

สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดย
วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS
PREPARED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดย
วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS
PREPARED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS
PREPARED 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 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยวิธี
รีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
Optoelectronic Properties of ZnO Thin Films Prepared by
Reactive DC Magnetron Sputtering

ชื่อนักศึกษา นางสาวทิพย์มณี รักปลื้ม รหัสนักศึกษา 57050974
นางสาวธนัชฐา แสงจันทร์ รหัสนักศึกษา 57050979

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2560

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวทิพย์มณี รักปลื้ม รหัสนักศึกษา 57050974 นางสาวธนัชรา แสงจันทร์ รหัสนักศึกษา 57050979
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใส โดยกำหนดอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่า ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัล ลักษณะพื้นผิวและเกรนขนาดนาโนเมตรสามารถตรวจสอบได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เตรียมได้ สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 3.24 และ 3.32 อิเล็กตรอนโวลต์ สภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์สามารถวัดได้โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พารามิเตอร์ที่สำคัญทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน สามารถหาได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิค่าต่างๆ จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ กระแสที่ลดลงตามเวลาสามารถพิตกราฟได้โดยใช้มัลติเอ็กซ์โพเนนเชียลฟิตติ้ง ส่งผลให้ได้ช่วงชีวิตค่อนข้างยาวจำนวนหลายค่า นอกจากนั้นความหนาแน่นของกับดักพาหะสามารถคำนวณหาได้จากกระแสชาลงนี้

คำสำคัญ : ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Optoelectronic Properties of ZnO Thin Films Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering	
Student	Miss Thipmanee Rakpluem	Student ID 57050974
	Miss Thanittha Sangjan	Student ID 57050979
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen	

Abstract

In this special project, zinc oxide thin films were prepared by reactive DC magnetron sputtering method on glass substrate with oxygen flow rate 1, 3, 5, 7 and 9 sccm, respectively. From XRD patterns, the all as-deposited films showed hexagonal structure. Surface morphology and nanoparticle size of the films were observed by FESEM and AFM. From transmittance spectra, band gap is varied between 3.24 and 3.32 eV. Electrical resistivity and Hall effect measurements were performed on the films with van der Pauw configuration. The negative sign of the Hall coefficient confirmed the n-type conductivity in the films. Important electrical parameters of the films as a function of oxygen flow rate were observed from temperature – dependent electrical conductivity measurement. From transient photoconductivity measurement, 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 decay current.

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

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ อาจารย์ภารุจ บัณฑิตธาดาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะต่างๆของชิ้นงาน

ขอขอบคุณนางสาวจรรุวรรณ มีนาง นางสาวกัญญ์ณัฐ จันทรครบ และนายมนตรี หาญไก่อ นักศึกษาปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมา

ทิพย์มณี รักปลื้ม

ธนัชฐา แสงจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	7
2.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์	9
2.2.1 ซ็อกบรื่องผลึก	10
2.2.1.1 ซ็อกบรื่องผลึกแบบจุด	10
2.2.1.2 ซ็อกบรื่องผลึกแบบเชิงเส้น	11
2.2.1.3 ซ็อกบรื่องผลึกแบบแนวระนาบ	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	16
2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	17
2.5.3 ส่วนทางของแถบพลังงาน	18
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	19
2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า	20
2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	21
2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	21
2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพอร์	22
2.6.3.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	24
2.6.4 ปราบกฏการฮอลล์	25
2.6.5 การศึกษาปราบกฏการฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	30
2.7 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสง	33
2.7.1 ย่านโปร่งแสง	37
2.7.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง	38
2.7.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง	41
2.7.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข	41
2.8 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เคอร์เชิงเดี่ยว	42
2.9 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี	50
2.9.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์	50
2.10 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	55
2.11 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี	55
2.12 หลักการสปีตเตอริง	56
2.12.1 โกล์ดดิซซาร์จ	56
2.12.1 สปีตเตอริง	58
2.12.2.1 ยีลด์การสปีตเตอริง	58
2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปีตเตอริง	60
2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีตเตอริง	60
2.12.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิซซาร์จ	64
2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีตเตอริง	65
2.13.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	65
2.13.2 การให้ความเย็นที่เป่า	65
2.13.3 การควบคุมให้เกิดการสปีตเตอริงเฉพาะผิวเป่า	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	67
2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา	70
2.14.1 หัววัดลางมัวร์	70
2.14.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	71
2.14.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	72
2.14.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา	73
2.14.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	73
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	74
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	80
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	80
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	80
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้	81
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	81
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	81
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรง อะตอม (AFM)	82
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตร โฟโตมิเตอร์	82
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	83
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง	83
3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	83
3.1.3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ ZnO โดยวิธีรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	84
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	84
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	85
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดิสซาร์จ	92
4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	97
4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	100
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	100
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	101
4.3.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	103
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	104
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	104
4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
อินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์(FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	107
4.5 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	109
4.5.1 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดียวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	112
4.5.2 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	117
4.6 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	120
4.6.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	120
4.6.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	123
4.6.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	129
4.7 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง	146
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	148
5.3 ข้อเสนอแนะ	148
เอกสารอ้างอิง	149
ภาคผนวก	152



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดของธาตุชนิดต่างๆ	59
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	94
4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	98
4.3 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	102
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	108
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีสลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	116
4.7 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	128
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	138

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอเตอร์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	138
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆคำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอฟสกีของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	139
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงเชิงตั้งัน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร	144

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	4
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบHexagonal หรือ wurtzite	10
2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	11
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	12
2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	12
2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	14
2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.9 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	16
2.10 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	18
2.11 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	21
2.12 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	22
2.13 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.14 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	24
2.15 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	25
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.16 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
2.17 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	31
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้	32
2.19 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางโปร่งแสง	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 แสดงรีวิวกการแทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\alpha\text{-Si : H}$ ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	35
2.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF	45
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	46
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS	46
2.24 โครงสร้างของการโกลด์ดิซชาร์จ	57
2.25 การเกิดสปีตเตอร์ริงที่ผิวเป้า	58
2.26 การสปีตเตอร์ริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีตเตอร์ริง	60
2.27 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	62
2.28 ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียทรงกระบอก	64
2.29 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	68
2.30 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	69
2.31 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	70
2.32 หัววัดเดี่ยววางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	70
2.33 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	71
2.34 แสดง XRD ของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และเจือด้วย GaAs จำนวน 1% และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%	75
2.35 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและสเปกตรัมสะท้อนแสงของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสเจือด้วย GaAs 1% และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้าและการส่งผ่านแสงย่านตามองเห็นได้กับอุณหภูมิแผ่นรองรับของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสเจือด้วย GaAs 1% และอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%	76
2.37 แสดงการเปลี่ยนของสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงย่านตามองเห็นได้ที่ขึ้นกับปริมาณของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และเจือด้วย GaAs 1%	76
2.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน สภาพคล่องฮอลล์และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:Ga ที่ขึ้นกับพื้นที่ของ GaAs ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%	77
2.39 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านและสเปกตรัมสะท้อนแสงของฟิล์มบาง ZnO:Ga ก. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5% ข. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5%	78
2.40 แสดงระหว่าง α^2 กับ $1/v$ ของฟิล์มบาง ZnO:Ga ที่มีพื้นที่ ความสัมพันธ์ของ GaAs เท่ากับ 1% ก. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5% ข. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5% ค. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%	79
3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	81
3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	81
3.3 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม (AFM)	82
3.4 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He (λ ios α))	82

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	83
3.6 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	83
3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	84
3.8 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	84
3.9 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	85
3.10 ก. ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า ข. ภาพแสดงคันบังคับ Shutter ที่อยู่ภายใน	86
3.11 ก. ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวจความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลูอิดกระจาย) ข. ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	87
3.12 ก. ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open ข. ภาพแสดง speedy valve	87
3.13 ก. ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ ข. ภาพแสดง power supply	88
3.14 ก. ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply ข. ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	89
3.15 ภาพแสดงพลาสติกที่ติดในครั้งแรก	89
3.16 ก. ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด ข. ภาพแสดงท่อก๊าซอาร์กอนและท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	91
4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 330 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 3.1×10^{-1} และ 7.6×10^{-4} ทอร์ ตามลำดับ	93
4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสซาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ ออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ	97
4.3 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริง ที่อัตราการไหล ของออกซิเจน 1, 3, 5, 7, และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	99
4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสเปคเตอรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7, และ 9 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที	100
4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริง	101
4.6 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วย สนามไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ทั้งที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริงที่กำลัง ขยาย 100000 เท่า	103
4.7 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริง ที่อัตราการไหลของ ออกซิเจนอัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	104
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคเตอรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	104

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที	105
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.11 แสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร	107
4.12 แสดงหน้าตาของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริง	109
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	110
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	111
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	112

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า (n^2-k^2) กับ λ^2 ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	115
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	117
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	118
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	119
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	119
4.21 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอเพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	120

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธี แวนเดอเพอร์วอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	120
4.23 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธี แวนเดอเพอร์วอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	121
4.24 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธี แวนเดอเพอร์วอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	121
4.25 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธี แวนเดอเพอร์วอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	122
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	123
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	123
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	124
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	124
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	125

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	125
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	129
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	130

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	131
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	132
4.41 แสดงแผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด	137
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ρ กับ T ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	140
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	141
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	142
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอนุพัทธ์ของอัลเลกซ์ฮาลกับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	143

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้พลังงานทดแทนได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น เพราะพลังงานหลัก คือน้ำมันเริ่มมีปริมาณน้อยลง มีทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์นี้ได้รับความสนใจมากในการศึกษาและพัฒนา เพราะว่าเป็นพลังงานประเภทหมุนเวียนใช้แล้วไม่หมดไปสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เมื่อเรานำมาใช้งาน แต่สิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูงและมีเปอร์เซ็นต์การแปลงพลังงานไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อย จึงเป็นที่สนใจในการศึกษาและพัฒนาเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ถูกลงและทำให้พลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะ คือ สามารถเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานโฟตอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาตกกระทบจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) (งามนิศย์, 2543; Kittel, 1971)

ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซึ่งคือออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุออกซิเจนที่แตกต่างกัน จัดเป็นฟิล์มบางตัวนำออกไซด์โปร่งแสง (TCO) ซึ่งเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซึ่งค้อออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น การพาไอระเหยสารเคมี (CVD), สปีดเตอริง (sputtering), กระบวนการโซลเจล (sol-gel) และการพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) เป็นต้น โดยฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซึ่งค้อออกไซด์ ศักยภาพการประดิษฐ์เป็นกระจกสะท้อนความร้อน (heat mirrors) หรือขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting electrode) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ $ZnO:Al/CdS/CuInGaSe_2$ ให้มีประสิทธิภาพ ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า สูงราว 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซึ่งค้อออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซึ่งค้อออกไซด์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ดีควรมีความต้านทานที่ต่ำและเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็นมีค่าที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างผลึกจุลภาคและเชิงมหภาค ปรากฏการณ์ฮอลล์ สมบัติทางแสง และผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์โดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโตรสโคปี
5. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้จะทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง จากนั้นจะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้าและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ศึกษาสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ โดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์และโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
4. นำฟิล์มบางไปถ่ายภาพลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM)
5. ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์
7. วิเคราะห์และสรุปผล
8. เขียนรูปเล่มโครงการงานพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เราทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในทางการศึกษาทฤษฎีและเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้

บทที่ 2

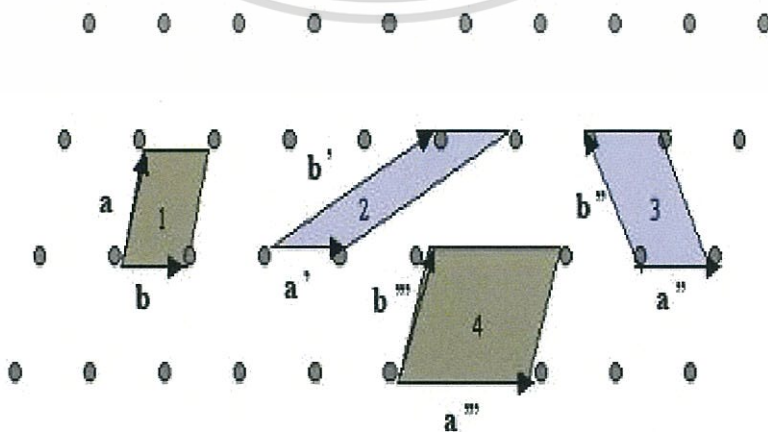
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิทย์, 2531; งามนิทย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่ และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองทั้งนี้ ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ





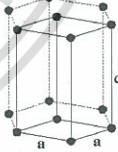
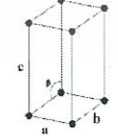
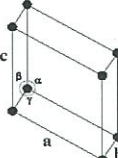
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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° rhombus)	$a=b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รมบโอบีฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

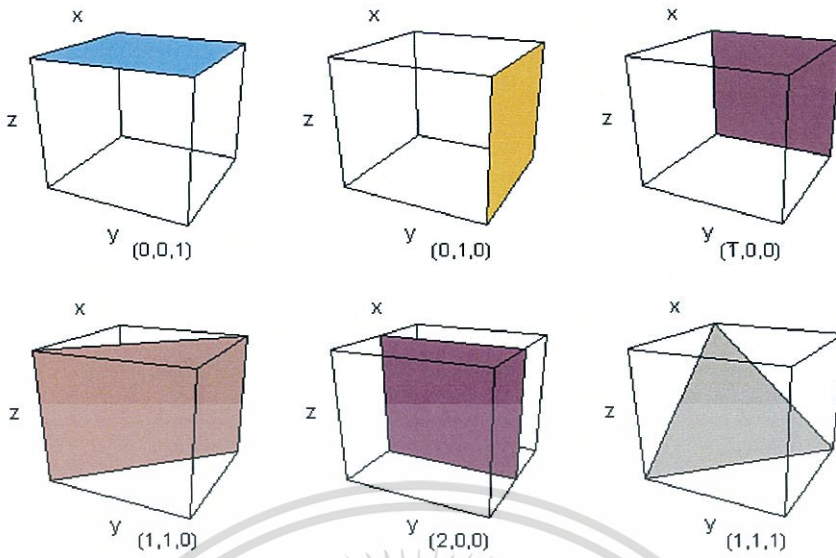
เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึง ตำแหน่ง ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

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 ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบ หรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
 - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) 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, ∞	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

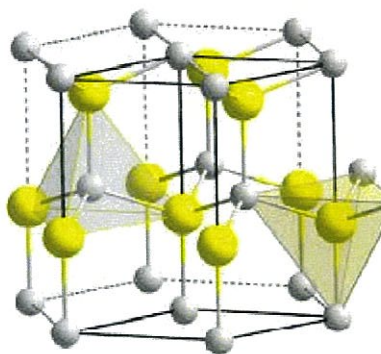
สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ในระบบเฮกซะโกนัล เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่า ทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่า สปัตเตอร์และหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.2 โครงสร้างผลึกของ ZnO

โครงสร้าง ZnO มีความสอดคล้องกับแกน c ของโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม wurtzite โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ 5/8 ตามแนวแกน c (c-axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS และ ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหรือเวอร์ทไซต์

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

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจน เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

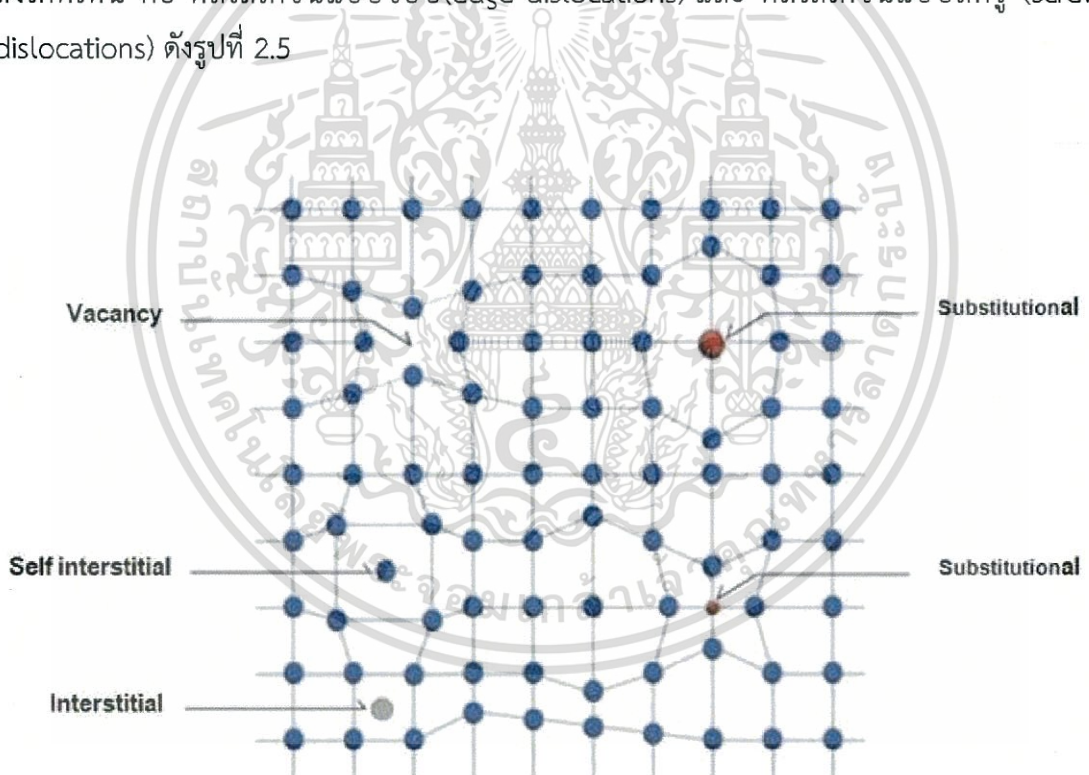
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจาก การที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก

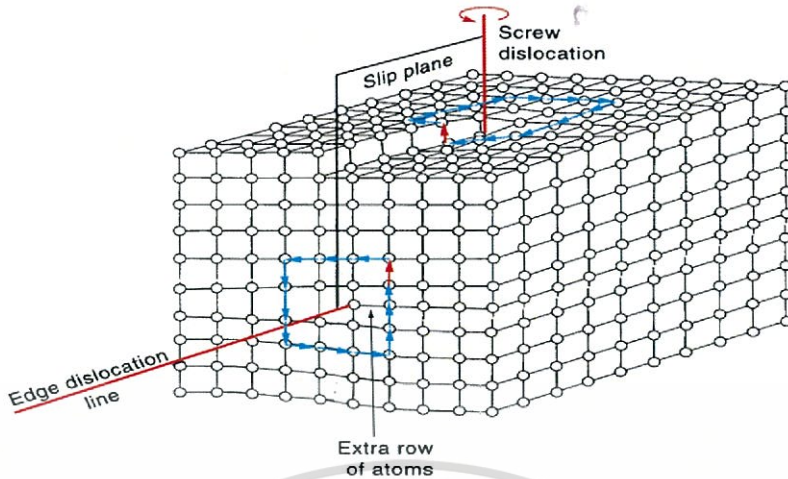
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.2.1.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป ซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชัน อาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) และ ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5

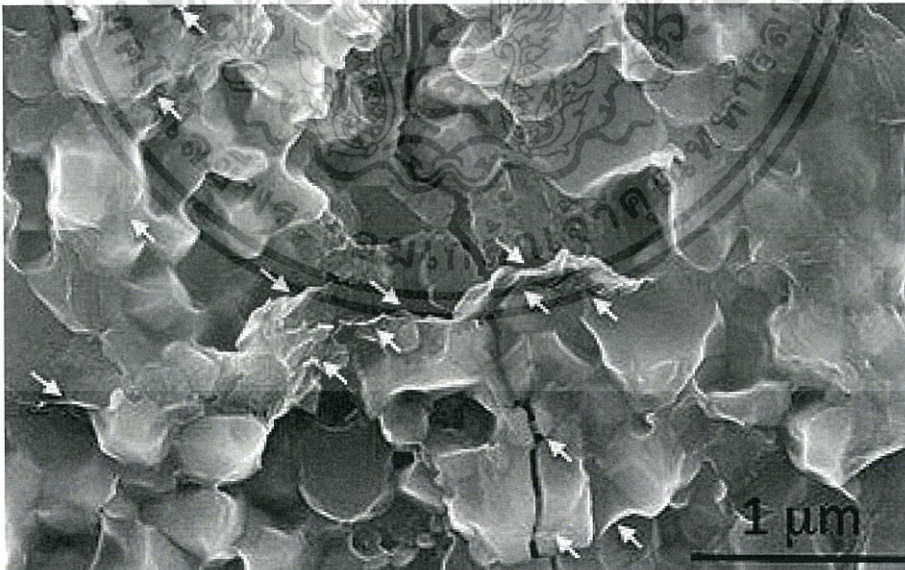


รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็น สามกลุ่มใหญ่ๆ คือ การเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971;

งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

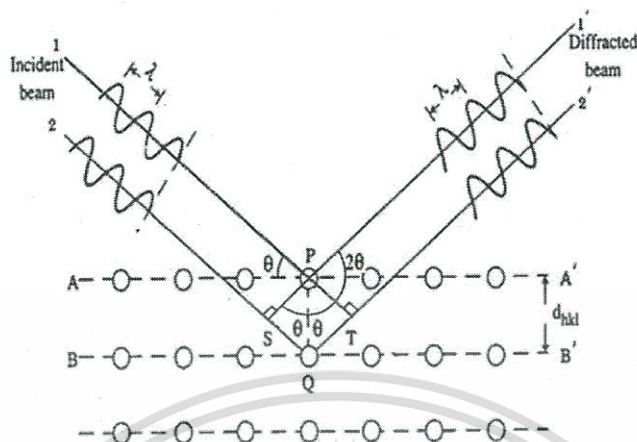
n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3 ,....

λ คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



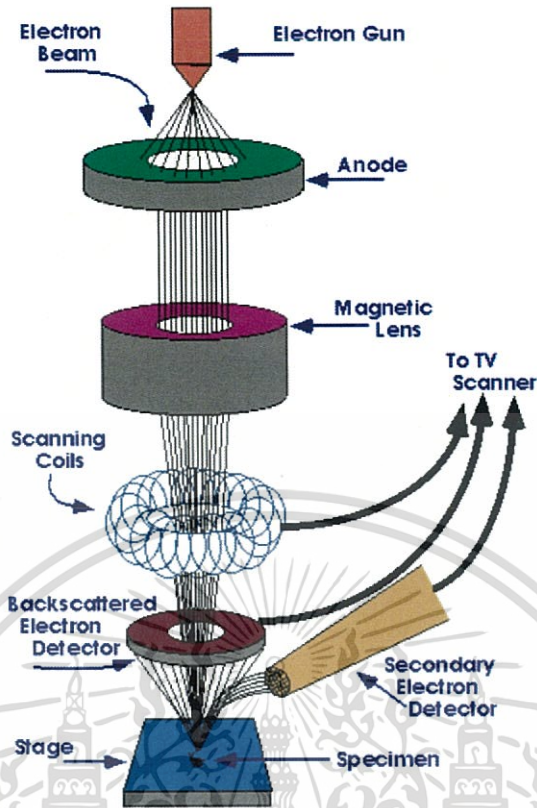
รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 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 ชาลส์วิลเลียมแอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.9 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่าง เช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

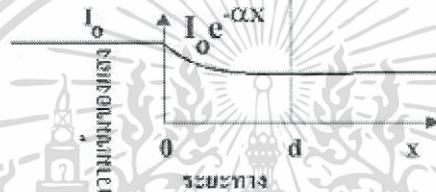
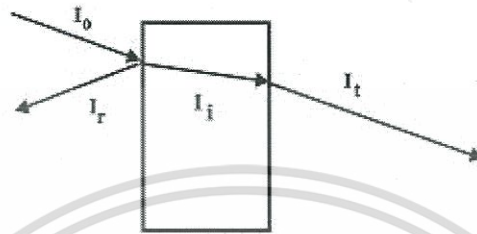
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; รุติไฉย, 2549; รุติไฉย, 2550; งามนิตย์, 2551; รุติไฉย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบ พลังงาน (energy gap: E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาชีวิตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

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

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

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

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียง คือ

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

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

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

2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดย

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

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.10)$$

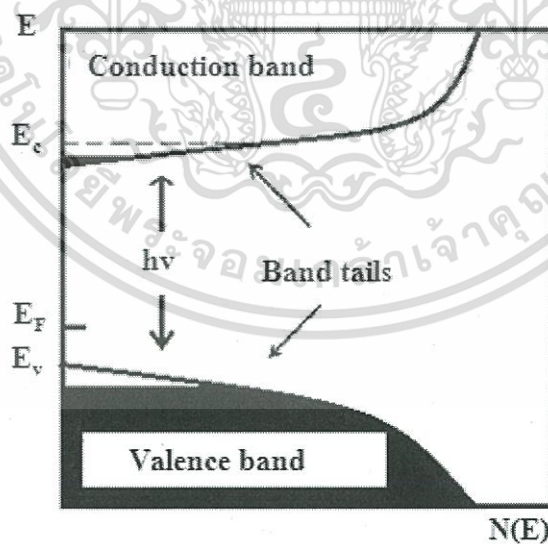
เมื่อ n คือ จำนวนจริง

K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.5.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้ จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออก โดยจะไม่ใช่ระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำ ซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้ มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเชิงการทดลองส่วนทางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่ง เออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือ ค่าความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนจากสมการที่ (2.10) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \alpha$ กับ พลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่เข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดสุ่มรวม

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

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่ มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระ ตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.12)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $f(E)$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)
k	คือ	ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

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

เมื่อ μ_n, μ_p	คือ	สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ
n	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
p	คือ	ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \left(\frac{1}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.16)$$

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

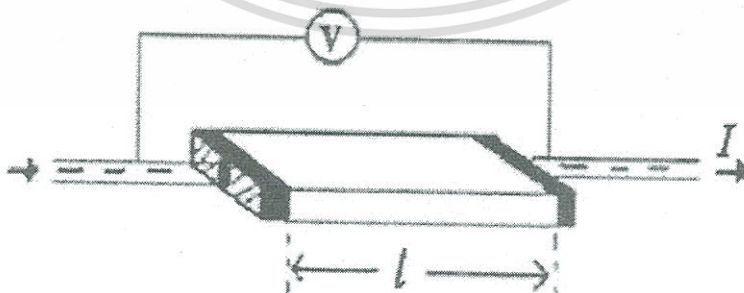
2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำ

ได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.11 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

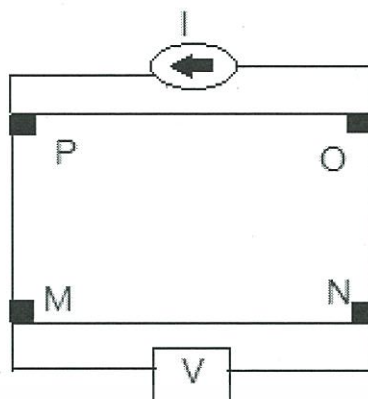
2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 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 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

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

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

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

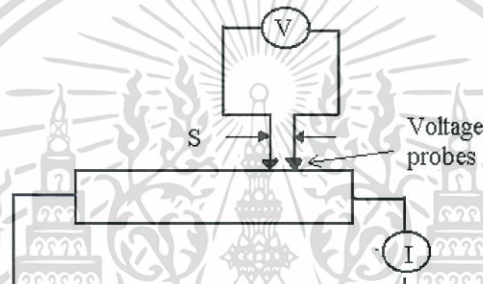
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

2.6.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.15 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

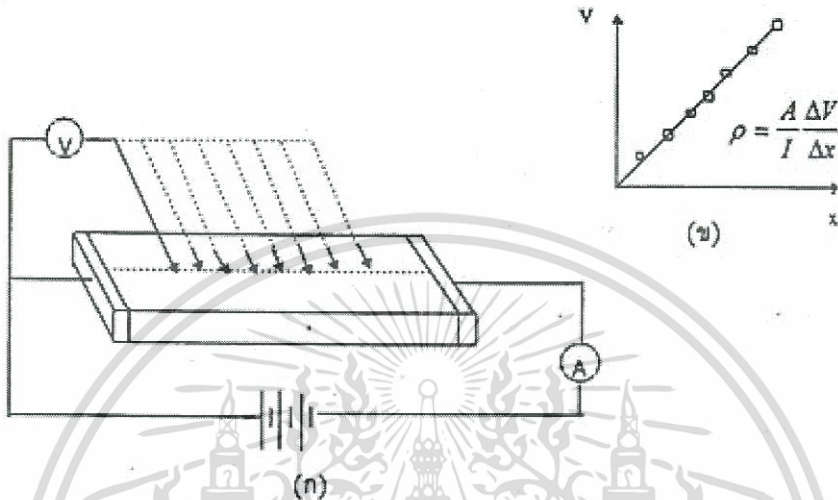


รูปที่ 2.14 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเลขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร 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 ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทาง หรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ความชันที่จะได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.15 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
 กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือ หากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) คือ

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

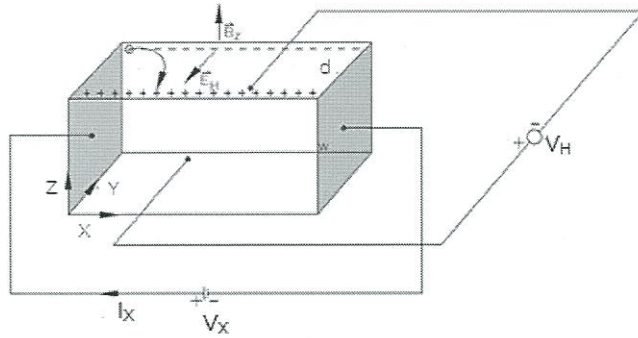
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.27)$$

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 2.16 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.17 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) ที่กระทำกับชั้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ 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) ซึ่งนิยามว่า เป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 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 โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึก หรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์ แปรค่าตาม สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ 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 (μ_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 ซึ่ง มีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไป เพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมัก ประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะ ที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจ สูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

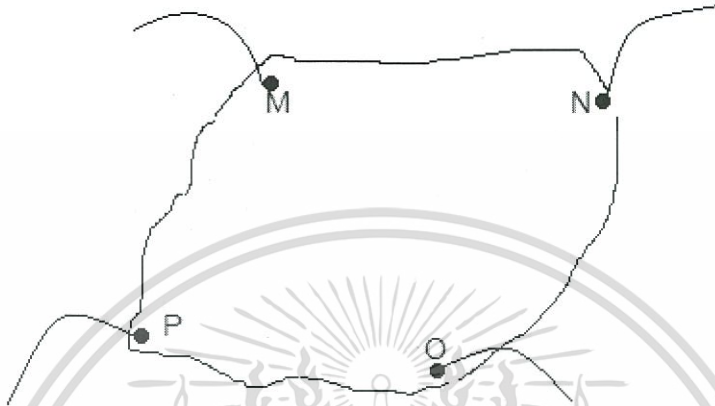
เทคนิคนี้ได้รับแวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สาระสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐาน ของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปีง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพุดิตตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสสว่างอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.17 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

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

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

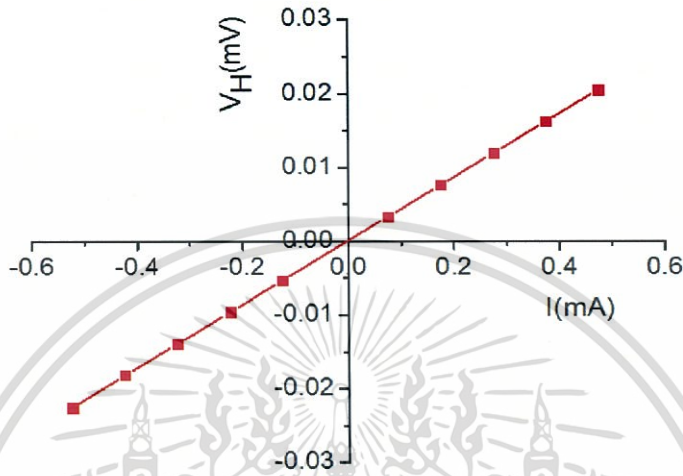
d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.51) จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลอง เราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.19 โดยที่ ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

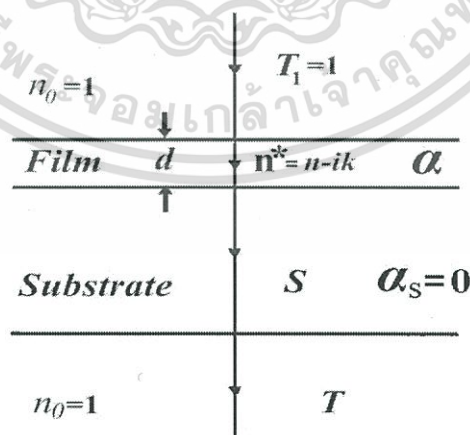
ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง

ความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง สามารถหาได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่โปร่งแสง ซึ่งจะแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.20 ฟิล์มบางมีความหนา d และดัชนีหักเหเชิงซ้อน $n^*=ik$ เมื่อ n คือจำนวนจริงของค่าดัชนีหักเห ส่วน k คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient) สำหรับความหนาของแผ่นฐานรองรับจะต้องมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มบางในระดับ 100-1000 เท่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางคือ s และประมาณว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแผ่นฐานรองรับ (α_s) มีค่าน้อยมากและประมาณให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าดัชนีหักเหของอากาศ $n_0=1$ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะต้องพิจารณาการสะท้อนแสงทีละชั้น (multiple reflections) ที่รอยต่อ (ดังรูปที่ 2.20) จำนวน 3 รอยต่อ

ถ้าฟิล์มบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือความหนามีลักษณะลาดชัน ลักษณะรั้วการแทรกสอดของที่ส่งผ่านฟิล์มบางจะหายไป ดังนั้นจะเห็นเพียงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เป็นเส้นกราฟที่เรียบดังแสดงด้วยเส้นโค้ง T_α ของรูปที่ 2.21 จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่โปร่งแสง ค่า $\alpha = 0$ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะขึ้นกับ n และ s โดยจะต้องมีการสะท้อนแสงทีละชั้นเกิดขึ้น สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบาง α มีค่าน้อยและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะเริ่มมีค่าลดลง ส่วนบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงปานกลาง α จะมีค่ามากและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงเนื่องจากผลของ α นี้ และบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างมากด้วยอิทธิพลของ α ดังกล่าว เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียบ T_α มักจะถูกนำไปใช้หาค่า $\alpha(\lambda)$ ในช่วงแสงตามองเห็นได้ และช่วงอินฟราเรดเสมอ



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางโปร่งแสง

ถ้าความหนา d ของฟิล์มบางมีค่าสม่ำเสมอ จะส่งผลให้สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของรูปที่ 2.21 เป็นเส้นทึบ ริ้วการแทรกสอดของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบางได้ โดยเริ่มจากการพิจารณากรณีแผ่นรองรับอย่างเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของแผ่นฐานรองรับจะแสดงได้ดังสมการ

$$T_s = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} \quad (2.55)$$

เมื่อ $R_s = \left\{ \frac{(s-1)}{(s+1)} \right\}^2 \quad (2.56)$

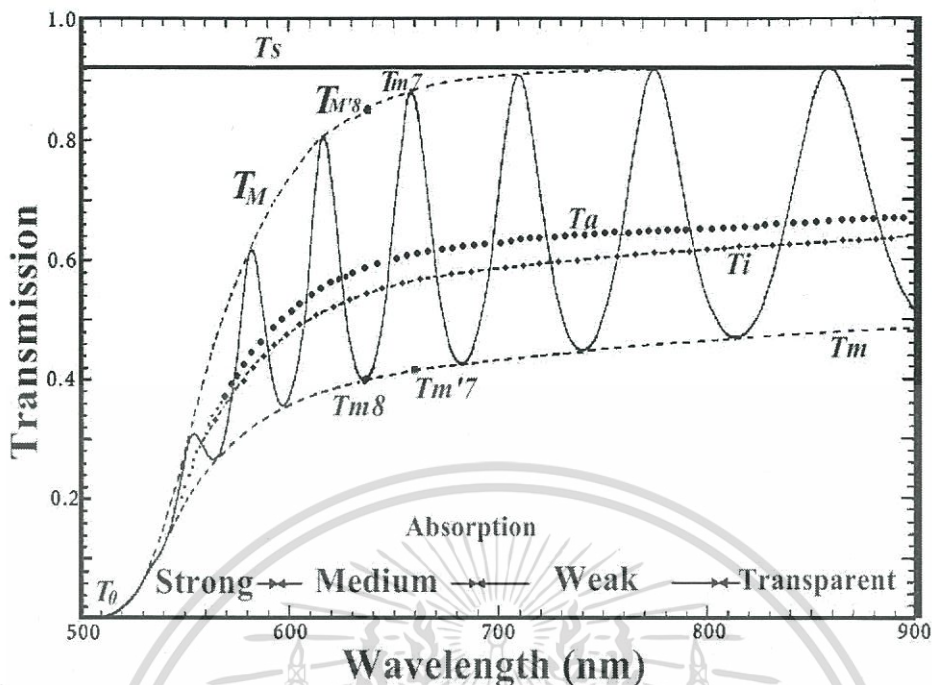
หรือ $T_s = \frac{2s}{s^2+1}$

และ $s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s} - 1 \right)^{1/2}$

การเกิดริ้วการแทรกสอดจะเป็นไปตามสมการ

$$2nd = m\lambda \quad (2.57)$$

เมื่อ m คือเลขจำนวนเต็มสำหรับริ้วการแทรกสอดชนิดเสริมกัน (ซึ่งก็คือสันคลื่น) และ m จะเป็นเลขจำนวนนับหารด้วย 2 สำหรับริ้วการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (ซึ่งก็คือท้องคลื่น) ในสมการที่ (2.57) เพียงสมการเดียว ก็ไม่สามารถหาค่า n และ d ได้



รูปที่ 2.20 แสดงริ้วการแทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\alpha\text{-Si:H}$ ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T ของรูปที่ 2.21 จะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha)$$

ถ้ารู้ค่า s แล้ว T สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของ $n(\lambda)$ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $x(\lambda)$ (absorbance) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (x) นี้จะแสดงดังสมการที่ (2.57) แล้วค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะกลายเป็น

$$T = T(n, x)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานทางแสงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางดังรูปที่ 2.21 จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = \frac{A'x}{B' - C'x + D'x^2} \tag{2.58}$$

เมื่อ $A' = 16s(n^2 + k^2)$

$$B' = [(n+1)^2 + k^2][[(n+1)(n+s^2) + k^2]]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C' = \left[(n^2 - 1 + k^2) \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) - 2k^2 (s^2 + 1) \right] 2 \cos \phi - k \left[2 \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) + (s^2 + 1) \left(n^2 - 1 + k^2 \right) \right] 2 \sin \phi$$

$$D' = \left[(n-1)^2 + k^2 \right] \left[(n-1)(n-s^2) + k^2 \right]$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda}$$

$$x = \exp(-\alpha d)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

ในกรณีที่แผ่นฐานรองรับมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มบางมากๆ (เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฐานรองรับมีความหนาเป็นอนันต์) แล้ว T จะกลายเป็น

$$T = \frac{A''x}{B'' - C''x + D''x^2} \quad (2.59)$$

เมื่อ

$$A'' = 16s(n^2 + k^2)$$

$$B'' = \left[(n+1)^2 + k^2 \right] \left[(n+1)(n+s^2) + k^2 \right]$$

$$C'' = \left[(n^2 - 1 + k^2) \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) - 2k^2 (s^2 + 1) \right] 2 \cos \phi - k \left[2 \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) + (s^2 + 1) \left(n^2 - 1 + k^2 \right) \right] 2 \sin \phi$$

$$D'' = \left[(n-1)^2 + k^2 \right] \left[(n-1)(n-s^2) + k^2 \right]$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (x) ของรูปที่ 2.20 สามารถเขียนอยู่ในพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นเส้นโค้งเรียบ (T_α) ดังนี้คือ

$$x = \frac{P + [P^2 + 2QT_a(1 - R_2R_3)]^{1/2}}{Q} \quad (2.60)$$

เมื่อ $Q = 2 T_\alpha (R_1R_2 + R_1R_3 - 2R_1R_2R_3)$

$$P = (R_1 - 1)(R_2 - 1)(R_3 - 1)$$

$$R_1 = \left[\frac{1-n}{1+n} \right]^2$$

$$R_2 = \left[\frac{n-s}{n+s} \right]^2$$

$$R_3 = \left[\frac{s-1}{s+1} \right]^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น เราจะให้ $k=0$ แล้วสมการที่ (2.60) จะกลายเป็น

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (2.61)$$

$$\text{เมื่อ } A = 16n^2s \quad (2.62ก)$$

$$B = (n+1)^3(n+s^2) \quad (2.62ข)$$

$$C = 2(n^2-1)(n^2-s^2) \quad (2.62ค)$$

$$D = (n-1)^3(n-s^2) \quad (2.62ง)$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.62จ)$$

$$x = \exp(-d) \quad (2.62ฉ)$$

แล้วจะได้ว่า T_M และ T_m ของรูปที่ 2.21 คือ

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (2.63)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (2.64)$$

ถ้าพิจารณาให้ T_M และ T_m เป็นฟังก์ชันของ λ หรือเป็นฟังก์ชันของ n (λ) และของ x (λ) อีก ทั้ง T_M และ T_m เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ที่ความยาวคลื่น λ ใดๆค่า T_M จะสัมพันธ์กับ T_m ยกตัวอย่างเช่น T_{M7} จะสัมพันธ์กับ T'_{M7} และ T_{M8} จะสัมพันธ์กับ T'_{M8}

2.7.1 ย่านที่โปร่งแสง

เป็นบริเวณที่ $\alpha = 0$ หรือ $x = 1$ ให้แทนสมการที่ (2.62) ลงในสมการที่ (2.63)

$$\text{จะได้ว่า } T_M = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.65)$$

สมการที่ (2.65) นี้จะให้ผลเหมือนกับสมการที่ (2.55) และจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเป็นฟังก์ชันของ s อย่างเดียว และซ้อนทับกับเส้น T_s แต่เมื่อจุดสูงสุดของการ

แทรกสอดแบบเสริมกันนี้เริ่มเบนออกจาก T_s จะแสดงว่าจุดเริ่มต้น (onset) ของการดุดกลืนแสงเริ่มปรากฏขึ้นแล้วดังนั้นค่า s สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.65)

ทำการแทนสมการที่ (2.62) ลงในสมการที่ (2.63) โดยให้ $x = 1$ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4 + n^2(s^2 + 1) + s^2}$$

หรือ
$$n = [M + (M^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.66)$$

เมื่อ
$$M = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

โดยที่ T_m จะเป็นฟังก์ชันของทั้ง n และ s แล้วค่า n จะคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.66) นี้เองและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ λ

2.7.2 ย่านที่มีการดุดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง

ในบริเวณที่มีการดุดกลืนแสงเบาบางนี้ $\alpha \neq 0$ และ $x < 1$ จากสมการที่ (2.66) และ (2.64) ผลต่างของส่วนกลับของ T_M และ T_m จะไม่ขึ้นกับตัวแปร x ดังนี้คือ

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (2.67)$$

ทำการแทนที่สมการที่ (2.62) ลงใน (2.67) จะสามารถทำให้หาค่า n ได้

$$n = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.68)$$

เมื่อ
$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{(s^2 + 1)}{2}$$

สมการที่ (2.68) นี้สามารถนำไปหาค่า n (λ) จาก T_M และ T_m ได้ เมื่อทราบค่า n (λ) แล้ว ค่าคงที่ทุกตัว ของสมการที่ (2.62) ก็จะหาได้ทันที และค่า x สามารถคำนวณหาได้จากหลายวิธี สมการที่ (2.63) และ (2.64) เป็นสมการยกกำลังสอง (quadratic function) ของตัวแปร x จากการแก้สมการที่ (2.63) จะได้ว่า

$$x = \frac{E_M - \left[E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{1/2}}{(n - 1)^3 (n - s^2)} \quad (2.69)$$

เมื่อ
$$E_M = \frac{8n^2s}{T_M}(n^2-1)(n^2-s^2)$$

จากการแก้สมการที่ (2.61) จะได้ว่า

$$x = \frac{E_m - \left[E_m^2 - (n^2-1)^3(n^2-s^2) \right]^{1/2}}{(n-1)^3(n-s^2)} \quad (2.70)$$

เมื่อ
$$E_m = \frac{8n^2s}{T_m}(n^2-1)(n^2-s^2)$$

และจากสมการที่ (2.63) และ (2.64) จะได้ว่า

$$\frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} = \frac{Ax}{B + Dx^2} \quad (2.71)$$

แก้สมการเพื่อหาค่า x จะได้ว่า

$$x = \frac{F - \left[F^2 - (n^2-1)^3(n^2-s^4) \right]^{1/2}}{(n-1)^3(n-s^2)} \quad (2.72)$$

เมื่อ
$$F = \frac{8n^2s}{T_i}$$

และ
$$T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} \quad (2.73)$$

จากสมการที่ (2.71) และ (2.61) เห็นได้ว่า T_i คือเส้นโค้งที่ผ่านจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของรีการแทรกสอดของรูปที่ 2.21 เส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียก T_α สามารถที่จะคำนวณหาได้จากรีการแทรกสอดของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.61) ระหว่างจุดสูงสุด (สันคลื่น) กับจุดต่ำสุด (ท้องคลื่น) ดังนี้คือ

$$T_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} d\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณว่าเป็นการอินทิเกรตในบริเวณแคบๆ (narrow integration region) ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่าคงที่แล้วผลของการอินทิเกรตคือ

$$T_\alpha = \frac{Ax}{[(B - Cx + Dx^2)(B + Cx + Dx^2)]^{1/2}} \quad (2.74)$$

แทนสมการที่ (2.73) และ (2.74) ลงในสมการที่ (2.64) จะได้ว่า

$$T_\alpha = \sqrt{T_M T_m} \quad (2.75)$$

โดยที่ T_α จะเป็นค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (geometric mean) ของ T_M และ T_m ซึ่งสมการที่ (2.5) จะเป็นสมการที่มีประโยชน์ จากสมการที่ (2.34) สามารถหาค่า x ได้ดังนี้ คือ

$$x = \frac{\left\{ G - \left[G^2 - (n^2 - 1)^6 (n^2 - s^4) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.76)$$

เมื่อ $G = \frac{128n^4 s^2}{T^2} + n^2 (n^2 - 1)^2 (s^2 - 1)^2 + (n^2 - 1)^2 (n^2 - s^2)^2$

สมการที่ (2.74) สมมูลกับสมการที่ (2.60) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงในย่านตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด สมการที่ (2.74) นี้ยังสามารถใช้หาค่า n จากสเปกตรัม T_α ในบริเวณที่โปร่งแสง (เมื่อ $\alpha=0$) การคำนวณหาค่า n จะเริ่มจากการให้ค่า x ของสมการที่ (2.74) เท่ากับ 1 แล้วจะได้ว่า

$$n = [H + (H^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.77)$$

เมื่อ $H = \frac{4s^2}{(s^2 + 1)T\alpha^2} - \frac{s^2 + 1}{2}$

มานิฟาซีเยร์และผู้ร่วมงานได้ทำการคำนวณหาค่า x จากเงื่อนไขแผ่นรองรับมีความหนาอนันต์ (infinite substrate) ซึ่งจะได้ว่า

$$x = \frac{(n+1)(s+n)[1 - (T_M/T_m)^{1/2}]}{(n-1)(s-n)[1 + (T_M/T_m)^{1/2}]} \quad (2.78)$$

สมการที่ (2.78) ไม่สมมูลกับสมการที่ (2.66), (2.67), (2.72) และ (2.76)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง รั้วการแทรกสอดจะไม่ปรากฏให้เห็น ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า n และ x จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงแต่เพียงอย่างเดียวได้ ค่า n ของบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรงนี้สามารถประมาณได้จากการลากส่วนต่อจากบริเวณอื่น เช่น จากบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลางเป็นต้น ส่วนค่า x สามารถคำนวณหาได้จากสมการใดสมการหนึ่งของสี่สมการอันได้แก่ สมการที่(2.69), (2.70), (2.72) และ (2.75) สำหรับ α ที่มีค่ามากๆ เส้นกราฟทั้งสี่ คือ T_M, T_α, T_i และ T_m จะลู่เข้าซ้อนกันเป็น T_0 ถ้าไม่พิจารณารั้วการแทรกสอดและให้ $x \leq 1$ สมการที่ (2.21) สามารถเขียนได้เป็น

$$T_0 \approx \frac{Ax}{B}$$

หรือ

$$x \approx \frac{(n-1)^3(n+s^2)}{16n^2s} T_0 \quad (2.79)$$

2.7.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อทดสอบความแม่นยำของทฤษฎีนี้ จะกำหนดให้ $S = 1.51$ ความหนา (d) ของฟิล์มบาง α -Si:H เท่ากับ 1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหจะเขียนในรูปของสมการคوشي (Cauchy's equation) ดังนี้

$$n = \frac{3 \times 10^5}{\lambda^2} + 2.6 \quad (2.80)$$

ส่วนค่าลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือ

$$\log \alpha = \frac{1.5 \times 10^6}{\lambda^2} - 8 \quad (2.81)$$

โดยที่ α มีหน่วยเป็น ต่อนาโนเมตร

จากค่า $n(\lambda)$ และ $\alpha(\lambda)$ ดังกล่าวข้างต้น นำเอาไปทำแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองได้อย่างดี เมื่อทราบค่า $\alpha(\lambda)$ แล้วก็สามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง $k(\lambda)$ จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

สำหรับการหาค่าความหนาของฟิล์มบาง (d) ให้พิจารณาที่สันคลื่นหรือท้องคลื่น ที่อยู่ติดกัน เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่มีความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ตามลำดับ จากสมการที่(2.57)จะได้ว่าความหนาของฟิล์มบางคือ

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2)} \quad (2.82)$$

สรุปได้ว่าสำหรับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตร จะเป็นเส้นโค้งเรียบแผ่นฐานรองรับเป็นแผ่นกระจกสไลด์มีความหนาในราว 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงประมาณว่า ความหนาของแผ่นรองรับเป็นอนันต์แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการที่ (2.59) ส่วน α จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า χ จากสมการที่ (2.60)

2.8 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว(single oscillator model)

หลักการพื้นฐานของการกระตุ้นทางแสงของวัสดุสามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ ซึ่งมีค่าขึ้นกับค่าความถี่ของแสง พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญต่างๆ ของวัสดุจะปรากฏอยู่ในพจน์จำนวนจริง $\epsilon_1(\omega)$ หรือไม่ก็พจน์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ $\epsilon_2(\omega)$ โดยที่พจน์ $\epsilon_1(\omega)$ และพจน์ $\epsilon_2(\omega)$ ซึ่งจะสัมพันธ์กันดังปรากฏในทฤษฎีของเครเมอร์-โครนิค [(Kramer-Kronig (K-K theory))] ดังนี้คือ

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.83)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{-2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

โดยที่ P คือค่าส่วนหลัก (principal part) สำหรับในวัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่านโปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_t \quad (2.84)$$

เมื่อ ω_t คือ ความถี่ขีดเริ่ม และ $\epsilon_1 = n^2$ สำหรับความถี่ ω นี้จะกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งหมด จากสมการที่ (2.84) ค่าดัชนีหักเหสามารถหาได้จากการอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ถึงแม้ว่ากระบวนการคำนวณหาค่า $\epsilon_2(\omega)$ จะอยู่ในกรอบของทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียว (one electron band theory of solids) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลินโซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีแนวโน้มคลุมเคลือขึ้นกับรายละเอียดของการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายังวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิคเทิน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อนิยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap; E_g) ในขณะที่ เวมเพิล-โดโคเมนนิโค ใช้

ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดโพลีตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแสง เพื่อนิยามพารามิเตอร์ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (dispersion energy; E_d) พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์มากเนื่องจากสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายได้และใช้ได้กับสารประกอบจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสมการความสัมพันธ์เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือจะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกและความเป็นไอออนิกของผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะสมบัติของค่าดัชนีหักเหของวัสดุของแข็งต่างๆ

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา (time dependent perturbation theory) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดโพลีตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} \int_{\text{BZ}} d^3k \frac{f_{ij}^\alpha(\vec{k})}{(\omega_{ij}^2(\vec{k}) - \omega^2)} \quad (2.85)$$

ซึ่ง e และ m คือประจุและมวลของอิเล็กตรอน ทำการหาค่าผลรวม (summation) ครอบคลุมทุกแถบพลังงาน i และ j โดยที่ $i \neq j$ และทำการอินทิเกรตตลอดทั่วทั้งบริลลินโซน สำหรับ $f_{ij}^\alpha(\vec{k})$ คือความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงาน i และ j ในทิศทางโพลาไรซ์ค่า α จากสมการที่ (2.85) สามารถทำการประมาณได้สองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าทำการทดลองวัดได้จริง โดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดโพลีตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดโพลีตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสงเช่นในย่านที่มีความถี่ในช่วง $\omega < \omega_{ij}$

เพนน (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดโพลีตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้แบบจำลอง อิเล็กตรอนอิสระในแบบไอโซโทรอปิกที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ถ้าประมาณให้ $\hbar\omega_{ij} \approx E_g$ แล้วสมการที่ (2.85) จะกลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum_{i,j} \int_{\text{BZ}} d^3k f_{ij}^\alpha(\vec{k}) \quad (2.86)$$

และ

$$\sum_j \int_{\text{BZ}} d^3k = 4\pi n_v \quad (2.87)$$

เมื่อ n_v คือค่าความหนาแน่นยังผลของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ (effective density of valence electrons) แล้วสมการที่ 2.86 จะลดรูปได้เป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{(\hbar\omega_p)^2}{E_g^2} \quad (2.88)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\omega_p^2 = 4\pi n_v e^2 / m$ คือค่าความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่สูง ถ้ากำหนดให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีอย่างละหนึ่งแถบ (single group of valence and conduction band) แล้วสมการที่ (2.85) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi^2}{m\Omega} \sum_k \frac{f_{cv}^\alpha(\vec{k})}{\omega_{CV}^2(\vec{k}) - \omega^2} \tag{2.89}$$

เมื่อ Ω คือปริมาตรของผลึก ส่วน c และ v คือแถบนำและแถบวาเลนซ์ ถ้าประมาณว่าการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำในบริลลันโซนเกิดเป็นออสซิลเลเตอร์และอิเล็กตรอนวาเลนซ์หนึ่งตัวจะทำให้เกิดเป็นออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว ดังนั้นจะประมาณสมการที่ (2.89) ได้ว่าเป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_n \frac{f_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \tag{2.90}$$

เมื่อ f_n คือ ค่าความเข้มแรงแของออสซิลเลเตอร์ของไดโพลทางไฟฟ้าที่สังสรรค์กับการย้ายสถานะพลังงานที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n การหาผลรวม (summation) ให้ครอบคลุมทุกออสซิลเลเตอร์ที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n (โดยที่ $\omega < \omega_n$) สามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งส่วนแรกคือออสซิลเลเตอร์ตัวที่หนึ่งซึ่งมีค่า $f_1/(\omega_1^2 - \omega^2)$ และส่วนที่สองคือ

$$\sum_{n \neq 1} \left(\frac{f_n}{\omega_n^2} \right) \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)$$

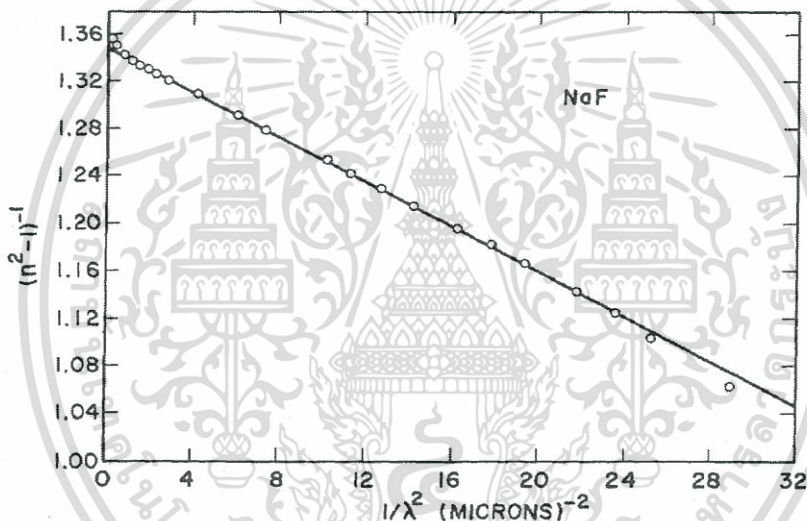
ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกันโดยที่ยังคงรักษาพจน์ ω^2 จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยวมีค่าดังนี้คือ

$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \tag{2.91}$$

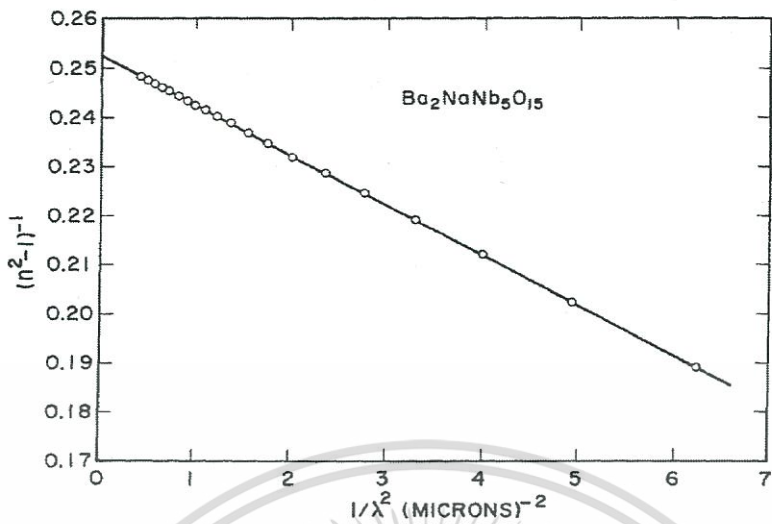
ซึ่งพารามิเตอร์ E_0 และ F จะสัมพันธ์กับ f_n และ ω_n ของสมการที่ (2.90) จากสมการที่ (2.91) จะทำให้สามารถประมาณหาค่าพารามิเตอร์สองตัวได้ที่พลังงาน $\hbar\omega < \hbar\omega_c$ สมการที่ (2.91) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องดีกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์ E_0 และ F ที่ได้จากผลการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆได้หรือไม่ แวมเพิล-ไดโอดเมนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนซ์ของสารประกอบที่มีไฮไลค์อีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $E_d = F/E_0$ ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.91) สามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) ดังนี้คือ

$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_0}{E_0^2 - (\hbar\omega)^2} \quad (2.92)$$

จากสมการที่ (2.92) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ω^2 แล้วจะได้ค่าความชันคือ $1/E_d E_0$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ E_0/E_d ตัวอย่างสมการที่ (2.92) ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF, $Ba_2NaNb_5O_{15}$ และ CdS จะแสดงดังรูป 2.22-2.14 ที่ความยาวคลื่นยาว (long wavelength) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของแลตทิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับกรณีที่มีความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ดังปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

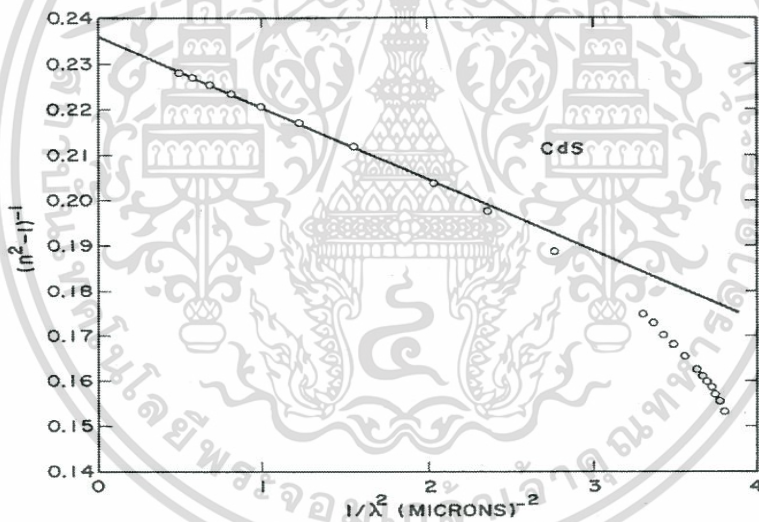


รูปที่ 2.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ

$Ba_2NaNb_5O_{15}$



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างค่าพารามิเตอร์ E_0 กับ E_d ของออสซิลเลเตอร์เดียวกับสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้จากสมการที่ (2.82) กับสมการที่ (2.83) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่ r ของค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสงดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_t}^{\infty} E^r \varepsilon_2(E) dE \quad (2.93)$$

เมื่อ $E \equiv \hbar\omega$ ส่วน E_t คือค่าพลังงานดุดกคลื่นแสงขีดเริ่ม ค่าพารามิเตอร์ E_0 และ E_d จะสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสงดังนี้คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.94)$$

และ
$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (2.95)$$

พลังงานออสซิลเลเตอร์ E_0 จะไม่ขึ้นกับ $\varepsilon_2(\omega)$ และ E_0 นี้คือค่าเฉลี่ยของค่าช่องว่างแถบพลังงานในขณะที่ E_d จะขึ้นอยู่กับ $\varepsilon_2(\omega)$ และ E_d จะทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ เนื่องจากโมเมนต์ที่ M_{-1} กับ โมเมนต์ที่ M_{-3} จะเกี่ยวข้องกับ E_0 และ E_d การให้น้ำหนักแก่ค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง $\varepsilon_2(\omega)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าใกล้ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.96) และ (2.97) กับสมการที่มีปริมาณ $\hbar\omega_p$ และ E_g ของแบบจำลองฟิลิปส์แล้วพบว่า

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (2.96)$$

และ
$$E_g^2 = \frac{M_1}{M_{-1}} \quad (2.97)$$

ดังนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิลิปส์ (E_g) คืออัตราส่วนของโมเมนต์ที่ M_1 ต่อโมเมนต์ M_{-1} (ตั้งสมการที่ (2.97)) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา M_1 แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้ M_{-1}^3/M_{-3} เพื่ออธิบายความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์และโฮปฟิลด์ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ E_a โดยนิยามว่า

$$E_a^2 = M_3/M_1 \quad (2.98)$$

และแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงาน E_a นี้ จะสัมพันธ์กับค่าอินทิกรัลของผลคูณระหว่างค่าลาปลาเซียนของศักย์ไฟฟ้าของผลึกกับความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่า E_0 , E_g

และ E_a จะแสดงความสมมาตรได้อย่างชัดเจนดังสมการที่ (2.94), (2.97), (2.98) และยังแสดงให้เห็นว่า

$$E_t < E_0 < E_g < E_a \quad (2.99)$$

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในวัสดุตัวกลาง (media) อิเล็กตรอนที่อยู่รอบอะตอมจะโผลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนแกนกลาง (ion core) โดยประมาณว่าทุกๆ อะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลเตอร์ชนิดเดียวกันที่เพียงพอจากแบบจำลองของเวมเพิลและโดเมนนิโค (Wemple - Di-Domenico) ในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องแถบพลังงาน ฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหจะแสดงดังสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (hv)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} \frac{1}{E_0 E_d - (hv)^2} \quad (2.100)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.100) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (2.101)$$

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.102)$$

จากสมการที่ (2.102) และ (2.103) สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (2.103)$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

N_c = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

Z_a = ค่าวาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_e = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8 และ $f = E_0 E_d$ คือค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่ r ของสเปกตรัมทางแสง (r^{th} moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ $E_0 E_d$ ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.104)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (2.105)$$

เมื่อ M_{-1} และ M_{-3} คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมนต์ลำดับที่ M_{-1} และ M_{-3} ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (2.106)$$

เมื่อ $n^* = n - ik$ (2.107)

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง
 k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.108)$$

โดยที่ $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ (2.109)

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.110)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้ คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

เมื่อ $\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0$ (2.111)

และ $\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0$ (2.112)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (dielectric spectroscopy)

2.9.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model)

อิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กทริกจะยึดเหนี่ยวด้วยแรงคูลอมบ์อยู่กับไอออนคอร์ (ion core) ของแลตทิซ (lattice) เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะกวัดแกว่ง (oscillate) รอบตำแหน่งสมดุลในแบบฮาร์โมนิก ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัมจะหมายถึงอิเล็กตรอนมีการทรานซิชันจากระดับพลังงานค่าหนึ่งไปยังระดับพลังงานอีกค่าหนึ่ง ในกลศาสตร์แผนเดิมจะประมาณว่าออสซิลเลเตอร์เป็นแบบหน่วง (damped oscillator) ซึ่งแรงหน่วงนี้เกิดจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ เป็นต้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตรอนจะมาจากแรงคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แรงคืนตัวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนคอร์ และแรงหน่วงเนื่องจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ จากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$\sum F = mx'' = -\beta x' - k_s x - eE_x \quad (2.113)$$

สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ

$$E_x = E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.114)$$

แทนสมการที่ (2.113) ลงในสมการที่ (2.114) จะได้

$$x'' + \gamma x' + \omega_0^2 x = \frac{-e}{m} E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.115)$$

เมื่อ $\beta = \gamma m$ โดยที่ γ คือแฟกเตอร์การหน่วง (damping factor)

k_s คือค่า n ของสปริง

เมื่อ $k_s = \omega_0^2 m$ โดยที่ ω_0 คือความถี่กำหนดของตัวออสซิลเลเตอร์

m คือมวลของอิเล็กตรอน

สมการคำตอบของค่าการกระจัดของออสซิลเลเตอร์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$x(t) = A \exp(-i\omega t) \quad (2.116)$$

แทนสมการที่ (2.116) ลงในสมการที่ (2.115) จะได้ว่า

$$A = \frac{-eE_0}{m} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right) \quad (2.117)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.116) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$x(t) = \left[\frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \right] \exp(-i\omega t) \quad (2.118)$$

ไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัว เรียกว่า ค่าโพลาริเซชันของออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว จะมีค่าดังนี้คือ

$$P = -ex = \frac{e^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.119)$$

ค่าโพลาริเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีค่า

$$P = Nex = \frac{Ne^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} = \left[\frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right] \epsilon_0 E \quad (2.120)$$

เมื่อ $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} = \text{ความถี่พลาสมา}$ (2.121)

และ N คือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือคือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่าโพลาริเซชัน ยังสัมพันธ์กับ ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.122)$$

จากสมการที่ (2.120) และ (2.122) จะได้ว่า

$$\chi = \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.123)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ^*) จะสัมพันธ์กับค่า χ ดังนี้

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.124)$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (2.125)$$

$$\varepsilon' = \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \quad (2.126)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega_p^2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \quad (2.127)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าดัชนีหักเห (n^*) จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^*} = n + ik \quad (2.128)$$

โดยที่ $n^2 - k^2 = \varepsilon'$ (2.129)

$$2nk = \varepsilon'' \quad (2.130)$$

เมื่อ n และ k คือ ค่าดัชนีหักเห และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวกลาง สำหรับในกลศาสตร์แผนเดิม ω_0 คือ ค่าความถี่ก่าทอนของออสซิลเลเตอร์ที่กวัดแกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหนึ่งตัวแต่สำหรับกลศาสตร์ควอนตัม ω_0 จะสอดคล้องกับผลต่างของระดับพลังงานตอนสุดท้ายกับระดับพลังงานตอนต้น สำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว (multiple oscillator) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \chi$ ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon^* = 1 + \omega_p^2 \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.131)$$

เมื่อ f_j คือ ค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) ซึ่งหมายถึงอิเล็กตรอน f_j ตัวที่มีความถี่ ω_j และ แฟกเตอร์การหน่วง γ_j ในแต่ละโมเลกุลและจะสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งโมเลกุล (z) ดังนี้ คือ

$$\sum_j f_j = z \quad (2.132)$$

นิยมเรียกสมการที่ (2.131) ว่าเป็นสมการของแบบจำลองลอเรนตซ์ (Lorentz model) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.131) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon^* = 1 + \frac{Nq^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.133)$$

โดยทั่วไปแล้วในส่วนที่เป็นจินตภาพ $i\omega\gamma_j$ จะไม่มีความสำคัญมากนัก แต่ทว่าในกรณีที่ ω มีค่าเข้าใกล้ ค่าความถี่ ω_0 ในส่วนจินตภาพจะกลับมามีผลอย่างมาก ดังที่จะแสดงต่อไปนี้

กรณีที่เป็นตัวกลางดิสเพอร์ชัน (dispersion medium) สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ใดๆคือ

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\varepsilon} \mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (2.134)$$

จะได้สมการของคลื่นระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$\tilde{\mathbf{E}}(z, t) = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{i(\tilde{k}z - \omega t)} \quad (2.135)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าเลขคลื่น (\tilde{k}) คือ

$$\tilde{k} \equiv \sqrt{\tilde{\varepsilon} \mu_0} \omega \quad (2.136)$$

เมื่อเขียน \tilde{k} อยู่ในพจน์ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

$$\tilde{k} = k + ik \quad (2.137)$$

จากสมการที่ (2.135) กลายเป็น

$$\tilde{\mathbf{E}}(z, t) = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{-kz} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.138)$$

จะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกลดทอนลง เนื่องจากความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนกับ E^2 (และความเข้มจะสัมพันธ์กับ e^{-2kz}) และนิยามได้ว่า

$$\alpha = 2k \quad (2.139)$$

สมการที่ (2.139) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ω/k และค่าดัชนีหักเหของตัวกลางคือ

$$n = \frac{ck}{\omega} \quad (2.140)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นแก๊สแล้ว พจน์ที่สองของสมการที่ (2.134) จะมีค่าน้อย และสามารถประมาณค่ารากที่สองในสมการที่ (2.137) โดยใช้พจน์แรกของการกระจายแบบไบโนเมียล $\sqrt{1+\varepsilon} \cong 1 + \frac{1}{2}\varepsilon$ จะได้ว่า

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r} \cong \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega_j} \right] \quad (2.141)$$

$$n = \frac{ck}{\omega} \cong \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j(\omega_{0j}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_j\omega^2}$$

ถ้าพิจารณาในช่วงความถี่ที่ต่างจากความถี่กำทอน แล้วการหน่วงสามารถตัดทิ้งได้และสูตรในการหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \quad (2.142)$$

วัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีความถี่ธรรมชาติ ω_j แต่สำหรับวัสดุที่โปร่งแสงแล้วค่าความถี่กำทอนจะอยู่ในย่านความถี่ของคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้น $\omega < \omega_j$ แล้วจะได้

$$\frac{1}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} = \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2} \right)^{-1} \cong \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2} \right)$$

และจากสมการที่ (2.141) เปลี่ยนรูปเป็น

$$n = 1 + \left(\frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2} \right) + \omega^2 \left(\frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^4} \right) \quad (2.143)$$

หรือในพจน์ของความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ หรือในอากาศ $\lambda = 2\pi c/\omega$

$$n = 1 + A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2} \right) \quad (2.144)$$

จากสมการที่ (2.144) เป็นที่รู้จักในนามของ สมการคอสซี (Cauchy's formula) ค่าคงที่ A คือค่าสัมประสิทธิ์ของการหักเห และ B คือค่าสัมประสิทธิ์ของดิสเพอร์ชัน สมการคอสซีใช้ได้กับตัวกลางที่เป็นแก๊สที่อยู่ในย่านความถี่ของคลื่นแสงที่ตามองเห็น (optical region)

2.10 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) (งามนิตย์, 2545; รุติณัย, 2549; รุติณัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รุติณัย, 2551)

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

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 ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

2.11 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) (งามนิตย์, 2545; รุติณัย, 2549; รุติณัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รุติณัย, 2551)

การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometers) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของสาร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงจากการหมุนในพันธะของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้รับพลังงานเข้าไป โดยพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะเกิดการสั่นและการหมุนของโมเลกุล การกระเจิงของรามานนั้นเกิดขึ้นจากการที่โมเลกุล ใต้นับพลังงานเข้าไปแล้วถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นแล้วคายพลังงานมาในรูปของ โฟตอน ซึ่งการคายพลังงานออกมานี้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากระดับพลังงานเดิม การกระเจิงของรามาน (Raman scattering) เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสง โมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีการกระเจิงส่วนน้อยอีก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ ทั้งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลว แต่ไม่สามารถทดสอบได้กับสารที่มีปริมาณในระดับ ppm ได้

2.12 หลักการสเปกโตรริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

ดีซีแมกนีตรอนสเปกโตรริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัย พื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสเปกโตรริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่ง สำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสเปกโตรริง และหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสเปกโตรริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้อง กับงานวิจัยนี้

2.12.1 โกลว์ดีสชาร์จ

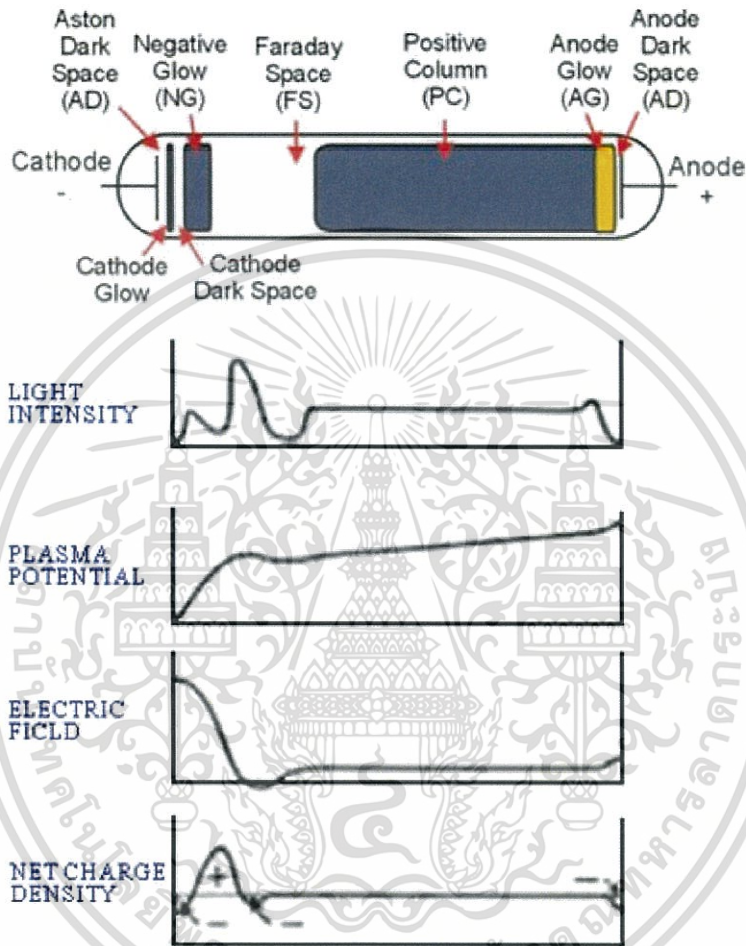
สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทาง ไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดย อะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็น ไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือพลังงานการแตก ตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซี แมกนีตรอนสเปกโตรริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจาก ผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุด ออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการ แลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอนและทำ ให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วย อิเล็กตรอนโดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน ของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.144)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิสชาร์จ คือ การเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ดิสชาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้ โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของการโกลว์ดิสชาร์จ

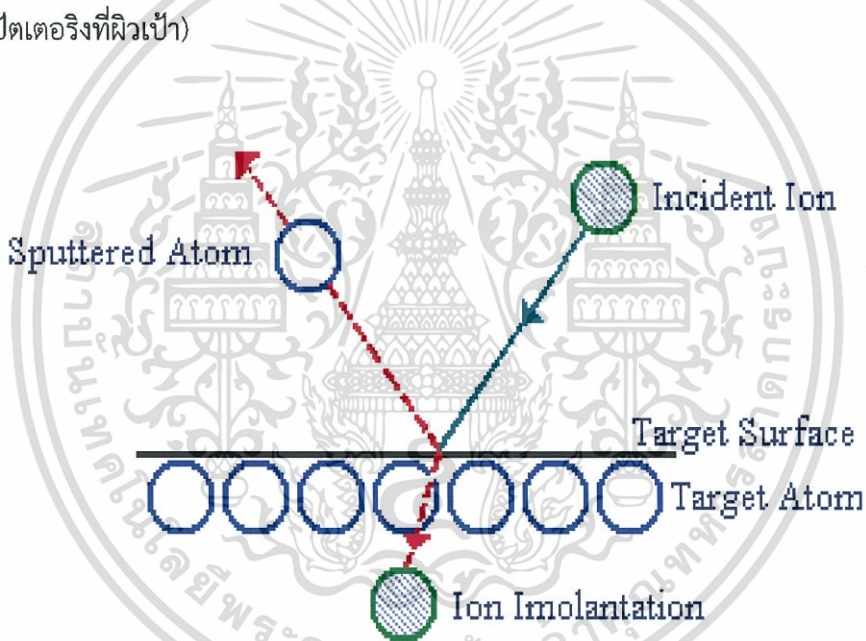
สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกความคุมไปจนถึงซีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งซีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของซีทจะผลักริเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนจะมีจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้เจ้าของเอกสารทราบทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากข้อผิดพลาดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายอย่างของโกลด์ดิสชาร์จและให้เห็นในรูปที่ 2.25 (การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า) การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างข้อผิดพลาดที่ทรนกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลด์ดิสชาร์จสามารถรักษาได้ก็จะมีปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมีไอในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.12.2 สปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วยเนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในรูปที่ 2.26 (การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า)



รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า

2.12.2.1 ยี่ลต์การสปัตเตอร์ริง (sputtering yields)

ยี่ลต์การสปัตเตอร์ริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.134 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่หลุดตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ริง

$$\text{ยี่ลต์ของการสปัตเตอร์ริง} = \frac{\text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า}}{\text{ไอออนที่ชนเป้า}} \quad (2.155)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสputtering แสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าในตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่า yield ของการสputtering ของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสputtering (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม yield ของการสputtering จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่า yield ของธาตุชนิดต่างๆ

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

2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริง จะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนด วางอยู่ในระบบสุญญากาศ ภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโกล์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว้ออิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.26 แสดงการสปีดเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปีดเตอริง เกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาหลังจากการชนของของไอออนบวกผิวเป่าดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมายมากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปีดเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = BqV \quad (2.156)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.157)$$

โดย

F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

จะได้ว่า

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

$$qV_{\perp} B = \frac{mV_{\perp}^2}{r} \quad (2.158)$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mV_{\perp} / Bq \quad (2.159)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (Lamor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากแม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อย และจาก $V = \omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.160)$$

และ เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

และ สนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

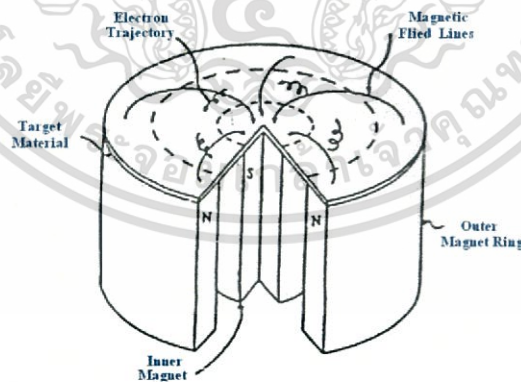
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.161)$$

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

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและ มีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉาก ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในรูปที่ 2.28 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและกระบวนการแตกตัวไปเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีซีดีโอตสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในหลายงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.27 แสดงการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน และจากความเร็ว V ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2} mV^2 = |q|V \quad (2.162)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|qV|}{m}} \quad (2.163)$$

แทนค่า (2.102) ลงใน (2.98)

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{|q|}} \quad (2.164)$$

โดยจะได้ รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

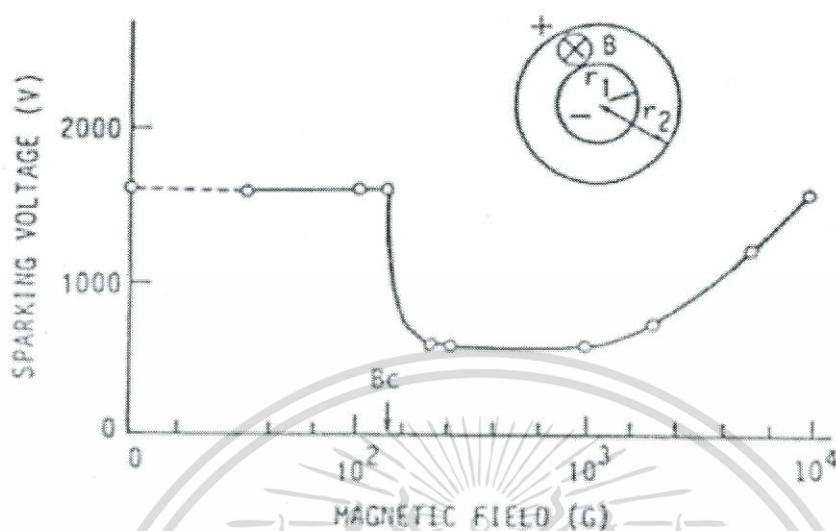
$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.165)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสซาร์จซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสซาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.106

$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \quad (2.166)$$

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
 L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.12.2.4. สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



รูปที่ 2.28 แสดงความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในข้อวิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.29 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดในข้อวิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณข้อคาโทดจะไปถึงข้อแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมระหว่างข้อวิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างข้อวิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (จูตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปัตเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.13.1. วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

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

2.13.2 การให้ความเย็นที่เป่า

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

2.13.3. การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป่า

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

ระยะห่างระหว่างเป้ากับกรวดซ์ิลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบและภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมีดจะลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ์ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.147

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_e) แสดงโดย

$$P_e/P \cong [1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \quad (2.167)$$

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

โดย จะได้ว่า $\omega = eB/m$ และ $\tau = \lambda_0 / P[2(e/m)V_0]^{1/2}$
 $\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} PV_0^{1/2} \quad (2.168)$

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

และความหนาของบริเวณมีด จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมีดกับความต่างศักย์ของการดิวชาร์จ์ขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมีดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์มีความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.169

$$d = cV^{-m} \quad (2.169)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของบริเวณมีด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไฮลด์ ซึ่งอยู่ใน
ความสัมพันธ์

$$I \propto \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (2.170)$$

เมื่อการหาขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมีดถูกแทนลงในสมการ (2.168) จะได้
ความสัมพันธ์

$$I \propto k^n \quad (2.171)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์
 n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดย
สนามแม่เหล็ก

2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตรอริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมา
ที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่
เคลือบโดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้น
แรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมี
ชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือ แมกนีตรอนแบบสามัญ
(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 โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำให้ทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิว

เป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิซชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้าและจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า นั้น พิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้ จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำเป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอกในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับจึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยวินโดวส์และซาว์โดและกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมามีที่

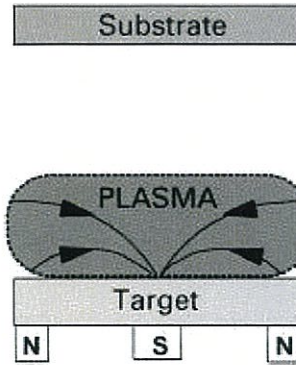
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้าและอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คือ อัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ต่ออัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้นและการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเครียดที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเครียดภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปัดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่ยอมรับใช้ เพราะการใช้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



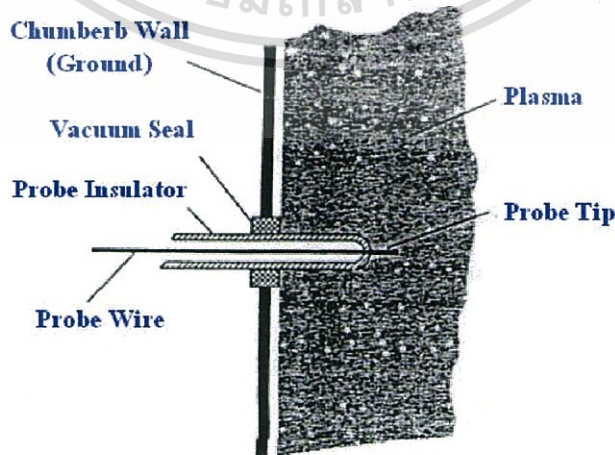
รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา

2.14.1. หัววัดลางมัวร์

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

ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินการโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัวที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในรูปที่ 2.33 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาสำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (saw tooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบผนังของภาชนะสุญญากาศ

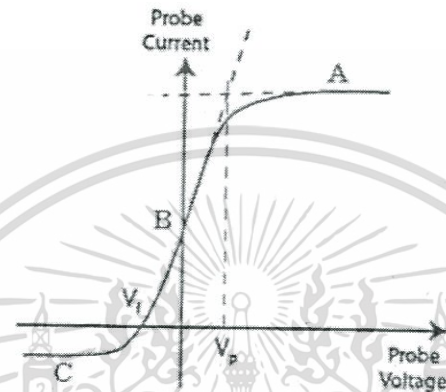


รูปที่ 2.32 แสดงหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2. ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยวกลางมั้ววิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 แสดงแผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาชิต อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} e A n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.172)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัว (I_{ce})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_c = e A n_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.173)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอง (V_p) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

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

$$I_i = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.174)$$

2.14.2.1 อุดหนุนอิเล็กตรอน (T_e)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.170) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (2.175)$$

หรือจะหาค่า จากการรวมสมการที่ (2.171) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.172) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

$$I = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} eAn_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.176)$$

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

$$I = \frac{1}{2} eAn \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.177)$$

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I=0$)

$$I = 0 = \frac{1}{2} eAn \left(\frac{kT}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{e(V_f - V_p)}{kT_c} \right) \right] \quad (2.178)$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_c}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)} \quad (2.179)$$

หน่วยของ kT_c/e คือโวลต์ ดังนั้นสามารถหา kT_c ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

2.14.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา

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

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6 Ae} \left(\frac{m_i}{kT_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.180)$$

โดย

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

2.14.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

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

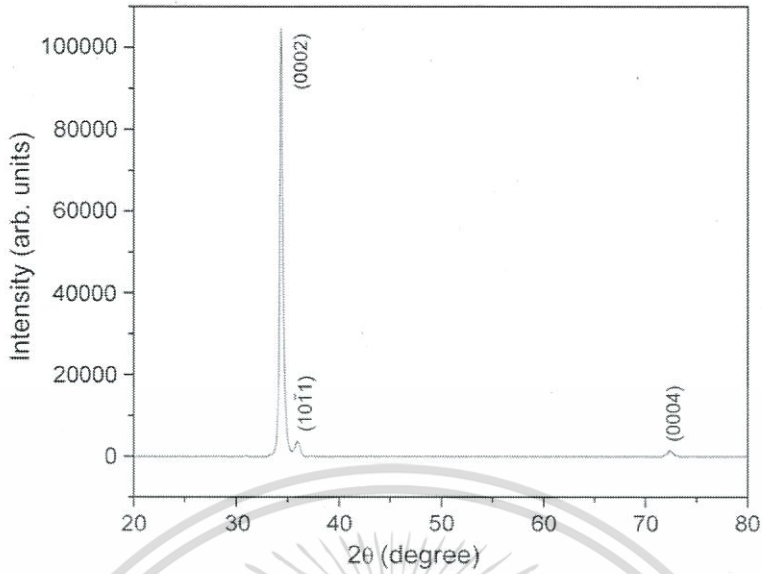
เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะฉะนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป $r_{Lj} > a$ กระแสไอออนอิมิตัวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมิตัว ที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัวที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิมิตัวจะได้รับผลกระทบน้อยมาก

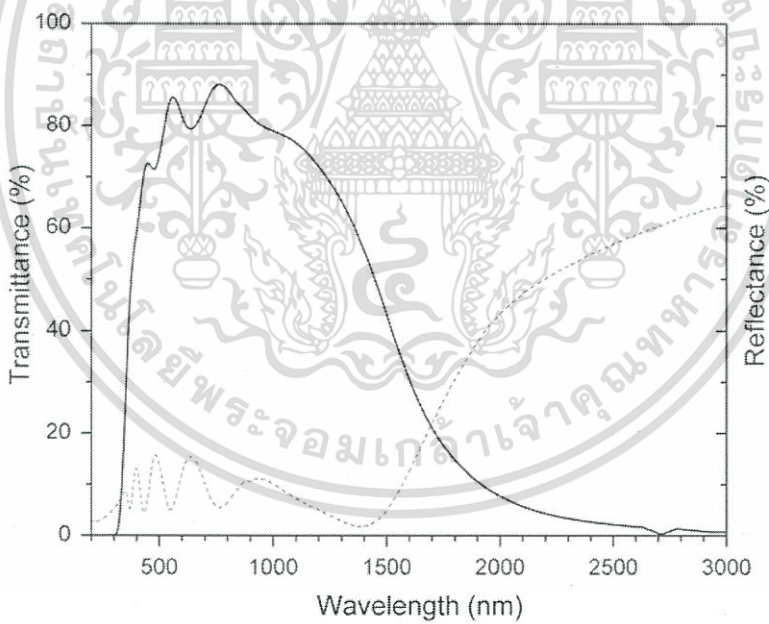
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Singh, 2014)

2.15.1 फिल्मบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ZnO ที่เจือด้วยอะตอม Ga ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของสารประกอบ ZnO เจือด้วย Ga โดยวิธีอาร์ เอฟ รีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากเป้าที่เป็นโลหะ Zn ร่วมกับเป้า GaAs ภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสม O_2+Ar ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยที่ความเข้มข้นของสารเจือจาก GaAs เท่ากับ 1% ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่สูงกว่า 80% และสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในระดับ 9×10^{-6} โอห์ม.เมตร เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับอยู่ในช่วง 350-400 องศาเซลเซียส และก๊าซออกซิเจนอยู่ในระดับ 3-4% อีกทั้งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในระดับ 7×10^{26} ต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสภาพคล่องของฮอลล์ประมาณ 10^{-3} เมตร².(โวลต์.วินาที)⁻¹ จากความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่มีค่าสูงส่งผลให้เกิดพลาสมาเรโซแนนซ์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1400 นาโนเมตร ซึ่งแสดงสมบัติการสะท้อนแสงอินฟราเรดที่ดี และมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์

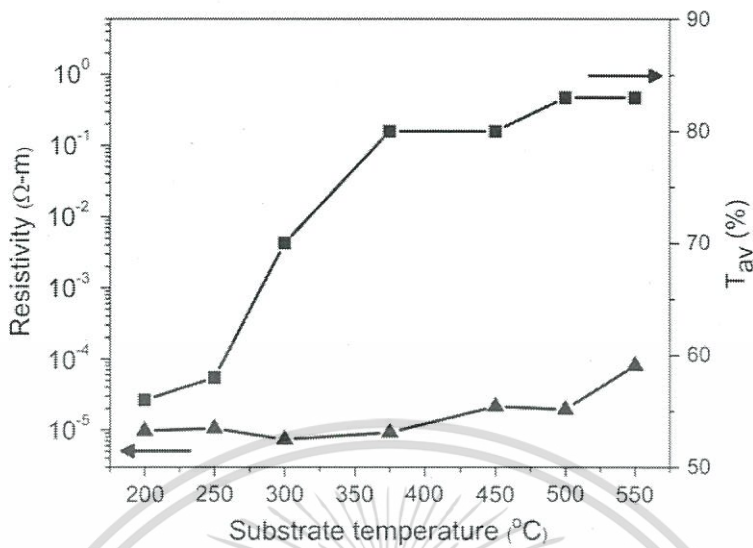


รูปที่ 2.34 แสดง XRD ของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และเจือด้วย GaAs จำนวน 1% และอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%

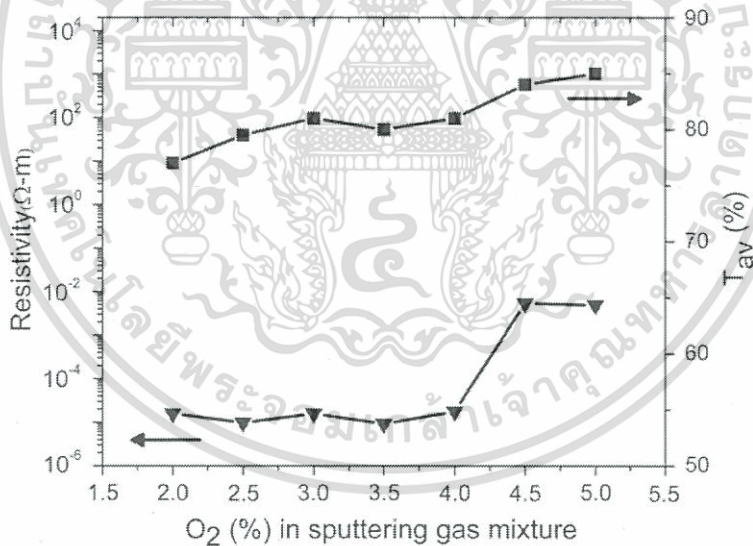


รูปที่ 2.35 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและสเปกตรัมสะท้อนแสงของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสเจือด้วย GaAs 1% และอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%

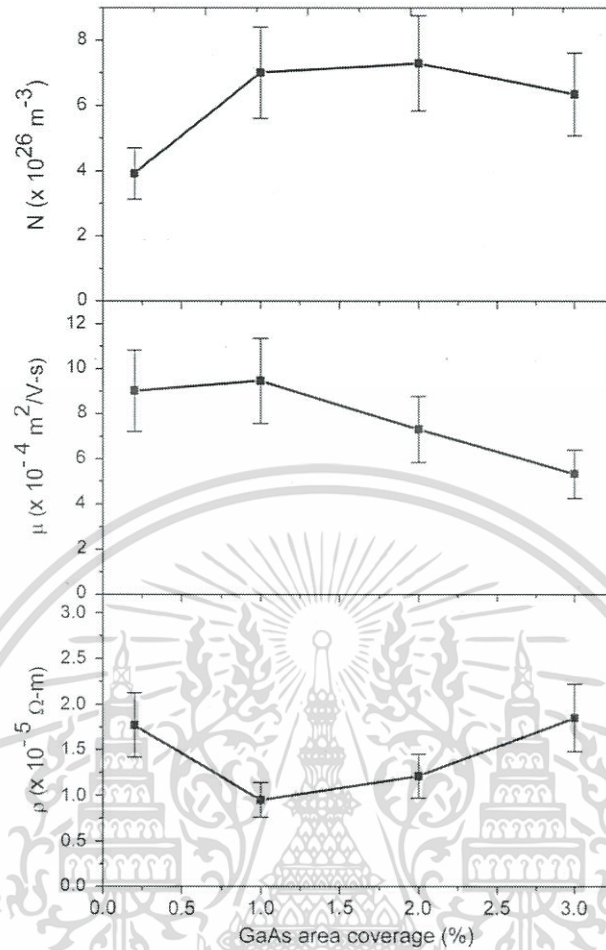
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



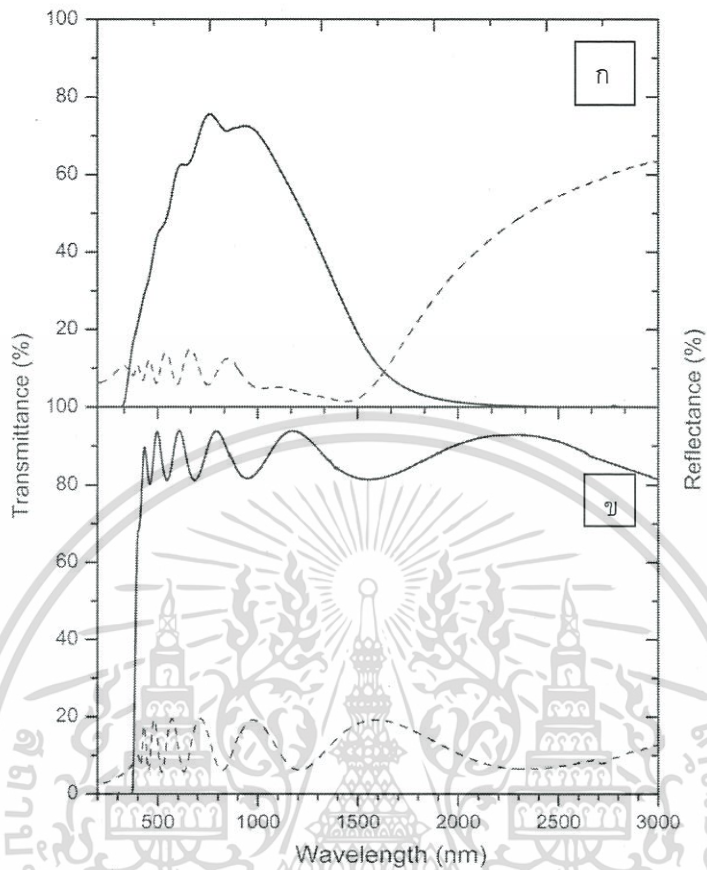
รูปที่ 2.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า และการส่งผ่านแสงย่านตามองเห็นได้กับอุณหภูมิแผ่นรองรับของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เจือด้วย GaAs 1% และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%



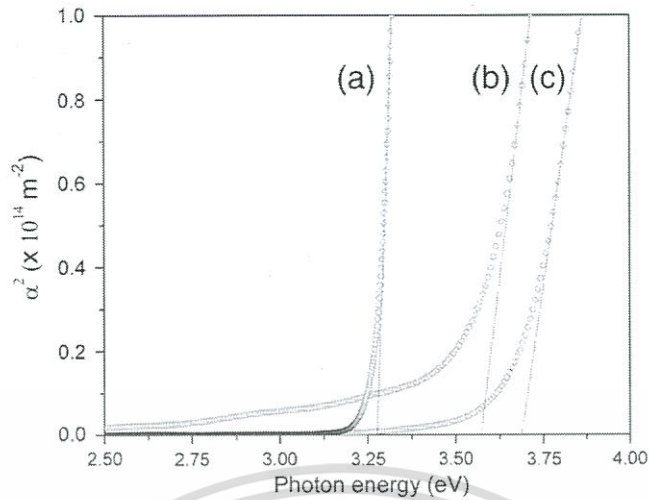
รูปที่ 2.37 แสดงการเปลี่ยนของสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงย่านตามองเห็นได้ที่ขึ้นกับปริมาณของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มบาง ZnO:Ga ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และเจือด้วย GaAs 1%



รูปที่ 2.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน สภาพคล่องฮอลล์และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:Ga ที่ขึ้นกับพื้นที่ของ GaAs ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%



รูปที่ 2.39 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านและสเปกตรัมสะท้อนแสงของฟิล์มบาง ZnO:Ga
 ก. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%
 ข. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5%



รูปที่ 2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO:Ga ที่มีพื้นที่ของ GaAs

เท่ากับ 1%

ก. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5%

ข. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%

ค. ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.5%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ และศึกษาสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

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

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยวิธีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

- กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
- อะซีโตน (CH_3COOH)
- สำลีสําหรับการเช็ดทำความสะอาด
- เป้าซิงค์ (Zn)
- เครื่องสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้



รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ oxford รุ่น FESEM-EDS (7610F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก เชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100

3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

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

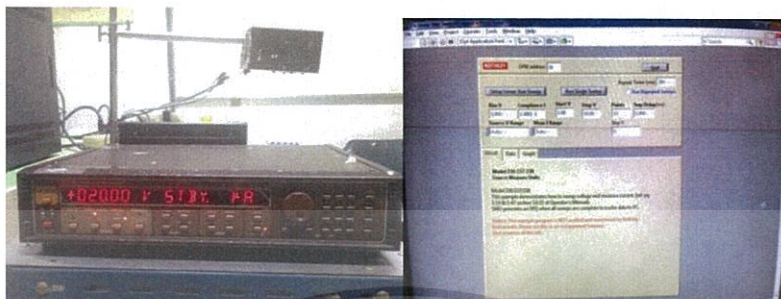


รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น ($\text{He } \lambda \text{ ios } \alpha$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

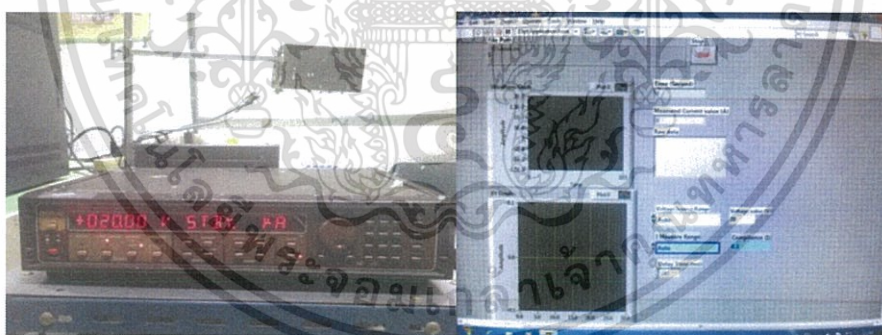
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง

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



รูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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

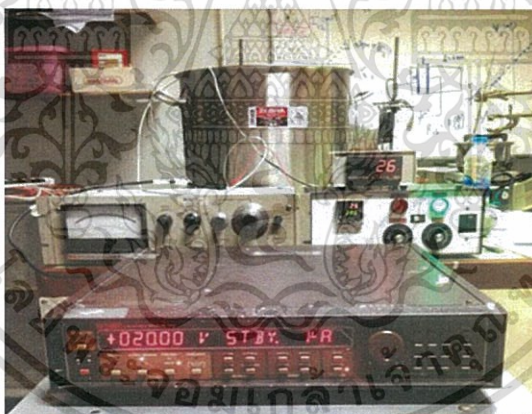
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

3.1.3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำ

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



รูปที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

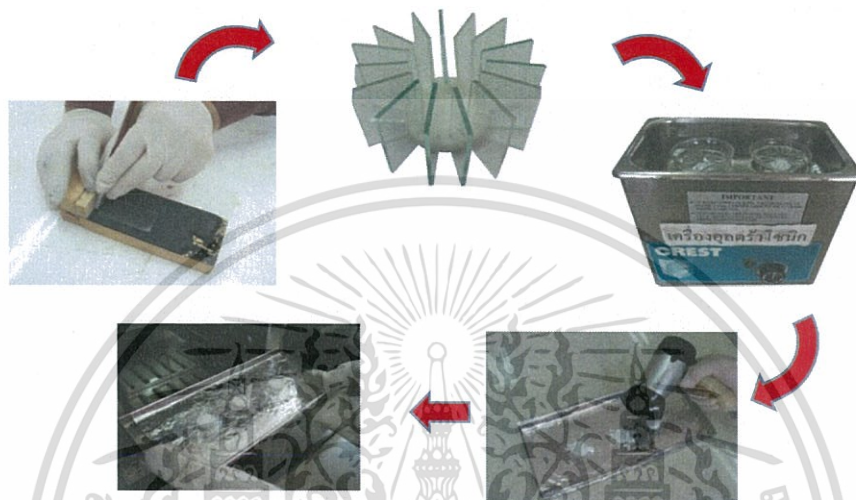
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ ซิงค์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง (งานนิത്യ, 2543; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปilotประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้ง
เป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

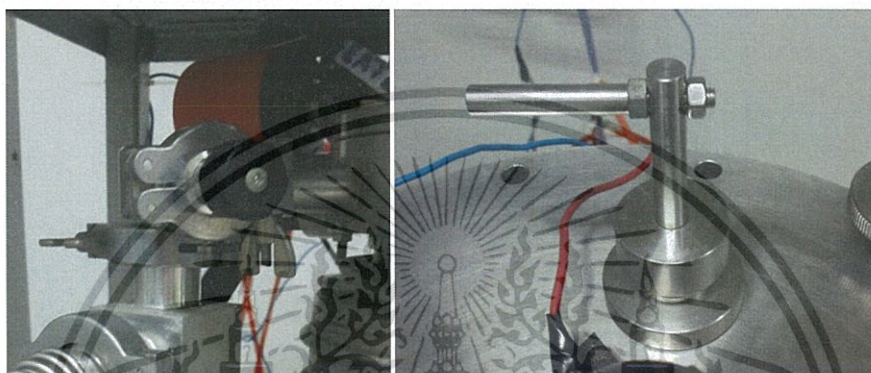
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปั้มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชีลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างขั้วเตอร์และกราวด์ชีลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึดวางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



(ก.)

(ข.)

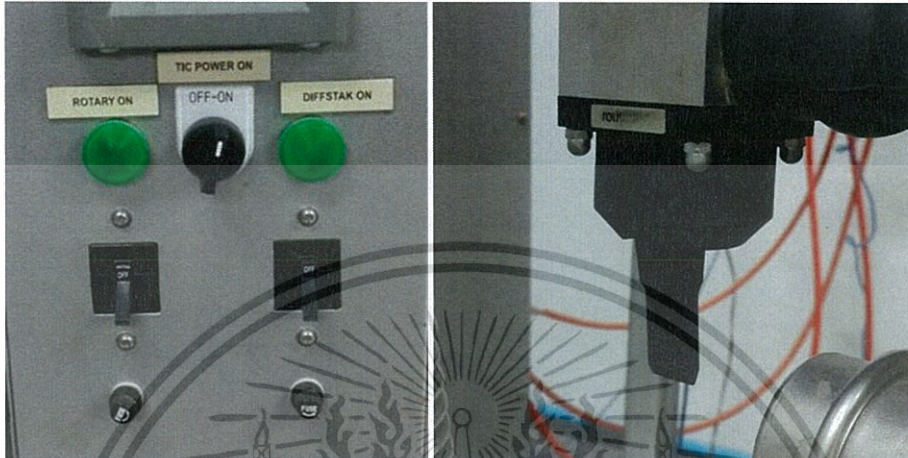
รูปที่ 3.10 (ก) แสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า

(ข) แสดงคันบังคับขั้วเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

8. ปิดขั้วเตอร์ (คันบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.11 (ก.) แสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)
(ข.) แสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

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



(ก.)

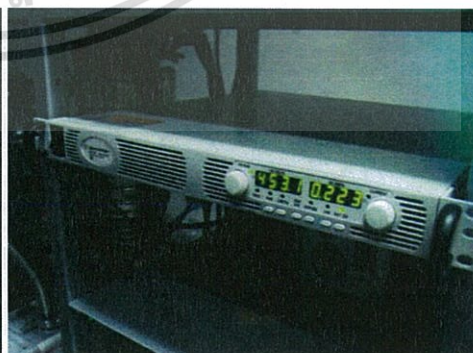
(ข.)

รูปที่ 3.12 (ก.) แสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open
(ข.) แสดง speedy valve

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พีรานิเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิงเกจ (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) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 1)
 - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 2)
 - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในไม่เกิน 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยก วาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 3)
- เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.13 (ก) แสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

(ข) แสดง power supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-5} ทอร์
18. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม out on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.14 (ก) แสดงสวิตช์ของ power supply

(ข) แสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

20. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ จาจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมาไม่สภาวะยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผมให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมา มีพลังงานและสภาวะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก



ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

รูปที่ 3.15 แสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์ว เรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดีวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7 และ 9 sccm
22. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยี่ลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกบนอกฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.16 (ก) แสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด
(ข) แสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

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



รูปที่ 3.17 แสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

แรงดันไฟฟ้า : 300 โวลต์

กระแส : 0.312 แอมป์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ : 5×10^{-3} ทอร์

ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 90 นาที

24. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชุดเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสีเขียวเล็กๆทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิทช์สีดำ
25. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
26. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าตัว)
27. โยกสวิทช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
28. ปิดสวิทช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
29. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิทช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกทั้งหมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะดึงออกมาเอง
30. เปิดฝาหน้าออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ(ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตอกซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ ศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางแสงและศึกษาสมบัติทางแสงไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงออกไซด์ด้วย

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดิสชาร์จ

ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มซิงออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป้าซิงค์ความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตรที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 360 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไอปฏิกิริยา ปัมสุญญากาศประกอบไปด้วยปั๊มแพรอเนอมน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 9 เซนติเมตร ความดันพื้นฐานเท่ากับ 3.0×10^{-5} ทอร์ เริ่มทำการทดลองโดยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันของห้องสุญญากาศที่อ่านได้จากเกจพิรานี (Pirani gauge) ในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวบน อ่านได้เท่ากับ 2.3×10^{-1} ทอร์ ส่วนความดันที่อ่านได้จากเกจเพนนิ่ง (Penning gauge) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวล่าง อ่านได้เท่ากับ 3.0×10^{-3} ทอร์ ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึง 280 โวลต์ การโกลดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสชาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทลายทาวนเซนด์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 330 โวลต์ เพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางซิงออกไซด์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโคจรดิสซาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 330 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 10 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 3.0×10^{-1} และ 7.6×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ

เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงไปอีก พบว่าลำพลาสมาจะเร็วเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จเพื่อให้ลำพลาสมาพุ่งโตขึ้นและการโคจรดิสซาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสซาร์จต่อไปอีก สีของการโคจรดิสซาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโคจรดิสซาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ลำพลาสมาจะโตขึ้นและยืดออกมากขึ้น) กระแสดิสซาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโคจรดิสซาร์จที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน

สปีดเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
10.0	1.0	2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.239	78.87	15
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.235	77.55	30
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.246	81.18	45
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.248	81.84	60
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.249	82.17	75
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	330.0	0.249	82.17	90
10.0	3.0	2.1×10^{-1} 3.3×10^{-4}	330.0	0.265	87.45	15
		2.0×10^{-1} 2.4×10^{-4}	330.0	0.246	81.18	30
		2.0×10^{-1} 2.5×10^{-4}	330.0	0.248	81.84	45
		2.0×10^{-1} 2.4×10^{-4}	330.0	0.243	80.19	60
		2.0×10^{-1} 2.3×10^{-4}	330.0	0.240	79.20	75
		2.0×10^{-1} 2.3×10^{-4}	330.0	0.241	79.53	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน
สปีดเตอริง(ต่อ)

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
10.0	5.0	2.3×10^{-1} 2.5×10^{-4}	350.0	0.131	45.85	15
		2.3×10^{-1} 2.3×10^{-4}	350.0	0.127	44.45	30
		2.2×10^{-1} 2.0×10^{-4}	350.0	0.133	46.55	45
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	350.0	0.133	46.55	60
		2.2×10^{-1} 1.6×10^{-4}	350.0	0.131	45.85	75
		2.5×10^{-1} 1.0×10^{-4}	350.0	0.130	45.50	90
10.0	7.0	2.4×10^{-1} 2.4×10^{-4}	330.0	0.154	50.82	15
		2.3×10^{-1} 1.8×10^{-4}	330.0	0.152	50.16	30
		2.3×10^{-1} 2.5×10^{-4}	330.0	0.145	47.85	45
		2.3×10^{-1} 2.4×10^{-4}	330.0	0.147	48.51	60
		2.0×10^{-1} 2.3×10^{-4}	330.0	0.240	79.20	75
		2.0×10^{-1} 2.3×10^{-4}	330.0	0.241	79.53	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน

สปีดเตอริง(ต่อ)

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
10.0	9.0	2.5×10^{-1} 2.1×10^{-4}	350.0	0.290	101.50	15
		2.5×10^{-1} 1.5×10^{-4}	350.0	0.285	99.75	30
		2.5×10^{-1} 1.3×10^{-4}	350.0	0.277	96.95	45
		2.5×10^{-1} 1.3×10^{-4}	350.0	0.275	96.25	60
		2.4×10^{-1} 1.4×10^{-4}	350.0	0.273	95.55	75
		2.4×10^{-1} 1.3×10^{-4}	350.0	0.262	91.70	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง

การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง ให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆให้กับขั้วคาโทดจนกระทั่งถึง 280 โวลต์ สภาพโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จขึ้น จนได้ความดันความดันที่อ่านโดยเกจพิรามิ 4.0×10^{-2} - 6.0×10^{-2} ทอร์ ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงจะแสดงตามตารางที่ 4.2 และสภาพโกลวดิสชาร์จที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆจะแสดงตามรูปที่ 4.3



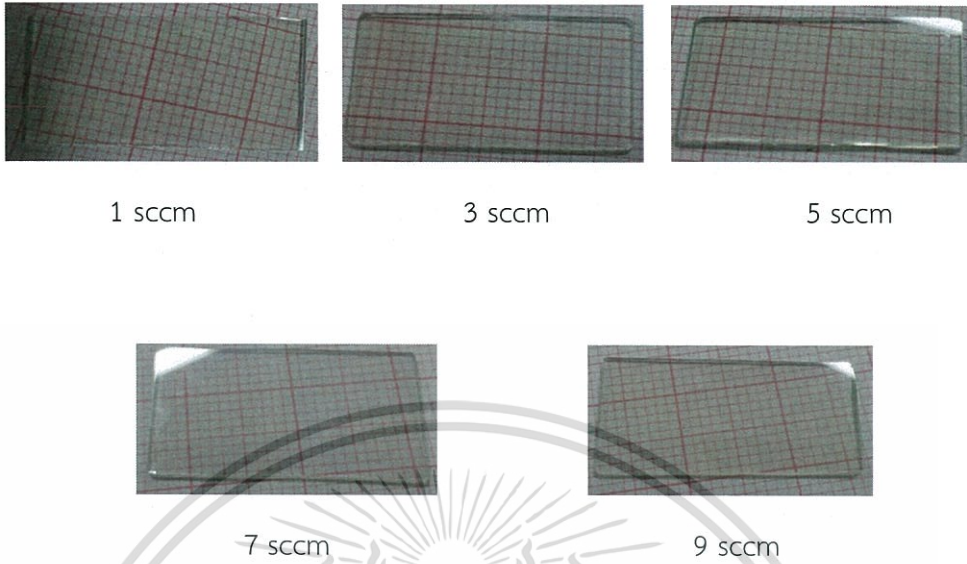
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Sputtering Conditions					Film Characteristics
	Argon flow rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	
1	10	บน= 2.5×10^{-1} ล่าง= 1.0×10^{-4}	330.0	0.235	77.55	ฟิล์มสีใส
3	10	บน= 2.0×10^{-1} ล่าง= 2.5×10^{-4}	330.0	0.248	81.84	ฟิล์มสีใส
5	10	บน= 2.2×10^{-1} ล่าง= 2.0×10^{-4}	350.0	0.133	46.55	ฟิล์มสีใส
7	10	บน= 2.3×10^{-1} ล่าง= 2.5×10^{-4}	330.0	0.145	47.85	ฟิล์มสีใส
9	10	บน= 2.5×10^{-1} ล่าง= 1.3×10^{-4}	350.0	0.277	96.95	ฟิล์มสีใส

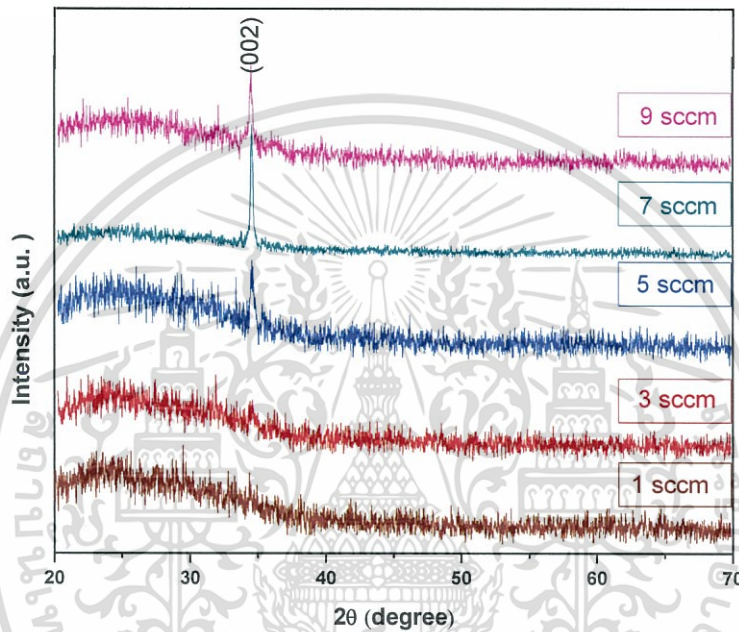
ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่แผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7, และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7, และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริง

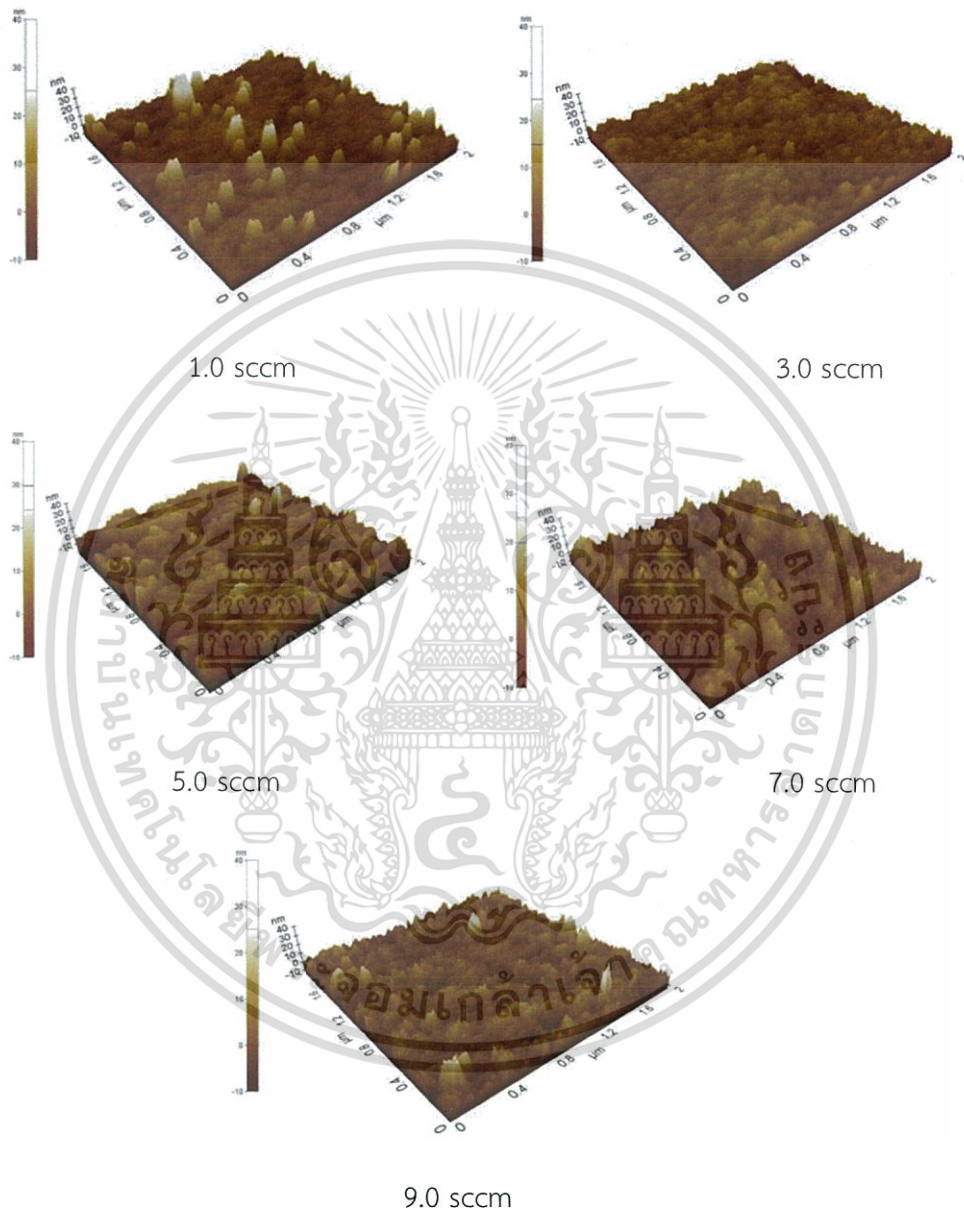
4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริง



รูปที่ 4.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7, และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสเปตเตอริง จะแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ฟิล์มบางที่ได้ไม่ปรากฏพิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นลักษณะของเฟสอะมอร์ฟัส แต่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะเริ่มปรากฏพิกของระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งพิกของระนาบ (002) จะมีความเข้มสูงสุดที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 7 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นความเข้มของพิกของระนาบ (002) จะลดลง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มเป็น 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

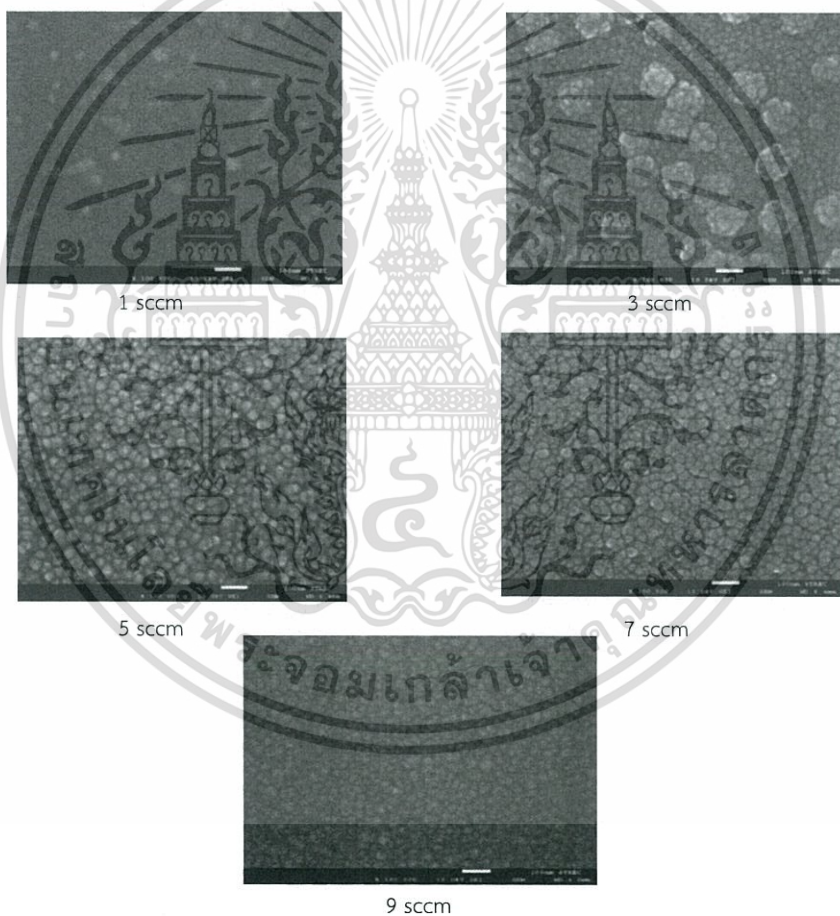
Oxygen Flow Rate (sccm)	Grain Size (nm)	Roughness (nm)
1.0	28.2	5.1
3.0	34.5	3.7
5.0	52.6	5.5
7.0	54.4	5.1
9.0	55.8	4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

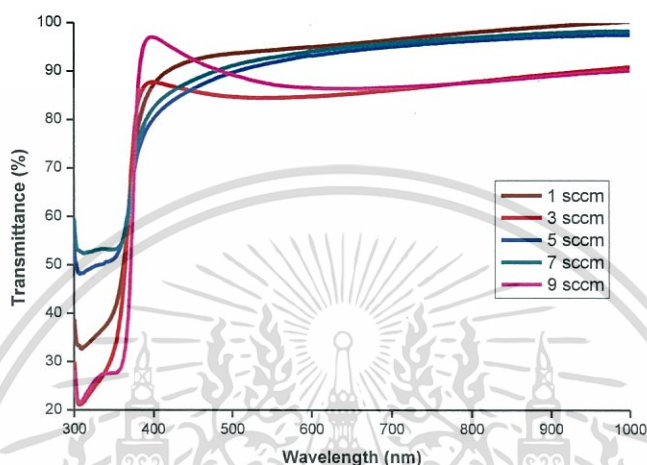
การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นเวลา 180 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย FESEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ถ่ายภาพ FESEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6



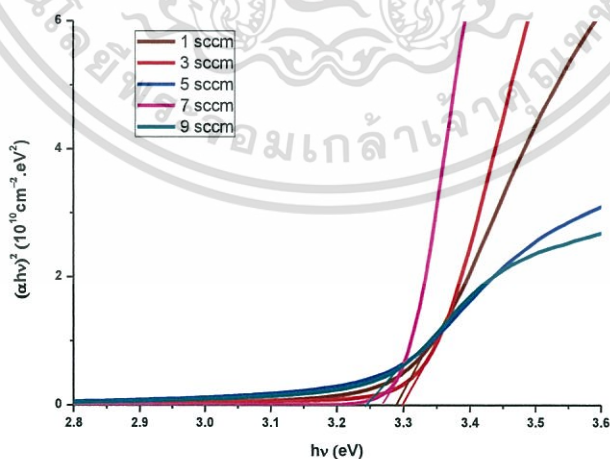
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่กำลังขยาย 100000 เท่า

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

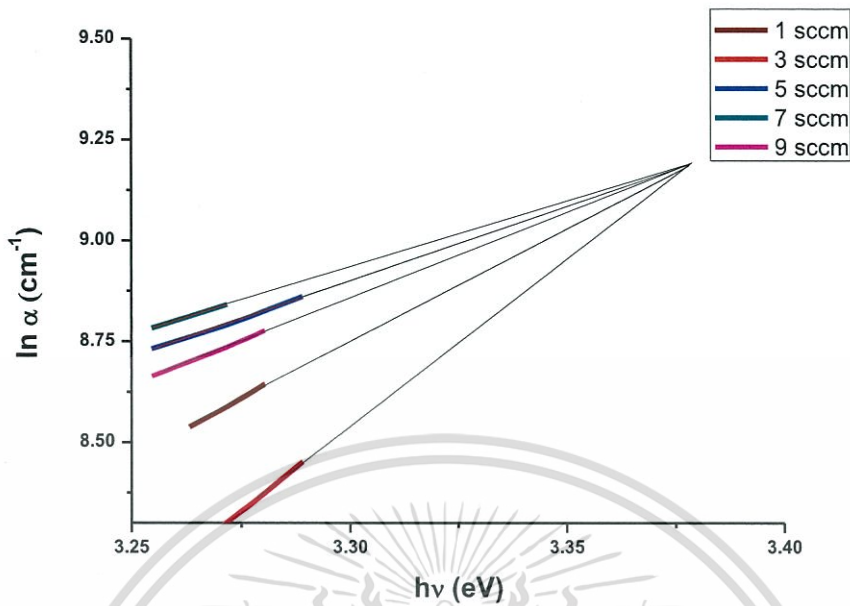


รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

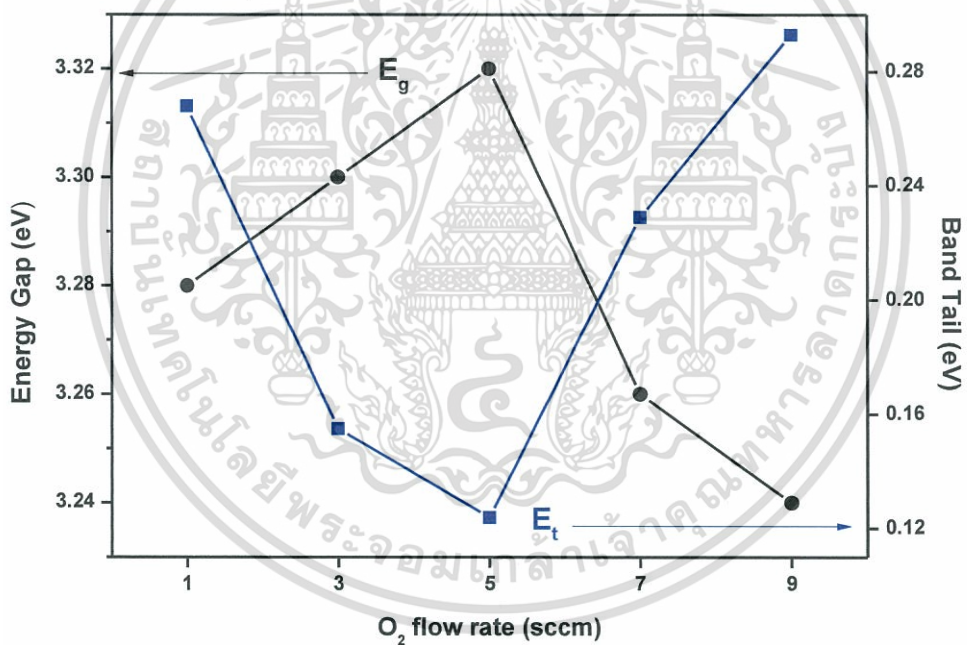


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ($\ln \alpha$) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากการลากส่วนต่อของเส้นตรงทุกเส้นของรูปที่ 4.8 พบว่ามีแนวโน้มไปตัดกันที่จุดโคออร์ดิเนต $(3.38, 1.0 \times 10^4)$ ซึ่งแสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานในอุดมคติเท่ากับ 3.38 อิเล็กตรอนโวลต์ และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีค่าเท่ากับ 1.0×10^4 ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที

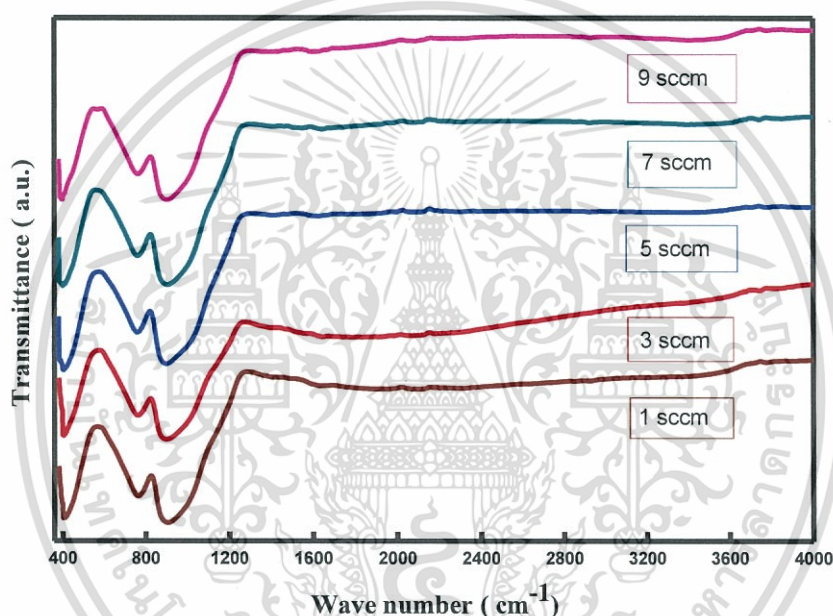
O ₂ Flow Rate (sccm)	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
1	3.28	267.91
3	3.30	154.90
5	3.32	123.83
7	3.26	228.93
9	3.24	292.91



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g), ส่วนหางของแถบพลังงาน (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที

4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงที่ใช้เลขคลื่นมีค่าในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร

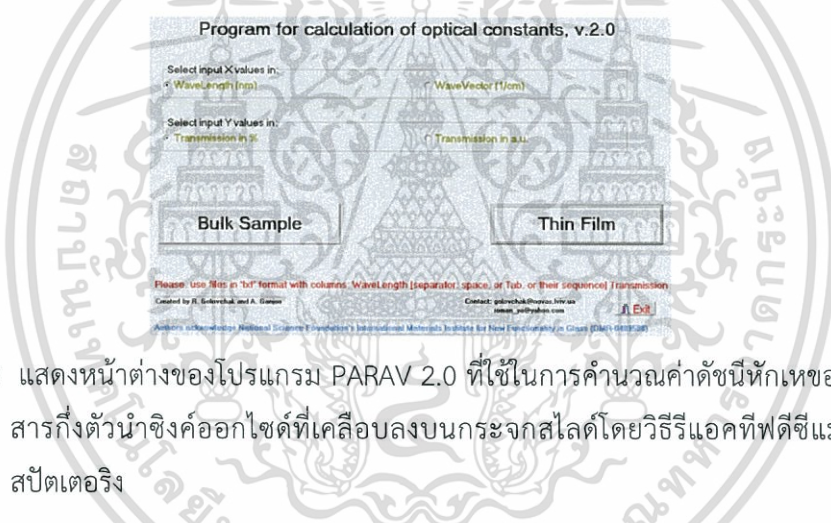
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

O ₂ Flow Rate (sccm)	Peak of FTIR (cm ⁻¹)	Assignment Vibration Mode	References
1	3450	Stretching mode of O-H group	A.H. Shah, 2013
	2110	C-H bonding	L. Saravanan, 2011
	904	C=C stretching mode	A. H. Shah, 2013
	763	Bending mode of Si-O-Si	S.I. Boyadjiev, 2016
	400	Zn-O stretching mode	S.I. Boyadjiev, 2016
3	3450	Stretching mode of O-H group	A.H. Shah, 2013
	1785	Carboxy groups	Haiqing Yao, 2016
	900	C=C stretching mode	A. H. Shah, 2013
	763	Al-N bond	M. Alizadeh, 2014
	400	Zn-O stretching mode	S.I. Boyadjiev, 2016
5	3450	Stretching mode of O-H group	A.H. Shah, 2013
	900	C=C stretching mode	A. H. Shah, 2013
	761	Al-N bond	M. Alizadeh, 2014
	400	Zn-O stretching mode	S.I. Boyadjiev, 2016
7	3450	Stretching mode of O-H group	A.H. Shah, 2013
	905	C=C stretching mode	A. H. Shah, 2013
	762	Al-N bond	M. Alizadeh, 2014
	400	Zn-O stretching mode	S.I. Boyadjiev, 2016
9	3450	Stretching mode of O-H group	A.H. Shah, 2013
	900	C=C stretching mode	A. H. Shah, 2013
	762	Al-N bond	M. Alizadeh, 2014
	400	Zn-O stretching mode	S.I. Boyadjiev, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

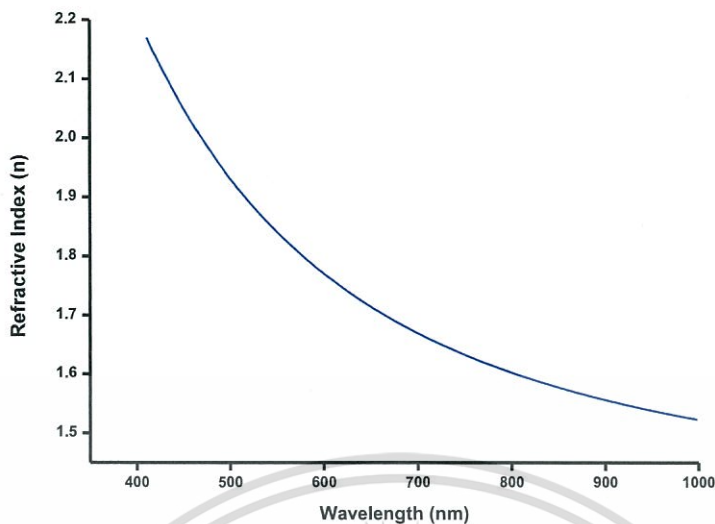
ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางแสงของตัวกลาง ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มนิยาม ได้จาก ค่าอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ หรือในอากาศ ต่อ ค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ แสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยอัตราเร็ว 3×10^8 เมตรต่อวินาที ส่วนในตัวกลางใด ๆ อัตราเร็วของแสงจะเปลี่ยนไป ถ้าให้ n แทนค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของตัวกลางใด ๆ จะได้ $n=c/v$ โดย c แทนค่าอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศหรืออากาศ และ v แทนค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ โดยโปรแกรม PARAV 2.0



รูปที่ 4.12 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง

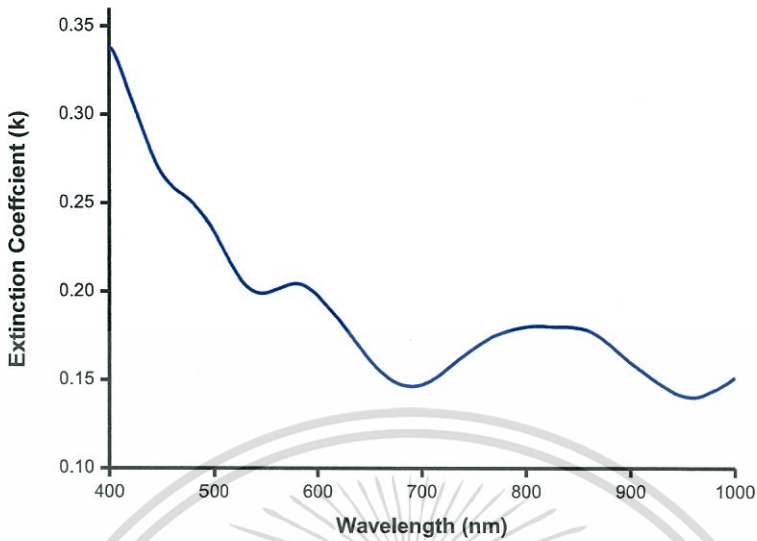
โปรแกรม PARAV 2.0 จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400-900 นาโนเมตร โปรแกรม PARAV 2.0 จะต้องอาศัยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงในรูปของ notepad จึงทำการสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางหลังจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกเป็นไฟล์ notepadถูกบันทึกเป็นนามสกุล .txt ภายในไฟล์จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ และค่าแถบช่องว่างพลังงาน ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณเสร็จเพื่อมาหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.12-4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หากพิจารณาความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์จะแสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์จะมีแนวโน้มลดลงโดยในช่วงความยาวคลื่นสั้น ๆ (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 650 นาโนเมตร) ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสูงกว่า 650 นาโนเมตร) แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตามความยาวคลื่นสอดคล้องกับสมการคอดีดังความสัมพันธ์ $n = a + (b / \lambda^2)$

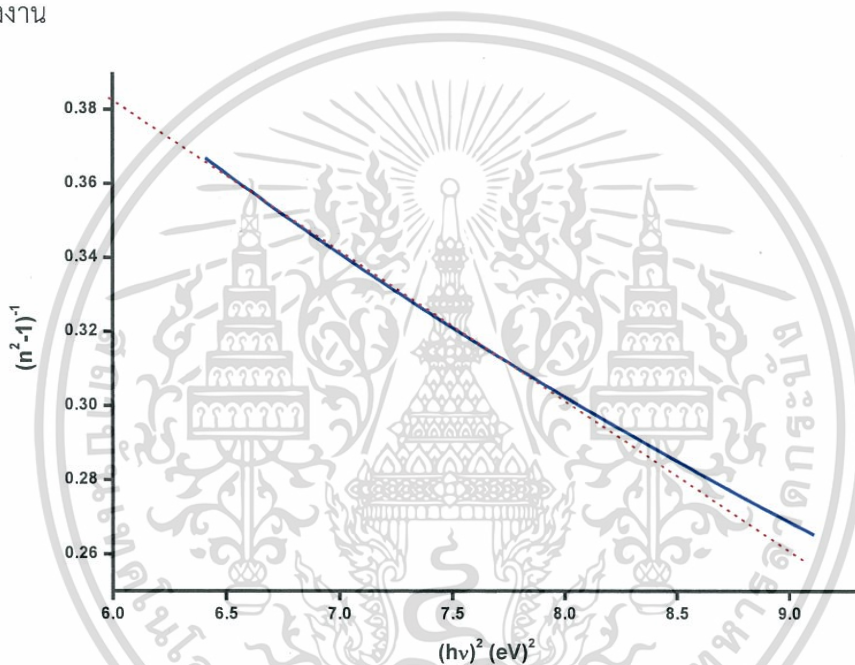


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับค่าความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้าๆ เข้าสู่ศูนย์นั้นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีบทบาทมากที่ช่วงพลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าวและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่มีความยาวคลื่นแสงมีค่าต่าง ๆ ดังความสัมพันธ์ $k = \alpha\lambda/4\pi$ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงที่มีค่าพลังงานสูงจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำในสารกึ่งตัวนำ

4.5.1 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองแก้วกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอกทีฟทีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เวมเพิ่ม-โดโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอกทีฟทีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.13-4.15 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเปอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (hv)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (hv)^2$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.100) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d}$$

และ จุดตัดแกน $y = \frac{E_0}{E_d}$

จากสมการของความชันและจุดตัดแกน y สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

N_c = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

Z_a = ค่าวาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

N_e = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

และ $f = E_0 E_d$ คือค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่ r ของสเปกตรัมทางแสง (r^{th} moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ $E_0 E_d$ ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}}$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M_1 และ M_3 คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมนต์ลำดับที่ M_1 และ M_3 ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*}$$

เมื่อ $n^* = n - ik$

เมื่อ $n =$ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

$k =$ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

โดยที่

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2$$

$$\epsilon_2 = 2nk$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

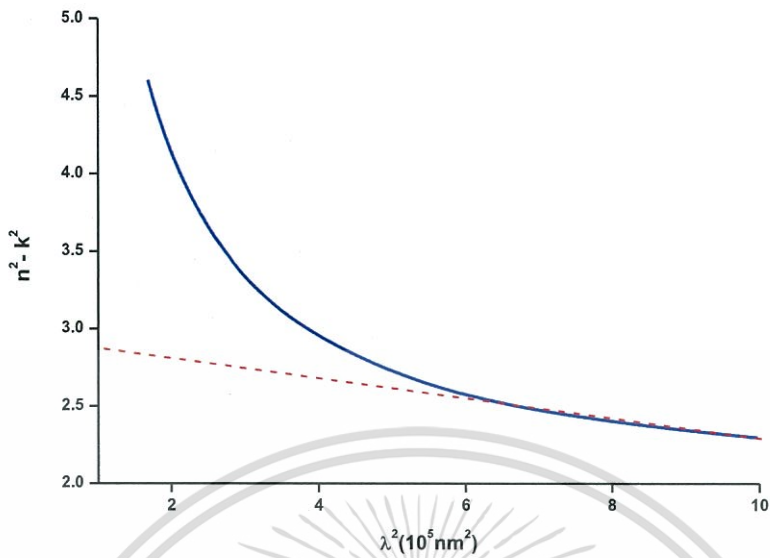
เมื่อ

$$\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0$$

และ

$$\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0$$

ตารางที่ 4.6 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ M_1 และ M_3 จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด(ϵ_∞)(dielectric constant at higher wavelength) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคอสซี $n = a + (b/\lambda^2)$ เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงค่าอนันต์แล้วในพจน์ของ (b/λ^2) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด(ϵ_∞) จึงมีค่าเท่ากับ a และจากสมการที่ $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรตได้



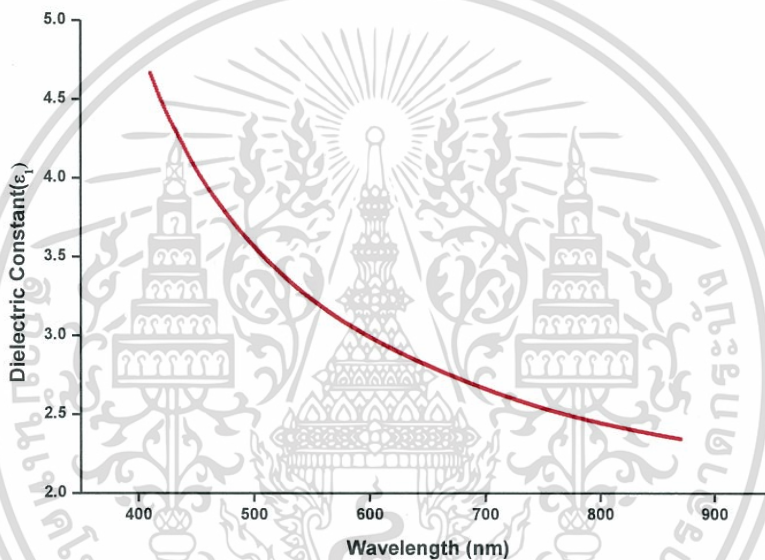
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2 - k^2)$ กับ λ^2 ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

$n = a+b/\lambda^2$		Wemple-Diomenico Analysis						E_t (meV)	E_g (eV)	E_0/E_g	ϵ_L	(N/m ²)
a	b(nm) ²	E_0 (eV)	E_d (eV)	M_{-1}	M_3 (eV) ⁻²	f (eV) ²	(ϵ_∞)					
1.616	9.326×10^4	3.97	6.46	2.64	0.17	25.646	2.817	836	3.27	1.975	2.817	7.325×10^{54}

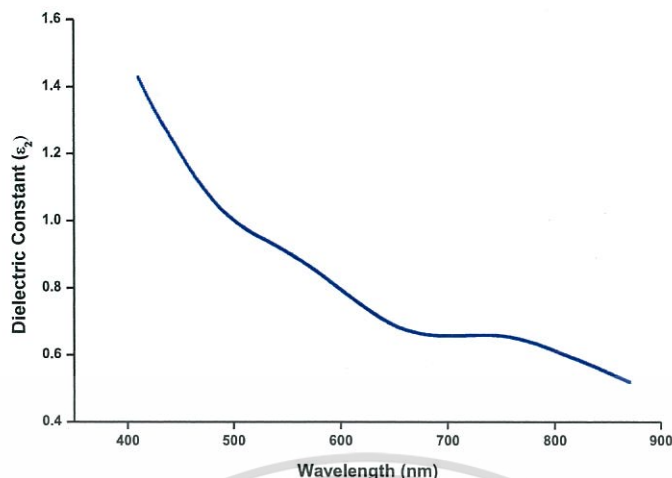
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5.2 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัว
 ซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน
 สเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลใน
 อากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงควมมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความ
 เป็นขั้วสูงและจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้
 เนื่องจากการโพลาไรซ์โมเลกุลมีขั้วของวัสดุต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ประกอบ
 ไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาว
 คลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจก
 สไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์
 เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

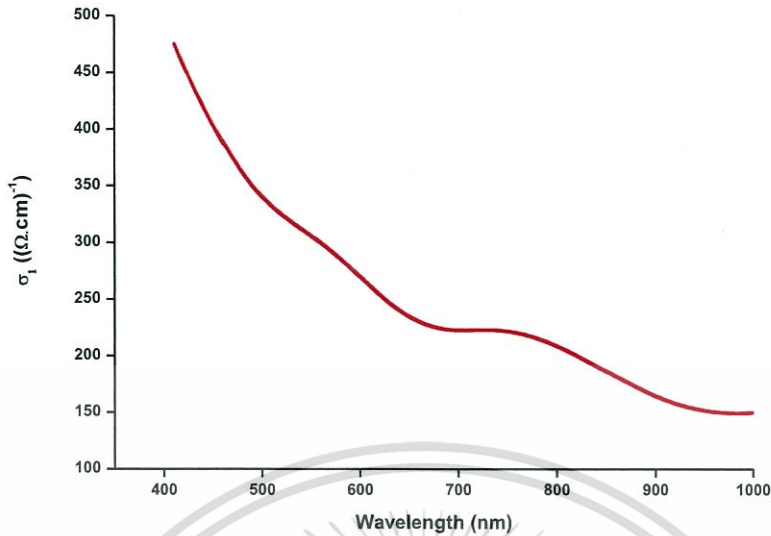


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนูลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

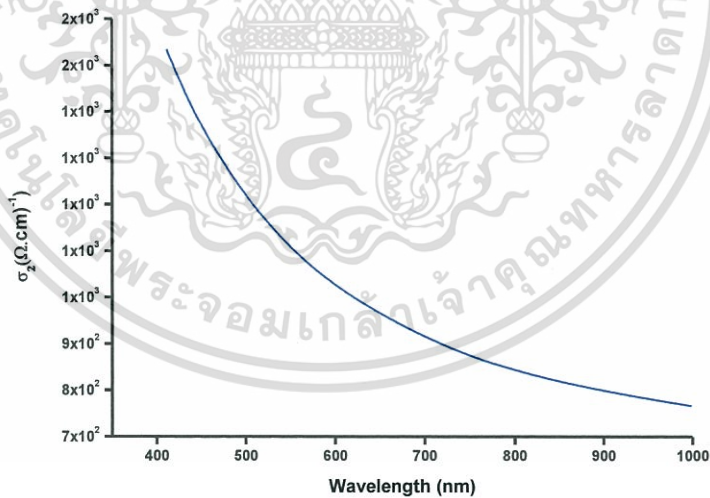
จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ พบว่าที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกัน พิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นแล้วจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าใดค่าหนึ่งทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้านำแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนแสงที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



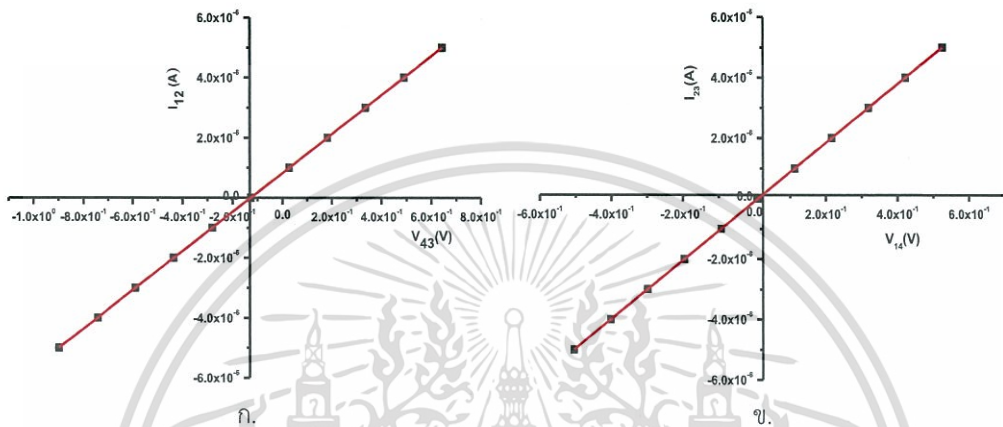
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



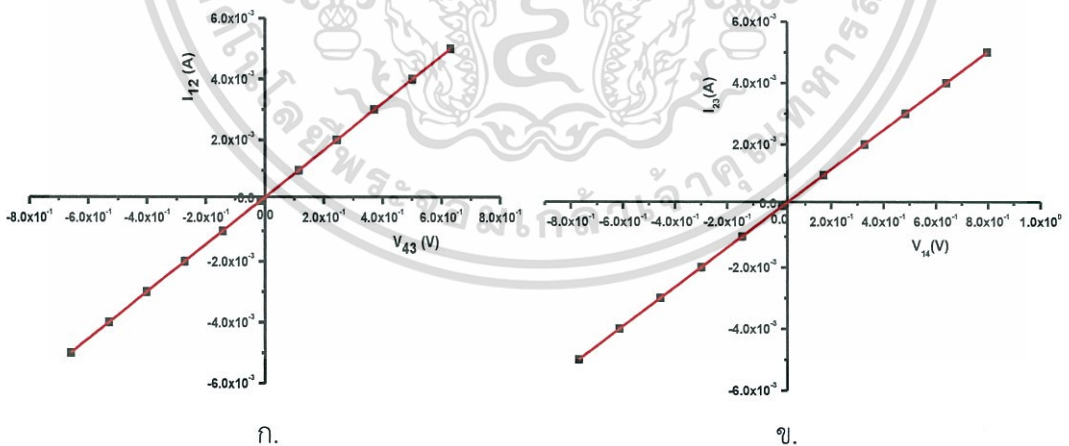
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

4.6.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

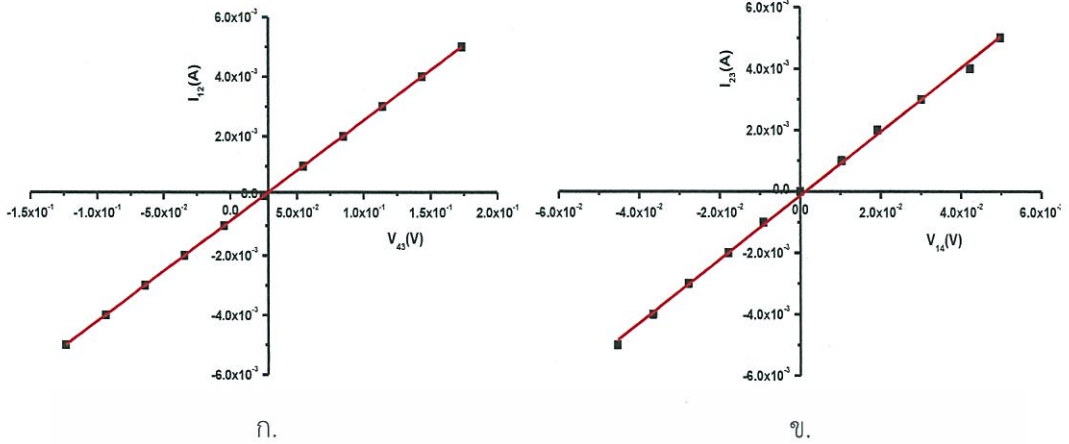


รูปที่ 4.21 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

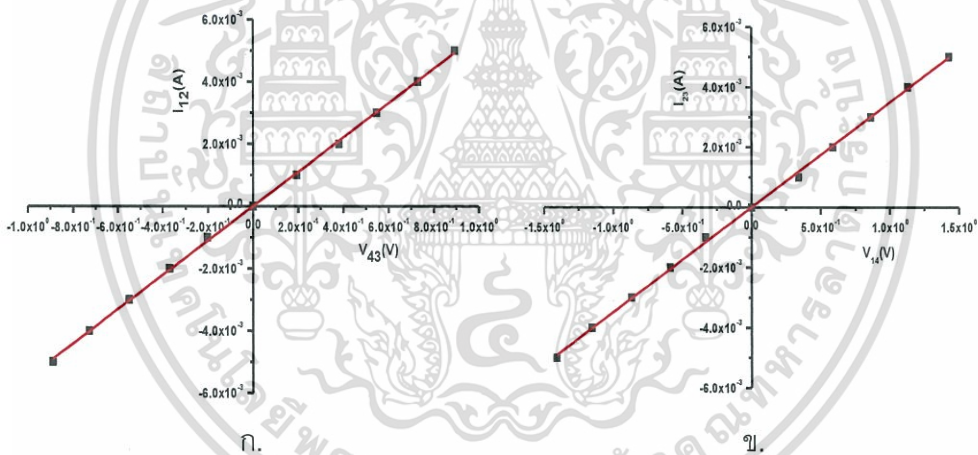


รูปที่ 4.22 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

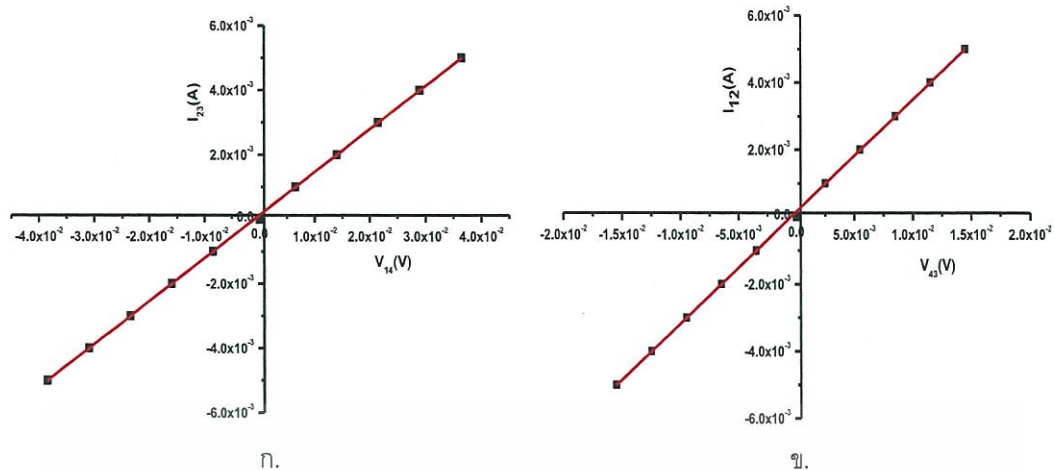


รูปที่ 4.23 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.24 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

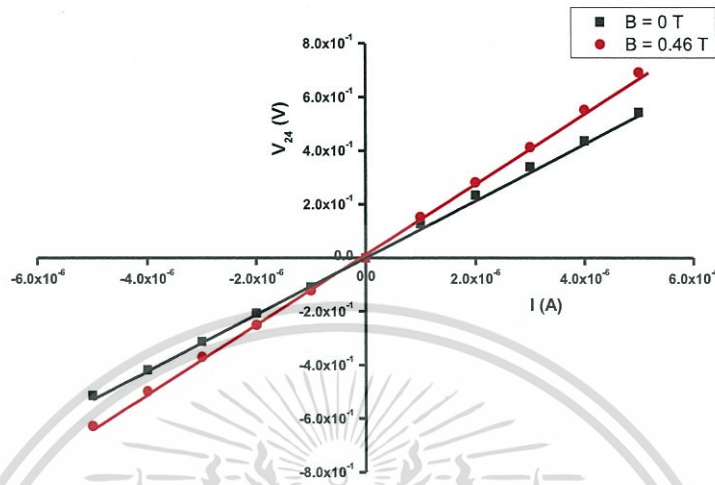
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



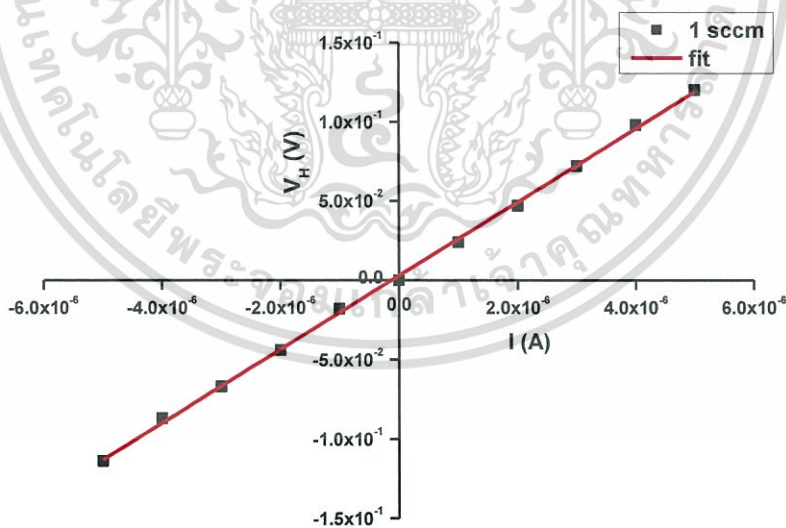
รูปที่ 4.25 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้า R_1 (ก.) และความต้านทานไฟฟ้า R_2 (ข.) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.21-4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทาน (resistance) ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) และ สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity)

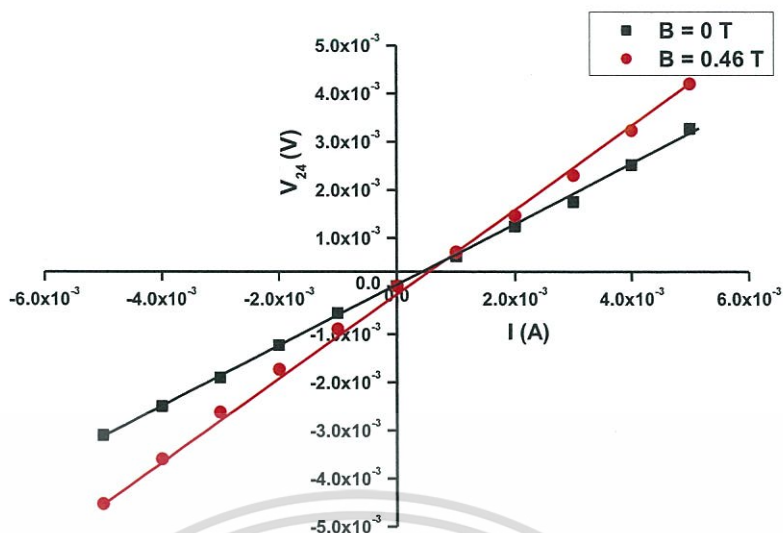
4.6.2 กราฟและผลการศึกษาดูปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง



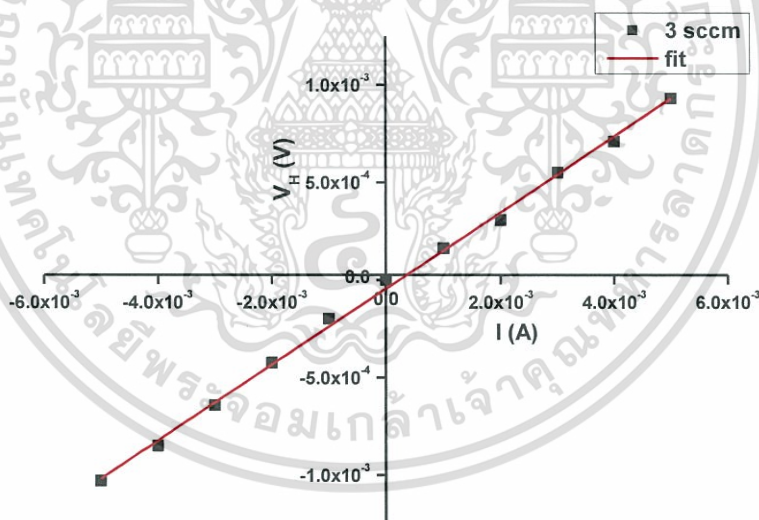
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

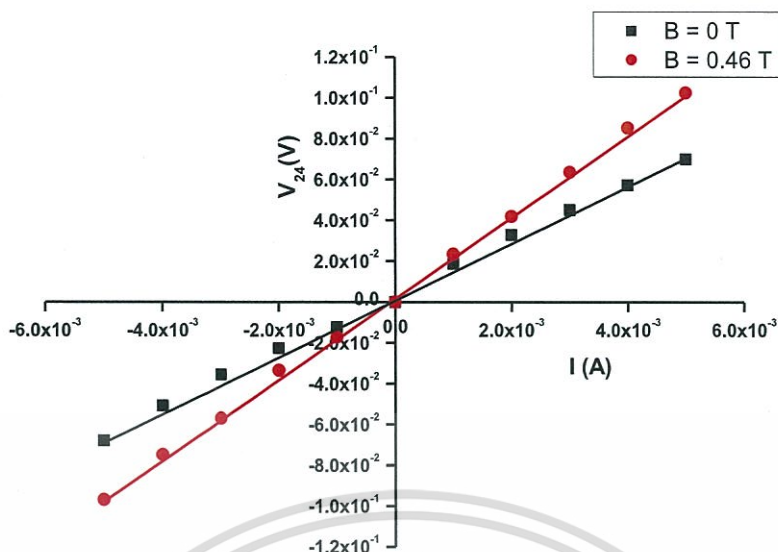


รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

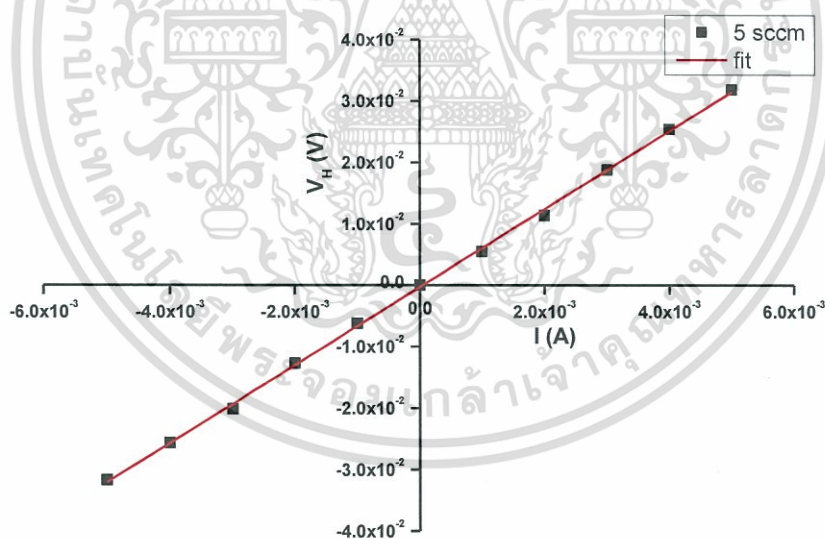


รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

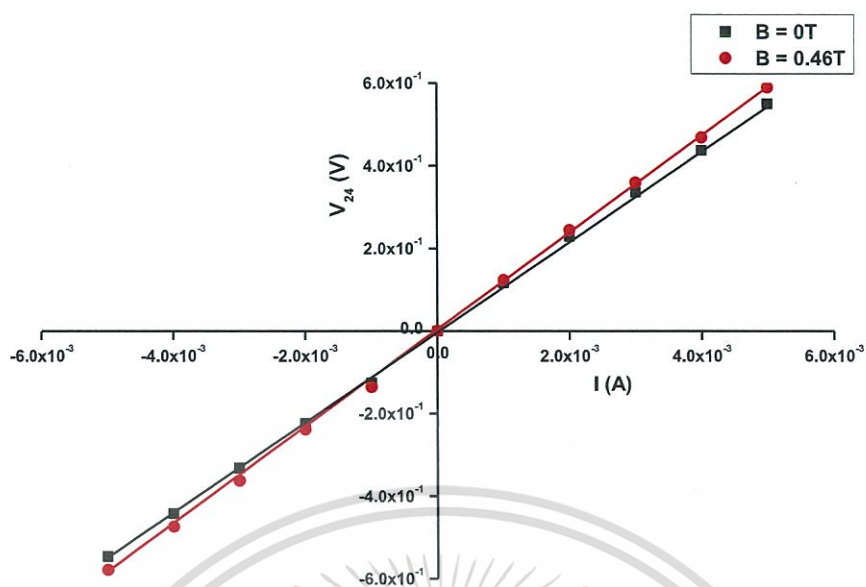
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



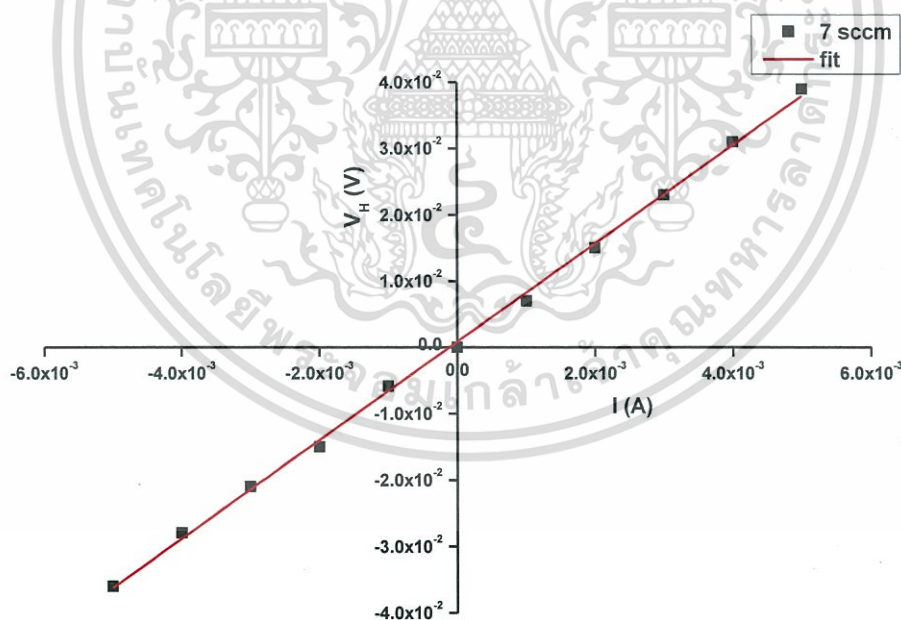
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



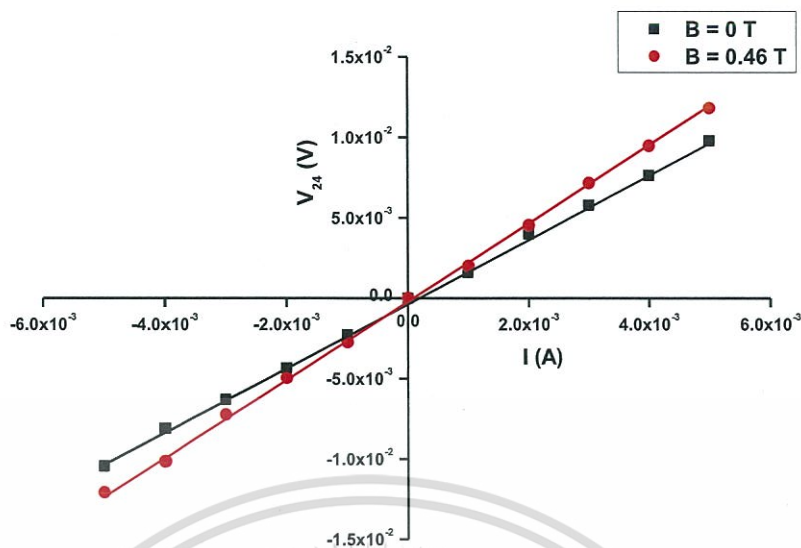
รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



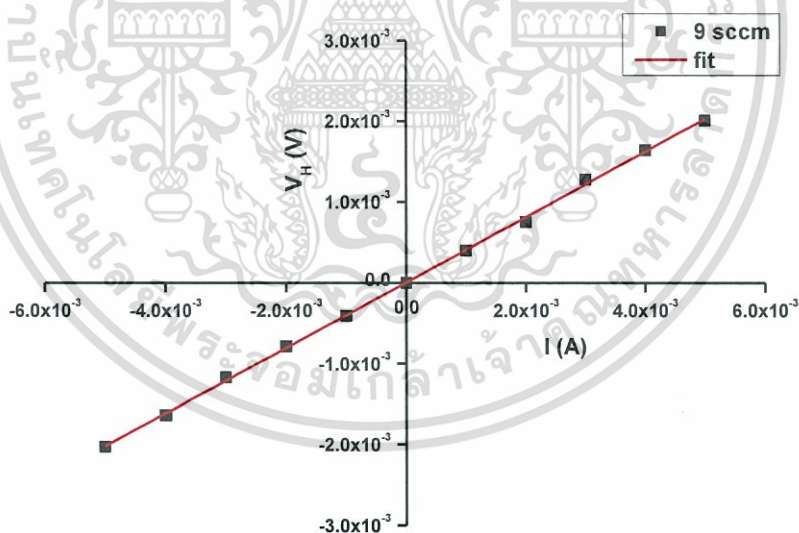
รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



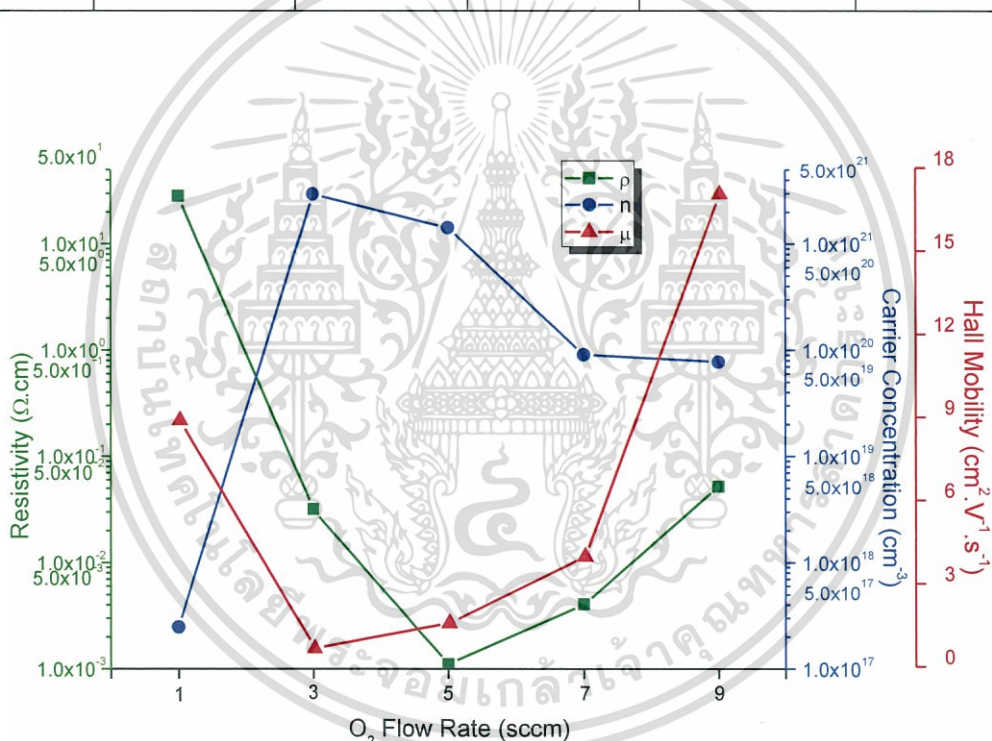
รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

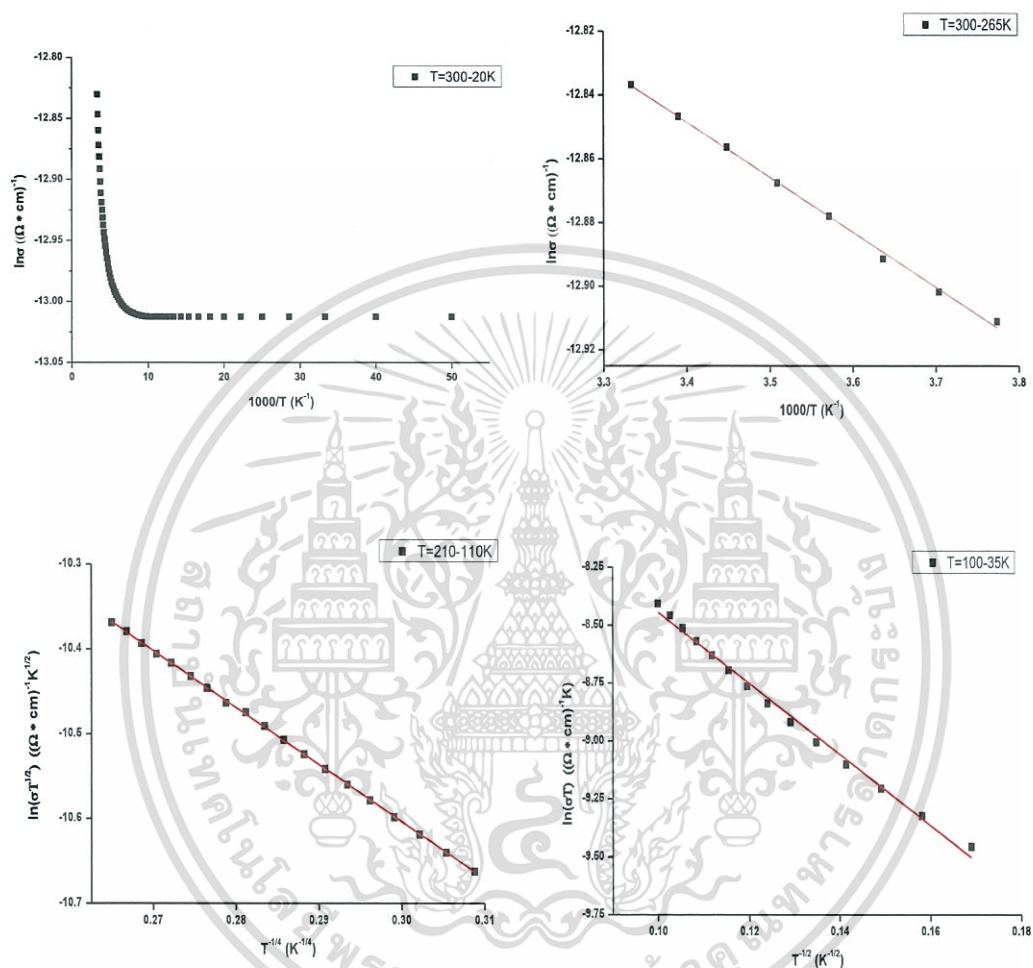
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

O ₂ Flow Rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Constant (cm^3/C)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)
1	5.66×10^5	2.83×10^1	2.51×10^2	2.48×10^{17}	8.87
3	6.43×10^2	3.20×10^{-2}	2.11×10^{-3}	2.96×10^{21}	0.66
5	2.23×10^1	1.11×10^{-3}	4.40×10^{-3}	1.42×10^{21}	1.56
7	8.11×10^1	4.05×10^{-3}	6.90×10^{-2}	9.06×10^{19}	3.96
9	1.04×10^2	5.20×10^{-2}	8.10×10^{-2}	7.72×10^{19}	17.04

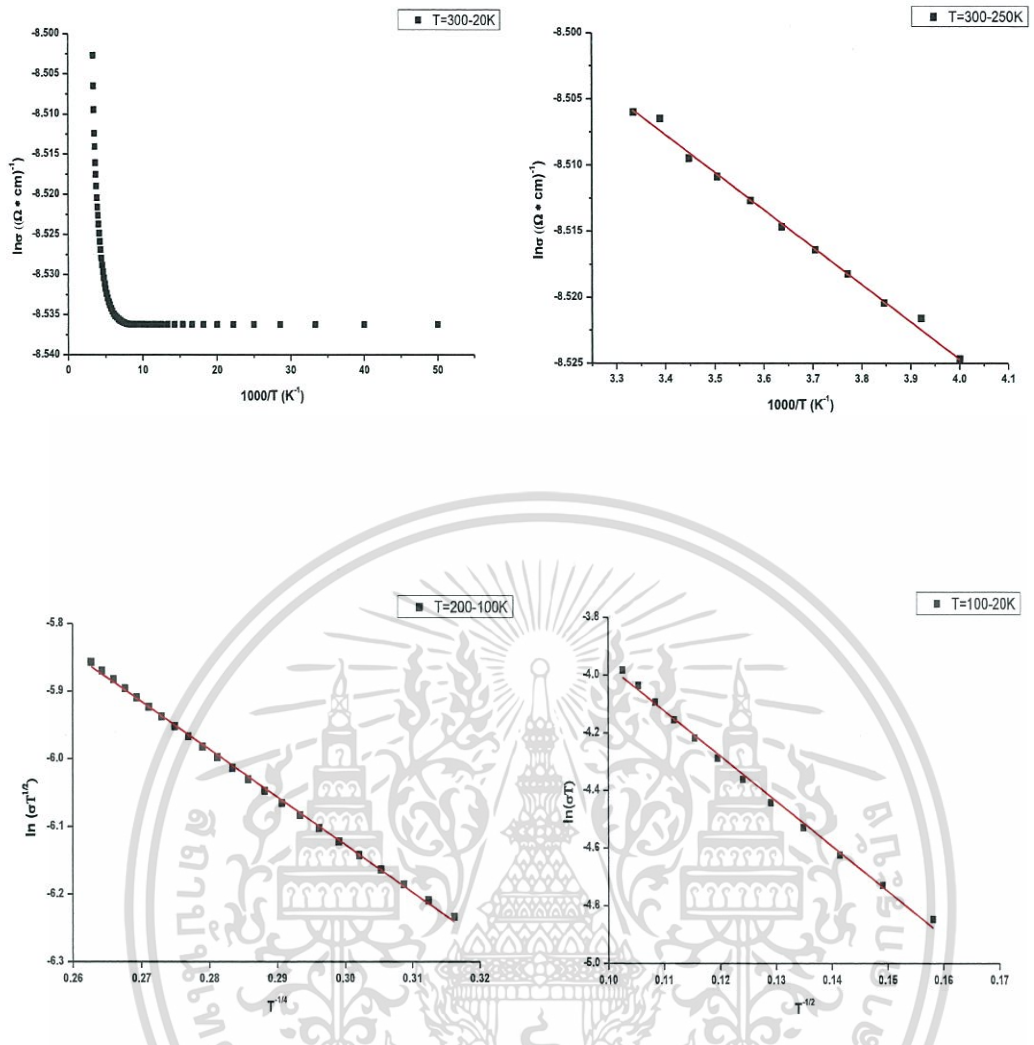


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.6.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

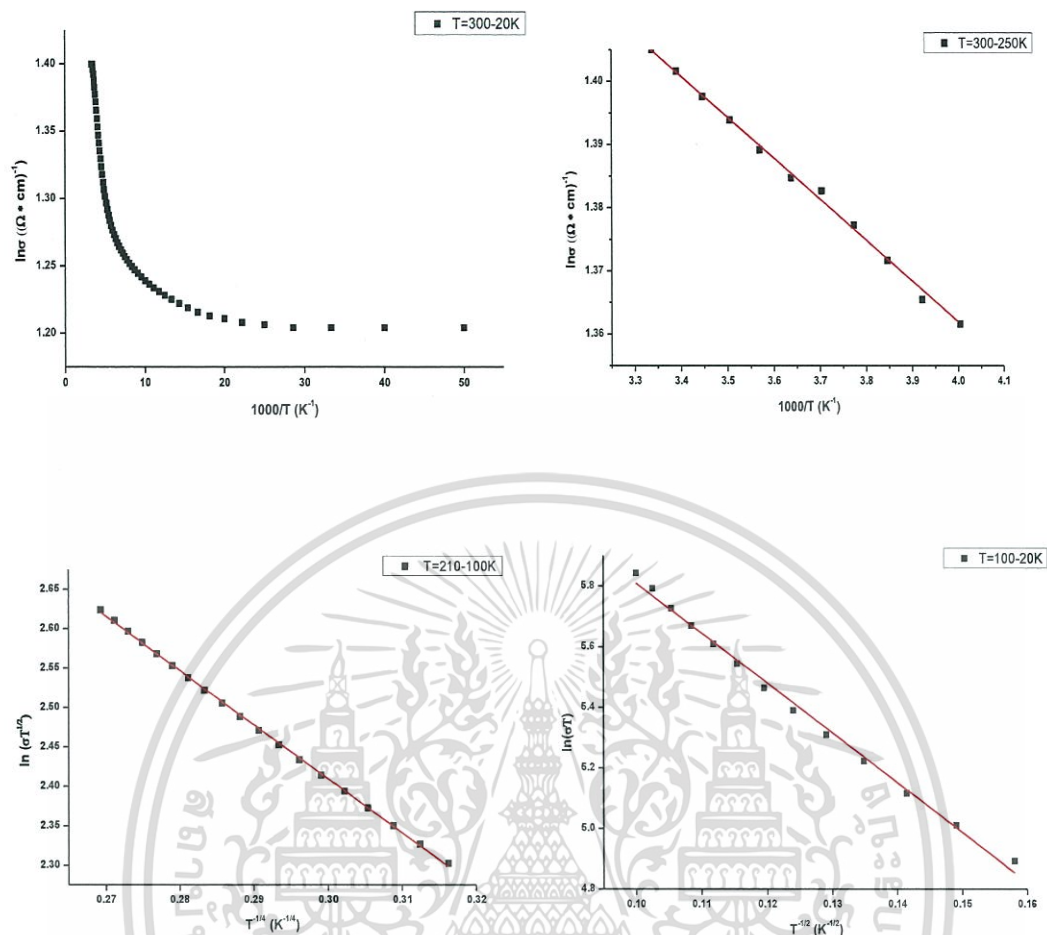


รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

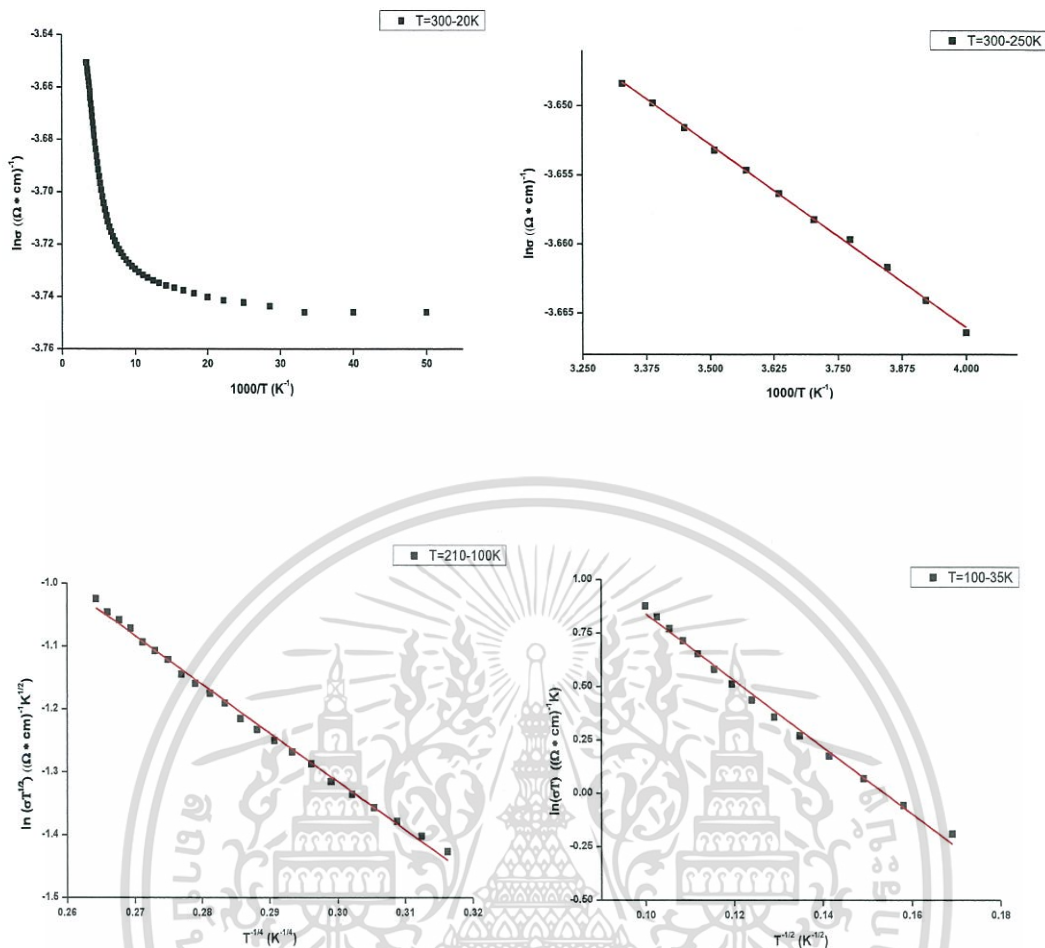


รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีเอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

การหาค่าระดับพลังงานของกัปดักพาหะ (E_t)

เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 300 เคลวิน พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง 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

ϵ_s คือ เฟอร์มิตติวิตีของ SnO_2 (มีค่าเท่ากับ $11.65 \times 8.85 \times 10^{-14}$ ฟารัดต่อเซนติเมตร)

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{C1} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B}$$

สมการที่ (3) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ 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_d เมื่อรู้ค่า k แล้วก็จะคำนวณหาค่า N_a ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิชัน (T_{C1}) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า ξ_{Mott} , N_d และ ϵ_s ตามลำดับ

จากสมการ

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

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

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

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยยะไม่คงที่ (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 ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงดังความสัมพันธ์

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชันของสมการ คือ $T_{0,\text{Mott}}^{1/4}$

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

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

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length; ξ_{Mott}) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

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

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state; $N_0(E_F)$) ที่ระดับเฟอร์มี คือ

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

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

หรือ

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

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

หรือ

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

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

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

หรือ $W_{\text{hop,Mott}} = \frac{3}{4\pi R_{\text{hop,Mott}}^3 N_0(E_F)}$ และ $\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} > 1$

อุณหภูมิตransition จากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

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

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

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

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

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} ก็จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงดังความสัมพันธ์

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

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

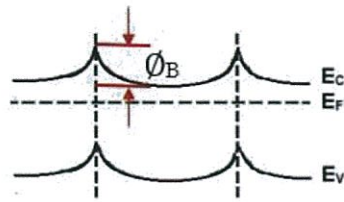
$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงดังความสัมพันธ์

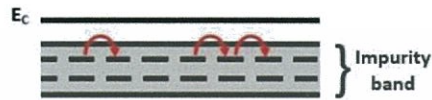
$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_S^{3/2}}$$

หรือ

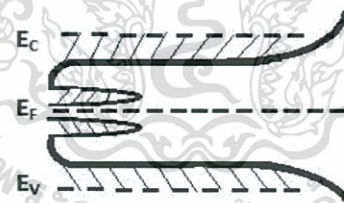
$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2}$$



(ก)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.41 แสดงแผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

O ₂ Flow Rate (sccm)	Temperature Range (K)	Temperature (K)	$\sigma_{0,NNH}$ (s/cm)	E _{NNH} (eV)	N _d (cm ⁻³)	Tc ₁ (K)
1	300-265	300	4.74×10 ⁻⁶	1.48×10 ⁻²	5.74×10 ¹⁷	11.60
3	300-250	300	2.23×10 ⁻⁴	1.73×10 ⁻³	9.10×10 ¹⁴	0.16
7	300-250	300	5.06×10 ⁰	5.52×10 ⁻³	2.98×10 ¹⁶	1.62
9	300-250	300	3.00×10 ⁻²	2.77×10 ⁻³	2.09×10 ¹⁵	0.28

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

O ₂ Flow Rate (sccm)	Temperature Range (K)	$\sigma_{0,Mott}$ (s/cm)	T _{0,Mott} (10 ³ K)	N ₀ (E _F) (cm ⁻³ .eV ⁻¹)	R _{hop,Mott} (10 ⁻⁷ cm)	W _{hop,Mott} (eV)	R _{hop,Mott} /ξ _{Mott}	Tc ₂ (K)
1	210-110	1.87×10 ⁻⁴	2.04	1.95×10 ²³	5.35	0.0246	7.99	8.42
3	200-100	1.81×10 ⁻²	2.46	1.62×10 ²³	5.67	8.08	5.67	391
7	210-100	3.70×10 ⁻²	3.56	1.12×10 ²³	6.14	9.21	1.03	246.6
9	210-100	8.72×10 ¹	2.22	1.79×10 ²³	5.46	8.19	0.81	579.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆคำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

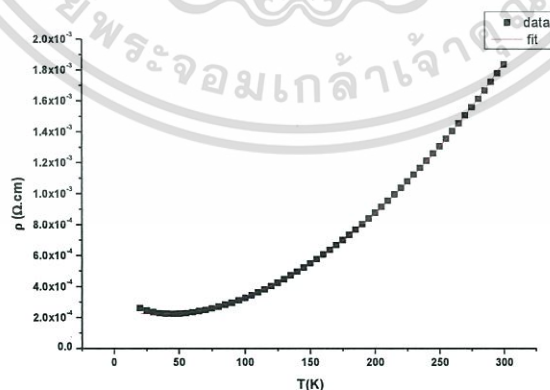
O ₂ Flow Rate (sccm)	Temperature Range (K)	$\sigma_{0,ES}$ (s/cm)	T _{0,ES} (K)	ξ_{ES} (cm)	W _{hop,ES} (meV)	R _{hop,ES/} ξ_{ES}	ΔC_{ES} (10 ⁻⁵ eV)
1	100-35	9.97×10 ⁻⁴	235.35	311.70	6.62	0.38	2.93
3	100-20	9.05×10 ⁻²	245.60	299.20	6.75	0.39	2.72
7	100-40	6.47×10 ⁻³	271.09	270.50	7.10	0.41	3.01
9	100-35	1.10×10 ¹	357.47	302.20	6.72	0.390	2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะพิเศษกล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 เคลวิน เป็น 300 เคลวิน สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจาก 3.25×10^{-4} โอห์ม.เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 20 เคลวิน จนถึงค่าต่ำสุด 1.0×10^{-4} โอห์ม.เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน จากนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.0×10^{-3} โอห์ม.เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 เคลวิน ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำแต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 เคลวิน ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะประพฤติตัวเป็นโลหะ ดังนั้นอุณหภูมิทรานซิชัน (transition temperature) เท่ากับ 50 เคลวิน สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์สามารถฟิตได้ดีกับสมการ (Bhosle, 2006, Nistor, 2009)

$$\rho = \frac{1}{\sigma_0 + aT^{1/2}} + bT^2$$

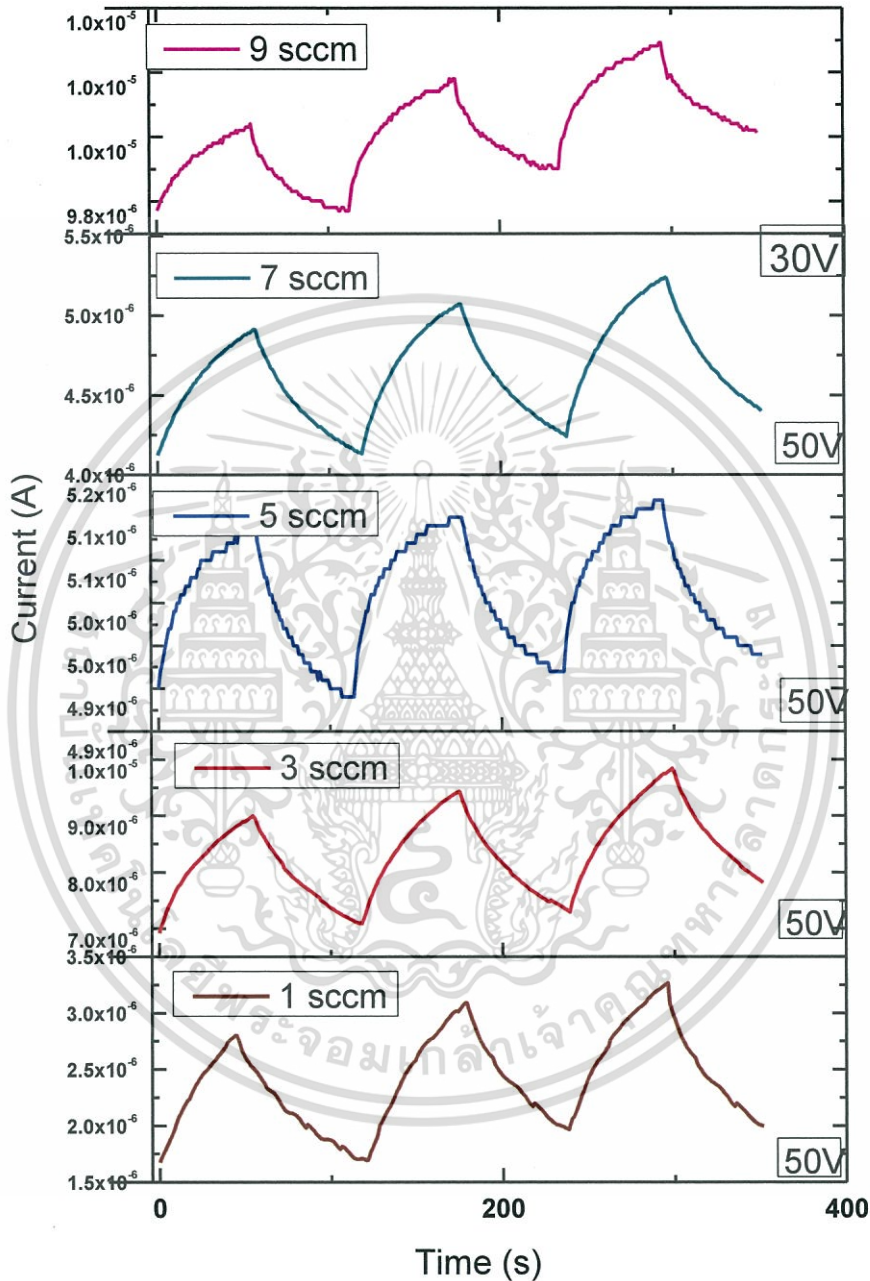
เมื่อ σ_0 คือสภาพต้านทานไฟฟ้าเหลือค้าง (residual resistivity) ส่วนพจน์ $aT^{1/2}$ จะสอดคล้องกับอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบและอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกจากอะตอมสารเจือ (impurity atoms) กล่าวคือเมื่อพิจารณาถึงสภาพความเป็นควอนตัม (quantum corrections) ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกจากอะตอมสารเจือจะเกิดการแทรกสอดกัน จะส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้กลายเป็นอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อน (weakly localized electron) ส่วนพจน์ bT^2 คือสมการโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's equation) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกระเจิงของอิเล็กตรอนอิสระ เนื่องจากโฟนอนซึ่งเป็นสมบัติปกติของโลหะ จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO มี a และ b เท่ากับ 4.35×10^{-2} (โอห์ม.เซนติเมตร.เคลวิน $^{1/2}$) $^{-1}$ และ 2.44×10^{-8} โอห์ม.เซนติเมตร(เคลวิน) $^{-2}$ ตามลำดับ ส่วน σ_0 มีค่าเท่ากับ 5.0×10^{-3} (โอห์ม.เซนติเมตร) $^{-1}$



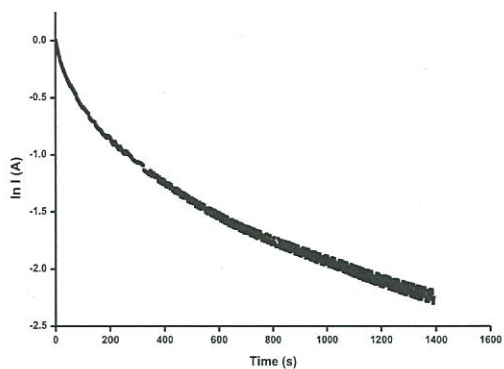
รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ρ กับ T ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบลงแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริงที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

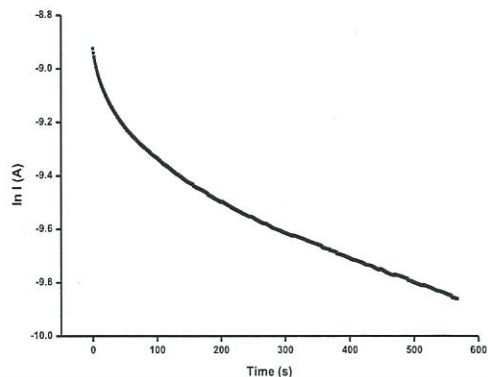
4.7 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง



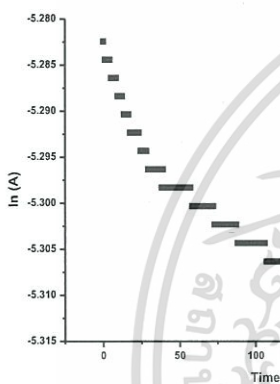
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



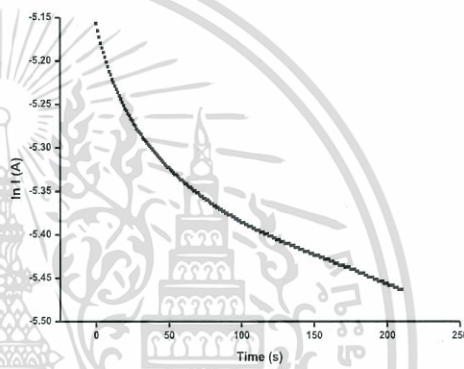
1 sccm



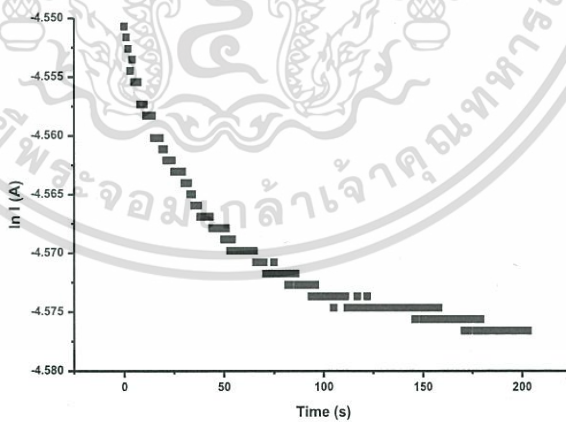
3 sccm



5 sccm



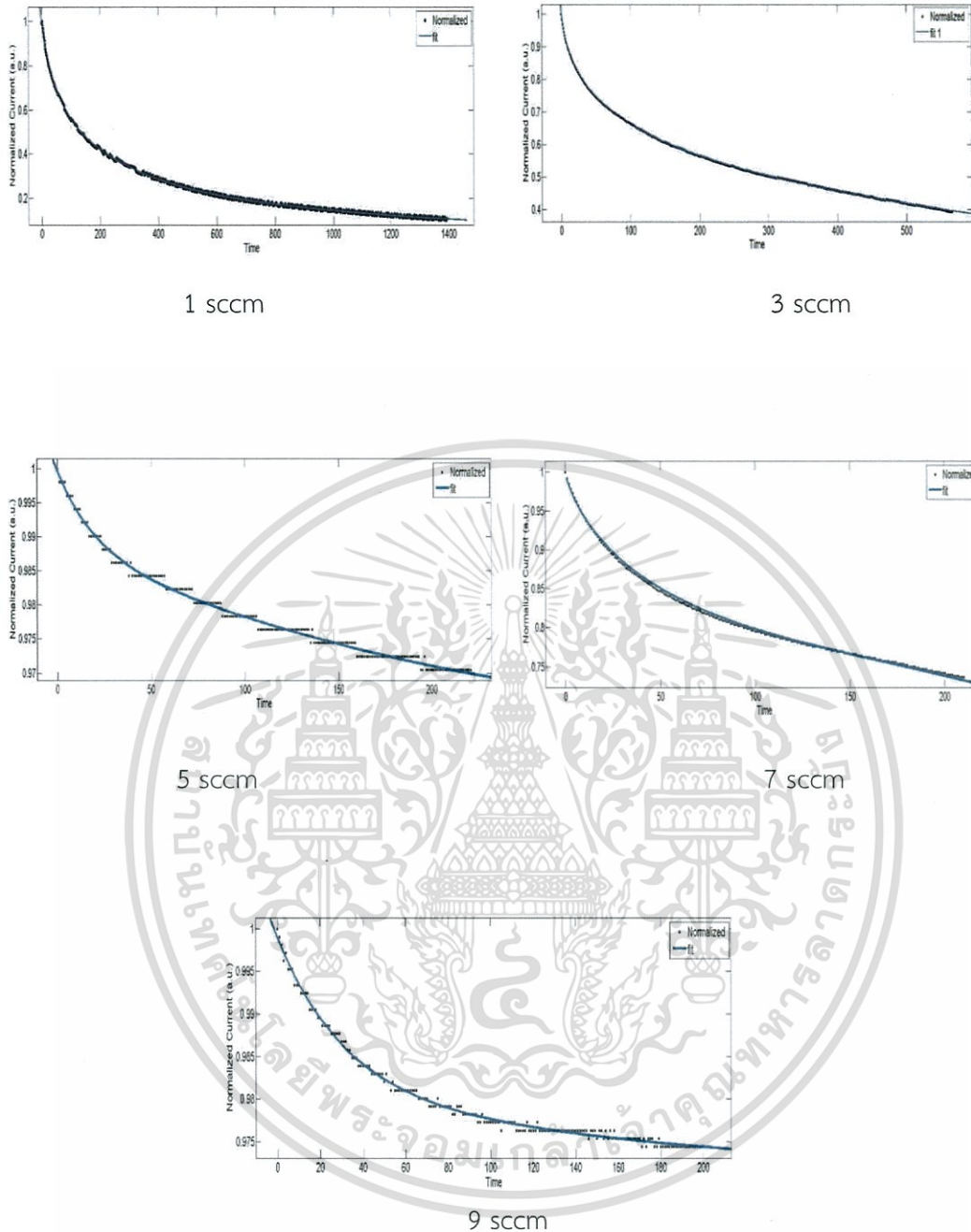
7 sccm



9 sccm

รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโพลโทในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีดอกซ์ที่พีดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลมไลซ์ขาลงกับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีรีเอคทีฟทีพีดีซีแมกนีตรอนสเปิตเตอร์ริงที่อัตราการผลิตของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงเชิง
 ด้อยของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซึ่งคอกซ์ไดต์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับโดย
 วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกเนตรอนสเปคโตรริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7
 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร

Decay Component						
O ₂ Flows Rate (sccm)	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
1	$\tau_{d1} = 120.47$ $A_1 = 0.5708$	$\tau_{d2} = 425.53$ $A_2 = -0.08013$	$\tau_{d3} = 936.50$ $A_3 = -0.5196$	$\tau_{d4} = 1233.64$ $A_4 = -0.112$	$\tau_{d5} = 2631.58$ $A_5 = 0.09392$ $\beta = -0.6531$	-
	$\sigma_1 = 4.84 \times 10^{12}$ cm ² $I_1 = 1.29 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_2 = 4.69 \times 10^{12}$ m ² $I_2 = 1.25 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_3 = 4.31 \times 10^{12}$ m ² $I_3 = 1.15 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_4 = 4.01 \times 10^{12}$ m ² $I_4 = 1.07 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_5 = 3.62 \times 10^{12}$ m ² $I_5 = 9.67 \times 10^{-5}$ A	-
3	$\tau_{d1} = 41.42$ $A_1 = 0.1972$	$\tau_{d2} = 114.03$ $A_2 = -3.5340$	$\tau_{d3} = 192.68$ $A_3 = 22.95$	$\tau_{d4} = 362.32$ $A_4 = -112.40$	$\tau_{d5} = 526.00$ $A_5 = 157.80$	$\tau_{d6} = 970.00$ $A_6 = 0.00828$ $\beta = 0.7967$
	$\sigma_1 = 8.06 \times 10^{12}$ cm ² $I_1 = 1.29 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_2 = 7.81 \times 10^{12}$ m ² $I_2 = 1.25 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_3 = 7.18 \times 10^{12}$ m ² $I_3 = 1.15 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_4 = 6.68 \times 10^{12}$ cm ² $I_4 = 1.07 \times 10^{-4}$ A	$\sigma_5 = 6.06 \times 10^{12}$ m ² $I_5 = 9.70 \times 10^{-5}$ A	$\sigma_6 = 6.06 \times 10^{12}$ m ² $I_6 = 9.70 \times 10^{-3}$ A
5	$\tau_{d1} = 20.1$ $A_1 = 0.2393$	$\tau_{d2} = 103.0$ $A_2 = 0.01338$	$\tau_{d3} = 888.5$ $A_3 = 0.9882$	$\tau_{d4} = 14619.88$ $A_4 = -48.99$	$\tau_{d5} = 147272.54$ $A_5 = 49.02$ $\beta = 1.020$	-
	$\sigma_1 = 3.55 \times 10^{14}$ cm ² $I_1 = 5.68 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_2 = 3.38 \times 10^{14}$ m ² $I_2 = 5.40 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_3 = 3.24 \times 10^{14}$ cm ² $I_3 = 5.19 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_4 = 3.18 \times 10^{14}$ m ² $I_4 = 5.09 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_5 = 3.15 \times 10^{14}$ m ² $I_5 = 5.04 \times 10^{-3}$ A	-
7	$\tau_{d1} = 177.94$ $A_1 = 18.72$	$\tau_{d2} = 271.00$ $A_2 = -185.9$	$\tau_{d3} = 440.53$ $A_3 = 1224$	$\tau_{d4} = 617.28$ $A_4 = -2704$	$\tau_{d5} = 900.289$ $A_5 = -1334$	$\tau_{d6} = 1179.245$ $A_6 = 2982$ $\beta = 0.9995$
	$\sigma_1 = 3.59 \times 10^{14}$ cm ² $I_1 = 5.74 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_2 = 3.52 \times 10^{14}$ m ² $I_2 = 5.63 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_3 = 3.41 \times 10^{14}$ cm ² $I_3 = 5.46 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_4 = 3.31 \times 10^{14}$ m ² $I_4 = 5.30 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_5 = 3.21 \times 10^{14}$ cm ² $I_5 = 5.14 \times 10^{-3}$ A	$\sigma_6 = 3.15 \times 10^{14}$ m ² $I_6 = 5.04 \times 10^{-3}$ A
9	$\tau_{d1} = 13.52$ $A_1 = 0.009831$	$\tau_{d2} = 300.30$ $A_2 = 0.3568$	$\tau_{d3} = 452.89$ $A_3 = -0.4811$	$\tau_{d4} = 14619.88$ $A_4 = 0.7354$	$\tau_{d5} = 36416.63$ $A_5 = 0.3792$ $\beta = 6.216$	-
	$\sigma_1 = 6.63 \times 10^{14}$ cm ² $I_1 = 1.06 \times 10^{-2}$ A	$\sigma_2 = 6.63 \times 10^{14}$ m ² $I_2 = 1.06 \times 10^{-2}$ A	$\sigma_3 = 6.56 \times 10^{14}$ m ² $I_3 = 1.05 \times 10^{-2}$ A	$\sigma_4 = 5.56 \times 10^{14}$ cm ² $I_4 = 1.05 \times 10^{-2}$ A	$\sigma_5 = 6.50 \times 10^{14}$ m ² $I_5 = 1.04 \times 10^{-2}$ A	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยของการศึกษาสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงรวมถึงการศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สรุปได้ว่ามีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ปรากฏระนาบ (002) ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ส่วนอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที นั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

จากการศึกษาลักษณะทางผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางไม่สม่ำเสมอ เกรนที่พบมีขนาดเล็กมากในทุกอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้าและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ส่วนใหญ่มีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ เกรนมีขนาดโตขึ้นจาก 28.2 เป็น 55.8 นาโนเมตร เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มจาก 1 เป็น 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที รวมทั้งเกรนมีขนาดสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ยกเว้นอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่ามีกลุ่มอนุภาค (cluster) ปกคลุมอยู่เต็มผิวหน้าของฟิล์ม

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถที่จะคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์เตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจนออกซิเจน 1, 3, 5, 7 และ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.28, 3.30, 3.32, 3.26 และ 3.24 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีตามลำดับ

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์เตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจาก 28.30 โอห์ม.เซนติเมตร จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.11×10^{-3} โอห์ม.เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 5 ลูกบาศก์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร จากนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.20×10^{-2} โอห์ม.เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-200 เคลวิน พลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้จากกราฟ $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซึ่งคือออกไซด์ที่เตรียมด้วยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรจากการทดลองพบว่ามีค่าประมาณ 1.48, 1.73, 2.77 และ 5.52 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับซึ่งพบว่าพลังงานกระตุ้นนี้มีค่าต่ำมาก ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต้อง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้ จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง

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

แต่จากการคำนวณพบว่า E_{NNH} มีค่าต่ำ ดังนั้น กลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันจึงโดดเด่นกว่ากลไกการทรานซิชันจากระดับผู้ให้ไปยังแถบนำ สำหรับในช่วงอุณหภูมิ 210-100 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ถึงความสัมพันธ์

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

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 100-35 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และ ช่องว่างของคูลอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เราทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์โดยวิธีรีเอคทีซีเอ็มเอ็นีตรอนสปีดเตอริง
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในทางการศึกษาทฤษฎีและเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ควรระวังอย่าให้ผิวหน้าของกระจกสไลด์เป็นรอย มีคราบไขมัน เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ควรทำความสะอาดเครื่องสปีดเตอริงทุกครั้งก่อนการใช้งานและหลังการใช้งานด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. การวัดค่าสมบัติต่างๆได้ฟิล์มบาง ควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบางให้อยู่ในสภาพที่ดี หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กมลวรรณ สุทธิเจริญ และ จารุวรรณ มีนาง. 2558. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยตาแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เฉลิมพล รุจดาวงค์, บุศรา นรารักษ์ และเบญจวรรณ ใจสว่าง. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงบางชนิด.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณที่สูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีสเปคโตรริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธ พันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมี ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิจพันธ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปาฏิหารีย์ สมตน และ เมธิชา ยาวีไชย. 2559. “การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่ออวิวิจพันธ์ p-Cu₂O/n-Si.” โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรหมพร ช่อมัยศิริ และ สุธินี สุรเกษมสวัสดิ์. 2558. “การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.” โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มนตรี หาญไก่อย. 2559. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.”โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุเมธี หงษา. 2559. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe(0 ≤ X ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุรสิงห์ ไชยคุณ, นรินทร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา, 2545. “การออกแบบและสร้างอินบาลานซ์ แมกนีตรอนคาโทดสำหรับระบบสปัตเตอริง.” รายงานวิจัยเสนอต่อกองทุนต้นตราบารณ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี.

- Alizadeh, M. Mehdipour, H. Ganesh, V. Ameer, A.N. Goh, R.T. Shuhaimi, A. Rahman, S.A. "Plasma-Assisted Hot Filament Chemical Vapor Deposition of AlN Thin Films on ZnO Buffer Layer:Toward Highly C-axis-Oriented, Uniform, Insulative Films." *Appl. Phys. A* 2014:1-8.
- Bhosle, V. Tiwari, A. Narayan, J.2006 "Electical Properties of Transport and Conductivity Ga Dopant ZnO" *J. Appl. Phys.* 100: 033713-1-033713-6
- Boyadjiev, S.I. Geogjeva, V. Yordanov, R. Raicheva, Z. 2016. "Preparation and Characterization of ALD Deposited ZnO Thin Films Studied for Gas Sensors" *Appl. Surf. Sci.* 387:1230-1235.
- Cullity, B.D. 1956, *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley.
- Guo, L. Zhao, M. Zhuang, D.M. Cao, M. Ougang, L. Li, X. 2015. "Influences of CuO Phase on Electrical and Optical Performance of Cu₂O Films Prepared by Middle Frequency Magnetron Sputtering." *Applied Surface Science* 359: 36-40.
- Gobbiner, C.R. Veedu, M.A.A. Kekude, D. 2016. "Influence of Oxygen Flow rate on the Structural, Optical and Electrical Properties of ZnO Films Grown by DC Magnetron Sputtering." *Appl. Phys. A.* 2016(122):1-9.
- Herranz, G. Sanchez, F. Martinez, B. Fontcuberta, J. Garcia-Cuenca, M.V. Ferrater, C. 2004. "Weak Localization Effects in Some Metallic Perovskites." *Eur. Phys. J.* 40:439-444.
- Nistor, M. Gherendi, F. Mandache, N.B. Hebert, C. Perriere, J. Seiler, W. 2009. "Metal-Semiconductor Transition in Epitaxial ZnO Thin Films" *106: 103710-1-103710-7.*
- Saravannan, L. Diwakar, S. Mohankumar, R. Pandurangan, A. Jayavel, R. 2011. "Synthesis, Structural and Optical Properties of PVP Encapsulated CdS Nanoparticles." *Intech Open Access.* 2(1):42-48.
- Shah, A.H. Manikahdan, E. Ahmed, M.B. Ganesan, V. 2013. "Enhanced Bioactivity of Ag/ZnO Nanorods-A Comparative Antibacterial Study." *Nanomedicine & Nanotechnology.* 4(3):1-6.
- Sharma, G.D. Manmeeta, Saxena, D. Roy, M.S. 2001. "Investigation of Schottky Barrier of Poly (phenyl azo methane thiophene) using Current-Voltage and Impedance Spectroscopy." *Materials Science and Engineering.* 79 :146-153.
- Singh, D. Singh, S. Kumar, U. Srinivasa, R.S. Major, S.S. 2014. "Transaparent Conducting Ga-Doped Zn and GaAs." *Thin Solid Films.* 555: 126-130.

Yao H. F., L. Lutkenhaus, J. Kotaki, M. Sure, H.J. 2015. "High-Performance Photo Catalyst Based on Nanosized ZnO-Reduced Graphene Oxide Hybrid for Removal of Rhodamine B under Visible Light Irradiation." *ALMS Materials Science*. 3(4):1410-1425.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของสารประกอบ ZnO

Pattern : 79-207		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated				
Zn O Zinc Oxide		2th 31.699 34.382 36.182 47.459 56.463 62.760 66.216 67.805 68.924 72.472 76.786 81.258 89.415	J 57 42 100 21 29 25 4 20 10 2 3 2 1 6	h 1 0 1 1 1 0 2 1 2 0 2 1 2	k 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0	l 0 2 1 2 0 3 0 2 1 2 4 4 3	
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.25682 c = 5.21251 Z = 2	Mol. weight = 81.38 Volume [CD] = 47.88 Dx = 5.645 l/lor = 5.26						
ICSD COLLECTION CODE : 065121 TEMPERATURE FACTOR : ATF REMARKS FROM ICSD : REM TEM 600.							
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 45, page 34, (1989) : Albertsson, J., Abrahams, S.C., Kvick, A.							
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060	Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวทิพย์มณี รักปลื้ม
วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2538
ภูมิลำเนา จังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา ระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านตรมไพร จังหวัดสุรินทร์
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนศิขรภูมิพิสัย จังหวัดสุรินทร์
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ชื่อ - นามสกุล นางสาวนิษฐา แสงจันทร์
วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2539
ภูมิลำเนา จังหวัดนนทบุรี
ประวัติการศึกษา ระดับประถมศึกษา โรงเรียนพระตำหนักสวนกุหลาบ
จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีนนทบุรี
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ ๒๙ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

ข้าพเจ้า นางสาวทิพย์มณี รักปลื้ม

รหัสประจำตัว 57050974

นางสาวธนัชฐา แสงจันทร์

รหัสประจำตัว 57050979

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยวิธีสปัตเตอริงด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

ชื่อภาษาอังกฤษ Optoelectronic Properties of ZnO Thin Films Prepared By Reactive DC Magnetron Sputtering

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น และได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวินิจฉัย..... 4.7๙% หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ ทิพย์มณี รักปลื้ม ลงชื่อ ธนัชฐา แสงจันทร์

(นางสาวทิพย์มณี รักปลื้ม)

(นางสาวธนัชฐา แสงจันทร์)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ ของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ KN

(รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้