
2.13 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	24
2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	24
2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	27
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.18 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	28
2.19 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	33
2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้	34

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงระดับพลังงานของกัปดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) และ กัปดักพาหะชนิดจับ โสลา ( $F_{th}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดง ถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	36
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลง ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์รัน	39
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์รันทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง	40
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง	43
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น	44
2.26 โครงสร้างของการโกล์ดดิซาร์จ	48
2.27 การเกิดสปีดเตอร์ริงที่ผิวเข้า	49
2.28 การสปีดเตอร์ริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	51
2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเข้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	53
2.30 ความต่างศักย์ของการดิซาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในซั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก	54
2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	59
2.32 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	60
2.33 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	60
2.34 หัววัดเดี่ยวกลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	61
2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	61
2.36 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง	65

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.37 แสดง (a) รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง $Cu_xO$ บนแผ่นฐานรองรับควอartz (b) การเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างรูปแบบ XRD $2\theta$ อยู่ในช่วง $34-44^\circ$ โดยไม่มี การเลื่อนแกน (c) รูปแบบขยาย XRD $2\theta$ ในช่วง $43-82^\circ$ โดยมีการเลื่อนแกน	66
3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	68
3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
3.3 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He $\lambda$ ios $\alpha$ )	69
3.4 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความ ต้านทานแผ่น	69
3.5 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำ ไฟฟ้าเชิงแสง	70
3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	70
3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	71
3.8 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	72
3.9 ก. ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า ข. ภาพแสดงคัมบังคัป Shutter ที่อยู่ภายใน	73
3.10 ก. ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มพกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย ข. ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	74
3.11 ก. ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open ข. ภาพแสดง speedy valve	74
3.12 ก. ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ ข. ภาพแสดง power supply	75
3.13 ก. ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply ข. ภาพแสดงปั๊ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	76
3.14 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก	76
3.15 ก. ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด ข. ภาพแสดงท่อก๊าซอาร์กอนและท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	78
4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ $2.4 \times 10^{-2}$ และ $4.3 \times 10^{-4}$ ทอร์ตามลำดับ	80
4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน เข้าห้องสุญญากาศ	81
4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ ออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ	83
4.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	85
4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที	86
4.6 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว นำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการ รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	87
4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธี การรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	89
4.8 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน ค่าต่างๆ	91
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha h\nu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	92
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	92
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	93
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	93
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	94
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ( $\alpha hu$ ) <sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1,2,4,6,8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	94
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	95
4.17 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1,2,4,6,8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	96
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	98

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	98
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	99
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	99
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	100
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	100
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{2d}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	102
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	102
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{2d}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	103
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	104
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	104
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	105
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	105
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีเอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	108

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	109
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$ , ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับค่า $1000/T$ ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับค่า $T^{(-1/4)}$ และ ค่า $\ln\sigma T$ กับค่า $T^{(-1/2)}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	111
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$ , ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับค่า $1000/T$ ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับค่า $T^{(-1/4)}$ และ ค่า $\ln\sigma T$ กับค่า $T^{(-1/2)}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	112
4.40 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีต (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี	119
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	123
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	124

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 การพิตรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที	125
4.44 การพิตรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนอร์มัลไลซ์ขาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนยังมีราคาแพงอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่มีราคาถูกและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อทดแทนซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe<sub>2</sub> โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ Te, In และ Ga ล้วนเป็นธาตุหายาก มีราคาแพงด้วยเหตุนี้ การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอระวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงงานไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อาจเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นั้นมีปริมาณมากบนโลก ราคาถูกและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเตรียมให้เป็นสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet chemical process) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคำนึงถึงคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้างดังกล่าวแล้ว สารประกอบคิวปริกออกไซด์ (CuO) กับคิวปรัสออกไซด์ (Cu<sub>2</sub>O) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด ได้มีการนำเอาสารประกอบ Cu<sub>2</sub>O ไปใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของแบดเตอร์ลิเทียมชนิดฟิล์มบางและเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Jeong, 2010) สารประกอบ Cu<sub>2</sub>O ที่เตรียมจากสารละลายของคอปเปอร์อะซิเตตกับไฮเดียมอะซิเตตจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความต้านทานสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพีถึง 2 เท่า ในเชิงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>O จะใช้ประสิทธิภาพสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ (Rakhshani, 1986) ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงพยายามประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>O/ZnO ค่อนข้างโดดเด่น ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) ให้เคลือบลงบนแผ่นสารประกอบ Cu<sub>2</sub>O ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของแผ่นโลหะ Cu จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>O/ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในระดับ 3.85 เปอร์เซ็นต์ (Minami et al., 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเมนนาโน (nanotherads) และ ลวดนาโน (nanowires) ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  จะมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว (2.17 อิเล็กตรอนโวลต์) อย่างมาก ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงขึ้นนี้เป็นผลทางควอนตัมของขนาดอนุภาค (quantum size effect) ซึ่งเกิดจากซีเมนนาโนและลวดนาโนมีขนาดเล็กมากจนประพจน์ตัวกลายเป็นวัสดุใน 1 มิติ ทั้งสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  สามารถประดิษฐ์ให้เป็นอนุภาคนาโนได้ ซึ่งวัสดุนาโนจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แปลกใหม่ และน่าสนใจในเชิงการวิจัยพื้นฐาน

สำหรับสารประกอบ  $\text{CuO}$  เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.2-1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ และเซนเซอร์แก๊ส เป็นต้น

ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  สามารถเตรียมได้จากหลายวิธีเช่น วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีอะโนดิกออกซิเจน (anodic oxidation) รีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มีเฟสของ  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  ปรากฏร่วมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดียวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ  $\text{Cu}$  ในช่วงอุณหภูมิ และ ช่วงเวลาที่เหมาะสม

ในโครงการพิเศษนี้สนใจที่จะเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ อันได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค คุณสมบัติทางแสงและ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีการรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดการส่งผ่านทางแสง
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียม

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. นำฟิล์มบางไปทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
3. นำฟิล์มบางไปทำการตรวจสอบพื้นผิวผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์
4. นำฟิล์มบางไปถ่ายภาพลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
5. ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดความต้านทาน
7. วิเคราะห์และสรุปผล
8. เขียนรูปเล่มโครงการพิเศษ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาทฤษฎีและกฎเกณฑ์การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

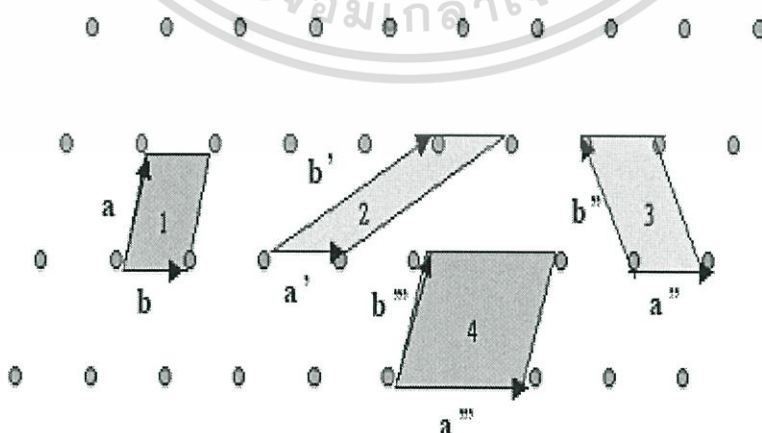
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

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

### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์ทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

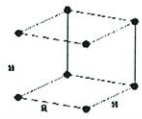

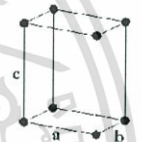
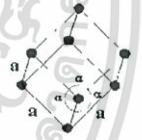
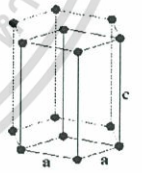
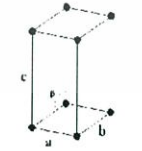
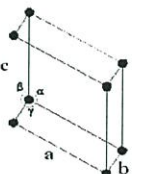
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล ผลึกในอุดมคติ	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
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)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

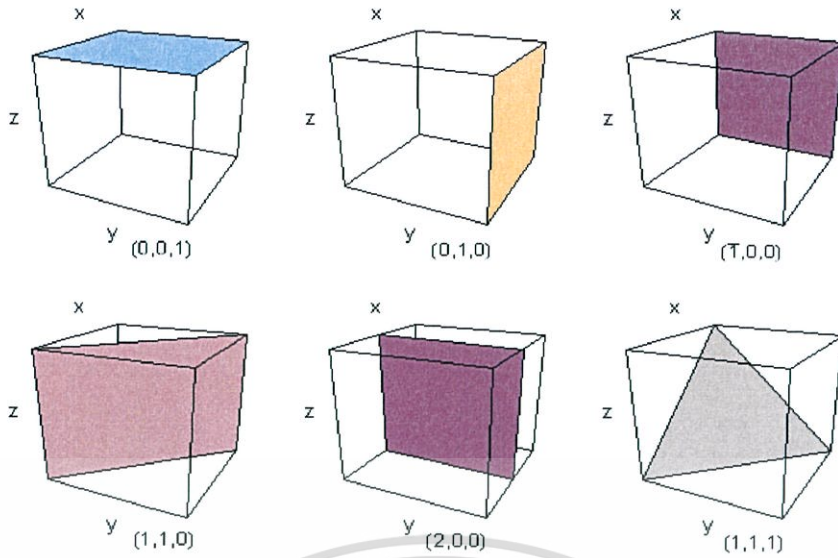
## 2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่งทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

#### การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$  การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[uvw]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(hkl)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า  $hkl$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วย อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
  - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น  $(x,y,z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
  - 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
  - 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ
 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบนแกนผลึก	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, $\infty$	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

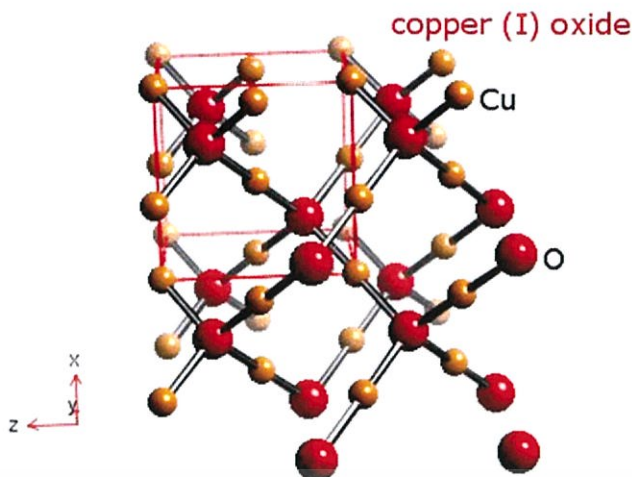
สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ในระบบเฮกซะโกนัลเฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ดีไซน์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปัตเตอร์ริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีไซน์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

## 2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$ (Bugarinovic, 2011; จิตินัย, 2556)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซับแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (BCC) ของอะตอมออกซิเจนกับซับแลตทิซเฟสเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ของอะตอมของธาตุ Cu ซับแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกันโดยที่แลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทแยงมุมของซับแลตทิซแรกเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอมและอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอมรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีสีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อรา เคยนำไปใช้ทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



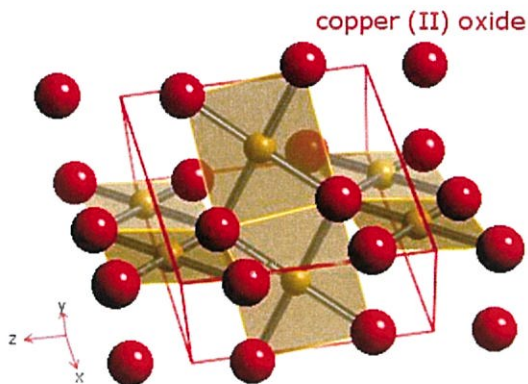
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีสีดำพบได้ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  และอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  จะมีอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ  $\text{O}$  จะมีอะตอมของธาตุ  $\text{Cu}$  ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็ว ในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ  $\text{CuO}$  สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

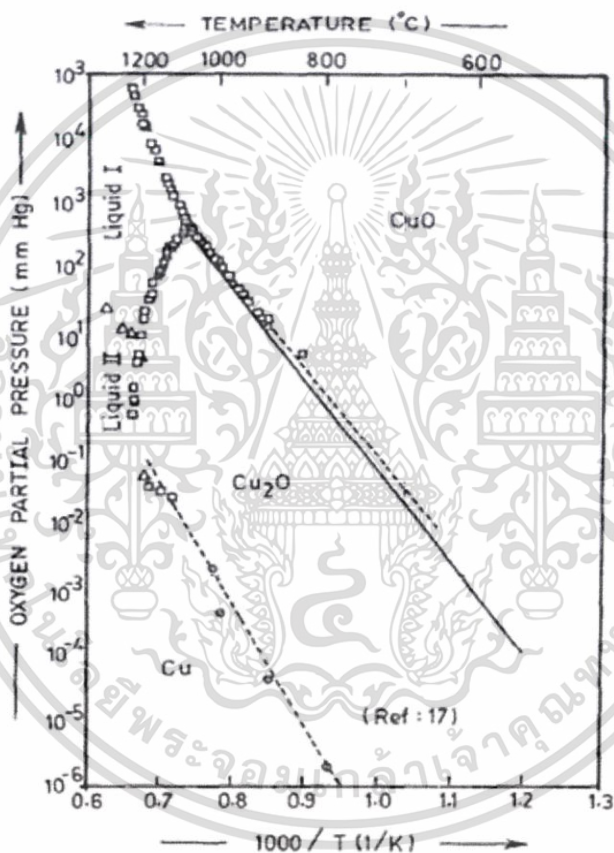
ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นโลหะ  $\text{Cu}$  ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้เป็นส่วนผสมทำไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจแก๊สรุ่นชนิดต่างๆ และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือ เพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ  $3d^9$  ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ  $\text{CuO}$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

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

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้วความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

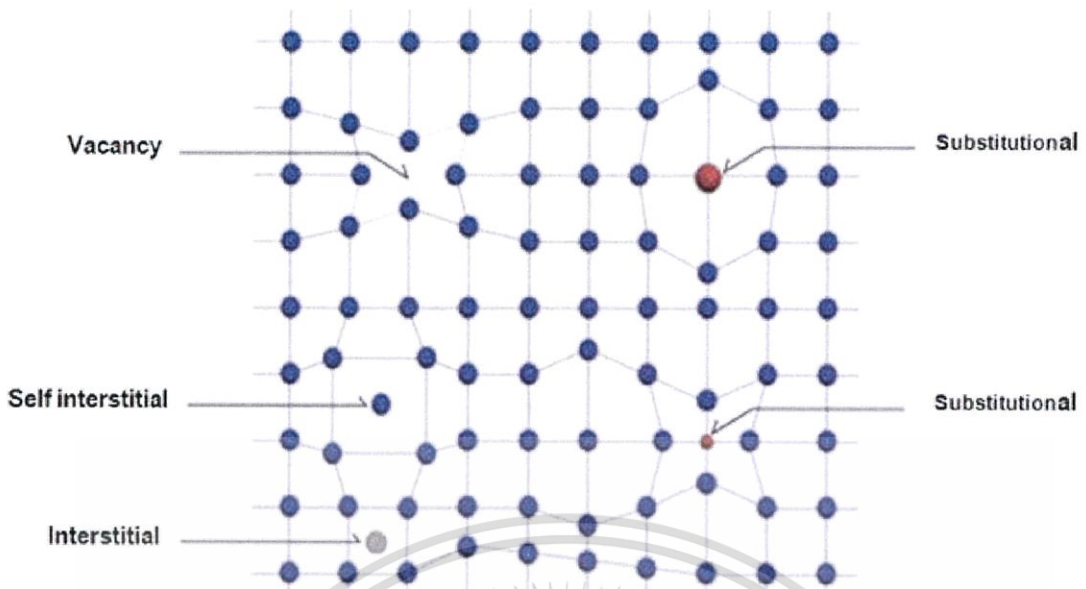
### 2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

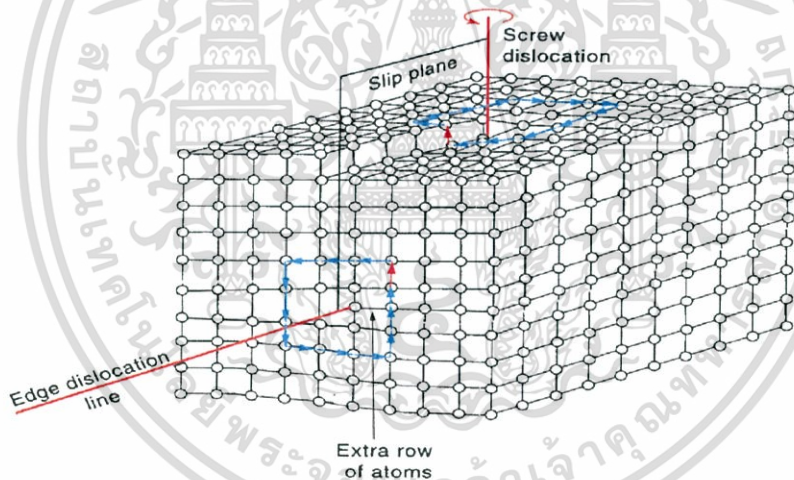
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนเคิล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

### 2.2.1.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7

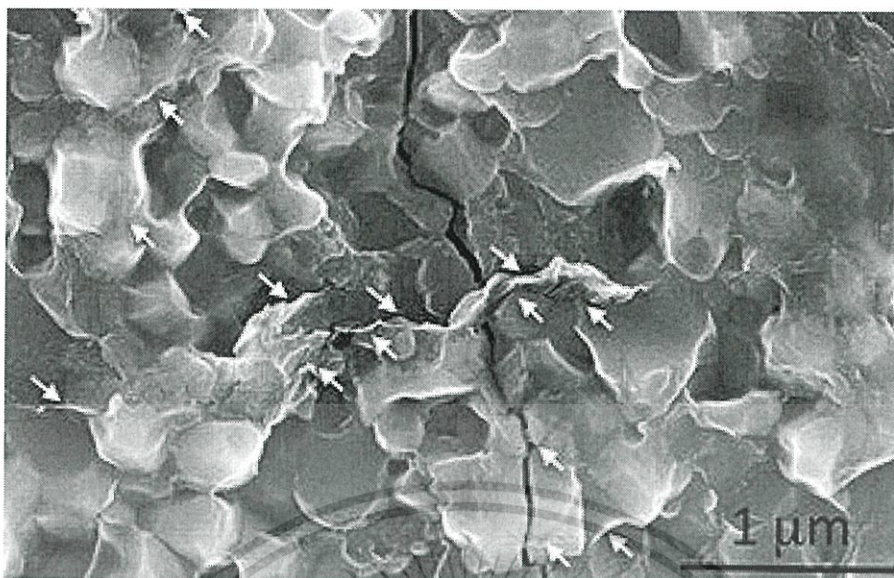


รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

### 2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ คือการเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

## 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบบดงสมการ

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

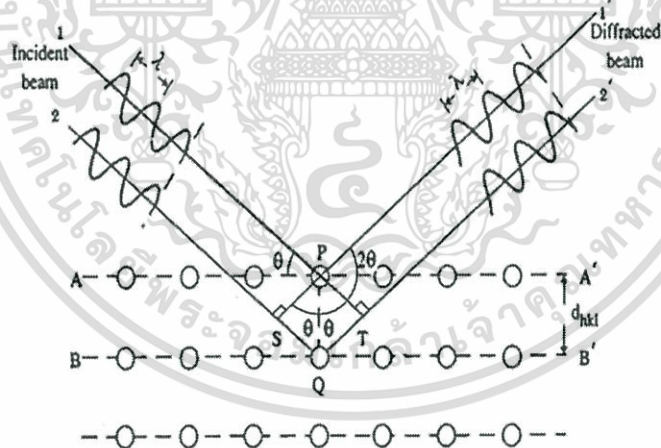
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบบ

$n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบบ  $2\theta$  ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

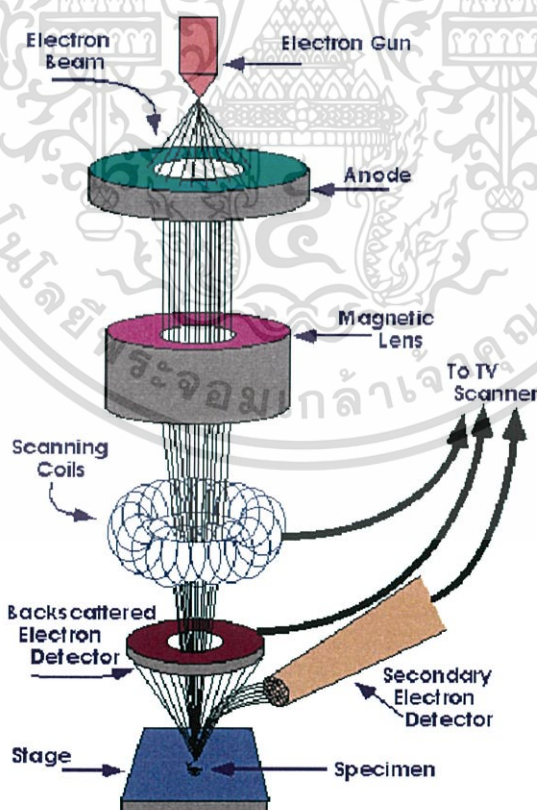
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter :  $d_p$ )
2. กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current :  $i_p$ )
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence :  $\alpha_p$ )

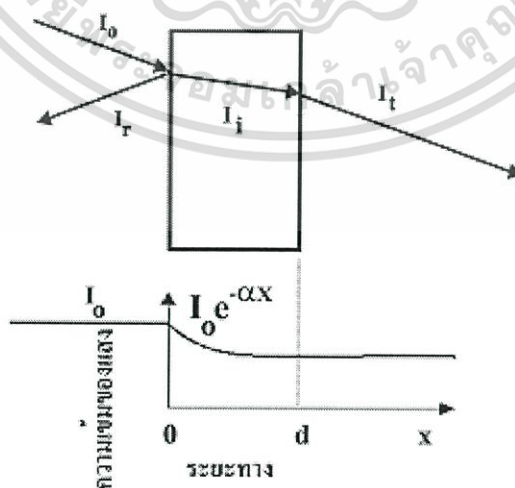
ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section ผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่แปรผันแบบผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $i_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

## 2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวีธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  มีนิยามดังนี้

$$T = \frac{I_i}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.3)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.4)$$

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า  $R$  มีค่าคงที่และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.5)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรงคือ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.6)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียงคือ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.7)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $I_0$	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
$I_r$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
$I_t$	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
$I_i$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
$R$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
$T$	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
$d$	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

### 2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ	$T$	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	$A$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	$R$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่ 
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.9)$$

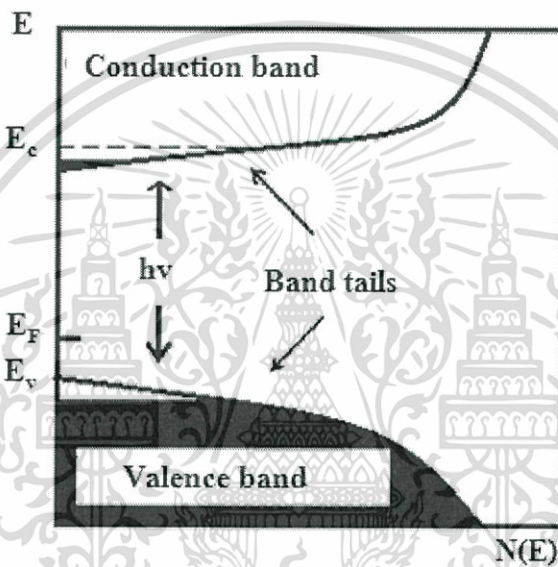
และค่าดัชนีหักเหของผลึก  $n_c = n - iK$  (2.10)

เมื่อ	$n$	คือ	จำนวนจริง
	$K$	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)
โดยทั้ง $n$ และ $K$ เป็นฟังก์ชันของ $\lambda$			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่ใช่ระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเหมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\alpha_0$  และ  $E_0$  เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน  $k_B$  คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์  $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ  $\alpha$  คือค่าความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนจากสมการที่ (2.10) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \alpha$  กับ พลังงาน ( $E$ ) จะเป็นเส้นตรง

ในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างเอกซิตอนเป็นเอกซิตอนที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น) อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่อเข้าสู่จุด  $(E_0, \alpha_0)$  ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดสุ่มรวม

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง(Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย,2550; งามนิตย์,2551; ฐิตินัย,2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.12)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $E$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

$k$  คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) =  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม(Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คืออัตราส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field :  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity:  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.14)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน  $V$  และเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า  $J = \frac{I}{A}$  และ  $E = \frac{V}{l}$  สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{l} \right) \quad (2.15)$$

$$V = \left( \frac{l}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.16)$$

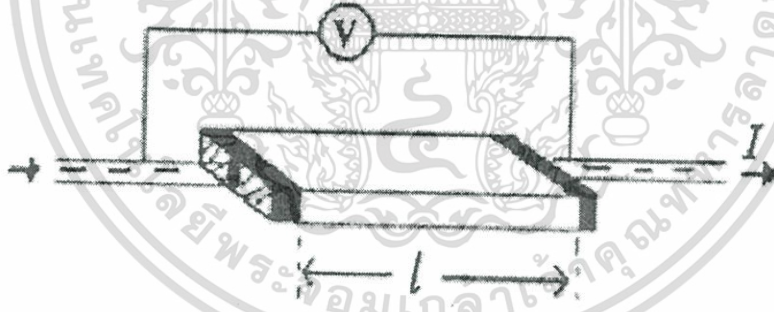
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

### 2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

#### 2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.17)$$

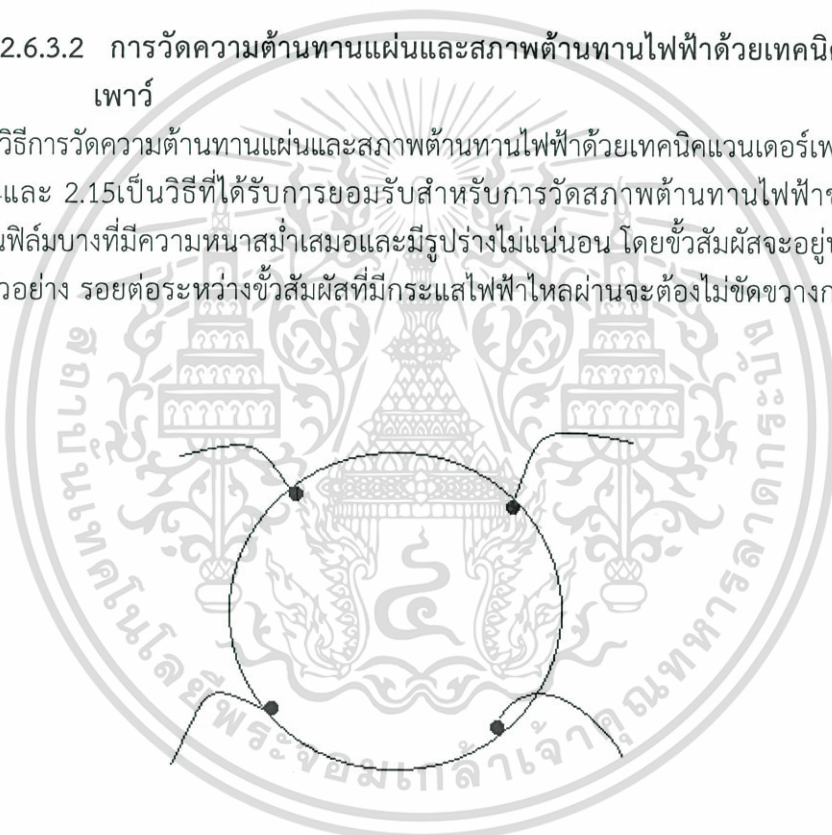
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.18)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

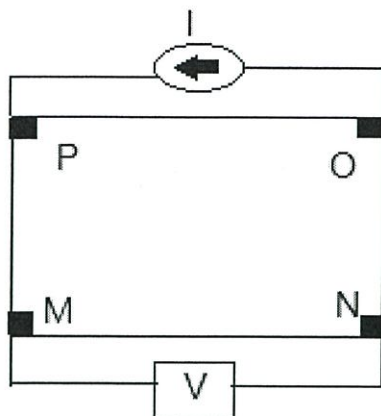
และออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

### 2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์



รูปที่ 2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.19)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.19)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.20)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.20)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.22)$$

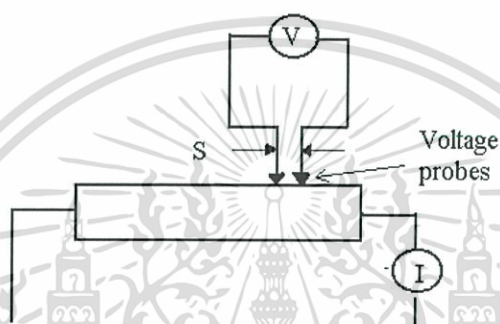
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.23)$$

### 2.6.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

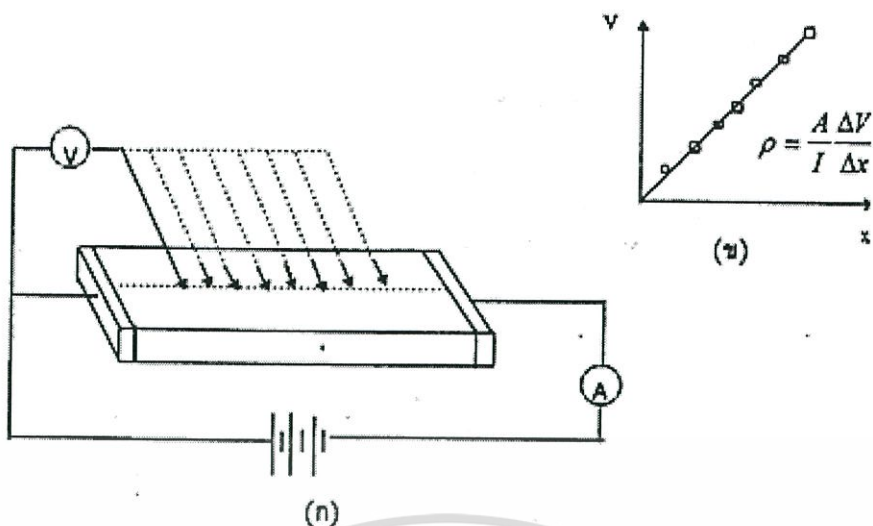
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเลขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำกรวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $\frac{l}{A} > 3$  เมื่อ  $l$  คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการคือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตั้งขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ความชันที่จะได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

#### 2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์  
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.24)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.25)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน  
สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล  
 $\mu_e$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) คือ  
 กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

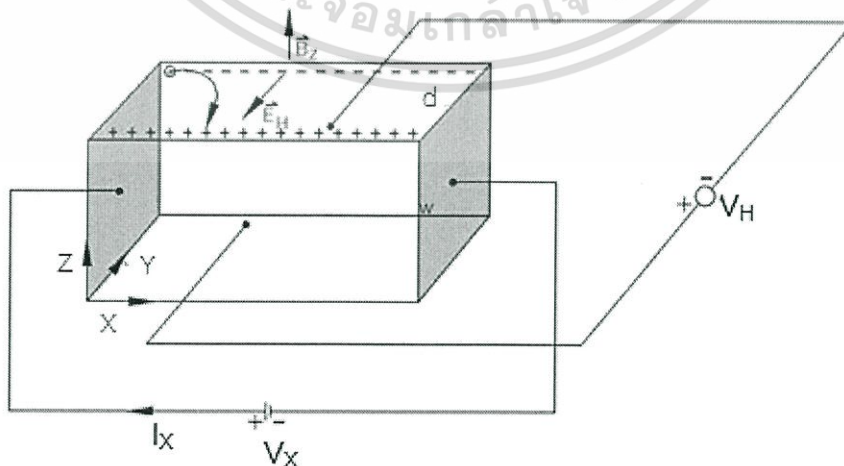
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.27)$$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.28)$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $V_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.29)

จาก 
$$I = nqvA \quad (2.29)$$

ดังนั้น 
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.30)$$

จากกฎของโอห์ม 
$$V = IR \quad (2.31)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.32)$$

จากรูปที่ 2.18 
$$A = w \cdot d \quad (2.33)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) และ (2.33)

$$\rho = \frac{v_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{v_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.34)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall Voltage :  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วย แรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.35)$$

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

$$E_y = v_x B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.36)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.36) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.38)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.39)$$

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.40)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.41)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.42)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.43)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.44)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยาม ค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.47)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 10000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.41) และ (2.42) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.48)$$

หรือจากสมการที่ (2.39) และ (2.44)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.49)$$

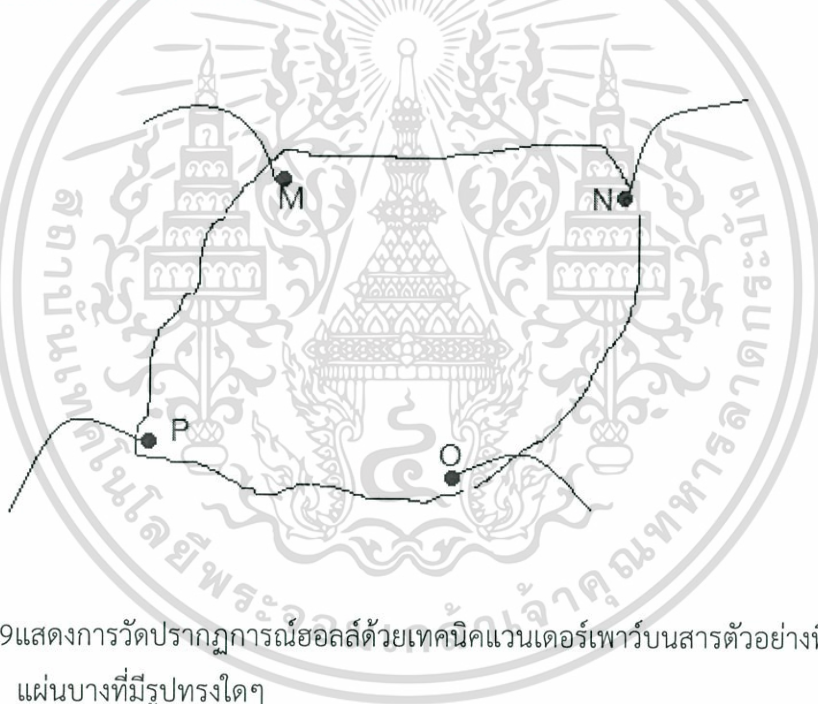
ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

### 2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เทคนิคนี้ได้รับแวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ในบริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

$$\text{นิยาม} \quad R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

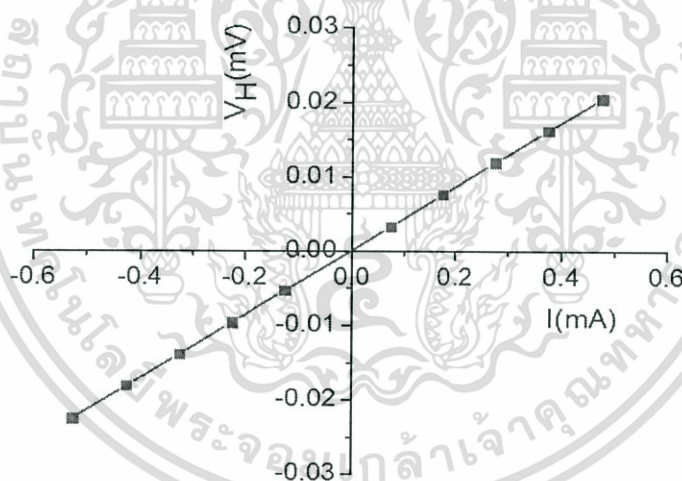
เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

$d$  คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.51) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.20 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น  $\frac{V_H}{I}$  สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.53)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

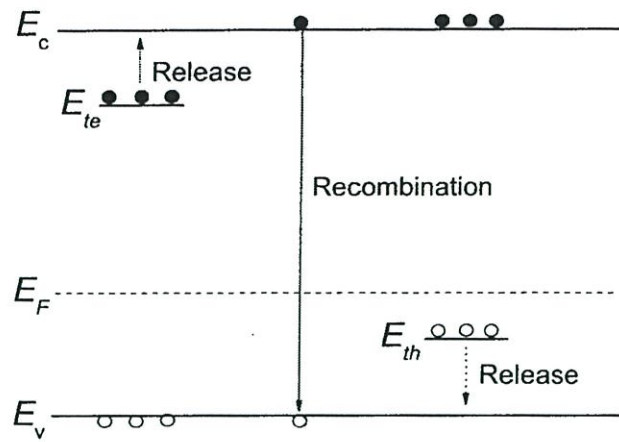
$$I = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.54)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

## 2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง(จามนิตย์, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{th}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มี การฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลาานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลาที่ยังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.21 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{th}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชิ้นสารมีความกว้าง  $w$  ความหนา  $d$  และยาว  $l$  ให้กระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  $w$  กระแสไฟฟ้า  $I$  จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.55)$$

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.56)$$

แทนสมการที่ (2.56) ลงในสมการที่ (2.55) จะได้

$$I = en\mu n_a \left( \frac{wd}{l} \right) \quad (2.57)$$

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

$$n = N_{ti} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.58) ลงในสมการที่ (2.57) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า  $I_i$  ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด  $i$  คือ

$$I = e\mu N_{ti} V_a \left( \frac{wd}{l} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.59)$$

กระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมด ( $I$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left( N_{ti} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \quad (2.60)$$

เมื่อ  $N_{ti}$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_i\right) \quad (2.61)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา  $d$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.57) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) (nd) V_a = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) \sigma_t V_a \quad (2.62)$$

เมื่อ  $\sigma_t$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม ( $I$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sum_i \left( \sigma_{ti} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \quad (2.63)$$

เมื่อ  $\sigma_{ti}$  คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_i\right) \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$V_H$	คือ	แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
$\mu$	คือ	สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
$w$	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$l$	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$d$	คือ	ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา $t$ ใดๆ
$\tau_r$	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
$N_{ti}$	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
$\sigma_{ti}$	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

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

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.65)$$

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

เมื่อ

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

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} \quad (2.66)$$

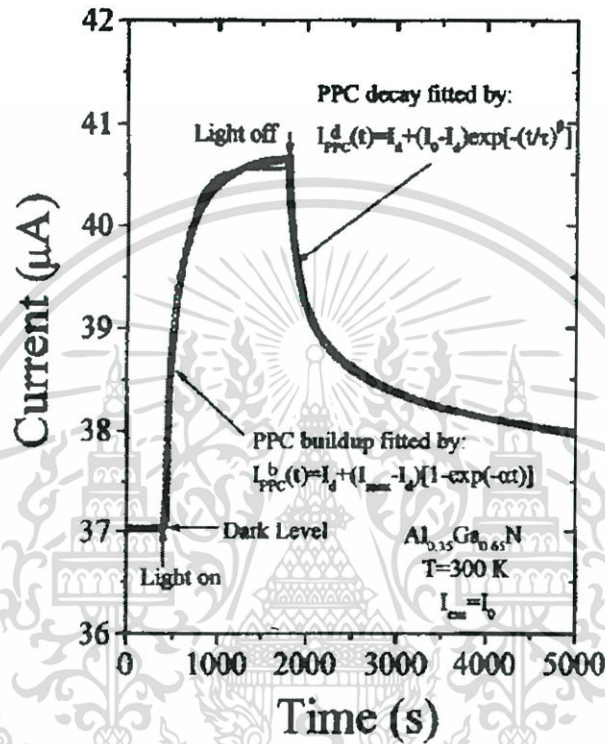
ในการศึกษาพลาสมาไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต ( $I_p$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา ( $t$ ) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $I_0$  คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตชาขึ้น (เมื่อ  $t=0$ ) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา ( $t$ ) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตชาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.68)$$



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลงของค่า สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรั้น

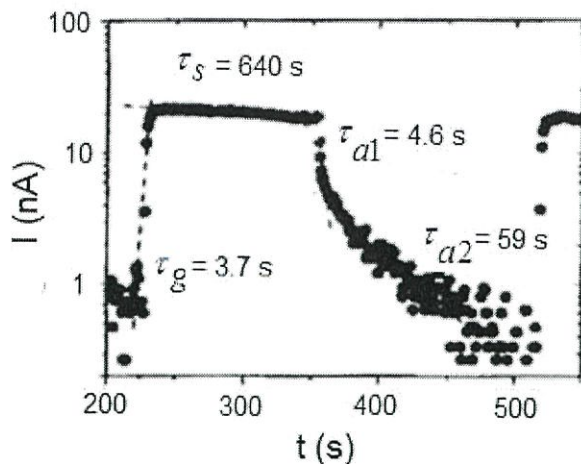
จากสมการที่ (2.67-2.68) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.69)$$

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

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตชาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จาก ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  (ดังรูปที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรัศมีทั้ง ช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.68) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.70)$$

เพื่อให้  $\tau_{d1}$  และ  $\tau_{d2}$  มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left( \frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.71)$$

จากสมการที่ (2.69) สามารถที่จะหาค่า  $\sigma_{t1}$  และ  $\sigma_{t2}$  ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.71) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \exp\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.73)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสค่าเริ่มต้น ( $t = 0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.74)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.75)$$

สมการที่ (2.71) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2 \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d1}} \right)^\beta \right] \quad (2.76)$$

เมื่อ  $A_1$  และ  $A_2$  คือ ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลอง และ  $\beta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1' \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{\tau_{r1}} \right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{r2}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.77)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโตะขณะกลางสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.60) และ (2.71) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t1} \exp\left( -\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{t2} \exp\left[ -\left( \frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.78)$$

จากสมการที่ (2.78) สามารถที่จะหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \exp\left( -t/\tau_{d1} \right) \quad (2.79)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \exp\left( -t/\tau_{d2} \right) \quad (2.80)$$

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

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.81)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.82)$$

สมการที่ (2.78) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

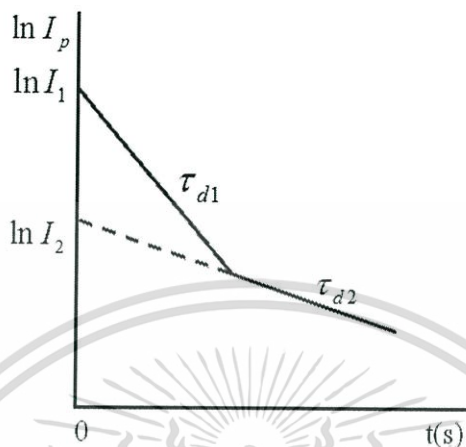
$$|I_p| = A_1'' \exp\left( -t/\tau_{d1} \right) + A_2'' \exp\left[ -\left( t/\tau_{d2} \right)^\beta \right] \quad (2.83)$$

ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[ 1 - \exp\left( -t/\tau_{d1} \right) \right] + A_2''' \left\{ 1 - \exp\left[ -\left( t/\tau_{d2} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.84)$$

### 2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

ค่า  $\tau_{d1}$  หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.85)$$

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

$$\sigma_{tl} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.86)$$

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

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{w} \right) \quad (2.88)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

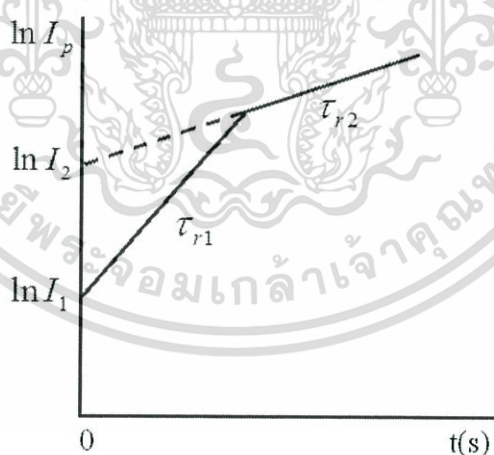
$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.89)$$

และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{1}{wd} \right) \quad (2.90)$$

### 2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau_r\right) \right] \quad (2.91)$$

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

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

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -t/\tau_r \quad (2.92)$$

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 (2.92) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.93)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.93) จะใช้ได้จริงเมื่อ  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น

ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีทั้งหมดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.86), (2.88), (2.89) และ (2.90) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

## 2.8 ฟูเรียร์แทรนซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์(Fourier Transform Infrared

Spectrometer : FTIR )(จามนิตย์, 2545;ฐิตินัย, 2549;ฐิตินัย, 2550;จามนิตย์, 2551;ฐิตินัย, 2551)

FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบ โครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออนของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงตามองเห็นได้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)
2. Middle Infrared (4000 200 ต่อเซนติเมตร)
3. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

## 2.9 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) (งามนิตย์, 2545;

ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometers) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของสาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงจากการหมุนในพันธะของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้รับพลังงานเข้าไป โดยพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะเกิดการสั่นและการหมุนของโมเลกุล การกระเจิงของรามานนั้นเกิดขึ้นจากการที่โมเลกุล ได้นับพลังงานเข้าไปแล้วถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นแล้วคายพลังงานมาในรูปของ โฟตอน ซึ่งการคายพลังงานออกมานี้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากระดับพลังงานเดิม การกระเจิงของรามาน (Raman scattering) เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสง โมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีการกระเจิงส่วนน้อยอีก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลว แต่ไม่สามารถทดสอบได้กับสารที่มีปริมาณในระดับ ppm ได้

## 2.10 หลักการสปีดเตอริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปีดเตอริง และหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

### 2.10.1 โกลว์ดิสชาร์จ

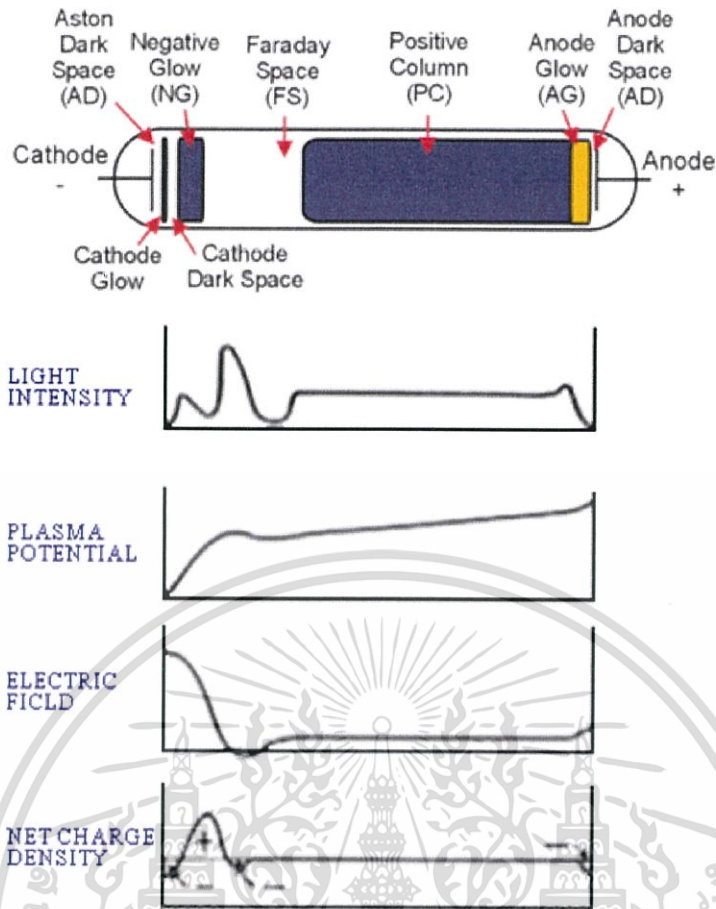
สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมเรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอนและทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอนโดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.94)$$

โดย  $W_i$  คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน  
 $m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน  
 $v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิสชาร์จ คือการเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ดิสชาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนดดังแสดงในรูปที่ 2.26



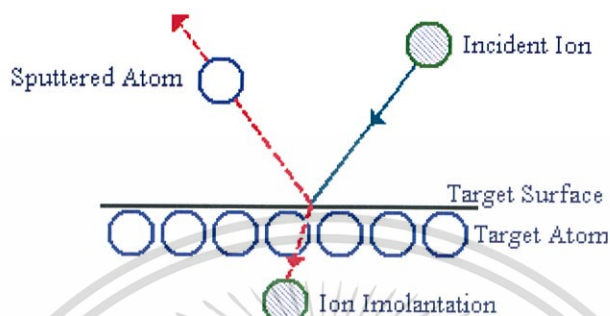
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของการโกลว์ดิสชาร์จ

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกความคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักริเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายอย่างของโกลว์ดิสชาร์จและให้เห็นในรูปที่ 2.26 (การเกิดสปัตเตอร์ิงที่ผิวเป้า) การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลว์ดิสชาร์จสามารถรักษาได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10.2 สปีดเตอริง

สปีดเตอริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วยเนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในรูปที่ 2.27 (การเกิดสปีดเตอริงที่ผิวเป้า)



รูปที่ 2.27 การเกิดสปีดเตอริงที่ผิวเป้า

### 2.10.2.1 ยีลด์การสปีดเตอริง (sputtering yields)

यीลด์การสปีดเตอริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.94 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่หลุดตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปีดเตอริง

$$\text{यीลด์ของการสปีดเตอริง} = \frac{\text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า}}{\text{ไอออนที่ชนเป้า}} \quad (2.95)$$

การสปีดเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่าयीลด์ของการสปีดเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสปีดเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยีลด์ของการสปีดเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

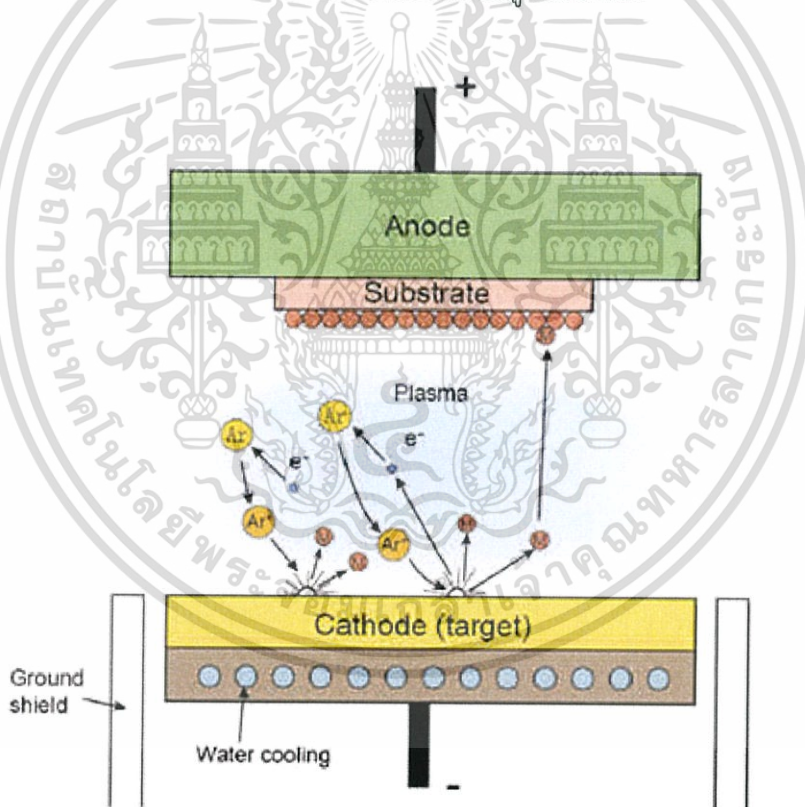
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่าyield ของธาตุชนิดต่างๆ

	Threshold (eV)	Ar <sup>+</sup> 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริง จะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนด วางอยู่ในระบบสุญญากาศ ภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโกลว์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.28 การสปีดเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.2.3. ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปัตเตอร์เกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอร์ให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาหลังจากการชนของของไอออนบวกผิวเป่าดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอร์ให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป่ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเตอร์สูงขึ้นทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการบ่อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปัตเตอร์ ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า  $q$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า  $B$  จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = BqV \quad (2.96)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล  $m$  เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.97)$$

โดย  $F_B$  คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก  
 $F_C$  คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่  
 จะได้ว่า

$$qV_{\perp}B = \frac{mV_{\perp}^2}{r} \quad (2.98)$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mV_{\perp}/Bq \quad (2.99)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (Lamor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อย และจาก  $V = \omega r$  จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.100)$$

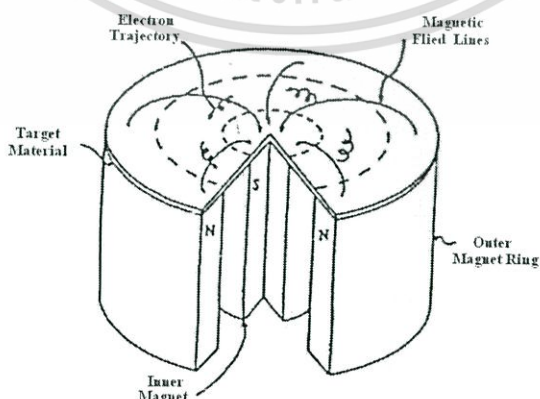
และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจากสมการของลอเรนซ์

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.101)$$

โดย

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

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้ อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega = eB/m$  ไปในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉาก ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศตั้งฉากกันด้วยความเร็ว  $E/B$  ถูกแสดงใน รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของก๊าซและกระบวนการแตกตัวไปเป็นไอออนบวกสูงชันบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่ เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามาขึ้น ซึ่งจะผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อ เปรียบเทียบกับวิธีซีดีโอตสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบ พิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในหลายงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความเร็ว  $V$  ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mV^2 = |q|V \quad (2.102)$$

จะได้ว่า

$$V = \sqrt{\frac{2|qV|}{m}} \quad (2.103)$$

แทนค่า (2.102) ลงใน (2.98)

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{|q|}} \quad (2.104)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอนจะได้ว่า

$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.105)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.106

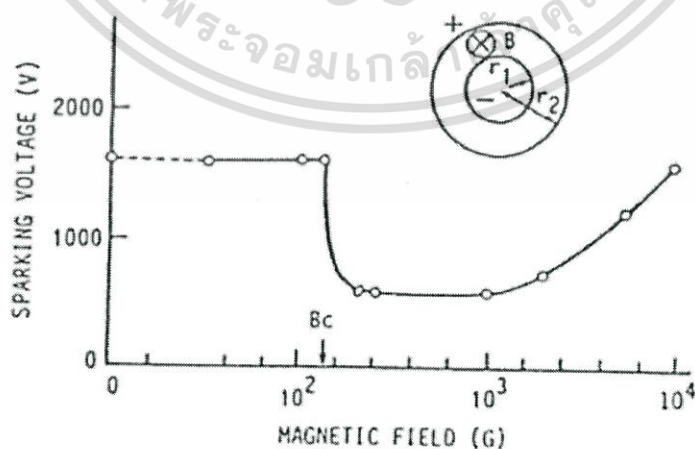
$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \quad (2.106)$$

โดย

$V_c$  คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

#### 2.10.2.4. สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



รูปที่ 2.30 ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอดเซียวทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.30 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิซซาร์จที่วัดใน  
 ขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมี  
 ภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติ  
 ผล (cut-off magnetic field;  $B_c$ ) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการ  
 แสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียว  
 วงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่า  
 สนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผลความต่างศักย์ของการดิซซาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจาก  
 การเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออน  
 เพิ่มสูงขึ้นและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิซซาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม  
 สนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการ  
 ชนอย่างต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปัตเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

### 2.11.1. วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ดังต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม
2. เป็นวัสดุที่มีกรายืดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป่าให้มีค่าน้อยลง

### 2.11.2 การให้ความเย็นที่เป่า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปัตเตอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป่ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป่าและ ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป่าในขณะเกิดการสปัตเตอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป่าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป่า และ โอริง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป่าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสม อื่นๆ และควรระวังการร้าวซึมของน้ำ

### 2.11.3. การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป่า

บริเวณของเป่าจะถูกล้อมรอบด้วยกำบังบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชิลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชิลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปัตเตอริงเกิดที่เป่าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป่าและตัวยึดเป่าอาจจะถูกสปัตเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความบริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป่าและกราวด์ชิลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกลด์ดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ในบางโอกาสพบว่า ตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งที่ยกประกขึ้นเล็กน้อยจะทำให้เกิดการโกลด์ดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่โดยเฉพาอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นของที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆต้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดออกไปเสียก่อนและเนื่องจากความหนาของบริเวณมีดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้นดังนั้น ระยะห่างระหว่างเป้ากับกรวดซีลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบและภายใต้ การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมีดจะลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.107

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล ( $P_e$ ) แสดงโดย

$$P_e/P \cong [1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \quad (2.107)$$

โดย  $\omega$  คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน  
 $\tau$  คือ เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)  
 $P$  คือ ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

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

จะได้ว่า

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} PV_0^{1/2} \quad (2.108)$$

โดย  $\lambda_0$  คือ ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอร์  
 $B$  คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก  
 $e/m$  คือ ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน  
 $V_0$  คือ ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมีดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการ ดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมีดกับความต่างศักย์ ของการดิวชาร์จขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมีดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ ที่ 2.109

$$d = cV^{-m} \quad (2.109)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของบริเวณมืด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไฮลด์ ซึ่งอยู่ใน  
ความสัมพันธ์

$$I \propto \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (2.110)$$

เมื่อการหาขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมืดถูกแทนลงในสมการ (2.108) จะได้  
ความสัมพันธ์

$$I \propto k^n \quad (2.111)$$

โดย  $k$  คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์  
 $n$  คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดย  
สนามแม่เหล็ก

#### 2.11.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมา  
ที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่  
เคลือบโดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้น  
แรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมีชื่อ  
เรียกว่าแมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือแมกนีตรอนแบบสามัญ  
(conventional magnetron)

2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรง  
แม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วน  
ที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตร  
ประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type 1)

3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรง  
แม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงส่วนหนึ่งจะ  
มีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced  
magnetron type 2)

ในกรณีดีสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก  
เท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำให้หน้าที่ยกเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิว  
เป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้า  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาด์เห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

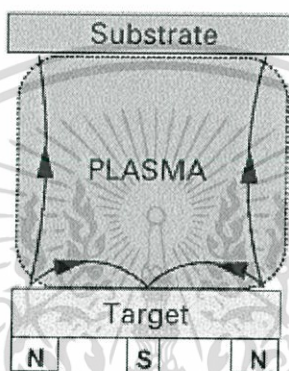
และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิซชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้าและจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น พิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำเป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.31 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

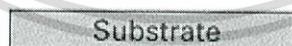
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอกในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับจึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยวินโดวส์และซาว์โวด์และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมามีว่าแผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ในระดับอื่นโดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริงและนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้าและอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ต่ออัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้นและการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีความมากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเครียดที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเครียดภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการใช้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

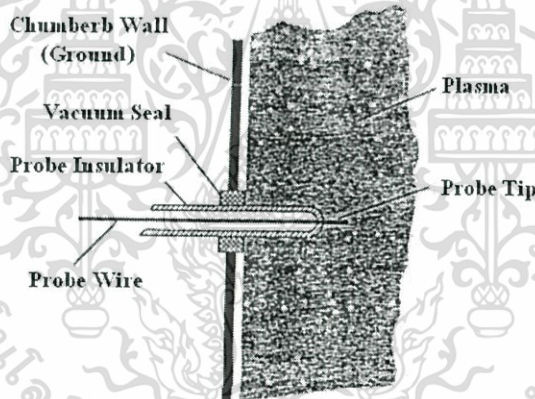
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 คุณสมบัติทางพลาสมา

### 2.12.1. หัววัดลางมัวร์

หัววัดลางมัวร์เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ปกคลุมด้วยฉนวน ยกเว้นที่ปลายหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา หัววัดทำมาจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงเช่น ทังสเตน โมลิตินัม หรือแพททินัม โดยจะใช้หัววัดลางมัวร์ในการวิเคราะห์พลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาเย็น โดยใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของพลาสมา ( $n$ ) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน ( $T_e$ ) ศักย์ของพลาสมา ( $V_p$ ) และศักย์ลอย (floating potential:  $V_f$ )

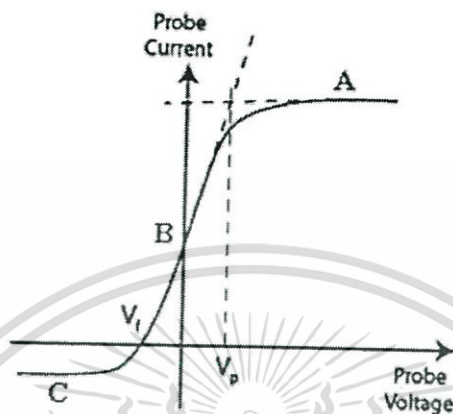
ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินการโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัวที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.33 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในรูปที่ 2.34 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาสำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (saw tooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบผนังของภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 2.34 หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

### 2.12.2. ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยววางมีร์วิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง  $V_p$  ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาซีท อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง  $V_p$  กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} e A n_e \left( \frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.112)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง  $V_p$  ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว ( $I_{se}$ )

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงต่ำกว่าตำแหน่ง  $V_p$  ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_e = e A n_e \left( \frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left( \frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอง ( $V_p$ ) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง  $V_p$  ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด และจะสร้างพลาสมาซีที่ขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านของซีทจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณที่กระแสไอออนอิมิตัว ( $I_{is}$ ) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออนจะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} eAn_i \left( \frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.114)$$

### 2.12.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน ( $T_e$ )

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.110) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (2.115)$$

หรือจะหาค่า จากการรวมสมการที่ (2.111) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.112) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

$$I = -\frac{1}{2} eAn_i \left( \frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} eAn_e \left( \frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left( \frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.116)$$

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

$$I = \frac{1}{2} eAn \left( \frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ -1 + \left( \frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left( \frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.117)$$

ที่ตำแหน่ง  $V_f$  กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $I=0$ )

$$I = 0 = \frac{1}{2} eAn \left( \frac{kT}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ -1 + \left( \frac{2i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e(V_f - V_p)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.118)$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln \left( \frac{2m_i}{\pi m_e} \right)} \quad (2.119)$$

หน่วยของ  $kT_e/e$  คือโวลต์ ดังนั้นสามารถหา  $kT_e$  ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

### 2.12.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา

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

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6 A e} \left( \frac{m_i}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.120)$$

โดย

A คือ พื้นที่ของวัดที่สัมผัสกับพลาสมา  
 $I_{is}$  คือ กระแสไอออนอิมิต์  
 $m_i$  คือ มวลของไอออน

### 2.12.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้าแต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์  $r = mv_{\perp}/Bq$  เป็นผลทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลรวมของสนามแม่เหล็กสามารถละลายได้ในกรณีที่  $r \gg a$  เมื่อ  $a$  คือขนาดของหัววัด

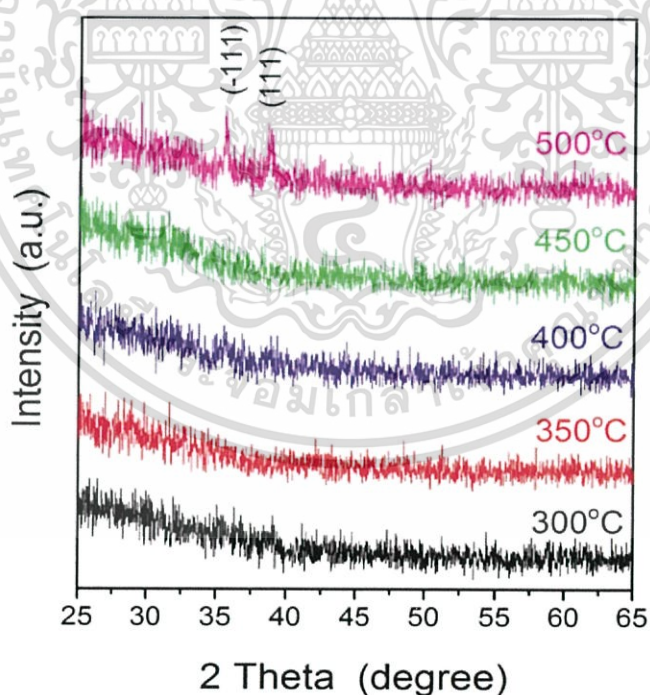
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.13.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะCu (วรรณนิศา สุขศรี, วลัยพัชร์ ใจเรื่อน และ ศวิตา ทศนิยม.2556)

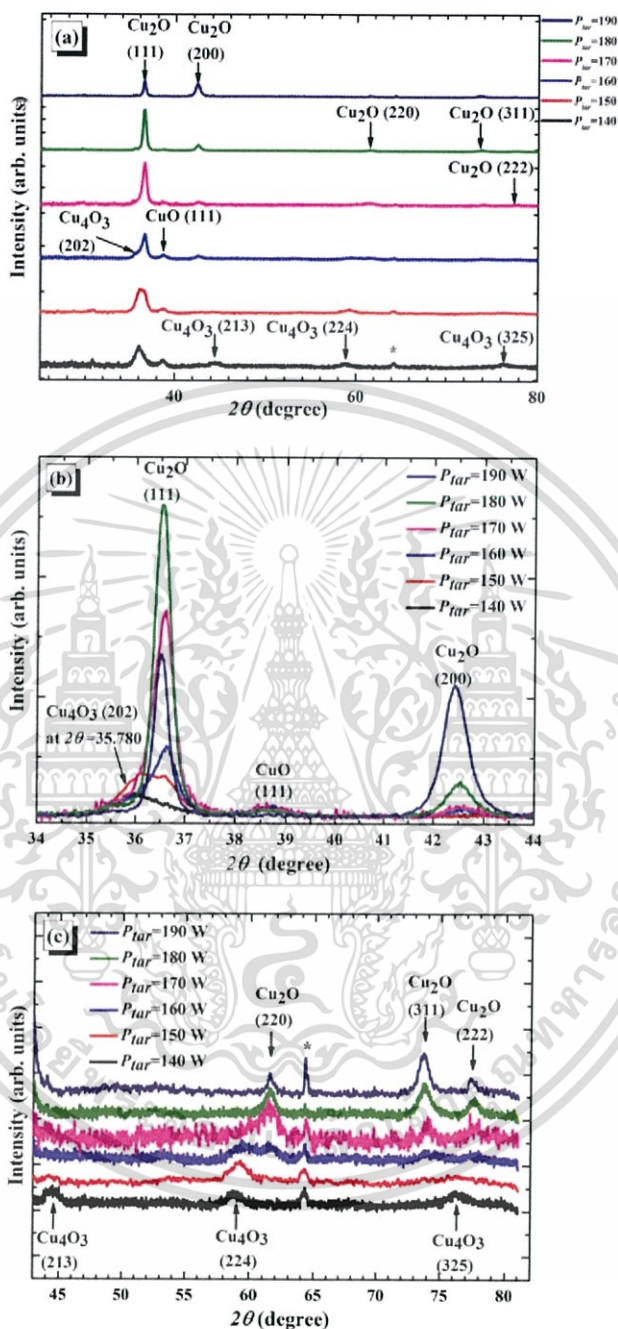
ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะทำการศึกษาคross-section ผลึกทั้งจุลภาค และเชิงมหภาค อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และศึกษาสมบัติทางแสงด้วย



รูปที่ 2.36 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.2 ผลของกำลังไฟฟ้าของเป้าที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{Cu}_x\text{O}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็กทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงด้วยคลื่นวิทยุ (J. Gan , V. Venkatachalapathy, B.G. Svensson and E.V. Monakhov.)



รูปที่ 2.37 แสดง (a) รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง  $\text{Cu}_x\text{O}$  บนแผ่นฐานรองรับควอทซ์

(b) การเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างรูปแบบ XRD  $2\theta$  อยู่ในช่วง  $34-44^\circ$  โดยไม่มีการ

เลื่อนแกน (c) รูปแบบขยาย XRD  $2\theta$  ในช่วง  $43-82^\circ$  โดยมีการเลื่อนแกน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อเวลาที่ พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2551; งามนิตย, 2551; นันธิดา, 2550)

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบไปด้วย
  - อะซิโตน ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
  - เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )
  - น้ำปอดประจุ (DI water)
- แผ่นกระจกสไลด์ 12 x 25 มิลลิเมตร
- ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิก

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

- กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
- อะซิโตน ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- สำลีสําหรับการเช็ดทำความสะอาด
- เป้าคอปเปอร์ ( $\text{Cu}$ )
- เครื่องสปัตเตอริง

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

#### 3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน  $\text{CuK}\alpha$  มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

#### 3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) MODEL : EVO@MA10 สามารถวัดในโหมด Secondary Electron, Backscattered Electrons และ VP Mode ซึ่งวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

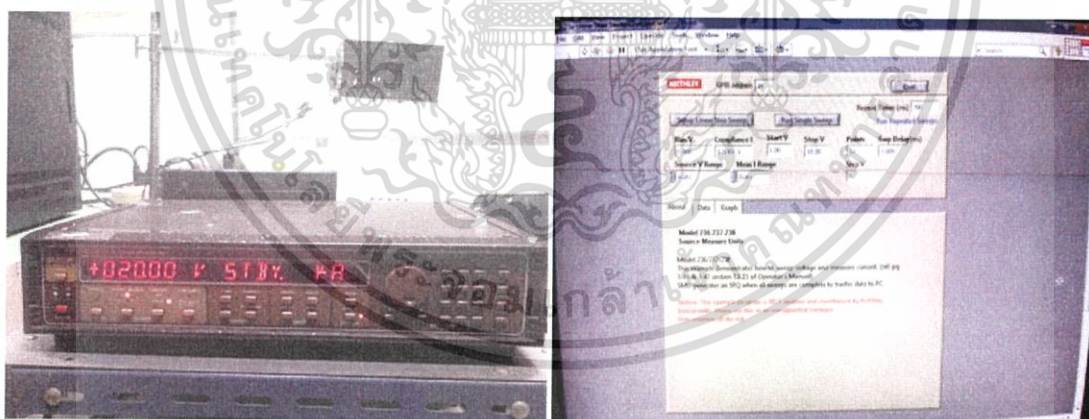
ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation (He  $\lambda$  ios  $\alpha$ ) ความยาวคลื่นแสงในช่วง 200-1,000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He  $\lambda$  ios  $\alpha$ )

### 3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

- อิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View

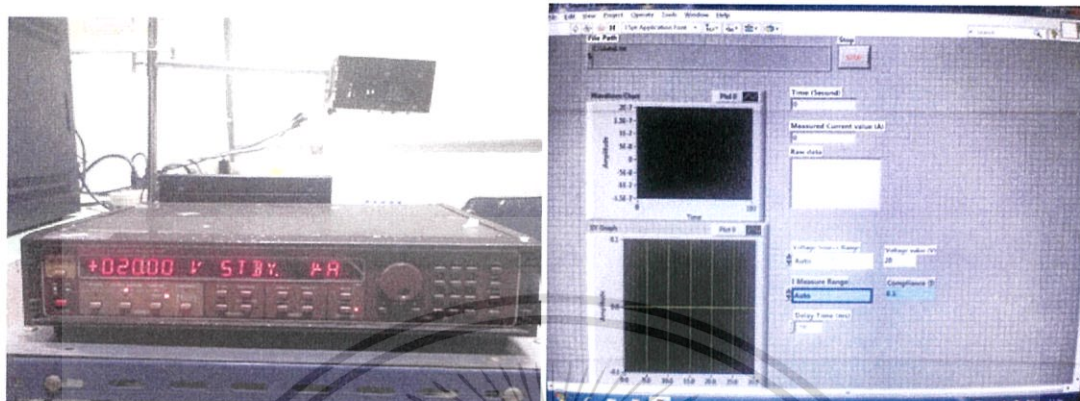


รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง

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



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

### 3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง

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

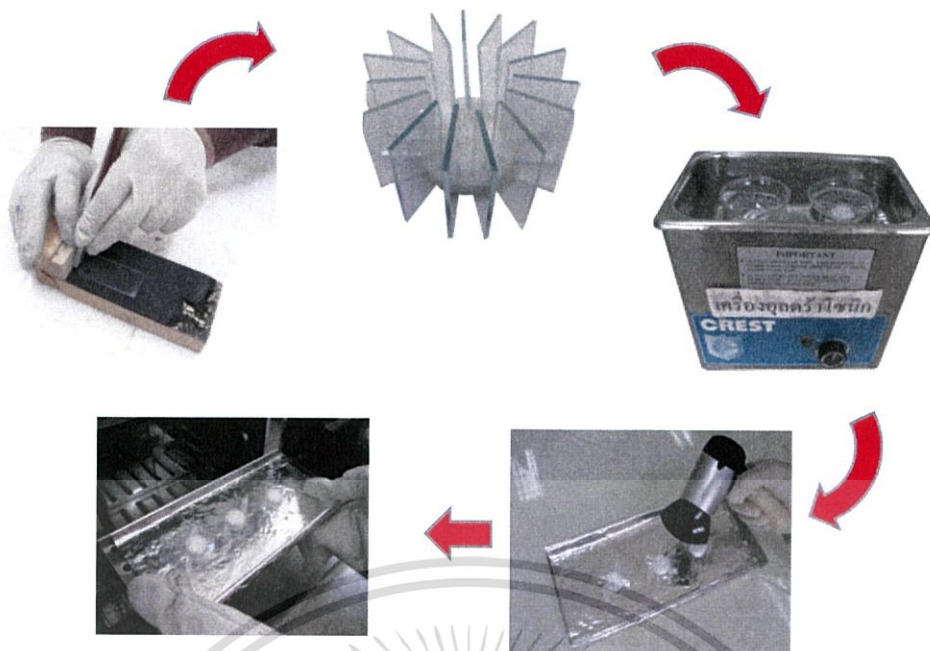


รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง (งามนิตย, 2543; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2551)

#### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้ง  
เป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

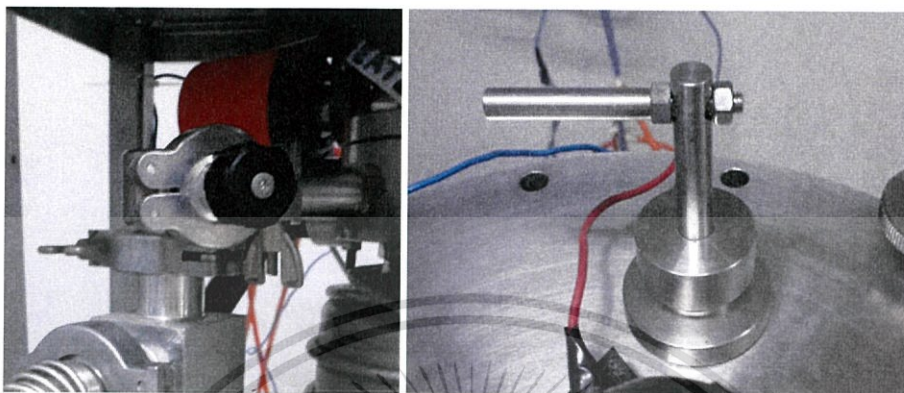
### 3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ( CuO ) ที่เตรียมได้โดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปั้มน้ำ ( WATER PUMP ) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป้าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ซิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป้าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป้าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ซิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างซีเตอร์และกราวด์ซิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเข้าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



(ก.)

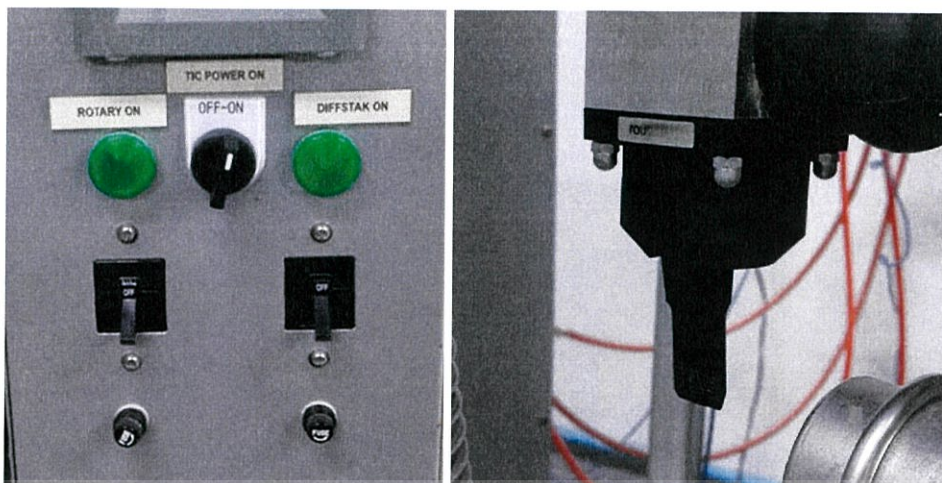
(ข.)

รูปที่ 3.9 (ก) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า

(ข) ภาพแสดงคั่นบังคับขีดเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

8. ปิดขีดเตอร์ (คั่นบังคับ) อยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ เพื่อบังคับเข้าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคั่นโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวยังไม่เพียงพอสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน
13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.10 (ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลูอิดกระจาย)  
(ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

14. เมื่อครบ 15 นาที เปิดวาล์วหลังโดยโยกตำแหน่งไปที่ Backing และปรับคั่นโยกของวาล์วผีเสื้อ (butterfly valve) ไปที่ตำแหน่งเปิด (open) (ดันคั่นโยกออกจากตัวจนสุด) หากดันคั่นโยกออกจากตัวตำแหน่งของวาล์วผีเสื้อคือเปิดแต่ถ้าดึงเข้าหาตัวคือ ปิด



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.11 (ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open

(ข) ภาพแสดง speedy valve

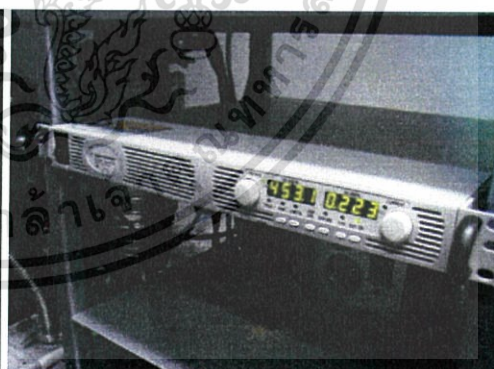
15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ  $3 \times 10^{-5}$  ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พิวานีเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง  $10^{-3}$  ทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพนนิ่งเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก  $10^{-3}$  –  $10^{-6}$  ทอร์
- 16. การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุด และใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนอาร์กอนแล้วสูบล้อออกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้
  - เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิด butterfly valve และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ  $7.5 \times 10^2$  ทอร์
  - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น  $3 \times 10^{-5}$  ทอร์ (สูบล้ออาร์กอนครั้งที่ 1)
  - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ  $7.5 \times 10^2$  ทอร์
  - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น  $3 \times 10^{-5}$  ทอร์ (สูบล้ออาร์กอนครั้งที่ 2)
  - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ  $7.5 \times 10^2$  ทอร์
  - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น  $3 \times 10^{-5}$  ทอร์ (สูบล้ออาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.12 (ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

(ข) ภาพแสดง power supply

17. เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ  $3 \times 10^{-5}$  ทอร์

18. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม cut on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.13 (ก) ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply

(ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

20. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆช้าจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมาไม่เสถียรยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมาเริ่มมีพลังงานและสถานะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก



รูปที่ 3.14 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 2.0 ,4.0 ,6.0 ,8.0 และ10.0 sccm
22. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกบนอกฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



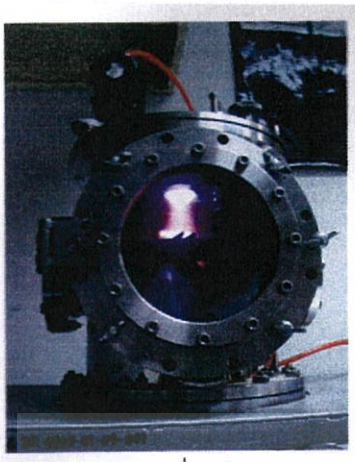
(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.15 (ก) ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด

(ข) ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

23. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการสปีดเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาดเรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสปีดเตอริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้



แรงดันไฟฟ้า : 360 โวลต์

กระแส : 0.05 แอมป์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ :  $5 \times 10^{-3}$  ทอร์

ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 30 นาที

### รูปที่ 3.16 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

24. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชุดเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตซ์สี่ตำแหน่ง
25. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูเลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
26. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าตัว)
27. โยกสวิตซ์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
28. ปิดสวิตซ์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
29. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิตซ์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะตั้งออกมาเอง
30. เปิดฝาหน้าออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ(ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

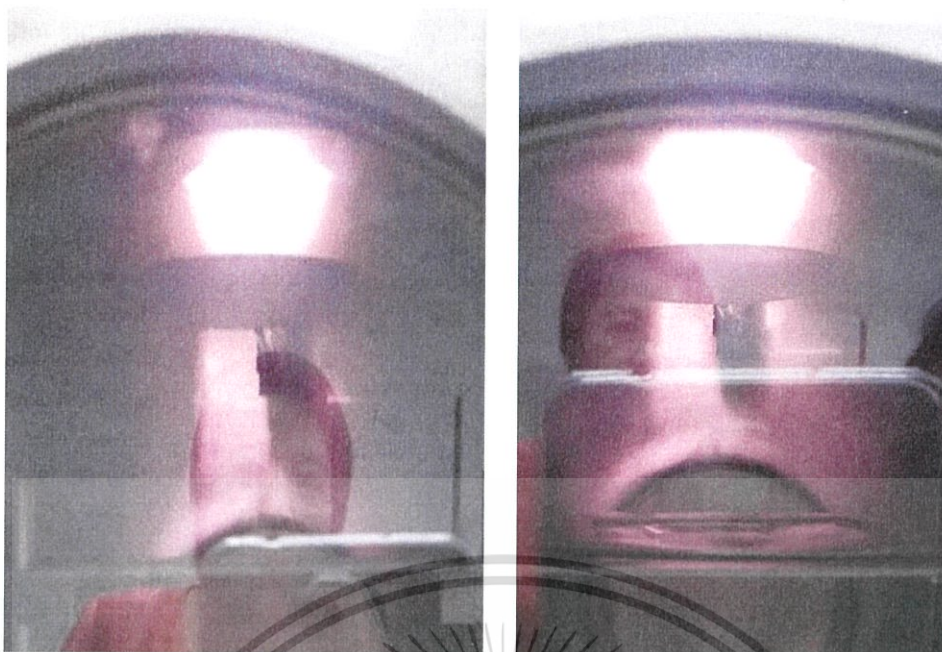
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางแสงและศึกษาสมบัติทางแสงไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วย

#### 4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดิสซาร์จ

ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป่าทองแดงความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 630 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไอปฏิกิริยา บีมสุญญากาศประกอบด้วยปั๊มแพรวไอน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 9 เซนติเมตร ความดันพื้นฐานเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-5}$  ทอร์ เริ่มทำการทดลองโดยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันของห้องสุญญากาศที่อ่านได้จากเกจพิรานี (Pirani gauge) ในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวบน อ่านได้เท่ากับ  $2.3 \times 10^{-1}$  ทอร์ ส่วนความดันที่อ่านได้จากเกจเพนนิ่ง (Penning gauge) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวล่าง อ่านได้เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  ทอร์ ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึง 237 โวลต์ การโกลดิสซาร์จจึงเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสซาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทลายทาวนด์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ เพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ  $2.4 \times 10^{-2}$  และ  $4.3 \times 10^{-4}$  ทอร์ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโคจรดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ  $2.4 \times 10^{-2}$  และ  $4.3 \times 10^{-4}$  ทอร์ ตามลำดับ

เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงไปอีก พบว่าลำพลาสมาจะเร็วเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพื่อให้ลำพลาสมาพุ่งโตขึ้นและการโคจรดิสชาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จต่อไปอีก สีของการโคจรดิสชาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโคจรดิสชาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ลำพลาสมาจะโตขึ้นและยืดออกมามากขึ้น) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโคจรดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1



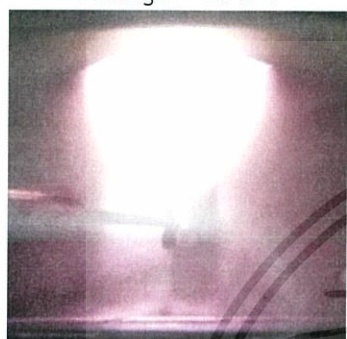
Ar flow rate = 50 sccm  
Voltage = 291 V



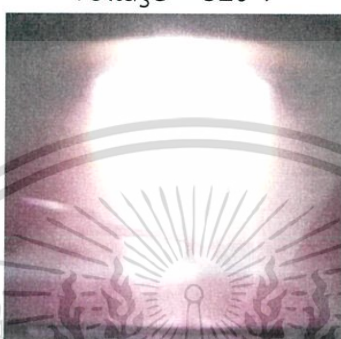
Ar flow rate = 45 sccm  
Voltage = 320 V



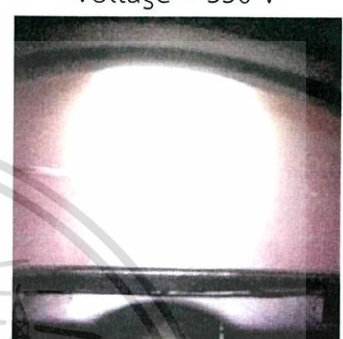
Ar flow rate = 40 sccm  
Voltage = 330 V



Ar flow rate = 35 sccm  
Voltage = 337 V



Ar flow rate = 32 sccm  
Voltage = 350 V



Ar flow rate = 30 sccm  
Voltage = 365 V

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

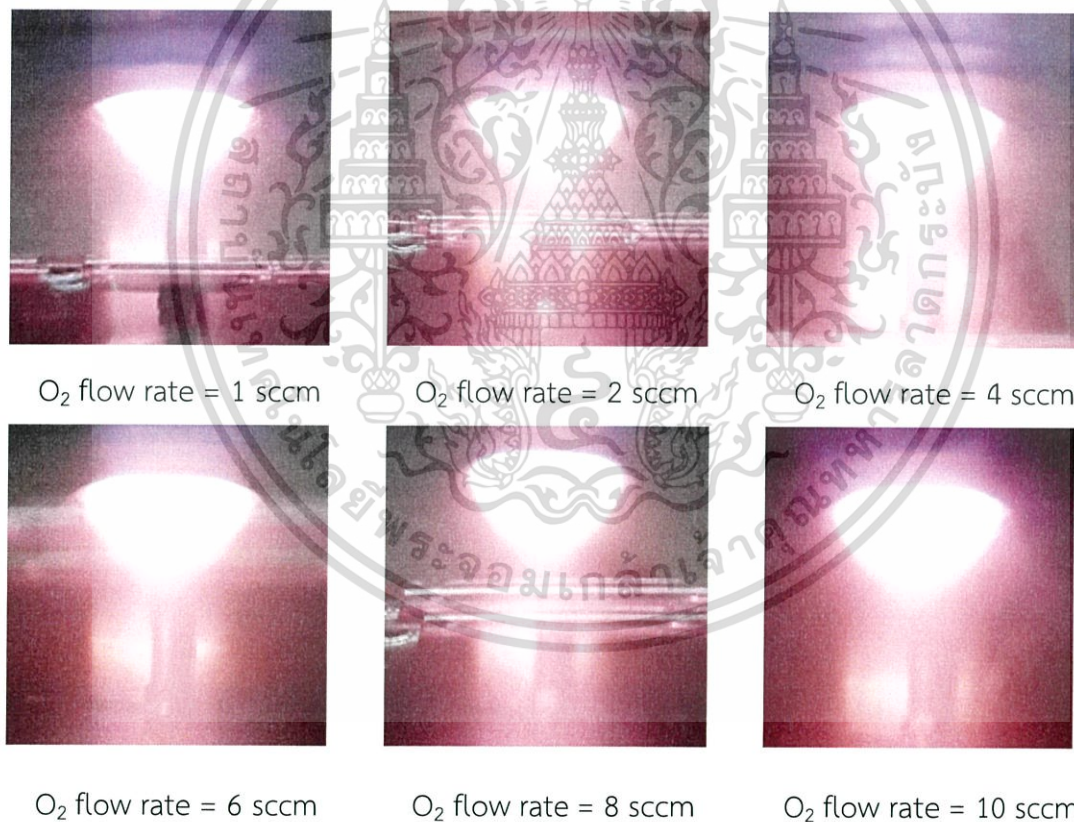
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ด้วยวิธีดีซีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง

Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Characteristics
50	ตัวบน = $2.3 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $3.0 \times 10^{-3}$	237.2	0.013	แรงดันพังทะลายทาวนเซนต์ ซึ่งก็คือแรงดันที่จุดติดพลาสติก
	ตัวบน = $2.3 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $3.0 \times 10^{-3}$	253.9	0.024	พลาสติกสีม่วง
	ตัวบน = $2.3 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.8 \times 10^{-3}$	291.0	0.052	พลาสติกสีม่วงเข้ม
	ตัวบน = $2.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.9 \times 10^{-3}$	300.0	0.059	พลาสติกสีม่วงอมน้ำเงิน
	ตัวบน = $2.3 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.9 \times 10^{-3}$	310.0	0.067	พลาสติกสีม่วงอมน้ำเงินมากขึ้น
45	ตัวบน = $2.0 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $2.1 \times 10^{-3}$	320.0	0.068	-
	ตัวบน = $2.0 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.7 \times 10^{-3}$	330.0	0.070	-
40	ตัวบน = $1.7 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.4 \times 10^{-3}$	330.0	0.065	-
35	ตัวบน = $1.6 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.4 \times 10^{-3}$	337.0	0.069	พลาสติกสีน้ำเงินเข้มใหญ่ขึ้น
32	ตัวบน = $1.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.2 \times 10^{-3}$	340.0	0.071	พลาสติกสีม่วงลดลง
	ตัวบน = $1.3 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $1.1 \times 10^{-3}$	350.0	0.075	พลาสติกสีม่วงอมน้ำเงินลดลง แสงสว่างมากขึ้น
30	ตัวบน = $1.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.8 \times 10^{-4}$	360.0	0.085	-
	ตัวบน = $1.5 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $8.2 \times 10^{-4}$	360.0	0.081	-
	ตัวบน = $1.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $7.5 \times 10^{-4}$	360.0	0.080	-
	ตัวบน = $1.5 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $7.2 \times 10^{-4}$	360.0	0.080	-
	ตัวบน = $1.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.2 \times 10^{-4}$	363.0	0.082	พลาสติกสีม่วงสว่างมากขึ้น
	ตัวบน = $1.4 \times 10^{-1}$ ตัวล่าง = $9.2 \times 10^{-4}$	365.0	0.085	พลาสติกสว่างมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง จะเริ่มจากการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตร บ่อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ ให้กับขั้วคาโทด จนกระทั่งถึง 290 โวลต์ สภาพโกลดิสซาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดีสซาร์จขึ้น จนได้ความดันความดันที่อ่านโดยเกจพิราณี  $4.0 \times 10^{-3}$  -  $6.0 \times 10^{-3}$  ทอร์ ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงจะแสดงตามตารางที่ 4.2 และสภาพโกลดิสซาร์จที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆจะแสดงตามรูปที่ 4.3



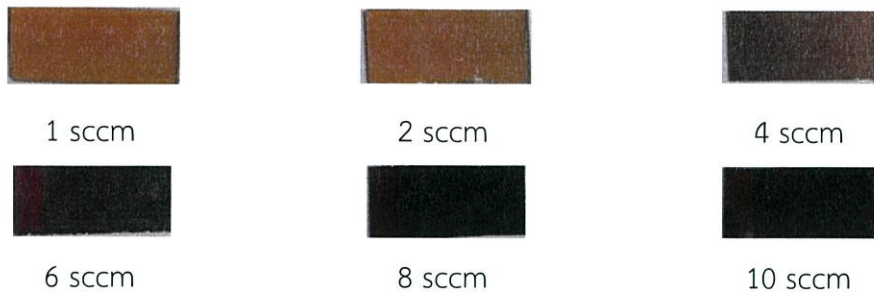
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Sputtering Conditions						Film Characteristics
	Argon flow rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering time (min)	
1	31.5	บน = $5.4 \times 10^{-3}$ ล่าง = $1.3 \times 10^{-4}$	360.0	0.046	16.6	25	ฟิล์มสีน้ำตาลแดง
2	22	บน = $5.2 \times 10^{-3}$ ล่าง = $1.3 \times 10^{-3}$	385.0	0.040	15.4	40	ฟิล์มสีน้ำตาลแดง
4	22	บน = $5.9 \times 10^{-3}$ ล่าง = $1.2 \times 10^{-4}$	385.0	0.042	16.2	30	ฟิล์มสีน้ำตาล
6	22	บน = $6.4 \times 10^{-3}$ ล่าง = $1.3 \times 10^{-4}$	390.0	0.050	19.5	30	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้ม
8	13	บน = $5.6 \times 10^{-3}$ ล่าง = $1.1 \times 10^{-4}$	410.0	0.048	19.7	30	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำ
10	12	บน = $5.7 \times 10^{-3}$ ล่าง = $9.7 \times 10^{-5}$	410.0	0.057	23.4	30	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำ

ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะแสดงดังรูปที่ 4.1



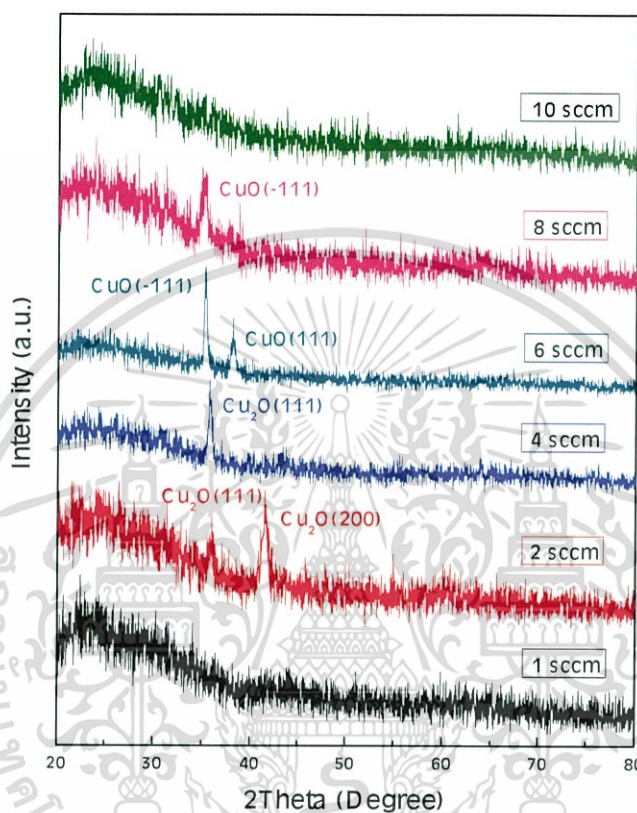
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

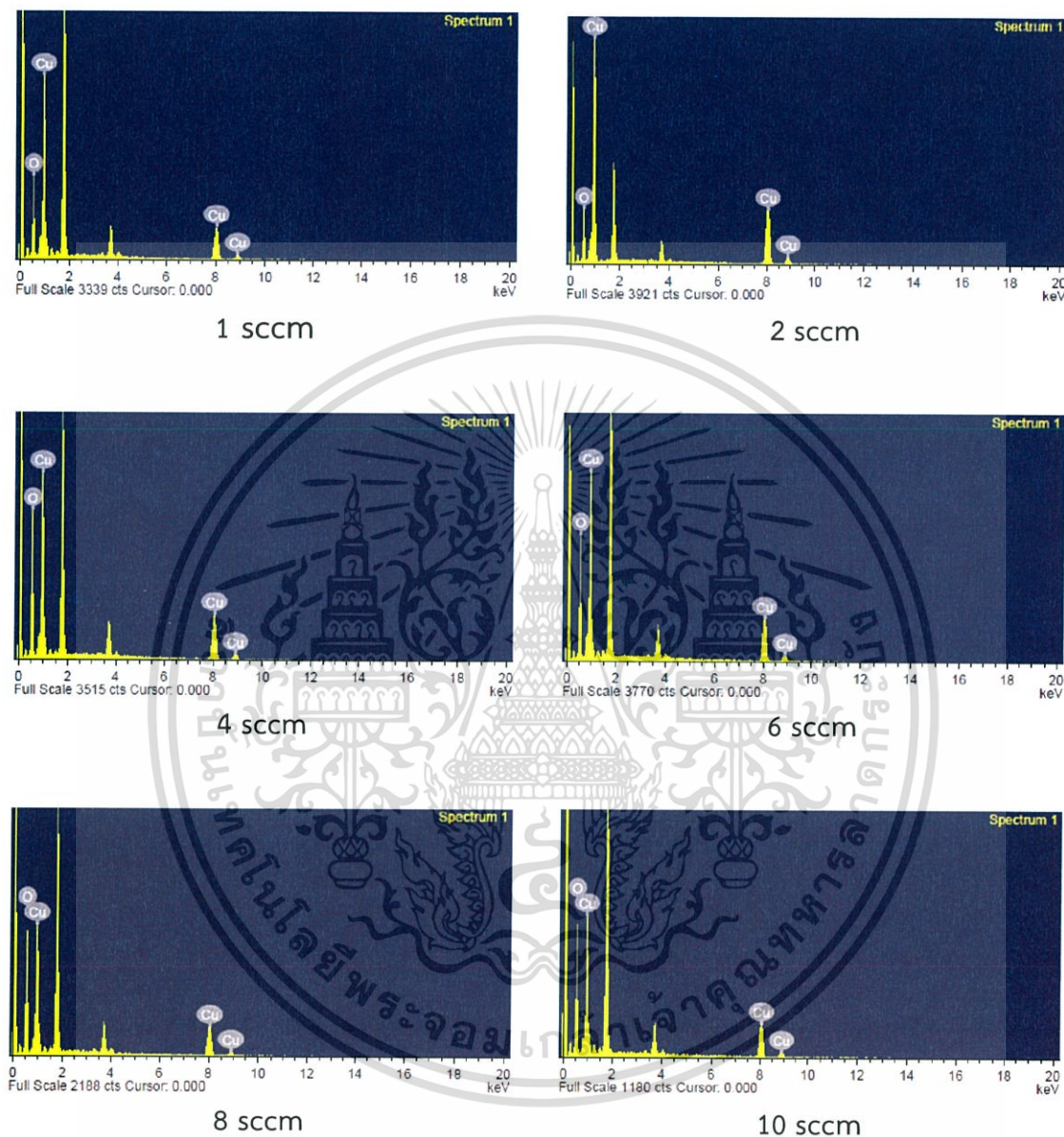
#### 4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะแสดงดังรูปที่ 4.2 จากพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เกิดระนาบการเลี้ยวเบน คือ (-111) และ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิกที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 และ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ในส่วนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu<sub>2</sub>O) เกิดระนาบการเลี้ยวเบน คือ (111) และ (200) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2 และ 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆแสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

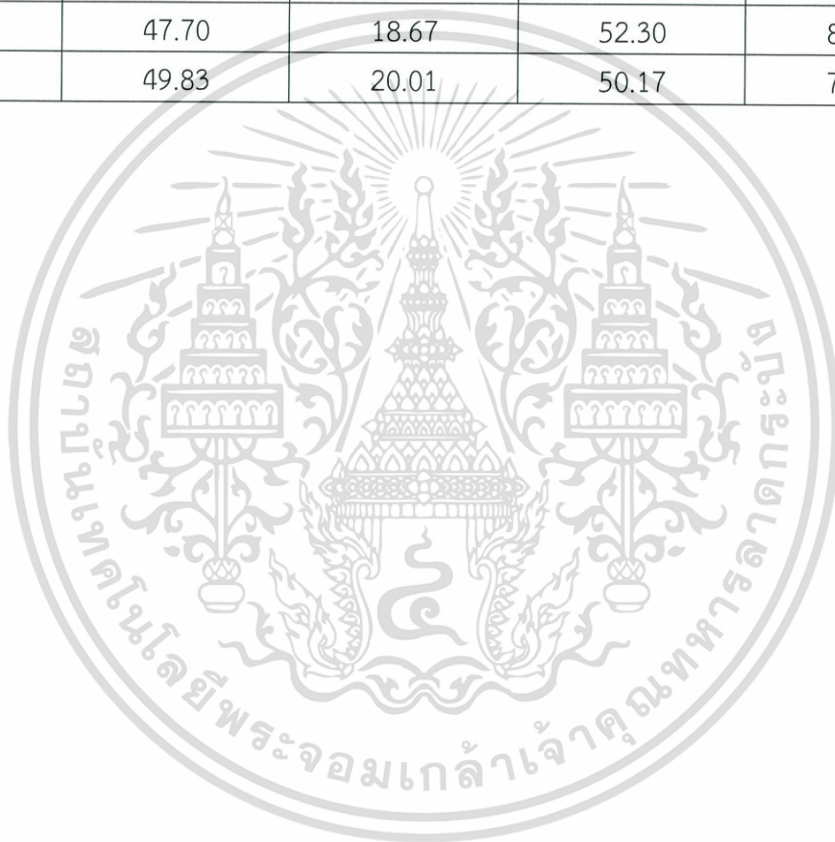
4.3.2 ผลการศึกษาธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

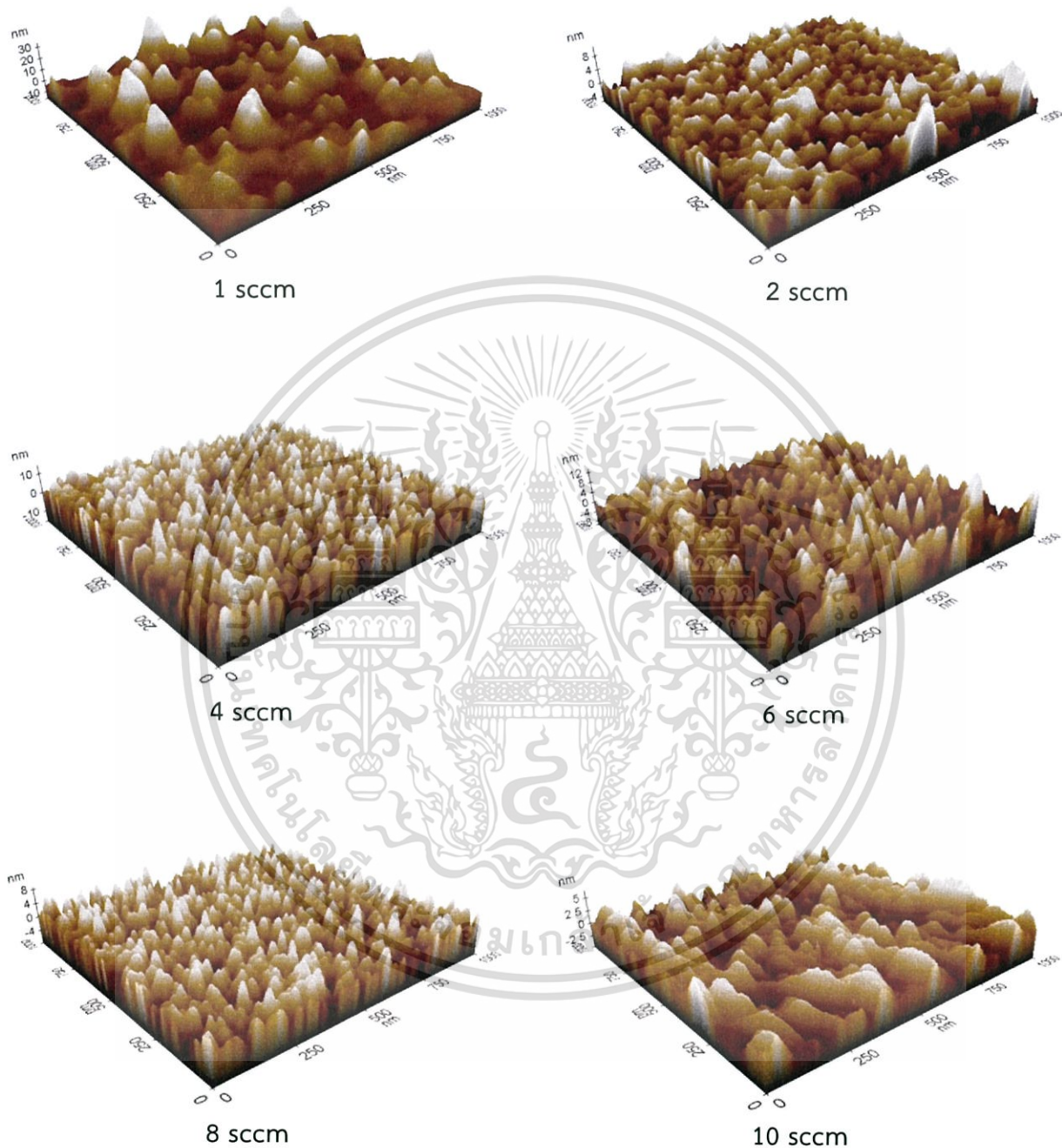
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen Flow rate of CuO (sccm)	Elements			
	Cu		O	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
1	58.64	26.31	41.36	73.69
2	74.96	42.98	25.04	57.02
4	52.21	21.57	47.79	78.43
6	54.09	23.52	45.01	76.48
8	47.70	18.67	52.30	81.33
10	49.83	20.01	50.17	79.99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีซีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอ็คทีฟทีพีซีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

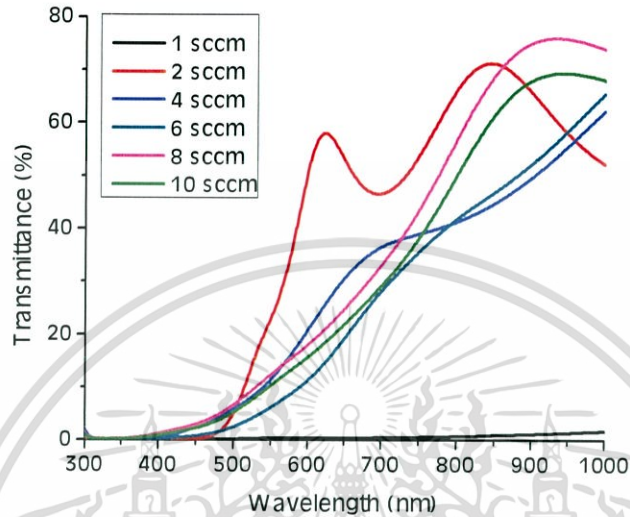
Oxygen Flow Rate (sccm)	Grain Size (nm)	Roughness(nm)
1	42.969	6.965
2	33.203	1.745
4	31.250	4.112
6	46.875	2.998
8	31.250	2.287
10	39.062	1.704



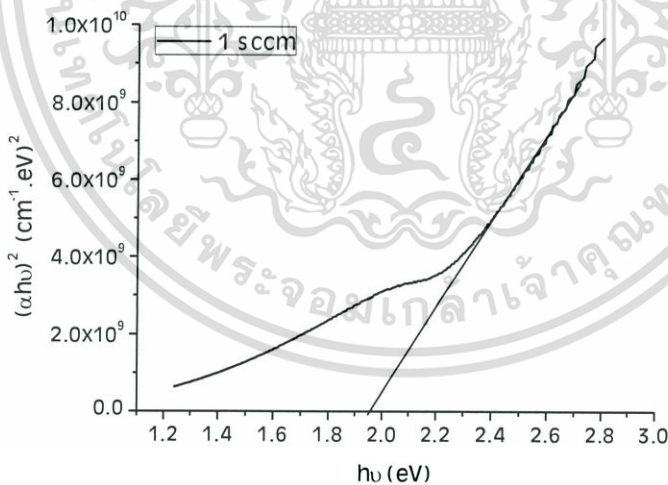
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

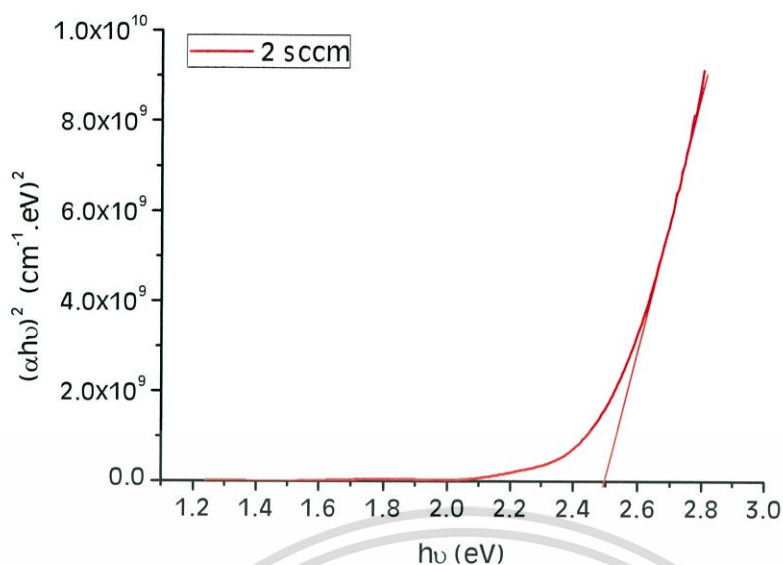
##### 4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



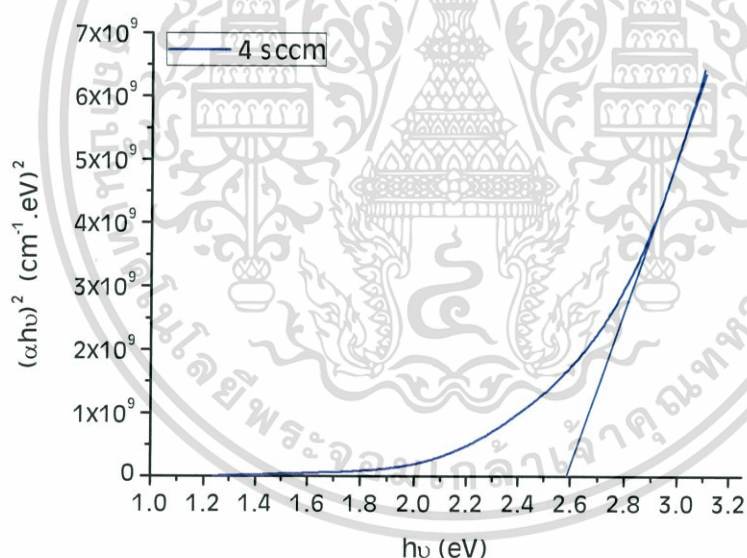
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ



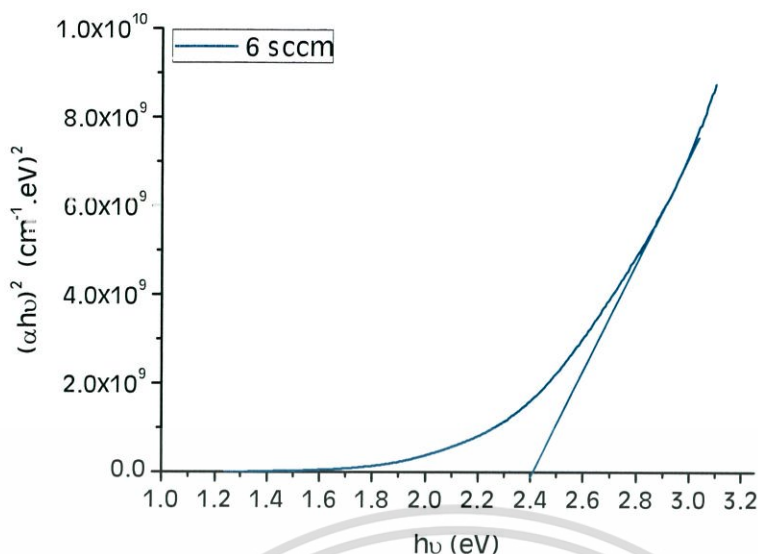
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



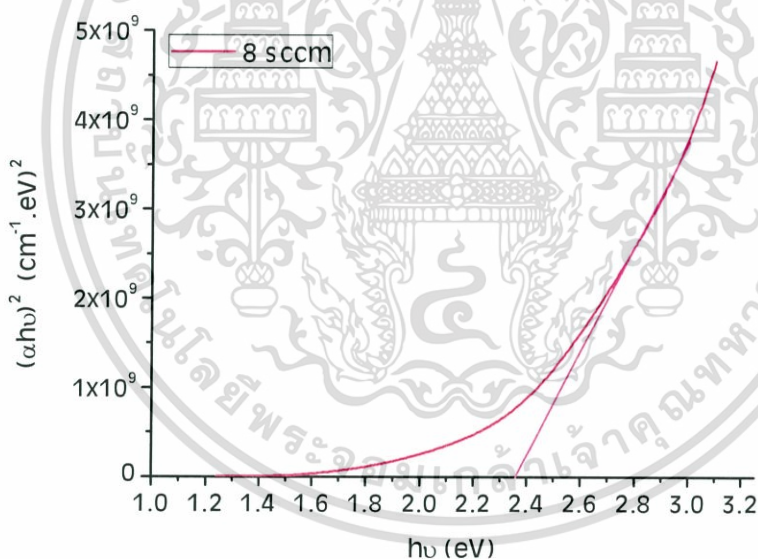
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



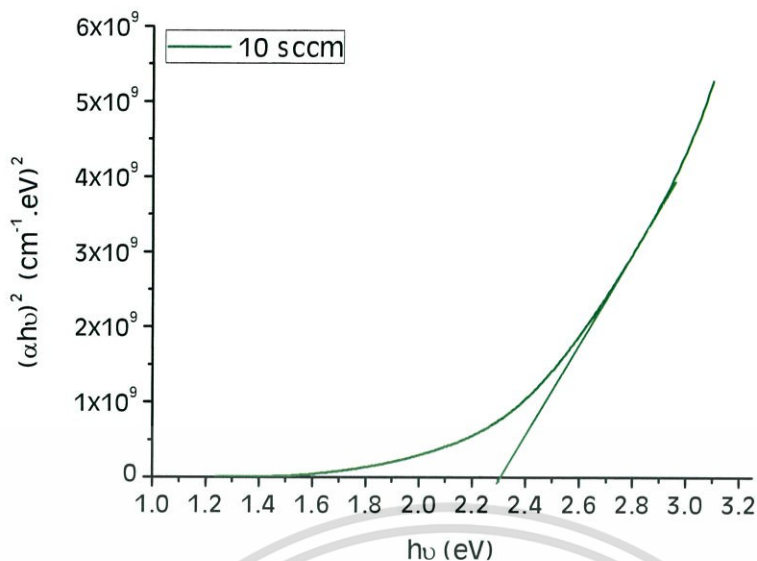
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



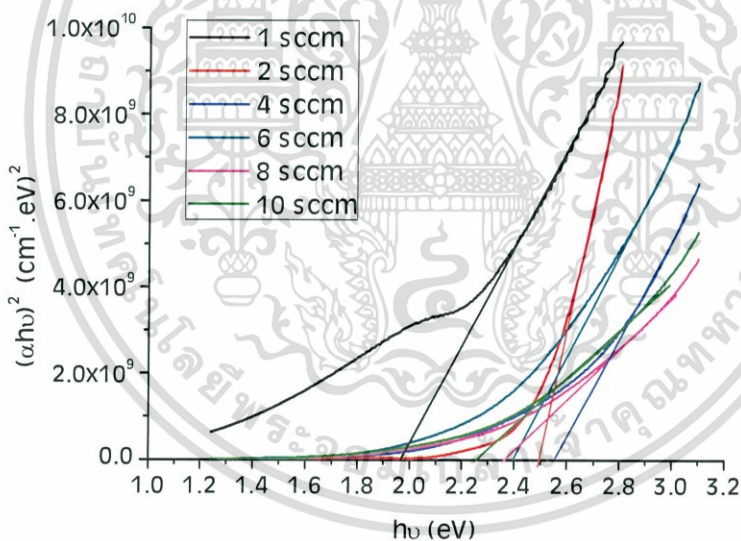
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

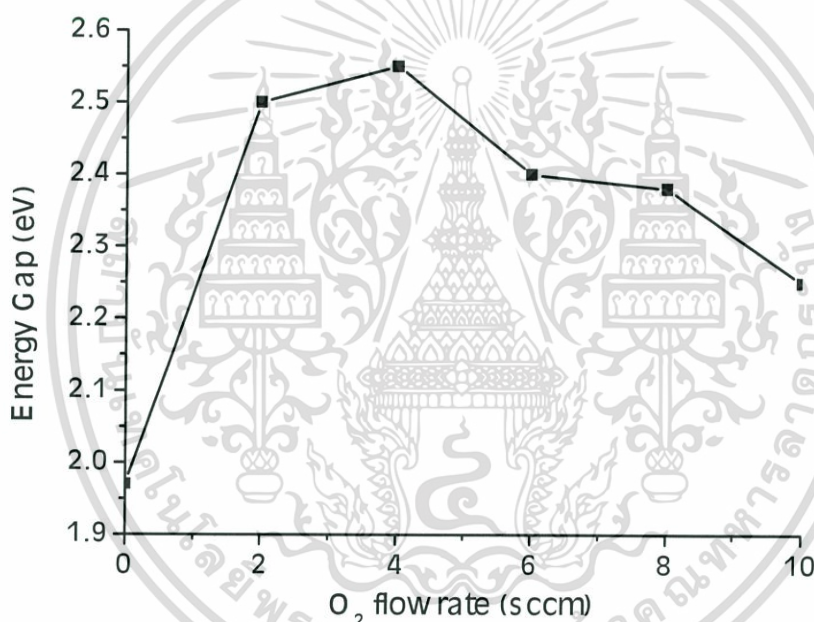


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1,2,4,6,8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	Energy Gap (eV)
1	1.97
2	2.50
4	2.55
6	2.40
8	2.38
10	2.25

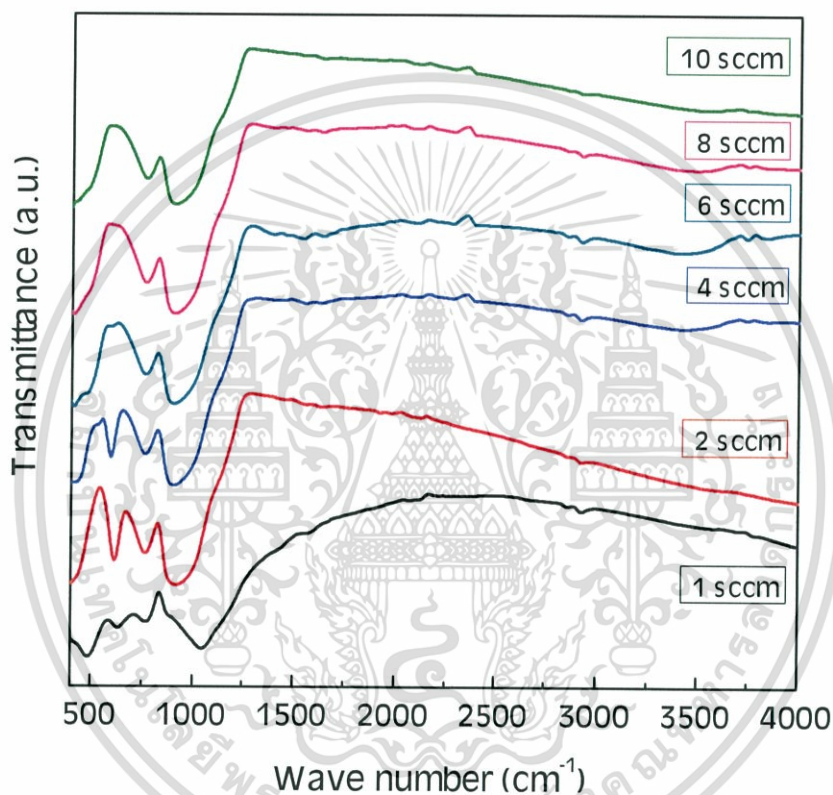


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสง (Transmittance : %T) ที่ใช้เลขคลื่นมีค่าในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

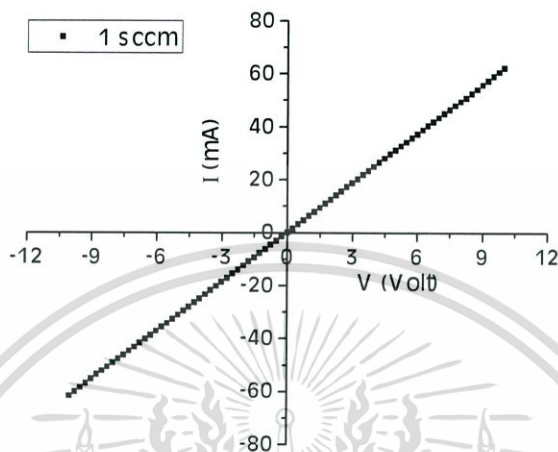
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	Peak of FTIR (cm <sup>-1</sup> )	Phase	Assignments Vibration Mode	References
1	485	CuO	Cu(II)-O	Fterich, 2016; Chen, 2009;
	633	Cu <sub>2</sub> O	Cu(I)-O	Guo, 2015; Kaviyarasan, 2016;
	770	CuO	Cu(II)-O	Arockiasamy, 2016;
	1046	Cu(OH)	Cu-OH	Fterich, 2016;
2	615	Cu <sub>2</sub> O	Cu(I)-O	Kardarian, 2016; chen, 2009
	765	CuO		
	918	CuO		
4	595	Cu <sub>2</sub> O		
	764	CuO	Cu(II)-O	
	905	CuO	Cu(II)-O	
	3438	Hydroxyls of absorbed water	Stretching vibration of OH	Guo, 2015; Arockiasamy, 2016;
6	590, 764, 904	CuO	Cu(II)-O	
	3407	Hydroxyls of absorbed water	Stretching vibration of OH	
8	764, 907	CuO		
	1641	Surface absorbed water	Bending vibration	Guo, 2015; Arockiasmy, 2016;
	3495	Hydroxyls of absorbed water	Stretching vibration of OH	
10	764, 907	CuO	Cu(II)-O	
	3400	Hydroxyls of absorbed water	Stretching vibration of OH	

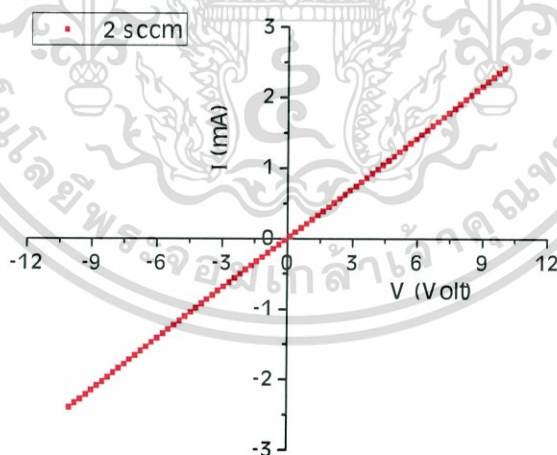
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

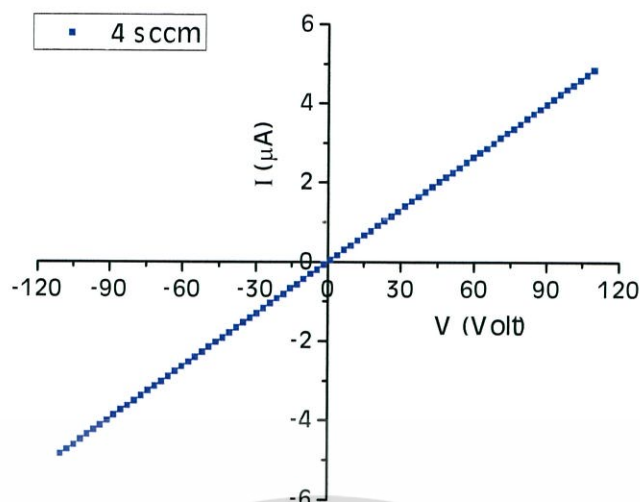
##### 4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง



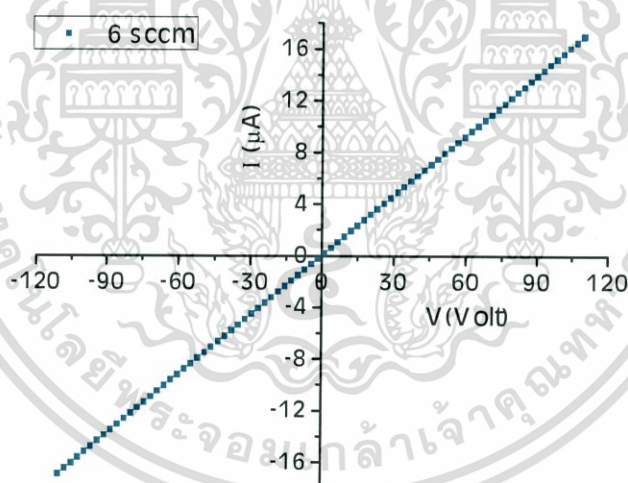
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

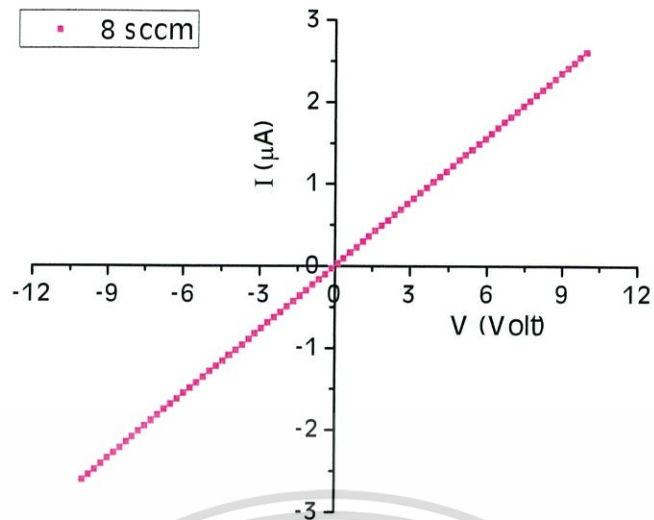


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

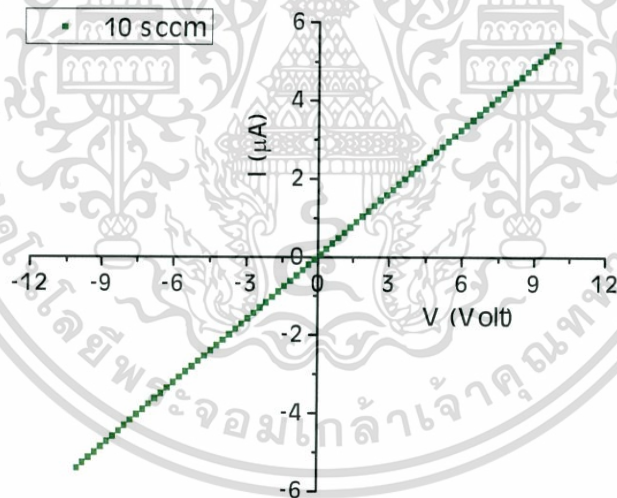


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแคทิพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแคทิพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

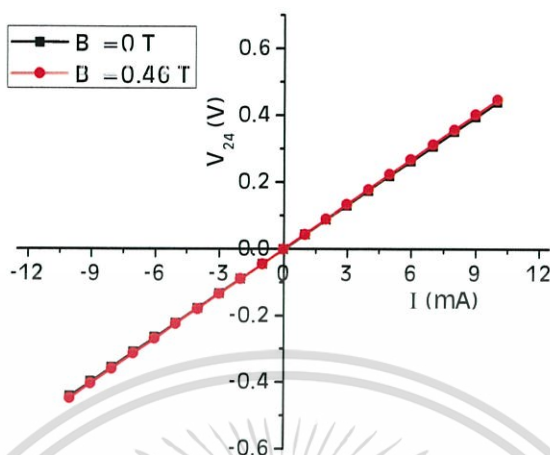
จากรูปที่ 4.18-4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทาน (Resistance) ความต้านทานแผ่น (sheet Resistance) และ สภาพนำไฟฟ้า (Resistivity)

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทาน ความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

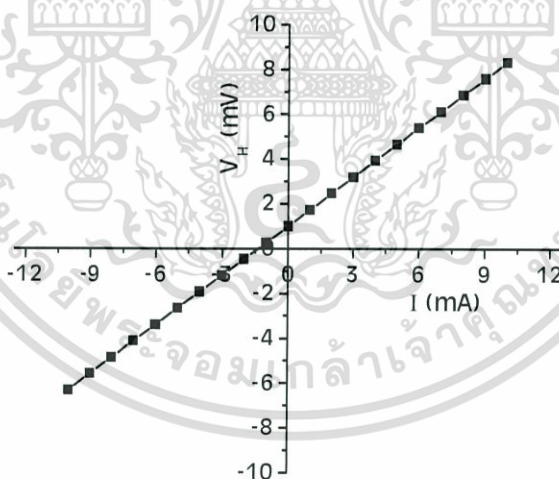
Oxygen flow rate (sccm)	Resistance $\Omega$	Sheet Resistance ( $\Omega/\text{sq}$ )	Resistivity ( $\Omega.\text{cm}$ )
1	$4.60 \times 10^1$	$1.38 \times 10^2$	$6.90 \times 10^{-3}$
2	$1.23 \times 10^3$	$3.70 \times 10^3$	$1.85 \times 10^{-1}$
4	$1.24 \times 10^7$	$3.71 \times 10^7$	$1.86 \times 10^3$
6	$3.82 \times 10^7$	$1.14 \times 10^8$	$7.22 \times 10^3$
8	$2.11 \times 10^5$	$6.34 \times 10^5$	$3.17 \times 10^1$
10	$2.34 \times 10^4$	$7.01 \times 10^4$	3.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

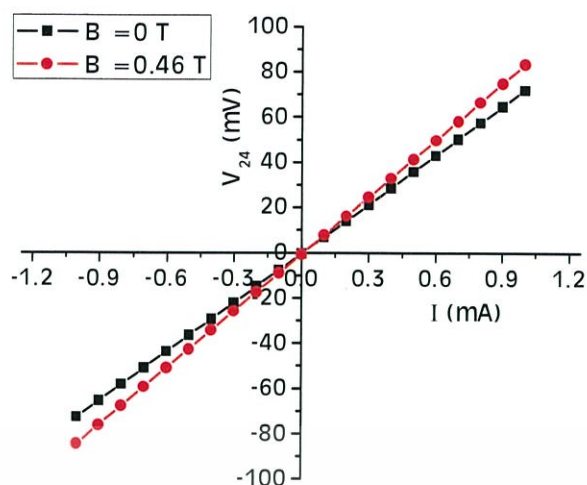
4.5.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง



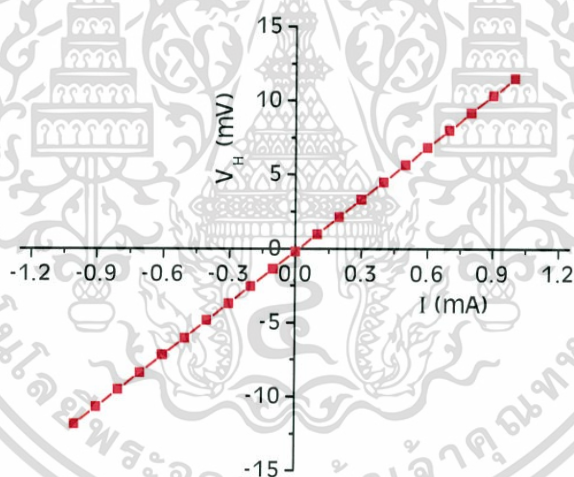
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



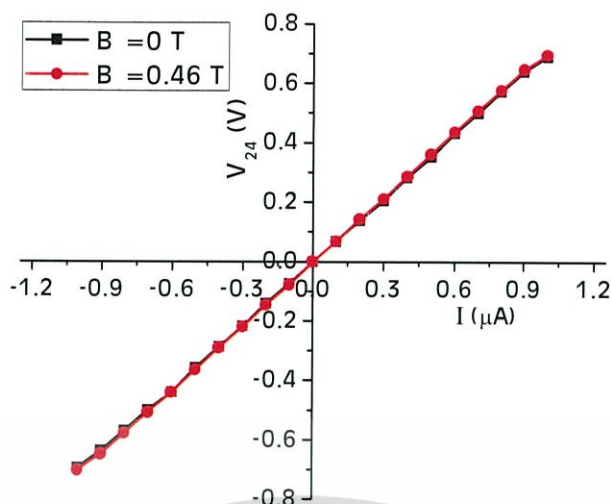
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



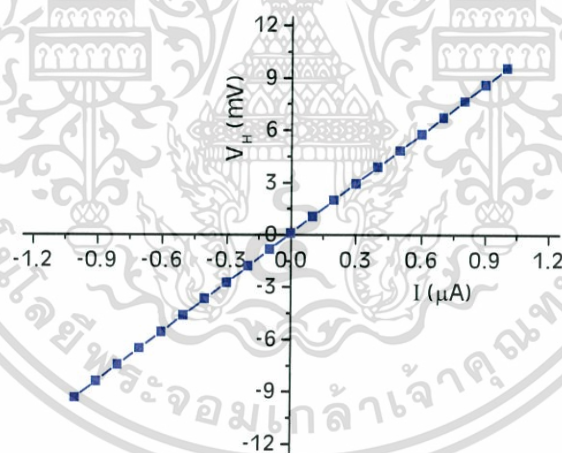
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



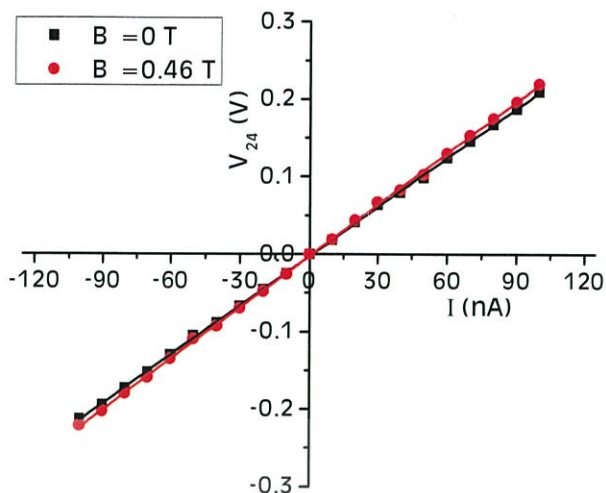
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



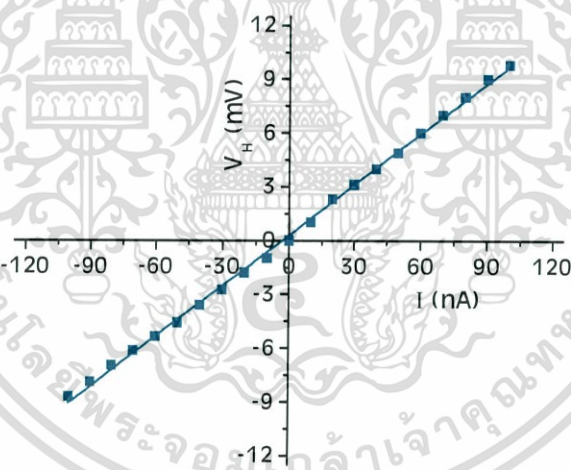
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

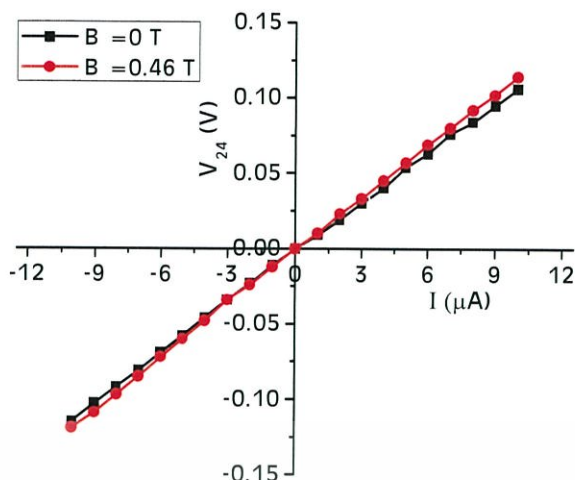


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

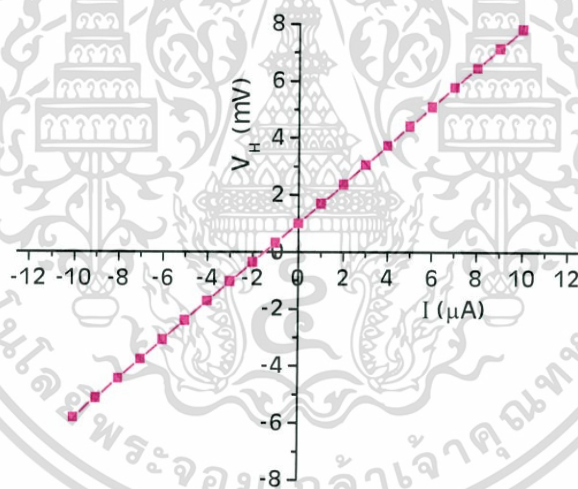


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

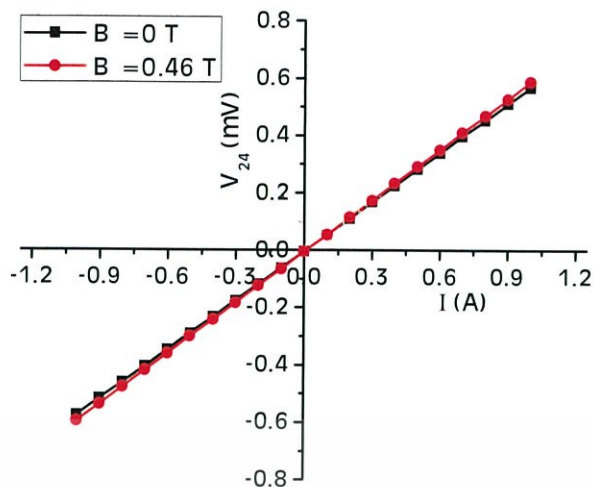


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

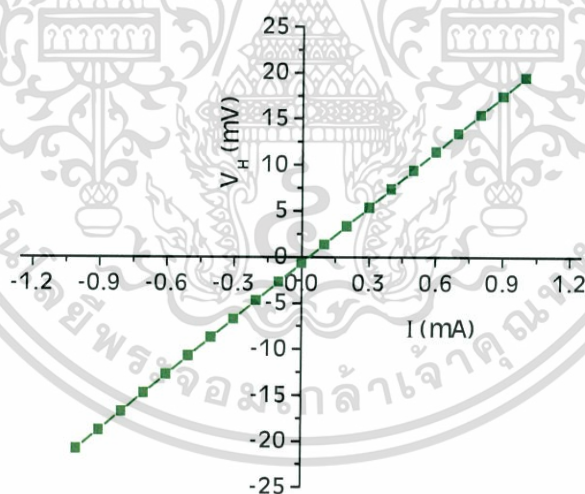


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



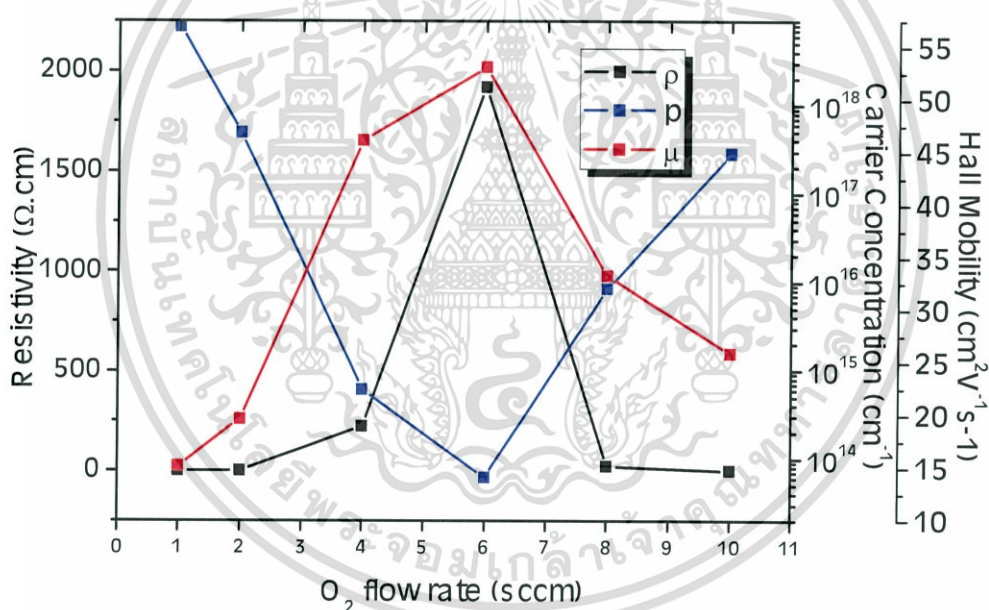
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง

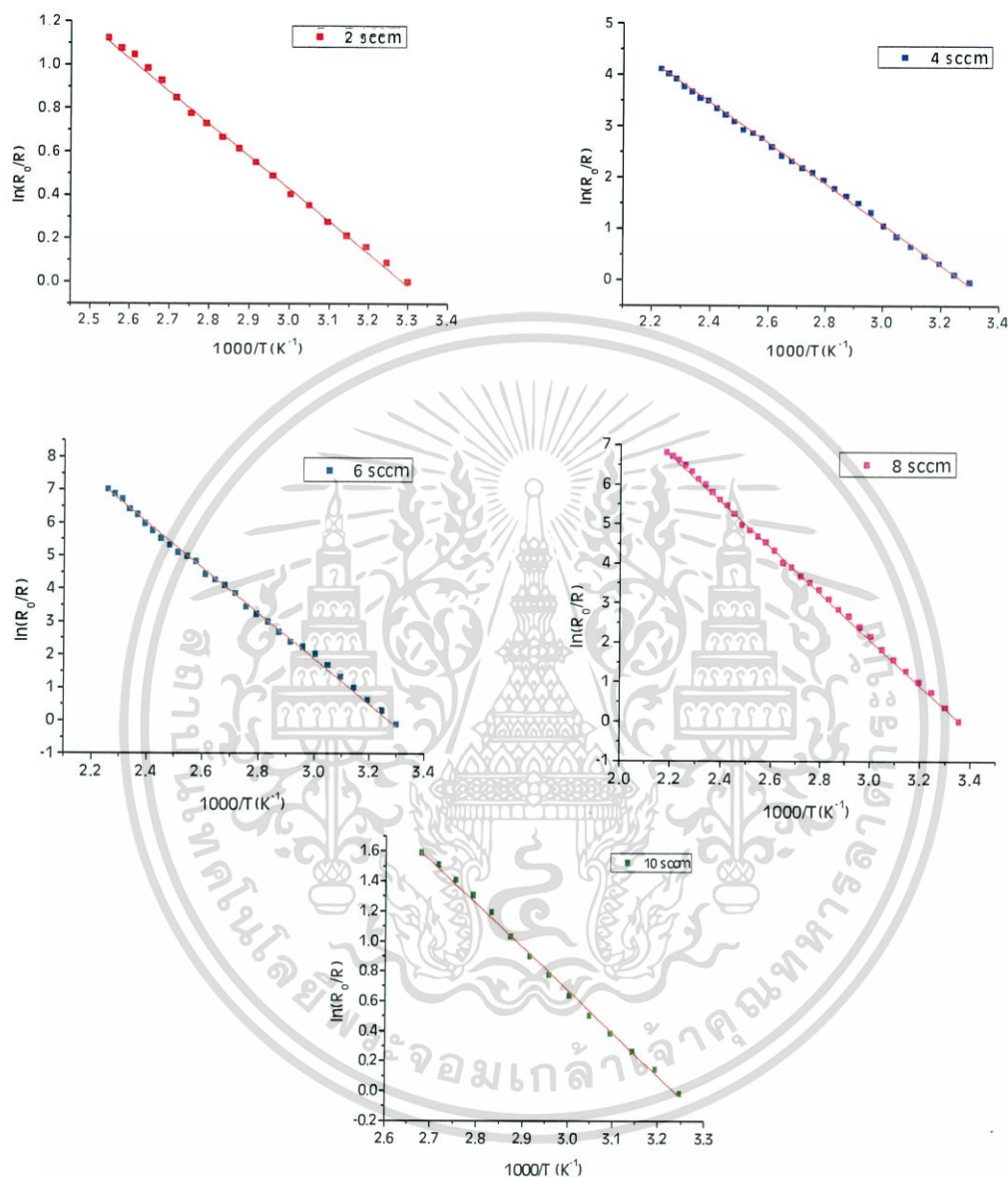
O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity (Ω.cm)	Hall Constant (cm <sup>3</sup> /C)	Hole Concentration (cm <sup>-3</sup> )	Hall Mobility (cm <sup>2</sup> /(V.s))
1	1.05×10 <sup>3</sup>	5.25×10 <sup>-2</sup>	7.96×10 <sup>-2</sup>	7.85×10 <sup>19</sup>	1.52
2	1.29×10 <sup>4</sup>	6.46×10 <sup>-1</sup>	1.27×10 <sup>0</sup>	4.91×10 <sup>18</sup>	1.97
4	4.45×10 <sup>6</sup>	2.22×10 <sup>2</sup>	1.03×10 <sup>3</sup>	6.08×10 <sup>15</sup>	4.62
6	3.97×10 <sup>7</sup>	1.92×10 <sup>3</sup>	1.02×10 <sup>4</sup>	6.12×10 <sup>14</sup>	5.31
8	4.45×10 <sup>5</sup>	2.23×10 <sup>1</sup>	7.41×10 <sup>1</sup>	8.43×10 <sup>16</sup>	3.33
10	1.69×10 <sup>4</sup>	8.46×10 <sup>-1</sup>	2.19×10 <sup>0</sup>	2.85×10 <sup>18</sup>	2.59



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $1000/T$  กับ  $\ln(R_0/R)$  เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้น กับ อัตราการไหลของออกซิเจน เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

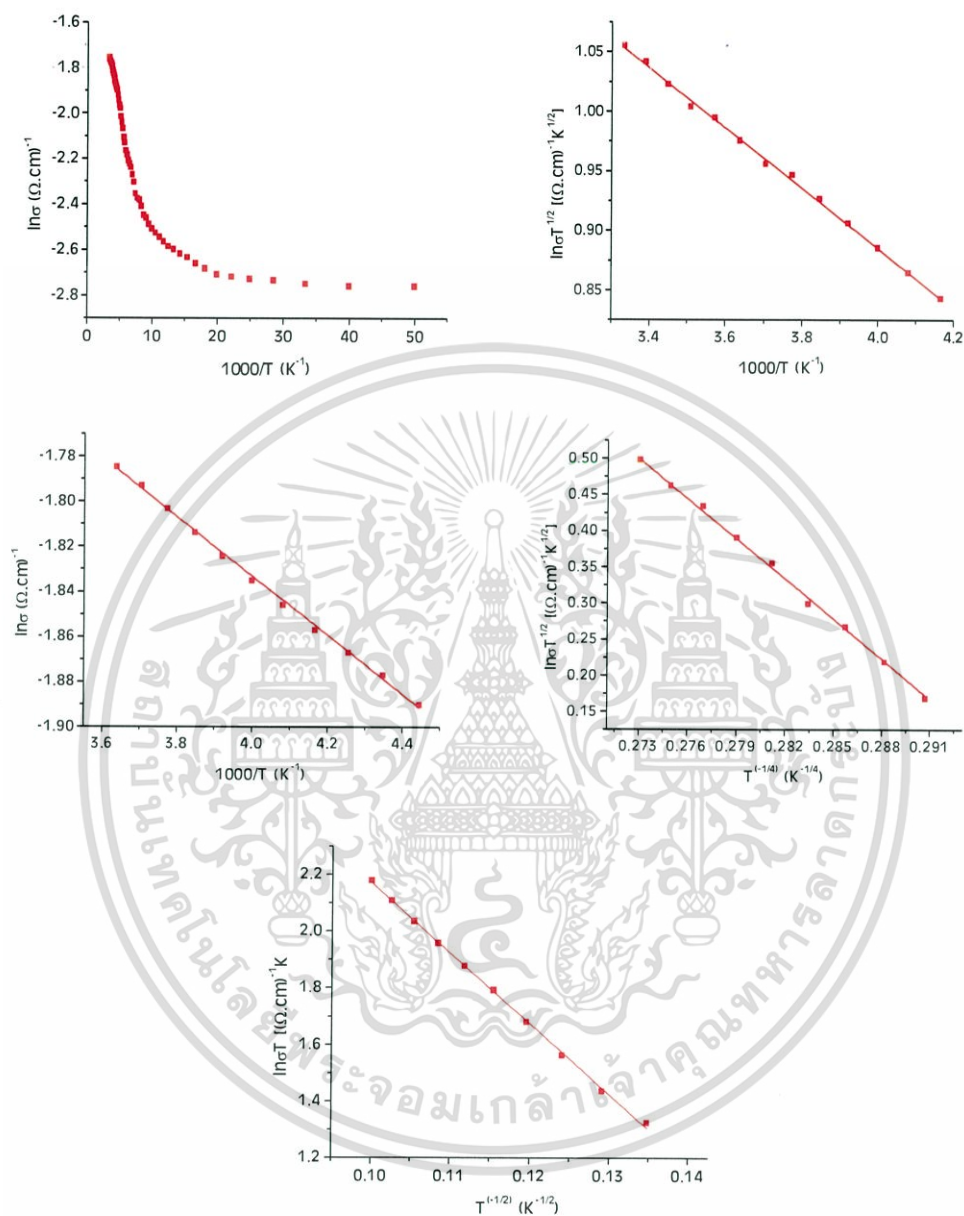
Oxygen Flow Rate (sccm)	Activation Energy (eV)
2	0.1286
4	0.3416
6	0.5935
8	0.5003
10	0.2436

จากรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.9 เป็นผลที่ได้จากการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : $E_a$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีที่พิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น( $E_a$ ) จะมีเพียงค่าเดียวซึ่งจะเป็นค่ากำแพงศักย์ที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งอธิบายได้จากสมการ

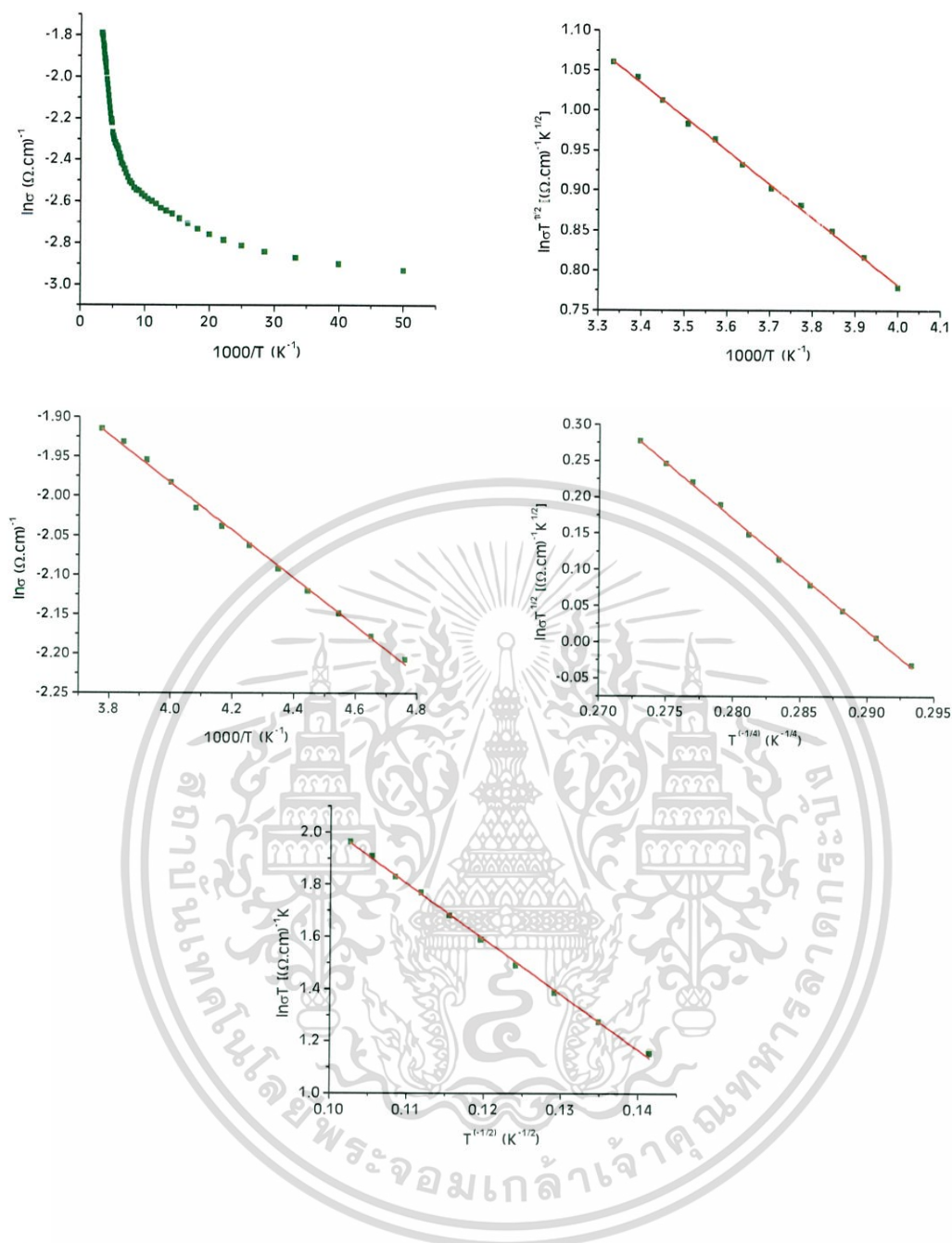
$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln\sigma$  กับค่า  $1000/T$  , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $1000/T$  , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $T^{-1/4}$  และ ค่า  $\ln(\sigma T)$  กับค่า  $T^{-1/2}$  ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \sigma$  กับค่า  $1000/T$  , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $1000/T$  , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $T^{-1/4}$  และ ค่า  $\ln(\sigma T)$  กับค่า  $T^{-1/2}$  ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 2 sccm ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง นำมาใช้ในการคำนวณโดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโตซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $1000/T$

การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

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

$$\ln\left(\sigma T^{1/2}\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln\left(\sigma T^{1/2}\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{slope} = -\frac{E_a}{1000k}$$

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

การหาค่าเพอร์มิติวิตี ( $\epsilon_s$ ) คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

จากการหาค่า การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และ การหาค่าเพอร์มิติวิตี ( $\epsilon_s$ ) สามารถนำมาหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ )

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s}$$

จากสมการ

$$N_a = \frac{8\epsilon_s E_b}{e^2 L^2}$$

เมื่อ L คือ ขนาดของเกรน

และ ความยาวเดอบาย ( $L_D$ )

$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a}\right]^{1/2}$$

การหาค่าระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ ( $E_t$ )

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t$$

จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_t = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

การหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ ( $N_t$ )

$$\sigma = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$N_t = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

เมื่อ ค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ ( $v_c$ ) ได้จาก

$$v_c = \left[ \frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

และค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ ( $N_v$ ) ได้จาก

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

เมื่อ  $m^*$  คือ มวลยังผล

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ เพื่อกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนได้ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ตั้งความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\sigma$  กับ  $1000/T$  ดังสมการ

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

โดยที่

$$E_{NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s}$$

เมื่อ  $\rho_{0,NNH}$  คือ ค่าคงที่

$N_d$  คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

$E_{NNH}$  คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปได้ตามความสัมพันธ์

$$T_{CI} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B}$$

สมการที่ (3) จะใช้ได้ดีก็ต่อเมื่อ  $k > 0.5$  ค่า  $k$  นี้คือ อัตราส่วนของ  $\frac{N_a}{N_d}$  (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left( \frac{N_0(E_F)e^2}{2\epsilon_s} \right)^{3/4} \left( \frac{1}{N_d} \right)^{1/2}$$

เมื่อ  $N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่า  $N_d$  ได้จากค่า  $E_{NNH}$  จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่า  $k$  ได้จากค่า  $N_0(E_F)$  และ  $N_a$  เมื่อรู้ค่า  $k$  แล้วก็จะคำนวณหาค่า  $N_a$  ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิชัน ( $T_{CI}$ ) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า  $\xi_{Mott}$ ,  $N_d$  และ  $\epsilon_s$  ตามลำดับ

จากสมการ

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

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH}$$

ความชัน คือ  $\frac{E_{NNH}}{1000k}$  ส่วนจุดตัดแกน y คือ  $\ln \sigma_{0,NNH}$

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp\left[\left(-\frac{T_0}{T}\right)^s\right]$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s}$$

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว  $s = \frac{1}{4}$  และ  $\frac{1}{3}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยกันเอง ส่งผลให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า  $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

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

โดยที่องศาของความไม่เป็นระเบียบ ( $T_{0,Mott}$ ) คือ

$$T_{0,Mott} = \frac{18.1}{k_B \xi_{Mott} N_0(E_F)}$$

ความชันของสมการ คือ  $T^{1/4}_{0,Mott}$

ส่วน  $\sigma_{0,Mott}$  คือสัมประสิทธิ์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma_{0,Mott} = 3e^2 v \left[ \frac{N_0(E_F) \xi_{Mott}}{8\pi k_B} \right]^{1/2}$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length;  $\xi_{Mott}$ ) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{21.23 \sigma_{0,Mott} T_{0,Mott}^{1/2}}$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะที่ถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state;  $N_0(E_F)$ ) ที่ระดับเฟอร์มิ คือ

$$N_0(E_F) = 2.0 \times 10^9 \sigma_{0,Mott}^3 T_{0,Mott}^{1/2}$$

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q} T_{0,Mott}}$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R_{hop,Mott}$ ) คือ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

หรือ

$$R_{hop,Mott} = \left( \frac{9\xi_{Mott}^4}{8\pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{1/4}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ( $W_{hop,Mott}$ ) คือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{k_B T}{4} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

หรือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_0(E_F)}$$

และ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} > 1$$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left( \frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right)$$

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

$$\ln(\sigma T) = - \left( \frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES}$$

โดยที่องศาความไม่เป็นระเบียบของ ES ( $T_{0,ES}$ ) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \varepsilon_S}$$

ค่า  $T_{0,ES}$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนค่า  $\sigma_{0,ES}$  สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น  $\xi_{ES}$  ก็จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R_{hop,ES}$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/2}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ( $W_{hop,ES}$ ) คือ

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left( \frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

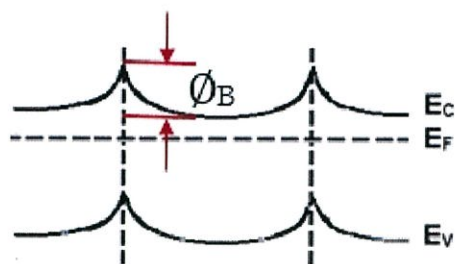
เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}}$$

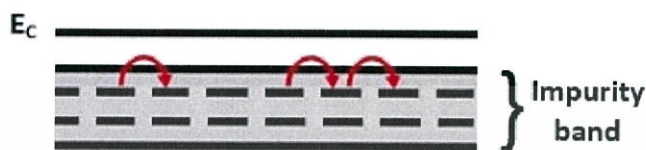
หรือ

$$\Delta_C = k_B \left( \frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2}$$

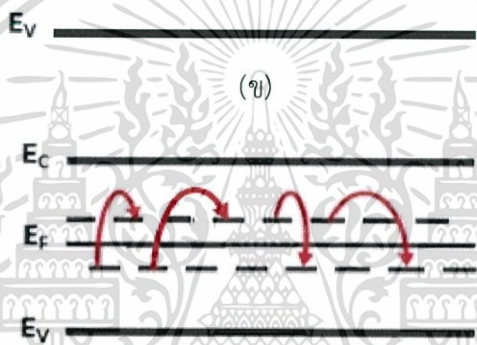




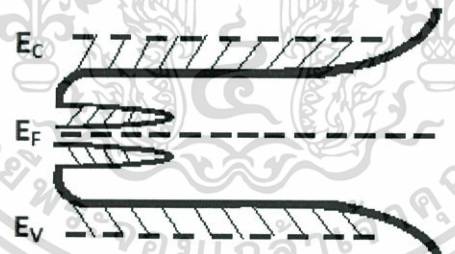
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.40 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

- (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโด
- (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
- (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่
- (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen flow rate (sccm)	Temperature range (K)	Temperature (K)	$\square_s$ ( $F/cm^2$ ) ( $10^{-13}$ )	Grain Size (nm)	$E_b$ (eV)	$N_a$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{16}$ )	$E_t$ (eV)	$N_t$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{11}$ )	$L_D$ (m) ( $10^{-6}$ )
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	300-240	300	6.9	33.2	0.0217	6.78	1.23	2.25	1.28
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	300-250	300	6.9	39.1	0.0361	8.13	1.09	2.69	1.17

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen flow rate (sccm)	Temperature Range (K)	Temperature (K)	$E_{NNH}$ (meV)	$\sigma_{0,NNH}$ ( $\Omega.cm$ ) <sup>-1</sup>	$N_d$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{17}$ )	$N_a$ ( $cm^{-3}$ ) ( $10^{17}$ )	$T_{c1}$ (K)	k
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	265-210	265	11.31	0.2725	2.37	2.37	6.61	1
4	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
10	275-225	275	26.05	0.4724	5.35	5.35	11.37	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Oxygen flow rate (sccm)	Temperature Range (K)	Temperature (K)	$\sigma_{RT}$ ( $\Omega.cm$ ) <sup>-1</sup>	$\sigma_{0,Mott}$ ( $\Omega.cm$ ) <sup>-1</sup>	$T_{0,Mott}$ (K) ( $10^4$ )	$N_0(E_F)$ ( $cm^{-3}.eV^{-1}$ ) ( $10^{21}$ )	$\xi_{Mott}$ (nm)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$W_{hop,Mott}$ (meV)	$R_{hoc,Mott}/\xi_{Mott}$	$T_{C2}$ (K)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	180-140	180	5.4054	244.69	11.59	3.43	0.8064	1.53	19.55	1.89	52.87
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	180-135	180	0.2853	90.02	5.56	7.16	0.8064	1.27	16.30	1.57	58.25

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง

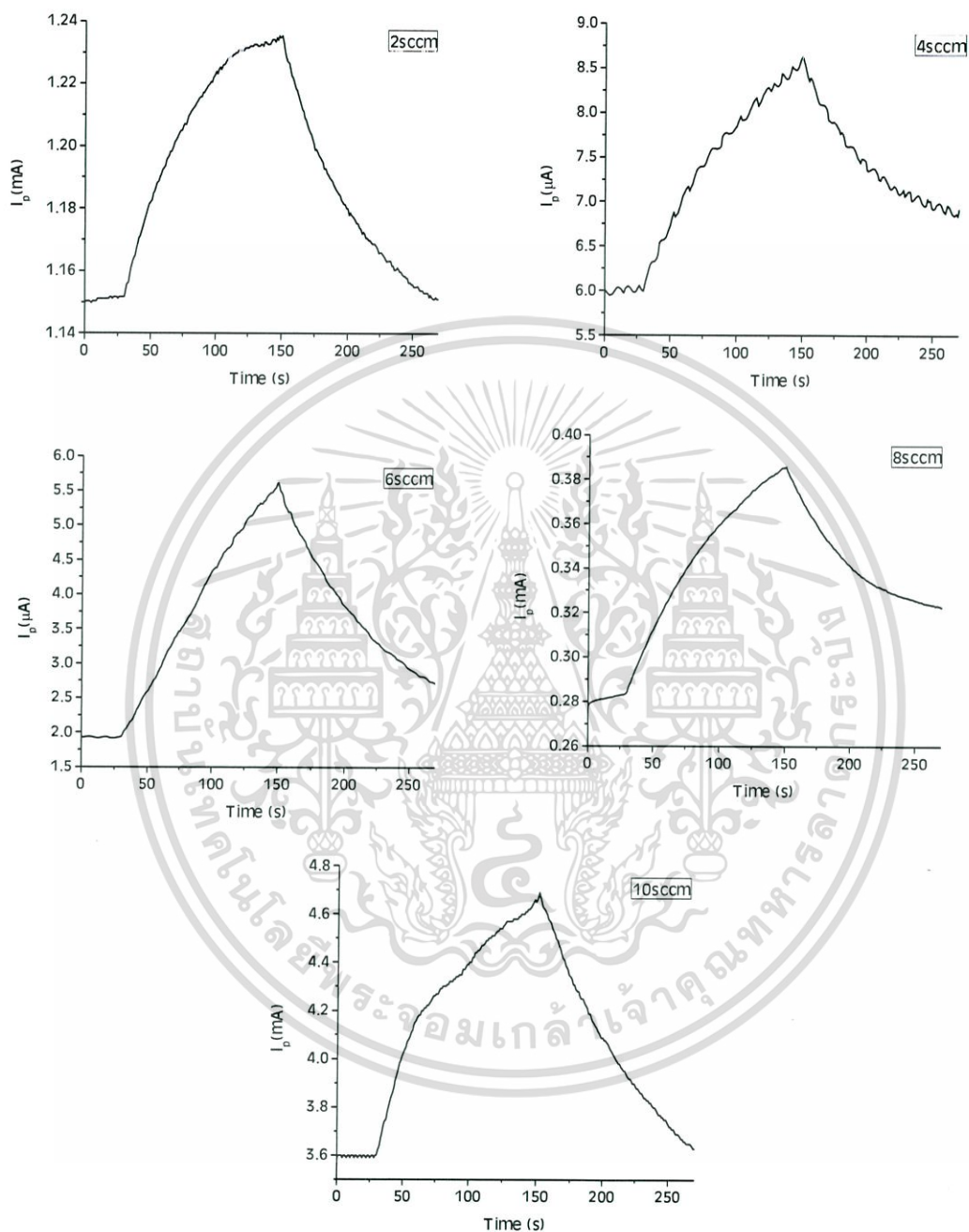
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอปสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen flow rate (sccm)	Temperature Range (K)	Temperature (K)	$\sigma_{0,ES}$ ( $\Omega.cm$ ) <sup>-1</sup>	$T_{0,ES}$ (K)	$\xi_{ES}$ ( $\mu m$ )	$W_{hop,Mott}$ (meV)	$R_{hop,Mott}/\xi_{Mott}$	$\Delta_{CES}$ (eV) ( $10^{-6}$ )
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100-55	100	99.48	618.98	0.12	10.73	0.6219	6.30
4	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
10	95-50	95	60.34	499.93	0.17	8.92	0.5440	7.94

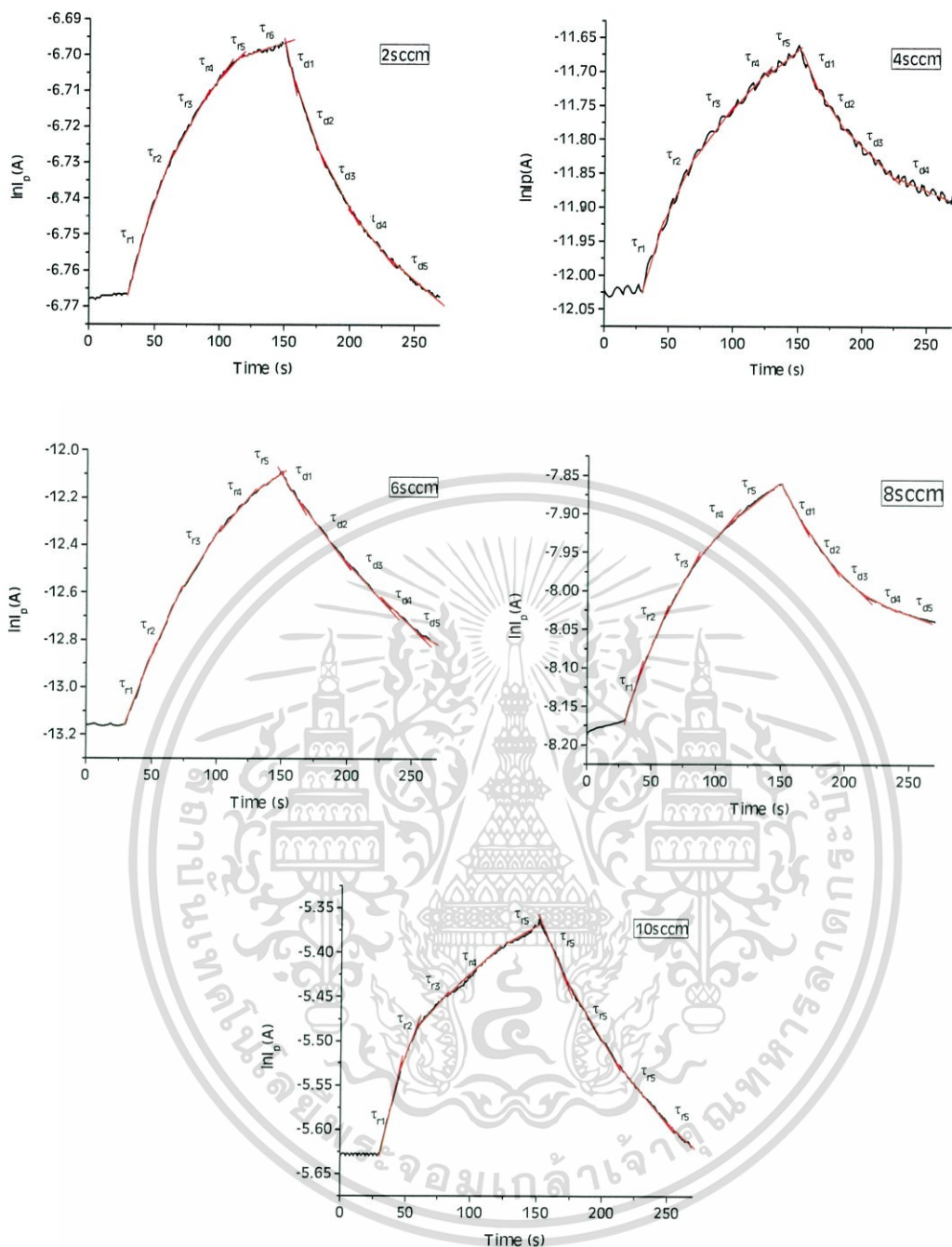


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.5 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง

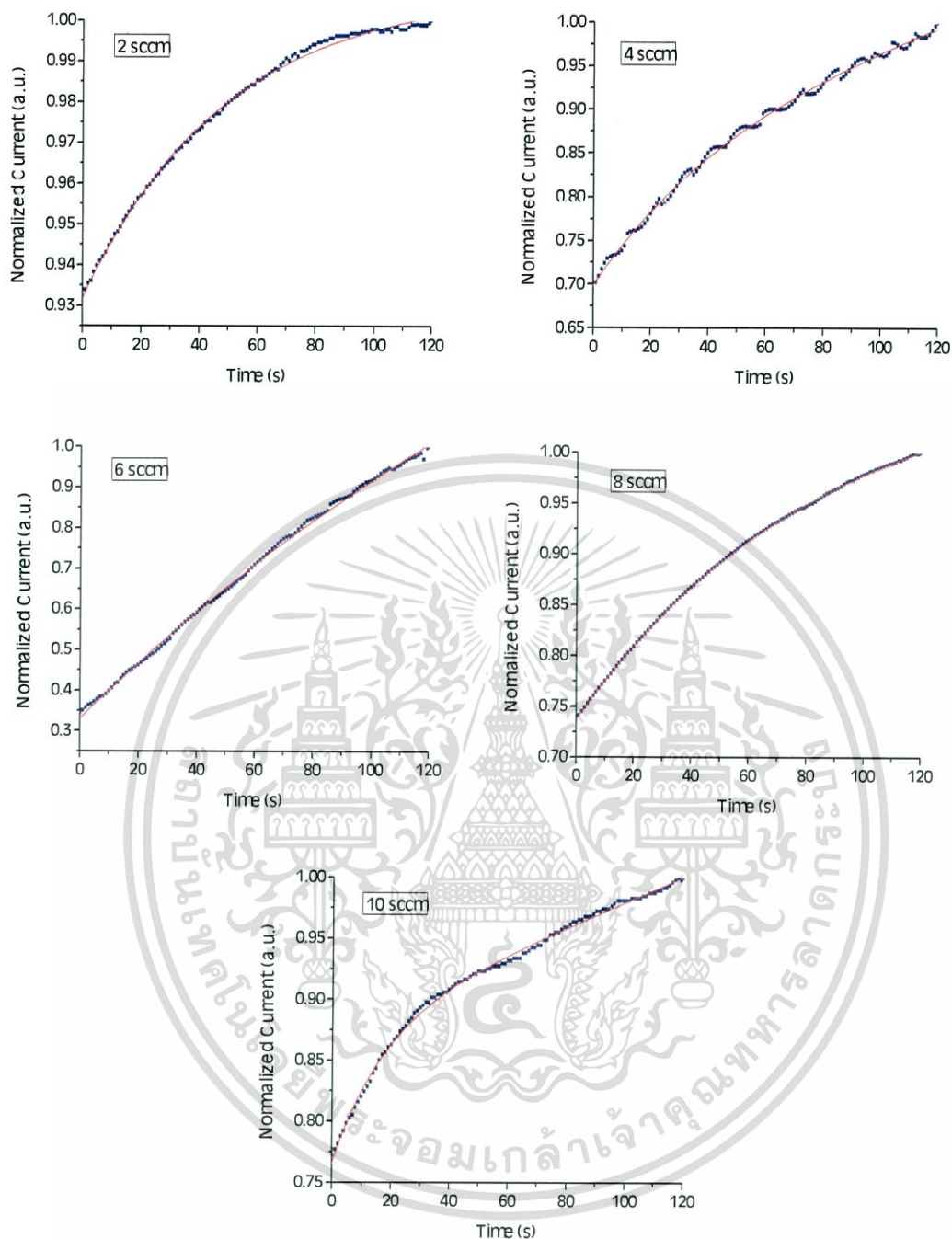


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



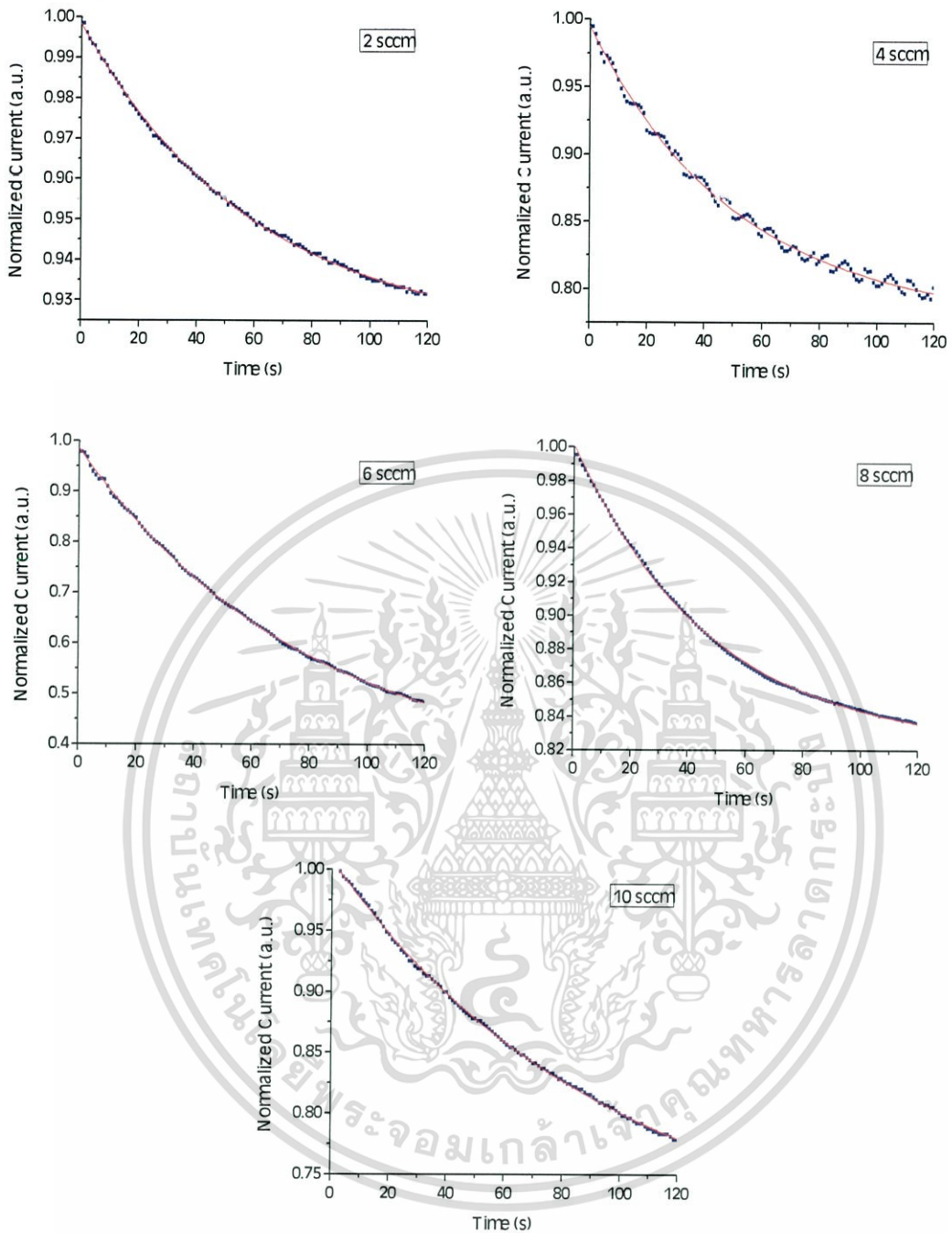
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตโนสเกลลอกลิทึมธรรมชาติ ( $\ln I_p$ ) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 การพิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 การพิตรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาหลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสาร กิ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	Rise Time (s)						Decay Time (s)				
2.0	A <sub>1</sub> =1.09 τ <sub>1</sub> =683.0	A <sub>2</sub> =5.72 τ <sub>2</sub> =920.0	A <sub>3</sub> =11.2 τ <sub>3</sub> =1305	A <sub>4</sub> =8.50 τ <sub>4</sub> =1915	A <sub>5</sub> =1.88 τ <sub>5</sub> =4388	A <sub>6</sub> =-3×10 <sup>-5</sup> τ <sub>6</sub> =9841 β=0.2247	A <sub>1</sub> =0.9429 τ <sub>1</sub> =764.1	A <sub>2</sub> =-2.507 τ <sub>2</sub> =988.2	A <sub>3</sub> =2.804 τ <sub>3</sub> =1530	A <sub>4</sub> =-1.239 τ <sub>4</sub> =2346	A <sub>5</sub> =3.5×10 <sup>-5</sup> τ <sub>5</sub> =3708 β=0.3185
4.0	A <sub>1</sub> =-7.4×10 <sup>-4</sup> τ <sub>1</sub> =683.0	A <sub>2</sub> =3.26×10 <sup>-3</sup> τ <sub>2</sub> =226.7	A <sub>3</sub> =-6.7×10 <sup>-3</sup> τ <sub>3</sub> =349.2	A <sub>4</sub> =4.75×10 <sup>-3</sup> τ <sub>4</sub> =508.3	A <sub>5</sub> =8×10 <sup>-7</sup> τ <sub>5</sub> =696.9 β=0.4786	-	A <sub>1</sub> =3.8×10 <sup>-5</sup> τ <sub>1</sub> =222.3	A <sub>2</sub> =9.8×10 <sup>-5</sup> τ <sub>2</sub> =374.6	A <sub>3</sub> =6×10 <sup>-5</sup> τ <sub>3</sub> =580.5	A <sub>4</sub> =8×10 <sup>-7</sup> τ <sub>4</sub> =1260 β=0.7377	-
6.0	A <sub>1</sub> =12×10 <sup>-5</sup> τ <sub>1</sub> =65.2	A <sub>2</sub> =-4×10 <sup>-4</sup> τ <sub>2</sub> =81.9	A <sub>3</sub> =5×10 <sup>-4</sup> τ <sub>3</sub> =108.7	A <sub>4</sub> =-2×10 <sup>-4</sup> τ <sub>4</sub> =175.6	A <sub>5</sub> =-3×10 <sup>-6</sup> τ <sub>5</sub> =248.4 β=0.3136	-	A <sub>1</sub> =-1.8×10 <sup>-4</sup> τ <sub>1</sub> =114.4	A <sub>2</sub> =7×10 <sup>-4</sup> τ <sub>2</sub> =137.8	A <sub>3</sub> =-6.8×10 <sup>-4</sup> τ <sub>3</sub> =160.8	A <sub>4</sub> =1.7×10 <sup>-4</sup> τ <sub>4</sub> =213.4	A <sub>5</sub> =8×10 <sup>-7</sup> τ <sub>5</sub> =285.9 β=0.4649
8.0	A <sub>1</sub> =-0.0155 τ <sub>1</sub> =206.4	A <sub>2</sub> =0.0459 τ <sub>2</sub> =266.6	A <sub>3</sub> =-0.04624 τ <sub>3</sub> =359.3	A <sub>4</sub> =0.0161 τ <sub>4</sub> =539.6	A <sub>5</sub> =6×10 <sup>-6</sup> τ <sub>5</sub> =775.1 β=0.3551	-	A <sub>1</sub> =0.0879 τ <sub>1</sub> =327.4	A <sub>2</sub> =-0.255 τ <sub>2</sub> =426.5	A <sub>3</sub> =0.2338 τ <sub>3</sub> =593.6	A <sub>4</sub> =-0.0688 τ <sub>4</sub> =1006	A <sub>5</sub> =-3×10 <sup>-5</sup> τ <sub>5</sub> =1891 β=0.4135
10.0	A <sub>1</sub> =-0.0953 τ <sub>1</sub> =171.5	A <sub>2</sub> =0.3714 τ <sub>2</sub> =283.4	A <sub>3</sub> =-1.592 τ <sub>3</sub> =619.5	A <sub>4</sub> =1.321 τ <sub>4</sub> =732.7	A <sub>5</sub> =-0.0019 τ <sub>5</sub> =986.6 β=0.4652	-	A <sub>1</sub> =-0.0166 τ <sub>1</sub> =321.0	A <sub>2</sub> =0.0653 τ <sub>2</sub> =446.8	A <sub>3</sub> =-0.0824 τ <sub>3</sub> =603.9	A <sub>4</sub> =0.0385 τ <sub>4</sub> =900.2 β=0.903	-

ตารางที่ 4.14 ค่าช่วงชีวิตของพลาสมาที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟพีซีเอ็มกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที หมายเหตุ V<sub>a</sub>=20 โวลต์, W=1.2เซนติเมตร, L=0.4 เซนติเมตร

O <sub>2</sub> flow rate (sccm)	Rise Time (s)						Decay Time (s)				
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$
2.0	$\sigma_1=6.08 \times 10^{13}$ $l_1=1.15 \times 10^3$	$\sigma_2=6.16 \times 10^{13}$ $l_2=1.16 \times 10^3$	$\sigma_3=6.19 \times 10^{13}$ $l_3=1.17 \times 10^3$	$\sigma_4=6.36 \times 10^{13}$ $l_4=1.20 \times 10^3$	$\sigma_5=6.48 \times 10^{13}$ $l_5=1.22 \times 10^3$	$\sigma_6=6.52 \times 10^{13}$ $l_6=1.23 \times 10^3$	$\sigma_1=6.54 \times 10^{13}$ $l_1=1.23 \times 10^3$	$\sigma_2=6.48 \times 10^{13}$ $l_2=1.22 \times 10^3$	$\sigma_3=6.33 \times 10^{13}$ $l_3=1.19 \times 10^3$	$\sigma_4=6.23 \times 10^{13}$ $l_4=1.13 \times 10^3$	$\sigma_5=6.14 \times 10^{13}$ $l_5=1.16 \times 10^3$
4.0	$\sigma_1=13.6 \times 10^{11}$ $l_1=60.3 \times 10^6$	$\sigma_2=1.45 \times 10^{11}$ $l_2=6.43 \times 10^6$	$\sigma_3=1.61 \times 10^{11}$ $l_3=7.15 \times 10^6$	$\sigma_4=1.72 \times 10^{11}$ $l_4=7.64 \times 10^6$	$\sigma_5=1.83 \times 10^{11}$ $l_5=8.13 \times 10^6$	-	$\sigma_1=1.96 \times 10^{11}$ $l_1=8.70 \times 10^6$	$\sigma_2=1.85 \times 10^{11}$ $l_2=8.20 \times 10^6$	$\sigma_3=1.69 \times 10^{11}$ $l_3=7.50 \times 10^6$	$\sigma_4=5.76 \times 10^{11}$ $l_4=7.10 \times 10^6$	-
6.0	$\sigma_1=3.63 \times 10^{10}$ $l_1=1.85 \times 10^6$	$\sigma_2=4.71 \times 10^{10}$ $l_2=2.40 \times 10^6$	$\sigma_3=6.57 \times 10^{10}$ $l_3=3.35 \times 10^6$	$\sigma_4=8.44 \times 10^{10}$ $l_4=4.30 \times 10^6$	$\sigma_5=10.3 \times 10^{10}$ $l_5=5.25 \times 10^6$	-	$\sigma_1=11.1 \times 10^{10}$ $l_1=5.65 \times 10^6$	$\sigma_2=10.0 \times 10^{10}$ $l_2=5.10 \times 10^6$	$\sigma_3=8.14 \times 10^{10}$ $l_3=4.15 \times 10^6$	$\sigma_4=6.38 \times 10^{10}$ $l_4=3.25 \times 10^6$	$\sigma_5=5.65 \times 10^{10}$ $l_5=2.88 \times 10^6$
8.0	$\sigma_1=0.88 \times 10^{13}$ $l_1=2.81 \times 10^4$	$\sigma_2=0.95 \times 10^{13}$ $l_2=3.03 \times 10^4$	$\sigma_3=1.02 \times 10^{13}$ $l_3=3.28 \times 10^4$	$\sigma_4=1.09 \times 10^{13}$ $l_4=3.48 \times 10^4$	$\sigma_5=1.15 \times 10^{13}$ $l_5=3.68 \times 10^4$	-	$\sigma_1=1.21 \times 10^{13}$ $l_1=3.88 \times 10^4$	$\sigma_2=1.16 \times 10^{13}$ $l_2=3.70 \times 10^4$	$\sigma_3=1.09 \times 10^{13}$ $l_3=3.50 \times 10^4$	$\sigma_4=1.06 \times 10^{13}$ $l_4=3.38 \times 10^4$	$\sigma_5=1.03 \times 10^{13}$ $l_5=3.30 \times 10^4$
10.0	$\sigma_1=1.43 \times 10^{14}$ $l_1=3.55 \times 10^3$	$\sigma_2=1.59 \times 10^{14}$ $l_2=3.98 \times 10^3$	$\sigma_3=1.66 \times 10^{14}$ $l_3=4.13 \times 10^3$	$\sigma_4=1.71 \times 10^{14}$ $l_4=4.25 \times 10^3$	$\sigma_5=1.83 \times 10^{14}$ $l_5=4.55 \times 10^3$	-	$\sigma_1=1.85 \times 10^{14}$ $l_1=4.60 \times 10^3$	$\sigma_2=1.73 \times 10^{14}$ $l_2=4.30 \times 10^3$	$\sigma_3=1.60 \times 10^{14}$ $l_3=3.98 \times 10^3$	$\sigma_4=1.47 \times 10^{14}$ $l_4=3.66 \times 10^3$	-

ตารางที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงเส้นตั้งขึ้นของฟิล์มบางของสารถึงตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที หมายเหตุ  $V_a=20$  โวลต์,  $W=1.2$  เซนติเมตร,  $L=0.4$  เซนติเมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานโครงการพิเศษ ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริง มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้มและมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

#### 5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริง

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

จากการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ เกรนที่พบมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันในทุกอัตราการไหลของออกซิเจน

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

การศึกษาศภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอ็คทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริง พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-2}$ - $10^2$  โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $1.92 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่ที่อัตราการไหลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง  $8.46 \times 10^{-1}$  โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มเดียวกันกับสภาพต้านทาน แต่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 200 องศาเซลเซียส สามารถนำมาคำนวณหาพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ โดยค่าพลังงานกระตุ้นนี้จะเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของกักพาหะที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์

จากการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 20 เคลวินถึง 300 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโตตั้งความสัมพันธ์

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

จะพบได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตจะเกี่ยวข้องกับขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งมีกักพาหะและค่าความสูงของกำแพงศักย์อยู่ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าระดับพลังงานของกักพาหะ ค่าความหนาแน่นของกักพาหะและค่าความยาวเดออบาย เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกันตั้งความสัมพันธ์

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

เมื่อพลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันสำหรับในช่วงอุณหภูมิ 200-100 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ตั้งความสัมพันธ์

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

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 100-20 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงตั้งความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และช่องว่างของคูลอมบ์

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอรั้น กระแสโฟโตชาขึ้นและกระแสโฟโตชาลง สามารถพิกตรภาพได้ด้วยสมการมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตค่อนข้างยาว จำนวนหลายค่า แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกประพุดิตัวเป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{10}$ - $10^{14}$  ต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าช่วงชีวิตลดลง และความหนาแน่นของกับดักพาหะมีค่าต่ำที่สุด

## 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เรียนรู้หลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. ได้เรียนรู้การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
3. ได้เรียนรู้สมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณกาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน
4. ได้เรียนรู้สมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มบางและสามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสโตนควรระวังอย่าให้ผิวหน้าของกระจกเป็นรอย เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ควรทำความสะอาดเครื่องสเป็คเตอริงทุกครั้งก่อนการใช้งานและหลังการใช้งานด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. การวัดค่าสมบัติต่างๆของต่างๆได้ฟิล์มบาง ควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบางให้อยู่ในสภาพที่ดี หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

ขวัญกมล สุวรรณเทศ. 2557. “กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xTe_{1-x}$ .” โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง  $CuO$  โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ  $Cu$  ที่ได้จากการสเป็คเตอรिंगเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมี ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษา สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2558. “การเตรียม ฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดิซิปต์เตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ วิวิธ พันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม ก่อเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2545. “การ เตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2546. “การ ประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภารุจ บัณฑิตาวิทย์. 2539. “สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม ไนไตรด์ด้วยวิธีสปีดเตอริง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วรรณนิศา สุขกรี, วลัยพัชร ใจเรื่อน และ ศวิตา ทศนิยม. 2556. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอป เปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะCu.” โครงการงาน พิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิฑิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และ จักรพันธ์ ถาวรธิดา. 2545. “การออกแบบและการสร้างอินบาลานซ์แมกนีตรอนคาโทด สำหรับระบบสปีดเตอริง.” รายงานวิจัยเสนอต่อกองทุนต้นตราบารณ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี

A. Aradhakrishnan, B.Baskaran Beena.2014. “Structural and Optical Absorption Analysis of CuO Nanoparticles.”Nanoscience Research Lab, Department of Chemistry, University of Kerala, Kollam, Kerala, India.

Arockiasamy, J.S.K. and Irudayaraj, J. 2016. “Natural Dye Sensitized CuO Nanorods for Luminescence Applications.” *Ceramics International*. 42:6198-6205.

Chen, A. Long, H. Li, X. Li, Y. Yang, G. and Lu, P. 2009. “Controlled Growth and Characteristics of Single-Phase Cu<sub>2</sub>O and CuO Films by Pulsed Laser Deposition.” *Vacuum*. 83:927-930.

Dehua Guo, LixianWang, YingjiDu, ZhuqiangMa and LongShen. 2015. “Preparation of octahedral Cu<sub>2</sub>O nanoparticles by a Green Route.”School of Chemical and Environmental Engineering, Shanghai Institute of Technology, China.

Fterich, M. Nasr, F.B. Lefi, R. Toumi, M. and Guermazi, S. 2016. “Effects of Concentration of Hexamethylenetetramine in Structure, Microstructure and Optical Properties of CuO Nanoparticles Synthesized by Hydrothermal Route.” *Mater. Sci. Semicon. Processing*. 43:114-122.

Guo, D. Wang, L. Du, Y. Ma, Z. and Shen, L. 2015. “Preparation of Octahedral Cu<sub>2</sub>O Nanoparticles by a Green Route.” *Mater. Lett*. 160:541-543.

J. Gan , V. Venkatachalapathy, B.G. Svensson and E.V. Monakhov. 2015. “Influence of Target Power on Properties of Cu<sub>x</sub>O Thin Films Prepared by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering.”University of Oslo, Department of Physics/Center for Materials Science and Nanotechnology, P.O. Box 1048 Blindern, N-0316 Oslo, Norway.

Joseph Sagaya Kennedy Arockiasamy,n and Johnson Irudayaraj. 2015. “Natural Dye Sensitized CuO Nanorods for Luminescence Applications.” Department of Physics, TRP Engineering College(SRMGroup), Tamilnadu, India.

Kardarian, K. Nunes, D. Sberna, P.M. Ginsburg, A. Keller, D.A. Pinto, J.V., Deuermeier, J. Anderson, A.Y. Zaban, A. Martins, R. and Fortunato, E. 2016. “Effect of Mg Doping on Cu<sub>2</sub>O Thin Films and Their Behavior on the TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O Heterojunction Solar Cells.” *Sol. Energy & Sol. Cells*. 147:27-36.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Kaviyarasan, K. Anandan, S. Mangalaraja, R.V. Sivasankar, T. and Ashokkumar, M. 2016. "Sonochemical Synthesis of  $\text{Cu}_2\text{O}$  Nanocubes for Enhanced Chemiluminescence Applications." *Ultrasonics Sonochemistry*. 29:388-393.
- Ooi, P.K. Ng, S.S. Abdullah, M.J. H. Abu Hassan and Z. Hassan. 2013. Effects of Oxygen Percentage on the Growth of Copper Oxide Thin Films by Reactive Radio Frequency Sputtering." Nano - Optoelectronics Research and Technology Laboratory, School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของCuO**  
**ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.80-76**

Pattern : 80-76		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated				
CuO							
Copper Oxide							
<b>Lattice :</b> Monoclinic <b>S.G. :</b> C2/c (15) <b>a =</b> 4.67970 <b>b =</b> 3.43140 <b>c =</b> 5.13620 <b>a/b =</b> 1.36379 <b>c/b =</b> 1.49682		<b>Mol. weight =</b> 79.55 <b>Volume [CD] =</b> 81.40 <b>Dx =</b> 6.491 <b>Z =</b> 4 <b>I/cor =</b> 4.98					
		<b>2th</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>i</b>	
		32.480	6	1	1	0	
		35.385	26	0	0	2	
		35.539	100	-1	1	1	
		38.640	44	1	1	1	
		38.970	16	2	0	0	
		46.252	1	-1	1	2	
		48.851	19	-2	0	2	
		51.228	1	1	1	2	
		53.355	7	0	2	0	
		56.587	1	0	2	1	
		58.164	10	2	0	2	
		61.517	8	-1	1	3	
		65.662	10	0	2	2	
		66.340	6	-3	1	1	
		66.513	3	3	1	0	
		67.728	9	1	1	3	
		68.017	9	2	2	0	
		68.852	<-1	-2	2	1	
		71.838	<-1	-3	1	2	
		72.337	6	3	1	1	
		72.812	<-1	2	2	1	
		74.864	3	0	0	4	
		75.234	4	-2	2	2	
		79.559	<-1	0	2	3	
		80.264	1	-1	1	4	
		80.264	1	-2	0	4	
		82.545	4	-3	1	3	
		82.857	3	2	2	2	
		83.343	<-1	3	1	2	
		83.690	2	4	0	0	
		86.806	1	-2	2	3	
		86.806	1	-4	0	2	
		87.740	<-1	1	1	4	
		89.575	1	1	-3	1	
ICSD COLLECTION CODE : 067850 REMARKS FROM ICSD : REM RVP REMARKS FROM ICSD : REM K CuO obtained from gamma-Cu2(OH)3Cl RM TEMPERATURE FACTOR : ITF							
*Calculated from ICSD using POWD-12+* (1997) primary reference *Solid State Ionics, volume 63, page 442, (1993) Garcia-Martinez O., Rojas R.M., Vila E., Martin de Vidales, J.L.							
<b>Radiation :</b> CuK $\alpha$ 1 <b>Lambda :</b> 1.54060		<b>Filter :</b> Not specified <b>d-sp :</b> Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของCuO  
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.74-1230

Pattern : 74-1230		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated	
Cu <sub>2</sub> O		2th		I	
Cuprite, syn / Copper Oxide		29.690	5	1	1
		36.575	100	1	1
		42.486	35	2	0
		52.687	1	2	1
		61.648	27	2	2
		65.843	<1	2	2
		69.903	<1	3	1
		73.861	20	3	1
		77.741	4	2	2
		85.351	<1	3	2
Lattice : Cubic		Mol. weight = 143.09			
S.G. : Pn3m (224)		Volume [CD] = 76.87			
a = 4.25200		Dx = 6.182			
		Dm = 5.920			
Z = 2		I/Icor = 8.28			
<p>ICSD COLLECTION CODE : 026963  REMARKS FROM ICSD : PICT.  TEST FROM ICSD : No R value given.  TEST FROM ICSD : At least one TF missing.  TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.  ADDITIONAL PATTERN : See PDF 5-667.</p>					
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference  *Z. Phys., volume 67, page 845. (1930) :  Neuburger, M.C.</p>					
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของCuO  
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.78-2076

Pattern : 78-2076		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cu <sub>2</sub> O		2 $\theta$	I	h	k	l
Cuprite / Copper Oxide		29.583	5	1	1	0
		36.441	100	1	1	1
		42.329	35	2	0	0
		52.488	1	2	1	1
		61.408	27	2	2	0
		65.582	<1	2	2	1
		69.622	<1	3	1	0
		73.558	20	3	1	1
		77.417	4	2	2	2
		84.980	<1	3	2	1
Lattice : Cubic	Mol. weight = 143.09					
S.G. : Pn3m (224)	Volume [CD] = 77.69					
a = 4.26700	Dx = 6.117					
Z = 2	I/Cor = 8.28					
<p>ICSD COLLECTION CODE 063281  REMARKS FROM ICSD : REM TEM 100  REMARKS FROM ICSD : REM DEN  REMARKS FROM ICSD : REM F Temperature factors have been deposited with the Briti  REMARKS FROM ICSD : REM Library Lending Division SUP. No. 42674.  SAMPLE SOURCE OR LOCALITY Specimen from USA</p>						
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference.  *Acta Crystallogr., Sec. B, Structural Science, volume 42 page 201, (1986)  Restori, R., Schwarzenbach, D.</p>						
Radiation : CuK $\alpha$ 1	Filter : Not specified					
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของCu<sub>2</sub>O

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.75-1531

Pattern : 75-1531		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cu <sub>2</sub> O		2 $\theta$	I	h	k	l
Cuprite / Copper Oxide		29.632	5	1	1	0
		36.503	100	1	1	1
		42.402	36	2	0	0
		52.581	1	2	1	1
		61.520	27	2	2	0
		65.703	<1	2	2	1
		69.753	<1	3	1	0
		73.699	20	3	1	1
		77.567	4	2	2	2
		85.153	<1	3	2	1
Lattice : Cubic		Mol. weight = 143.09				
S.G. : Pn3m (224)		Volume [CD] = 77.31				
a = 4.26000		Dx = 6.147				
Z = 2		I/cor = 8.28				
<p>ICSD COLLECTION CODE 031057                  TEST FROM ICSD : No R value given                  TEST FROM ICSD : At least one TF missing</p>						
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference.                  *Z. Kristallogr. Kristallgeom. Kristallphys. Kristallchem. volume 57, page 253 (1922).                  Niggli, P.</p>						
Radiation : CuK $\alpha$ 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				



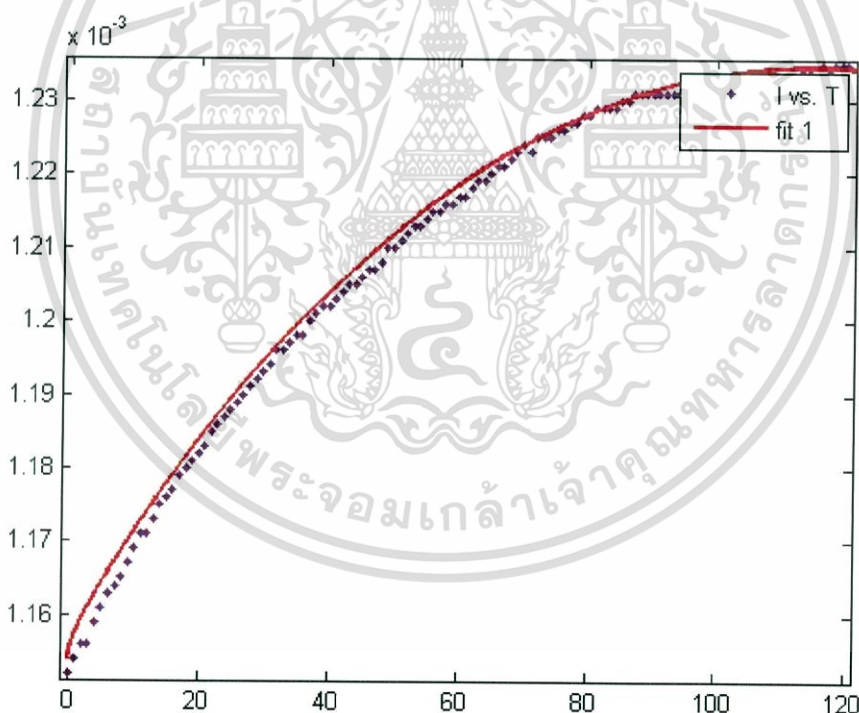
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

Rise Time : 2 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/683.016139)))+(b*(\exp(-x/920.986263)))+(c*(\exp(-x/1305.211119)))+(d*(\exp(-x/1913.999690)))+(e*(\exp(-x/4388.023996)))+(f*(\exp(-(x/9841.022420)^z)))$$

a	1.099	$\tau_1$ (s)	683.01
b	-5.724	$\tau_2$ (s)	920.98
c	11.24	$\tau_3$ (s)	1305.21
d	-8.495	$\tau_4$ (s)	1913.99
e	1.876	$\tau_5$ (s)	4388.02
f	-0.000035	$\tau_6$ (s)	9841.02
z	0.2247		



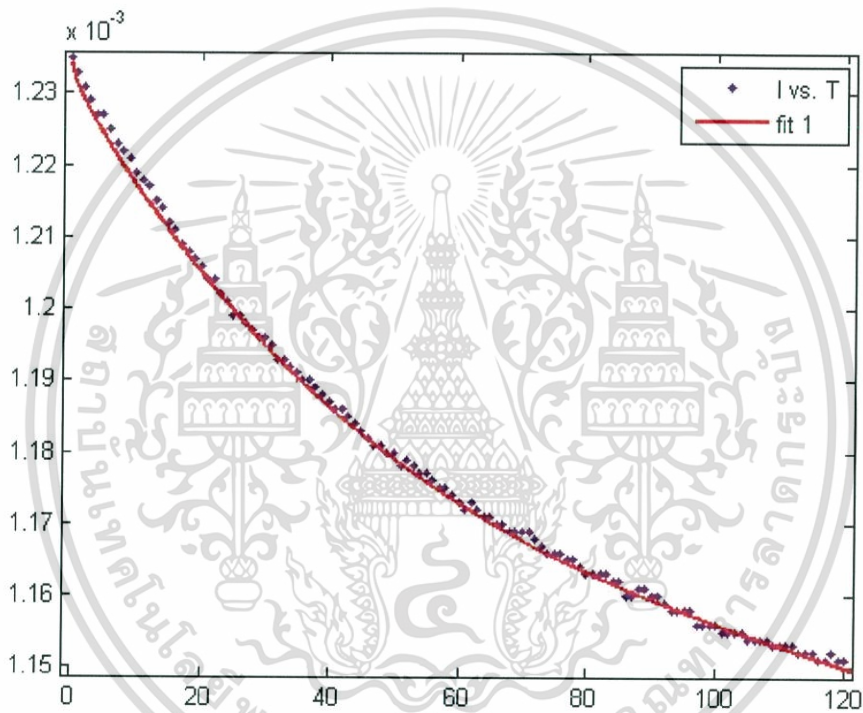
รูปการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 2 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/764.104642)))+(b*(\exp(-x/988.222442)))+(c*(\exp(-x/1530.601977)))+(d*(\exp(-x/2346.956001)))+(e*(\exp(-x/3708.861561)^z))$$

a	0.9429	$\tau_1$ (s)	764.10
b	-2.507	$\tau_2$ (s)	988.22
c	2.804	$\tau_3$ (s)	1530.60
d	-1.239	$\tau_4$ (s)	2346.95
e	-0.000035	$\tau_5$ (s)	3708.86
z	0.3185		



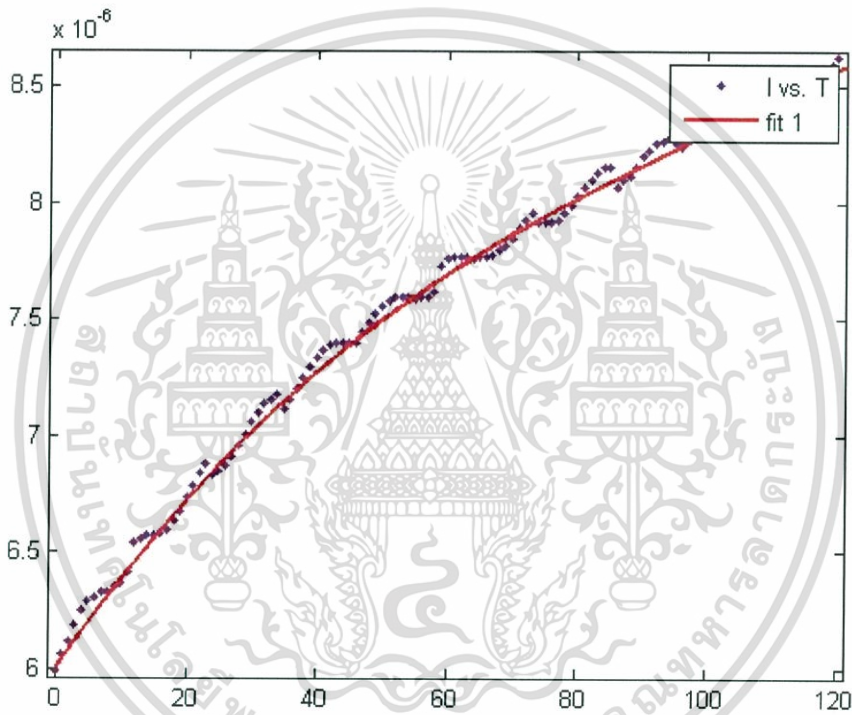
รูปการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโลซ์ชาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise Time : 4 sccm

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/168.6535)))+(b*(1-\exp(-x/226.752)))+(c*(1-\exp(-x/349.2082)))+(d*(1-\exp(-x/508.3074)))+(e*(1-\exp(-(x/696.9405)^f)))+0.000006$$

a	-0.0007391	$\tau_1$ (s)	168.65
b	0.003256	$\tau_2$ (s)	226.75
c	-0.006734	$\tau_3$ (s)	349.20
d	0.004753	$\tau_4$ (s)	508.30
e	-0.00000008	$\tau_5$ (s)	696.94
f	0.4786		



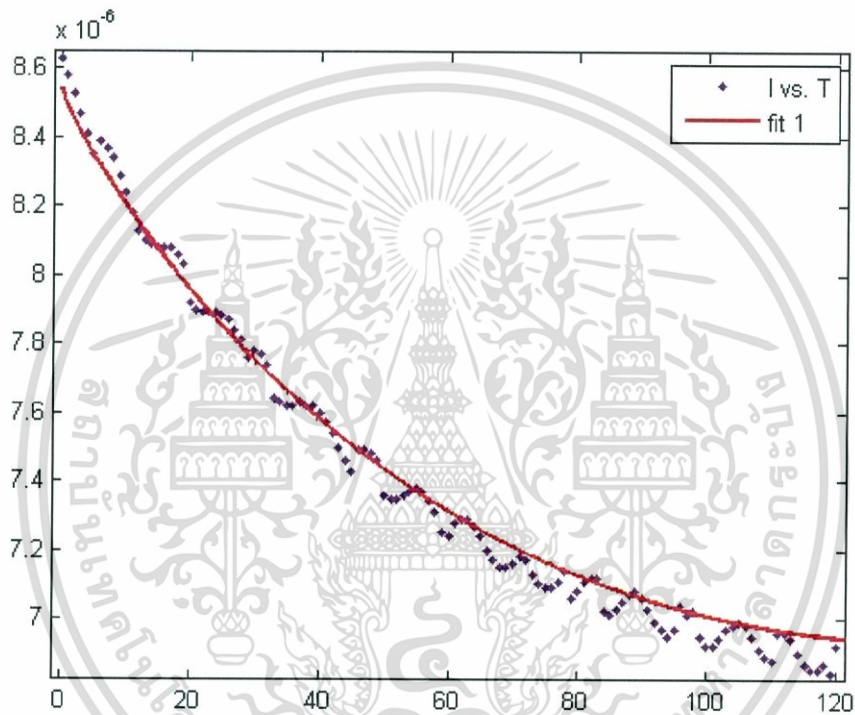
รูปการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 4 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/222.2799060)))+(b*(\exp(-x/374.5909588)))+(c*(\exp(-x/580.4519807)))+(d*(\exp(-x/1259.6682154)^z))$$

a	0.000038	$\tau_1$ (s)	222.27
b	-0.000098	$\tau_2$ (s)	374.59
c	0.000061	$\tau_3$ (s)	580.45
d	0.0000075	$\tau_4$ (s)	1259.66
z	0.7377		



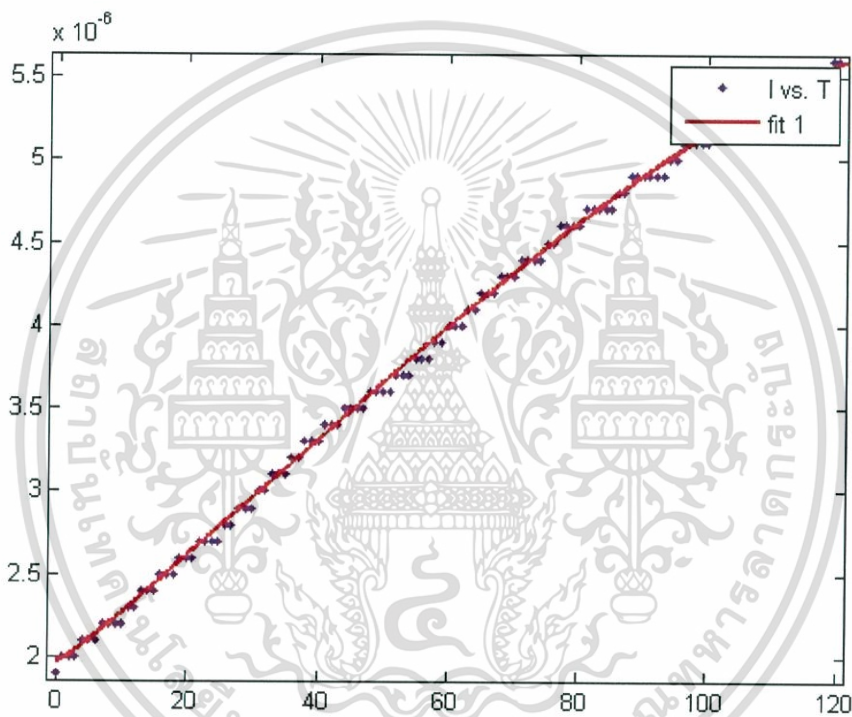
รูปการพิทกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ชาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise Time : 6 sccm

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/65.1796)))+(b*(1-\exp(-x/81.9013)))+(c*(1-\exp(-x/108.7664)))+(d*(1-\exp(-x/175.6335)))+(e*(1-\exp(-x/248.3940)^f))+0.000002$$

a	0.0001175	$\tau_1$ (s)	65.17
b	-0.0004147	$\tau_2$ (s)	81.90
c	0.0004792	$\tau_3$ (s)	108.76
d	-0.0001949	$\tau_4$ (s)	175.63
e	-0.00000030	$\tau_5$ (s)	248.39
f	0.3136		



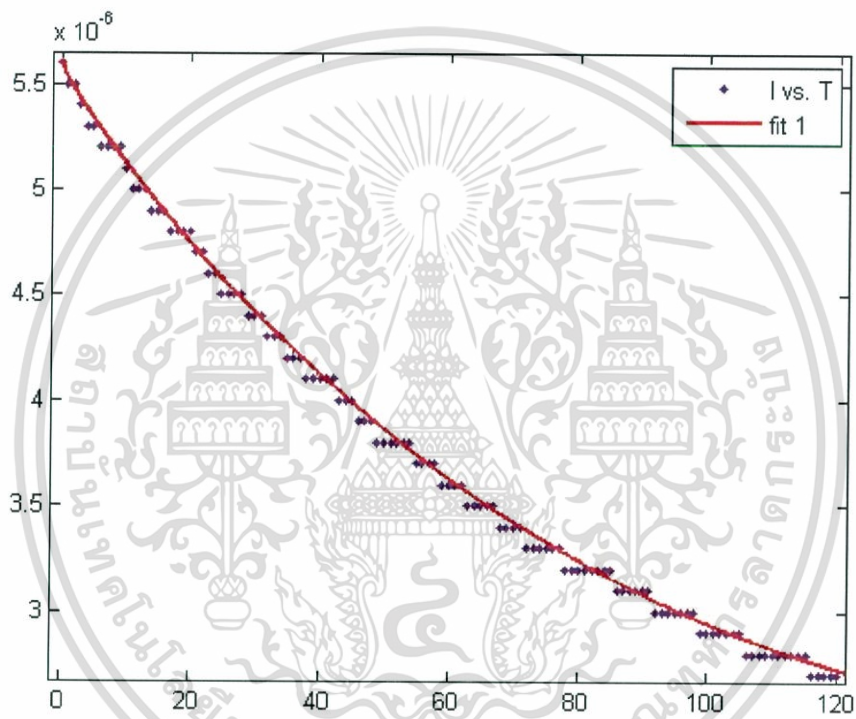
รูปการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโวลต์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 6 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/114.4186)))+(b*(\exp(-x/137.8758)))+(c*(\exp(-x/160.7852)))+(d*(\exp(-x/213.3903)))+(e*(\exp(-x/285.8539)^z))$$

a	-0.0001785	$\tau_1$ (s)	114.4186
b	0.0006973	$\tau_2$ (s)	137.8758
c	-0.0006863	$\tau_3$ (s)	160.7852
d	0.0001723	$\tau_4$ (s)	213.3903
e	0.00000078	$\tau_5$ (s)	285.8539
z	0.4649		



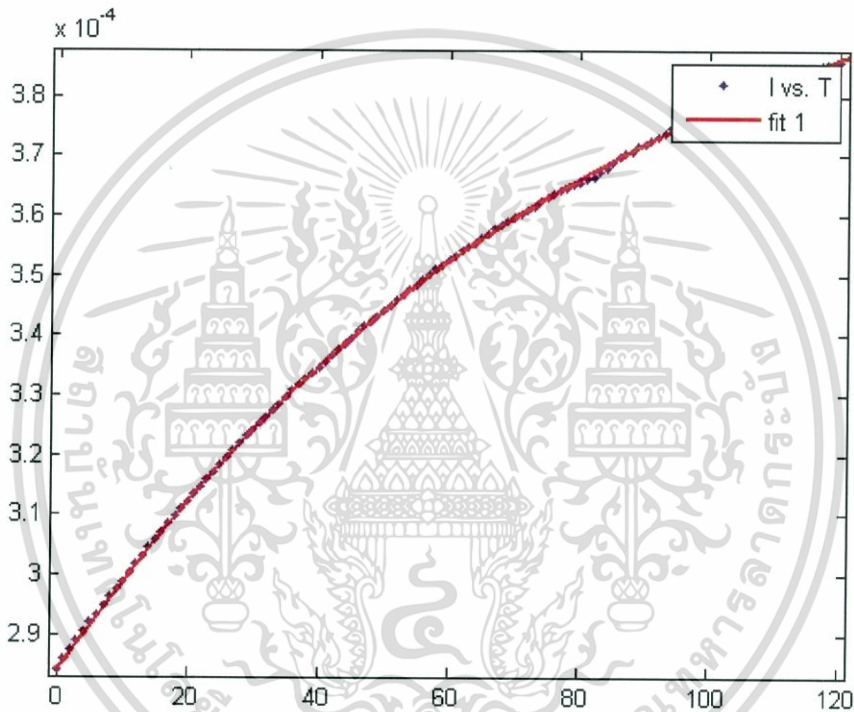
รูปการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise Time : 8 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/206.3731)))+(b*(\exp(-x/266.5652)))+(c*(\exp(-x/359.2759)))+(d*(\exp(-x/539.6037)))+(e*(\exp(-x/775.0934)^z))$$

a	-0.01549	$\tau_1$ (s)	206.3731
b	0.01593	$\tau_2$ (s)	266.5652
c	-0.04624	$\tau_3$ (s)	359.2759
d	0.01607	$\tau_4$ (s)	539.6037
e	0.000006	$\tau_5$ (s)	775.0934
z	0.3551		



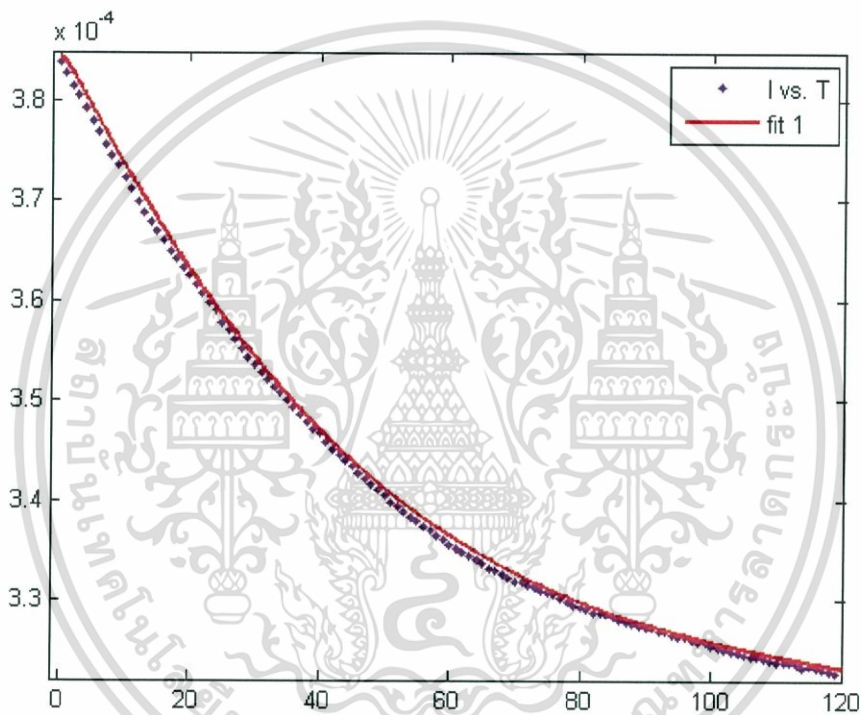
รูปการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 8 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/327.3832)))+(b*(\exp(-x/426.4925)))+(c*(\exp(-x/593.5573)))+(d*(\exp(-x/1006.1307)))+(e*(\exp(-x/1891.2062)^z))$$

a	0.08709	$\tau_1$ (s)	327.3832
b	-0.2516	$\tau_2$ (s)	426.4925
c	0.2338	$\tau_3$ (s)	593.5573
d	-0.06883	$\tau_4$ (s)	593.5573
e	-0.00003	$\tau_5$ (s)	1891.2062
z	0.4135		



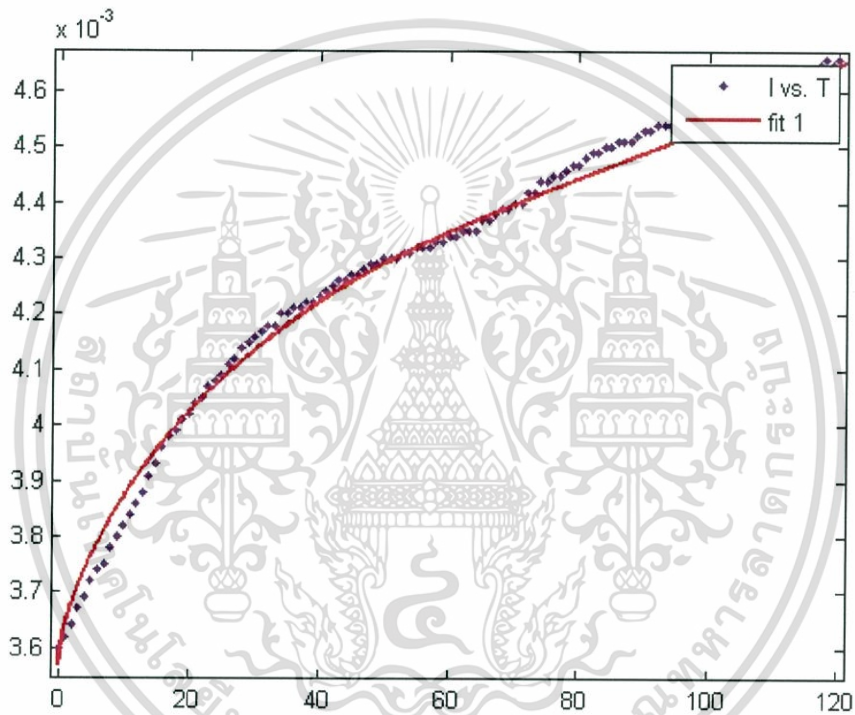
รูปการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโกล์ซาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise Time : 10 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/171.5357)))+(b*(\exp(-x/283.4301)))+(c*(\exp(-x/619.5023)))+(d*(\exp(-x/732.7319)))+(e*(\exp(-x/986.6524)^z))$$

a	-0.09532	$\tau_1$ (s)	171.5357
b	0.3714	$\tau_2$ (s)	283.4301
c	-1.592	$\tau_3$ (s)	619.5023
d	1.321	$\tau_4$ (s)	732.7319
e	-0.001905	$\tau_5$ (s)	986.6524
z	0.4652		

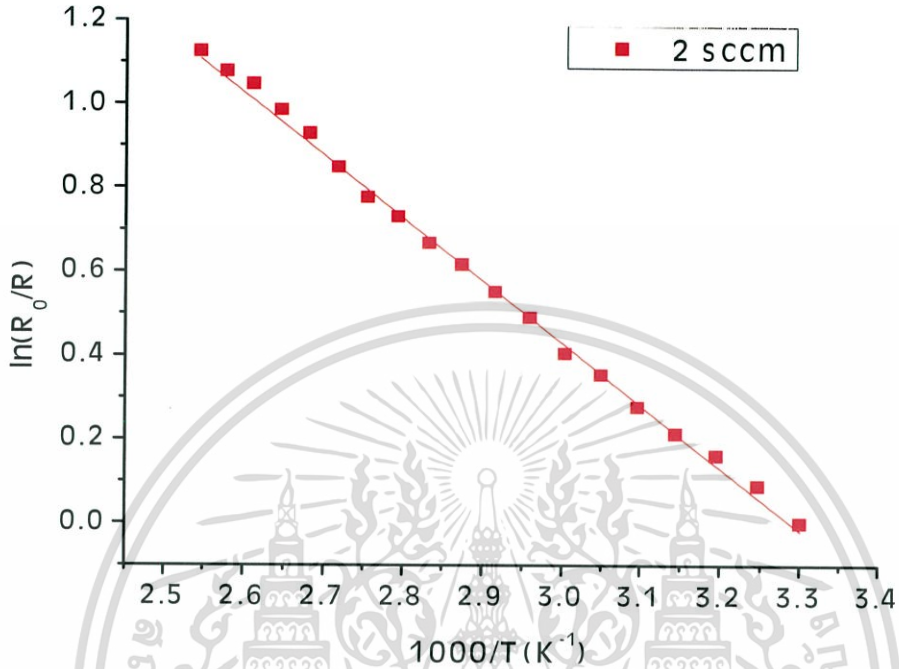


รูปการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโศซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

2 sccm



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที

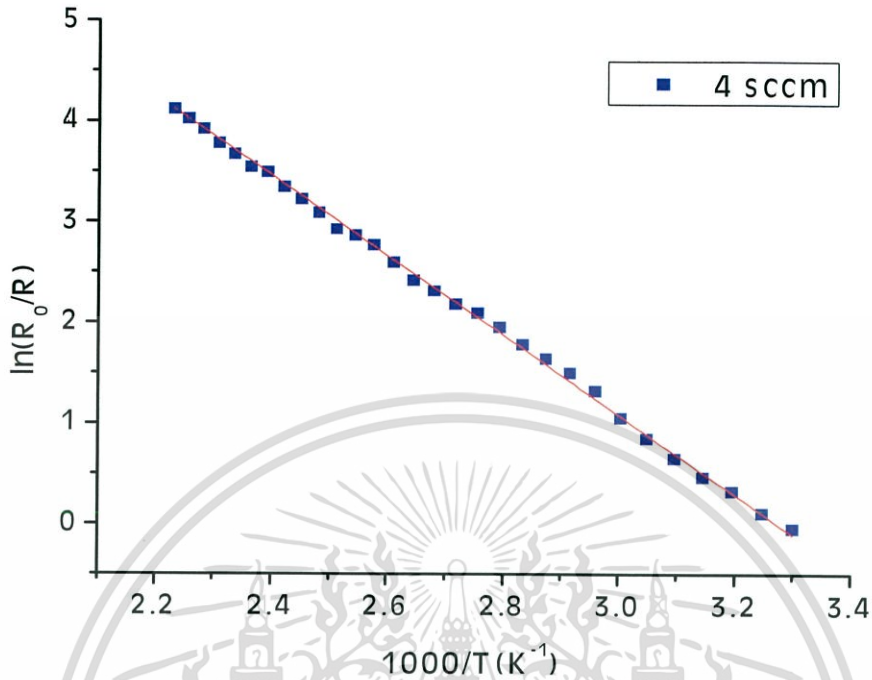
$$E_a = \frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(1.49097)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$= 0.1286 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 sccm

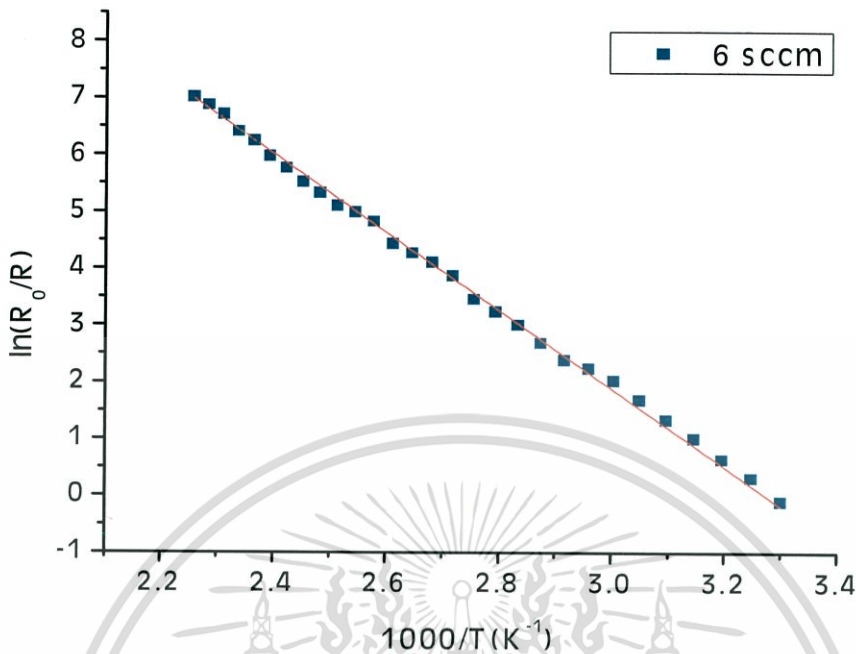


รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที

$$E_a = \frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$
$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(3.9616)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$
$$= 0.3416 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 sccm

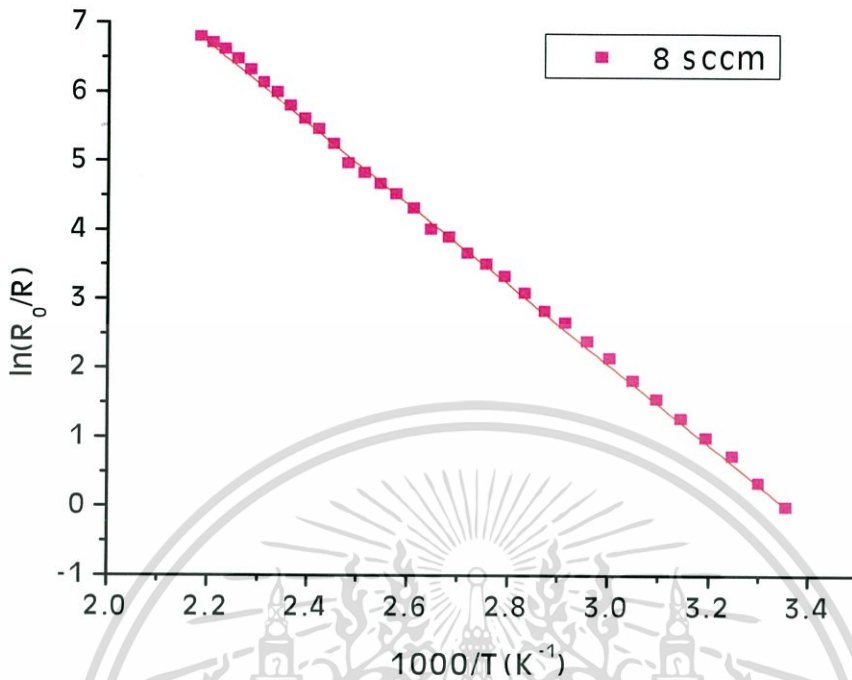


รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที

$$E_a = \frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$
$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(6.88116)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$
$$= 0.5935 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8 sccm



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที

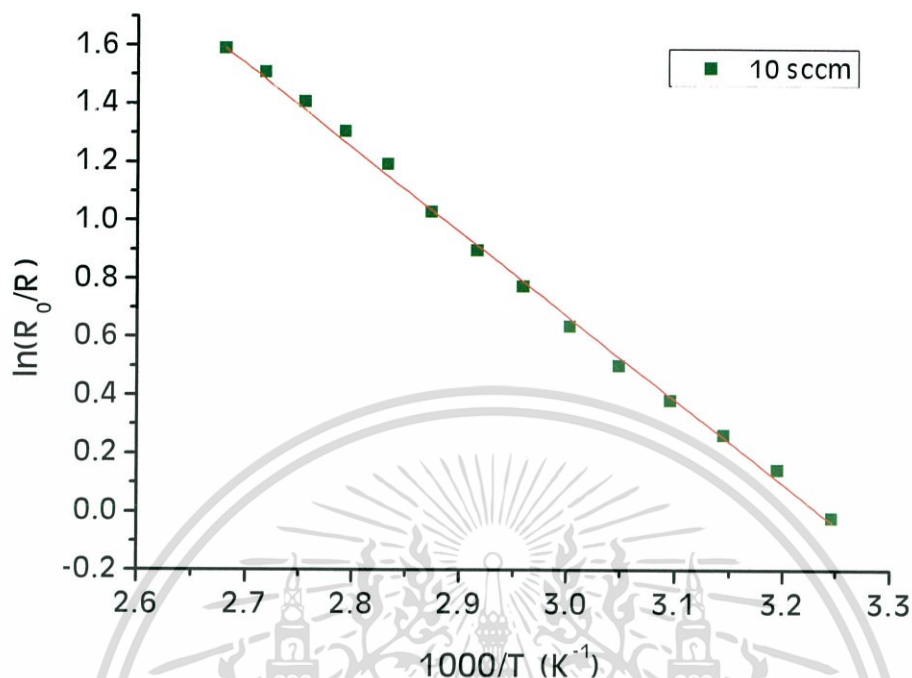
$$E_a = \frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(5.80081)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$= 0.5003 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 sccm



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที

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

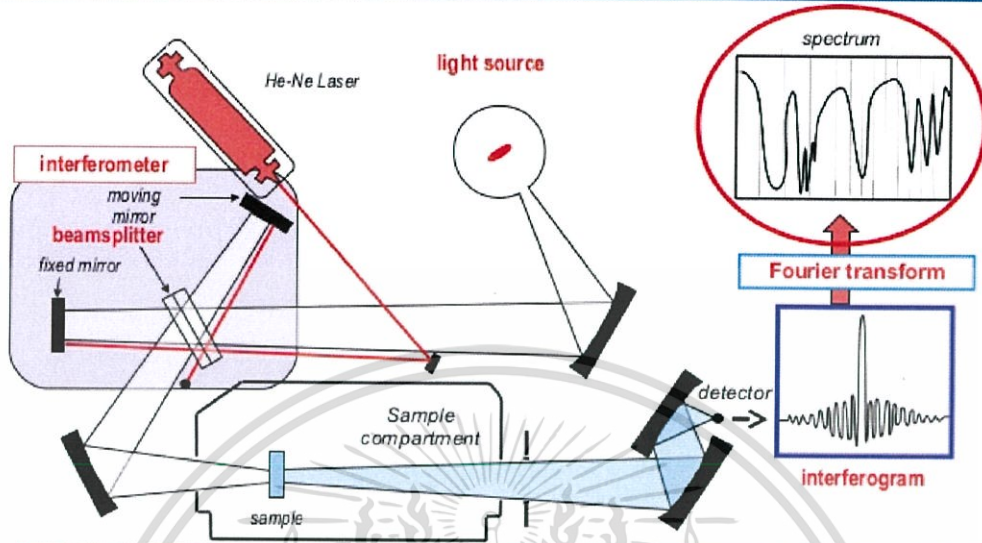
$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(2.82447)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$= 0.2436 \text{ eV}$$

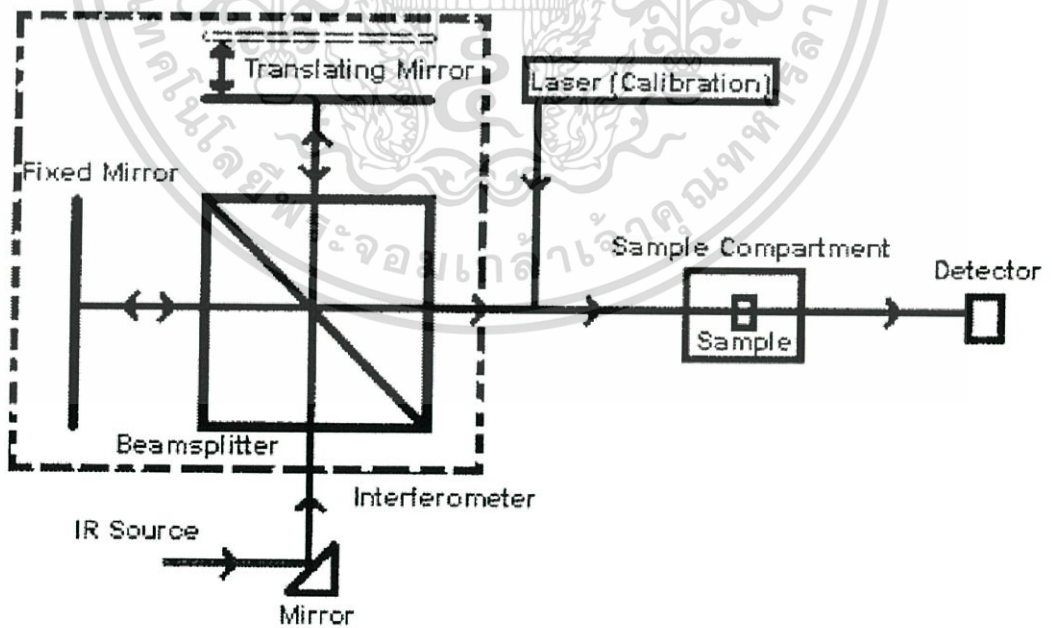
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวกภาพ

## Fourier Transform Infra-Red Spectrophotometer (FTIR)

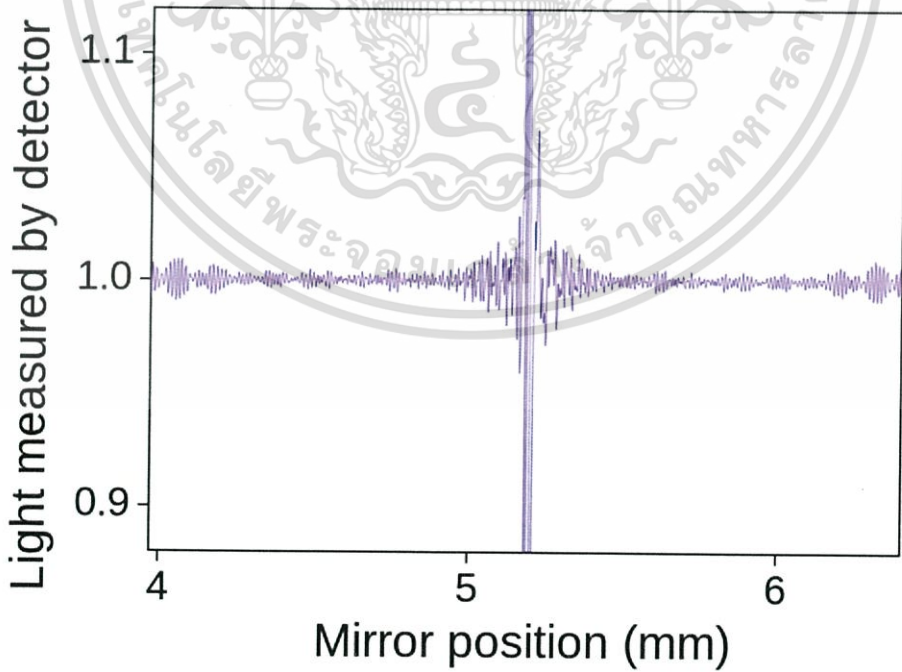
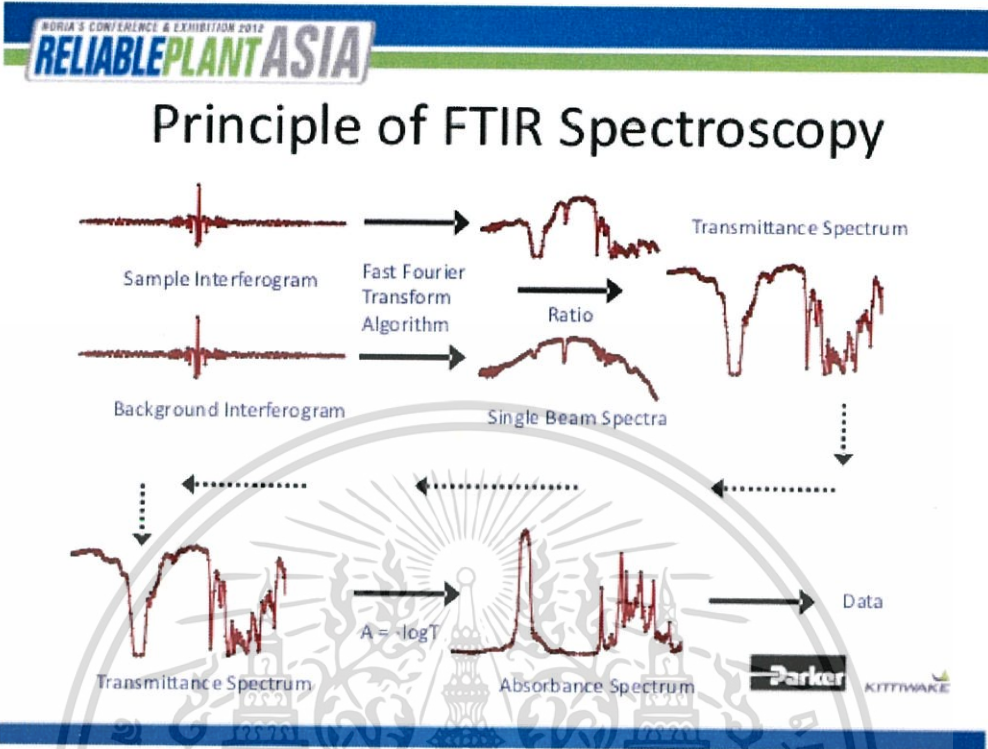


Radiation emitted from the source is split into two with a **beamsplitter** in the **interferometer**. The fixed and moving mirrors reflect each of the beam back to the beamsplitter, where the two beams recombine into one and falls on the detector. The two beams combine constructively or destructively, varying as the optical path difference, when the moving mirror is moved. When the combined beam is transmitted through the sample, it is detected as an **interferogram** and contains all infrared information on the sample. The infrared spectrum is obtained from the interferogram by the mathematical process of **Fourier transformation**.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวกภาพ(ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นางสาวพรหมพร ชุ่มชัยศิริ  
เกิดเมื่อ วันที่ 24 พฤศจิกายน 2536  
ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2554 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย  
โรงเรียนอัสสัมชัญคอนแวนต์  
ปี พ.ศ. 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน นางสาวสุธินี สุรเกษมสวัสดิ์  
เกิดเมื่อ วันที่ 10 พฤศจิกายน 2536  
ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2554 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย  
โรงเรียนเซนต์โยเซฟ บางนา  
ปี พ.ศ. 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้