

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ
ทีพีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

CHARACTERIZATION OF TIN OXIDE THIN FILMS BY
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอค

ทีฟตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

CHARACTERIZATION OF TIN OXIDE THIN FILMS BY
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



สทว.
215917
2009

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี 30 ต.ค. 2551

42881715

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF TIN OXIDE THIN FILMS BY
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



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

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง
 Characterization of Tin Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering

ชื่อนักศึกษา นายมนตรี หาญโก้ย รหัสนักศึกษา 56051191

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง
ชื่อนักศึกษา	นายมนตรี หาญไก่อัย รหัสนักศึกษา 56051191
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเคลือบบนกระจกใสลด ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 12 – 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลรูไทล์ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มจาก 12 ถึง 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีจากนั้นพีคจะหายไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีซึ่งแสดงถึงความเป็นเฟสอะมอร์ฟัส จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม แสดงให้เห็นว่าเกรนมีขนาดนาโนเมตร ช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลงจาก 3.72 เป็น 3.45 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มจาก 12 เป็น 16 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 3.55 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มเป็น 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที จากค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตรสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางได้ โดยที่ค่าดัชนีหักเหของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เชิงแสงได้ อีกทั้งยังได้วิเคราะห์จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางอิเล็กทรอนิกส์ และสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงอีกด้วย ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อาจมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Characterization of Tin Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering	
Student	Mr. Montree Hankoy	Student ID 56051191
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen	

Abstract

In this special project, SnO₂ thin films were prepared by reactive dc magnetron sputtering method on glass substrate with oxygen flow rate R(O₂) as 12, 13, 14, 15, 16 and 18 sccm. From XRD patterns, the films prepared with R(O₂) of 12-16 sccm exhibited single phase with tetragonal rutile structure. Its peak intensity decreased monotonically with the increase of R(O₂) from 12 to 16 sccm and then disappeared at R(O₂) of 18 sccm attributed to amorphous phase. Nanocrystallite size of the as-grown films was observed by AFM. The energy gap initially decreased from 3.72 to 3.45 eV with an increase in R(O₂) up to 16 sccm and then increased to 3.55 eV with an increase in R(O₂) of 18 sccm. The optical constants of the films were determined using the interference maxima and minima of the transmission spectra in the range 300 to 900 nm. The dispersion of refractive index was discussed in terms of the single oscillator model and the important oscillating parameters were determined. The real and imaginary parts of the electronic dielectric constants and optical conductivity were analyzed. Electrical properties were carried out by Hall effect measurements with van der Pauw configuration. These parameters can be useful for optoelectronic application.

Keywords : SnO₂ thin films, Reactive dc magnetron sputtering, XRD, Single oscillator model, Optical parameters.

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรม การจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้ เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟ โตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้ โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะ ทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมา

มนตรี หาญโก๋ย

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	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก	7
2.2 สมบัติพื้นฐานของดีบุกออกไซด์	9
2.2.1 ข้อบกพร่องผลึก	11
2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	12
2.2.1.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	12
2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	14
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	17
2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	17
2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.5.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน	20
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	21
2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า	22
2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	23
2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพอร์	24
2.6.3.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.6.4 ปραกฏการฮอลล์	27
2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	33
2.7 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสง	35
2.7.1 ย่านโปร่งแสง	39
2.7.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง	40
2.7.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง	43
2.7.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข	43
2.8 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เตอร์เชิงเดี่ยว	44
2.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี	52
2.9.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์	52
2.10 พูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	57
2.11 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี	57
2.12 หลักการสปีดเตอริง	58
2.12.1 โกล์ดิสซาร์จ	58
2.12.1.1 สปีดเตอริง	60
2.12.2.1 ยีลด์การสปีดเตอริง	60
2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง	62
2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	62
2.12.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสซาร์จ	66
2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	66
2.13.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	67
2.13.2 การให้ความเย็นที่เป้า	67
2.13.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะผิวเป้า	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	69
2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา	72
2.14.1 หัววัดลางมัวร์	72
2.14.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	72
2.14.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	74
2.14.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา	75
2.14.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	75
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	76
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	79
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	79
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	79
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้	80
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	80
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของ ฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	80
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของ ฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)	81
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตร โฟโตมิเตอร์	81
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	82
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง	82
3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	82
3.1.3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำ	83
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ SnO ₂ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	83
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	84
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลดิสซาร์จ	91
4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	97
4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	100
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	100
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	102
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	104
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	104
4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	110
4.5 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.1 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองแก้วกระจกสไลด์โดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	117
4.5.2 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	122
4.6 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	126
4.6.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	126
4.6.2 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	130
4.6.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	137
4.7 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	145
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	151
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	155
5.3 ข้อเสนอแนะ	155
เอกสารอ้างอิง	156
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
2.4 แสดงสมบัติของสารประกอบ SnO และ SnO ₂	10
2.5 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดของธาตุชนิดต่างๆ	61
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	94
4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	98
4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับแก้วกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	101
4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnO ₂ ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	103
4.5 แสดงค่าแถบพลังงาน (E _g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	108
4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	112
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	121
4.8 แสดงค่าความต้านทาน ความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	129
4.9 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน(NNH)ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที	144
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอดด์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	144
4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอปสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	144
4.13 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที	149
4.14 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงเส้นดื้อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	4
2.2	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลของ SnO ₂	10
2.4	เฟสไดอะแกรมของ Sn-O	11
2.5	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	13
2.6	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	13
2.7	แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	14
2.8	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.9	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.10	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	17
2.11	แสดงส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	20
2.12	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	23
2.13	แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	24
2.14	แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	25
2.15	การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.16	การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	27
2.17	แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	29
2.18	แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	33
2.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้	34
2.20	แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางโปร่งแสง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงรีฟราวการแทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\alpha\text{-Si} : \text{H}$ ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	37
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF	47
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	48
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS	48
2.25 โครงสร้างของการโกลด์ดิซซาร์จ	59
2.26 การเกิดสปีตเตอร์ริงที่ผิวเข้า	60
2.27 การสปีตเตอร์ริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีตเตอร์ริง	62
2.28 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	64
2.29 ความต่างศักย์ของการดิซซาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในข้ออิเล็กโทรโคแอกเซียวทรงกระบอก	66
2.30 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	70
2.31 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	71
2.32 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	71
2.33 หัววัดเดี่ยวกลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	72
2.34 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	73
2.35 a.) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือ b.) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยอะตอมทองแดง c.) ขนาดของเกรนและค่า FWHM d.) อัตราการเกิดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือด้วยอะตอมทองแดง	77
2.36 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและทำการเจือด้วยอะตอมทองแดงโดยใช้ AFM ในการตรวจสอบ	77
2.37 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมทองแดงต่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่แตกต่างกัน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.38 การศึกษาการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งค้ออกซ์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมทองแดงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer และค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซึ่งค้ออกซ์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมทองแดง	78
3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	80
3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	80
3.3 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม (AFM)	81
3.4 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α)	81
3.5 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	82
3.6 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	82
3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	83
3.8 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	83
3.9 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	84
3.10 ก. ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า ข. ภาพแสดงคั่นบังคับ Shutter ที่อยู่ใน	85
3.11 ก. ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มฟิวส์กระจาย) ข. ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	86
3.12 ก. ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open ข. ภาพแสดง speedy valve	86
3.13 ก. ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ ข. ภาพแสดง power supply	87
3.14 ก. ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply ข. ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	88
3.15 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก	88
3.16 ก. ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด ข. ภาพแสดงท่อก๊าซอาร์กอนและท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	90
4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาทิ ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ ตามลำดับ	92
4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน เข้าห้องสุญญากาศ	93
4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ ออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทิจำห้องสุญญากาศ	97
4.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหล ของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทิจำ	99
4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาทิจำ	100
4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	102
4.7 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน ค่าต่างๆ	104
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทิจำ	104
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทิจำ	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง (α_{hu}) ² กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	105
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง (α_{hu}) ² กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง (α_{hu}) ² กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง (α_{hu}) ² กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง (α_{hu}) ² กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	108
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) , band tails (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	109
4.17 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์(FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีในช่วงความยาวคลื่น 4000-800 cm^{-1}	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาทีในช่วงความยาวคลื่น $800-400\text{ cm}^{-1}$	111
4.19 แสดงหน้าตัดของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	114
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	115
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	116
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	117
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า (n^2-k^2) กับ λ^2 ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	120
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	122
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	123
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	125
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	126
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	127
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	128
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	130
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	136
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln\sigma T$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	137
4.48 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโด (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี	143
4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	145
4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	146
4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	147
4.52 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโลซ์ชาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตร	148

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ พลังงานทดแทนได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น เพราะพลังงานหลัก คือน้ำมัน เริ่มมีปริมาณน้อยลง มีทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์นี้ได้รับความสนใจมากในการศึกษาและพัฒนา เพราะว่า เป็นพลังงานประเภทหมุนเวียน ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เมื่อเรานำมาใช้งาน แต่สิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูงและมีเปอร์เซ็นต์การแปลงพลังงานไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อยจึงเป็นที่สนใจในการศึกษาและพัฒนาเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ถูกลงและทำให้พลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะ คือ สามารถเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานโฟตอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาตกกระทบ จะทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) (งามนิตย์,2543; Kittel, 1971)

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุออกซิเจนที่แตกต่างกัน จัดเป็นฟิล์มบางตัวนำออกไซด์โปร่งแสง (TCO) ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น การพาไอระเหยสารเคมี (CVD), สเปตเตอริง (sputtering), กระบวนการโซลเจล (sol-gel) และการพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) เป็นต้น โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุก ศักยภาพในการประดิษฐ์เป็น กระจกสะท้อนความร้อน (heat mirrors) หรือ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting electrode) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ $\text{SnO}_2 / \text{CdS} / \text{CuInGaSe}_2$ ให้มีประสิทธิภาพ ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงราว 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ดีควรมีความต้านทานที่ต่ำ และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็นมีค่าที่สูง

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเชิงมหภาค ปรากฏการณ์ฮอลล์ คุณสมบัติทางแสง และผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 12-16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์โดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโตรสโกปี
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ จะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุออกซิเจนที่มีค่าแตกต่างกันที่เตรียมไว้ได้ และสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์และโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-330 เคลวิน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
2. ทำการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์
4. นำฟิล์มบางไปถ่ายภาพลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
5. ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. วิเคราะห์และสรุปผล
8. เขียนรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เราทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในทางการศึกษาทฤษฎีและเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้า โปร่งแสงดีบุกออกไซด์ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

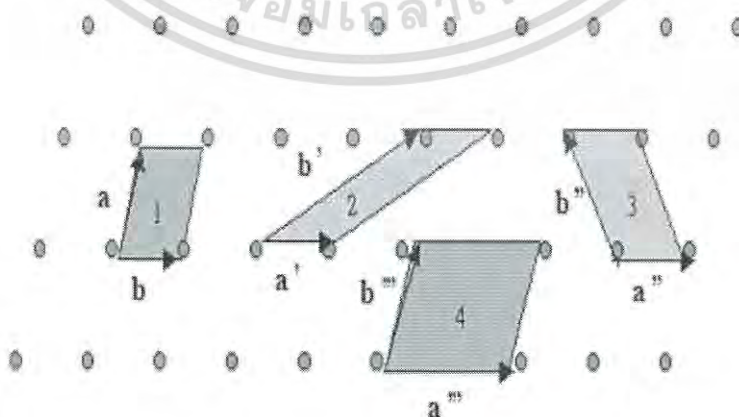
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

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


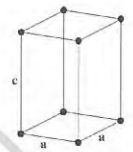
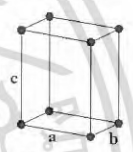
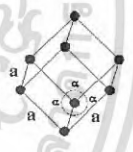
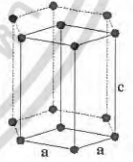

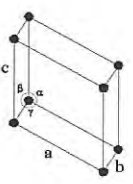
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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), โรมโบฮีดรัล (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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึง ตำแหน่ง ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

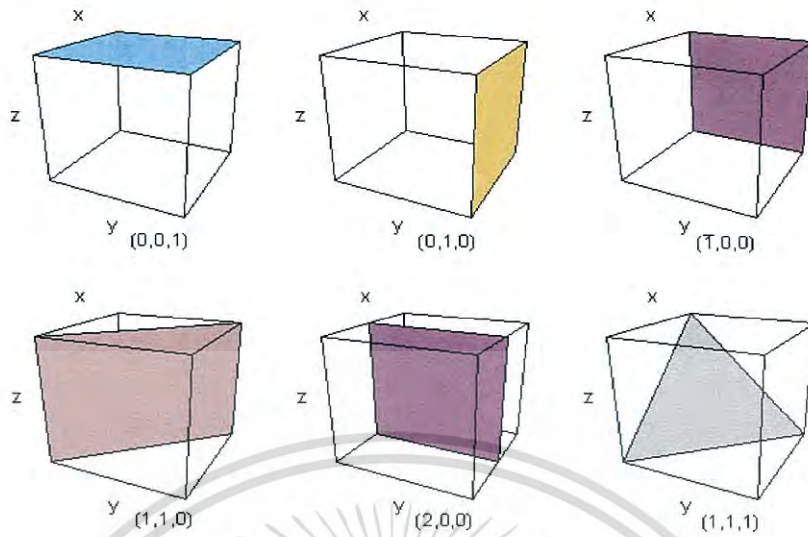
หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

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 อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบ หรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
 - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
 - 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
 - 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัด

แกนอ้างอิง



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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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) ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่า สปัตเตอร์ริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

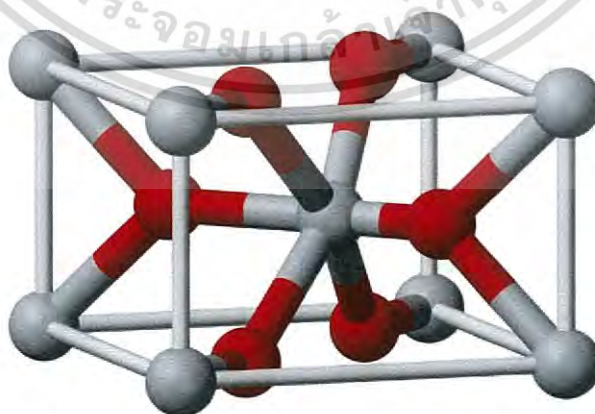
2.2 สมบัติพื้นฐานของดีบุกออกไซด์ (Samsonov G. V.,1973; Cooper D. G.,1968; งามนิത്യและคณะ,2549;อุปถัมถัม,2548;Winter M.,2004;Cahen S.และคณะ,2003)

ดีบุก Sn เป็นธาตุในหมู่ที่ 4 ของตารางธาตุสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นดีบุกไอออน (Sn^{2+} , Sn^{4+}) และรวมตัวกับสารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจนหรือคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบชั้นซึ่งมีชื่อเรียกต่างกันตามประจุของดีบุก คือ สารประกอบของ Sn^{2+} เรียกว่าสารประกอบสแตนเนียส (stannous compound) ส่วนสารประกอบ Sn^{4+} เรียกว่าสารประกอบสแตนนิก (stannic compound) สารประกอบทั้งสองจะมีสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4

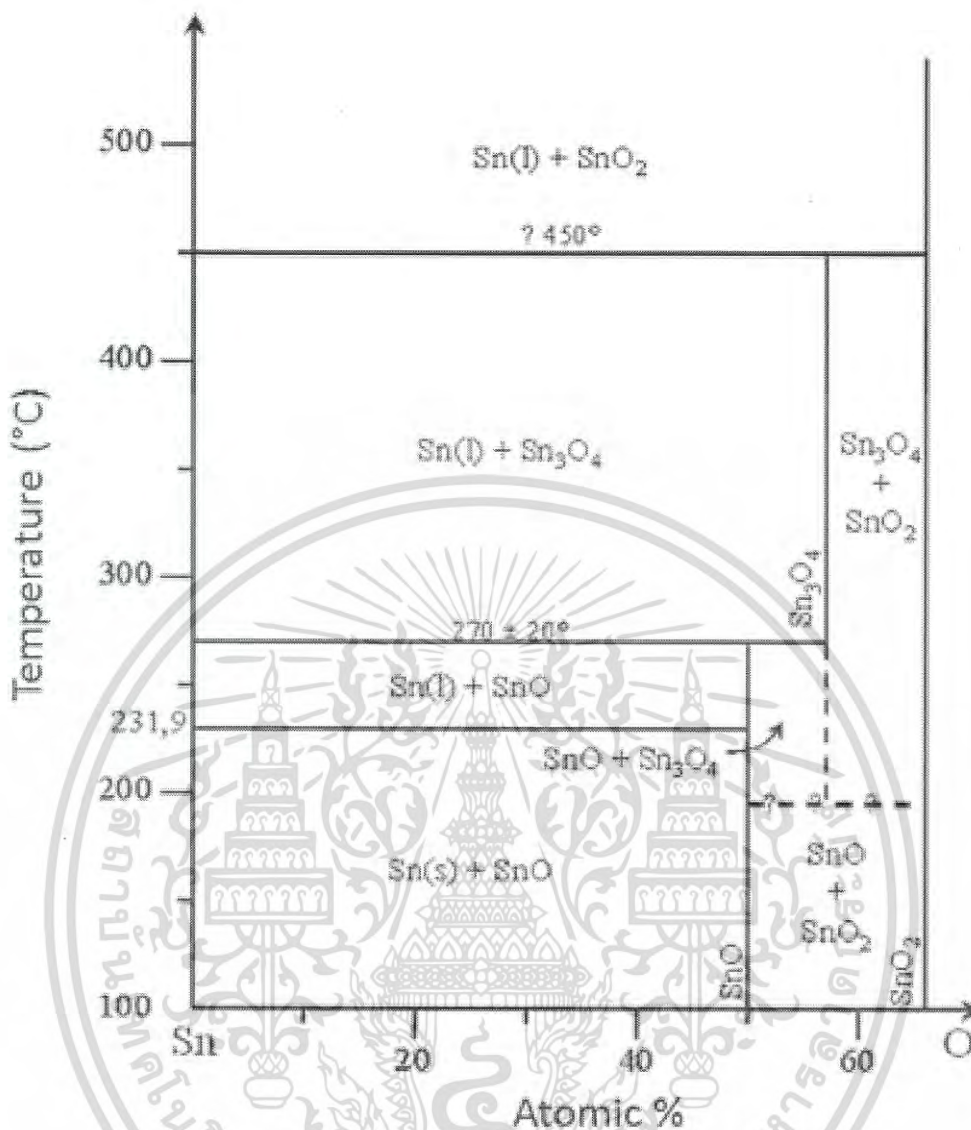
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของสารประกอบ SnO และ SnO₂

สมบัติของสาร	Sn	SnO ₂
มวลโมเลกุล (g/mol)	1.384.6894	150.6888
โครงสร้าง	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
ความหนาแน่น ($\times 10^3$ kg/cm ³)	6.45	6.55
สถานะ	ของแข็ง	ของแข็ง
สี	ดำ	ใส
จุดเดือด (°C)	1,527	2,000
จุดหลอมเหลว (°C)	1,042	1,625
พลังงานที่ใช้ในการเกิดสารประกอบ ($\times 10^6$ J/kg·mol)	257.488	520.000
สภาพต้านทานไฟฟ้า	-	4×10^6 (20°C) 60 (1200°C)

ดีบุกออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลรูไทด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือประกอบด้วย Sn 2 อะตอม และ O 4 อะตอมโดยมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบบเตตระฮีดรอน นอกจากนี้ยังมีเฟสไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลของ SnO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของ Sn-O

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

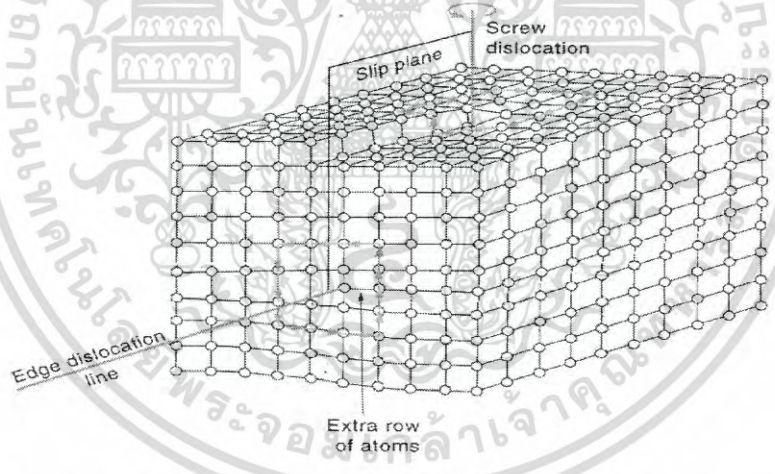
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (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 ซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชัน อาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และ ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็น สามกลุ่มใหญ่ๆ คือ การเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (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 ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบบดิ่งสมก

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

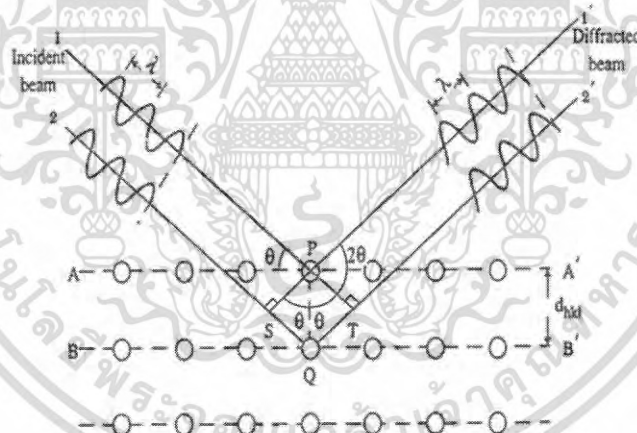
เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบบ

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

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



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

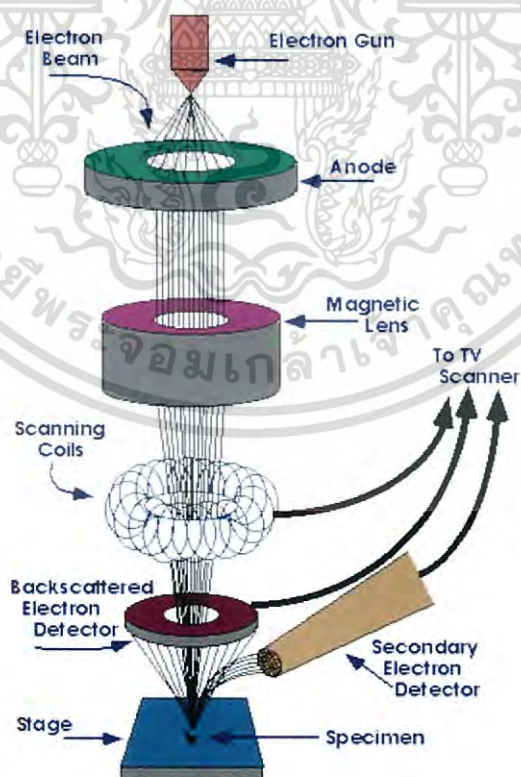
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.9 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

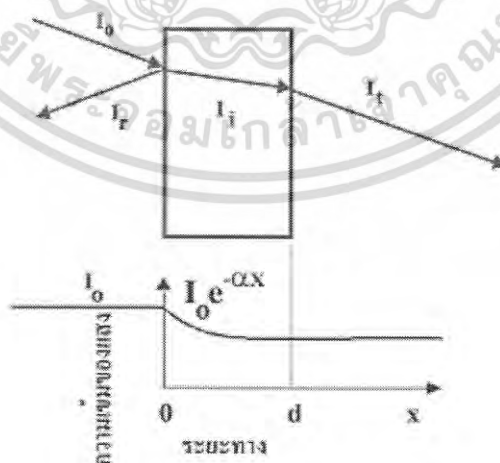
ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section ผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่าง เช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

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

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

2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวีวัตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

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

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่

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

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

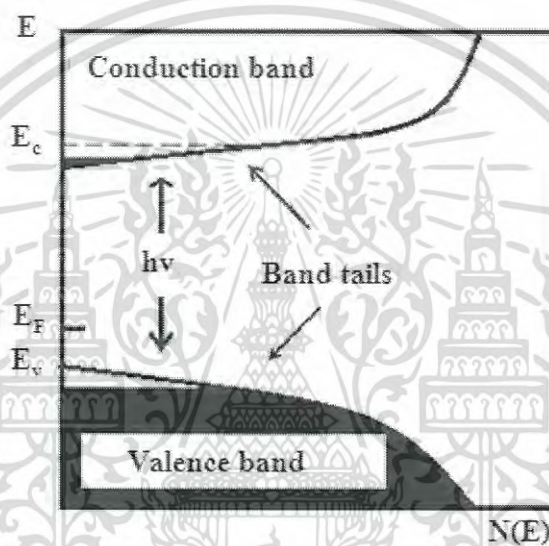
$$n_c = n - iK \quad (2.10)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนจริง
	K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)
	โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 2.11 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่ง 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 (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะเข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดสุ่มรวม

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

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่ มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

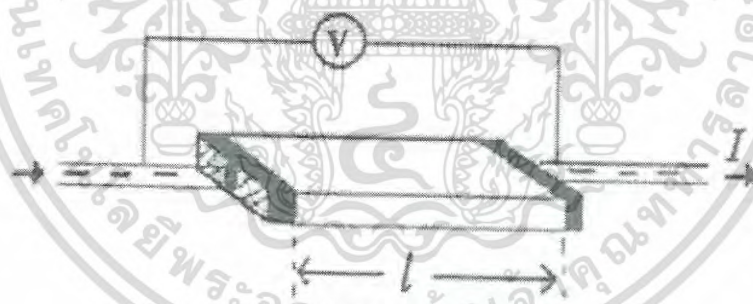
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

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 2.12 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

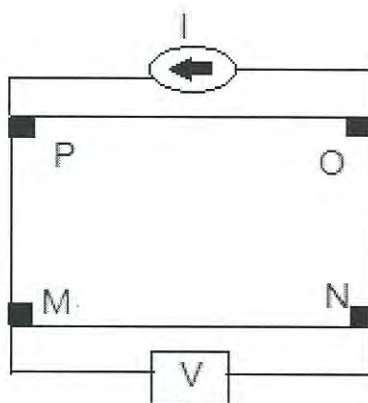
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย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

2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.14 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 แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

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

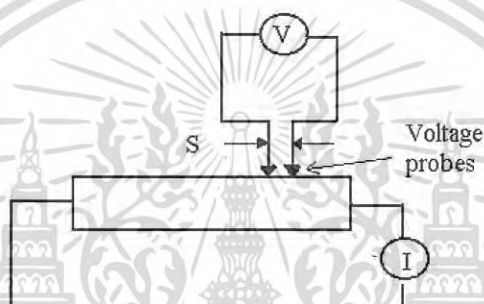
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

2.6.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.15 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

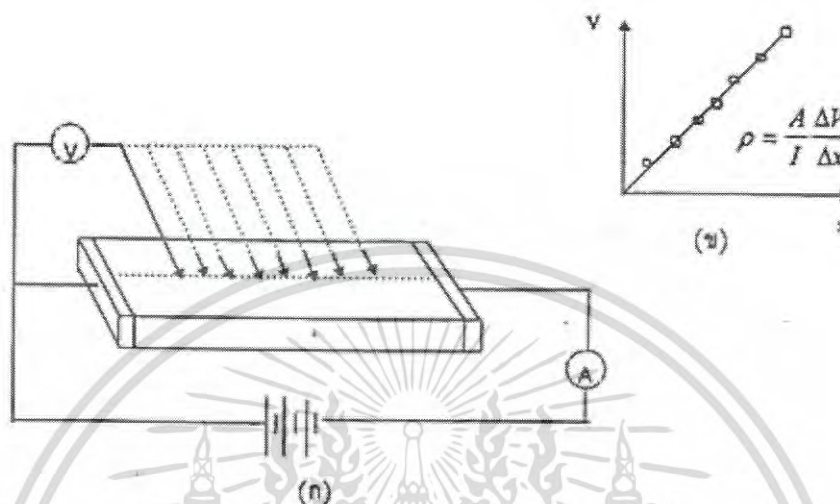


รูปที่ 2.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเลขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร 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 การวัดควรใช้วิธีตรงขั้วหนึ่งไว้ และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ความชันที่จะได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.16 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 และสภาพคล่องของพาหะจะสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

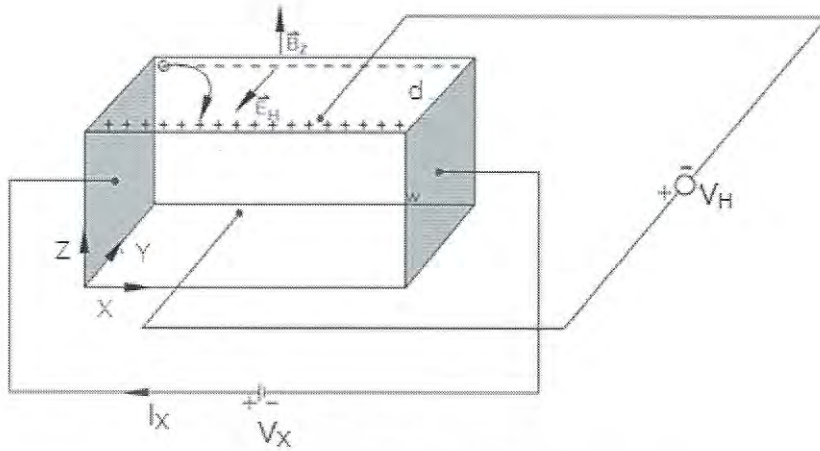
ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 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)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สละสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) 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

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

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึก หรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์ แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ 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 เพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะ ที่คำนวณจาก ปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

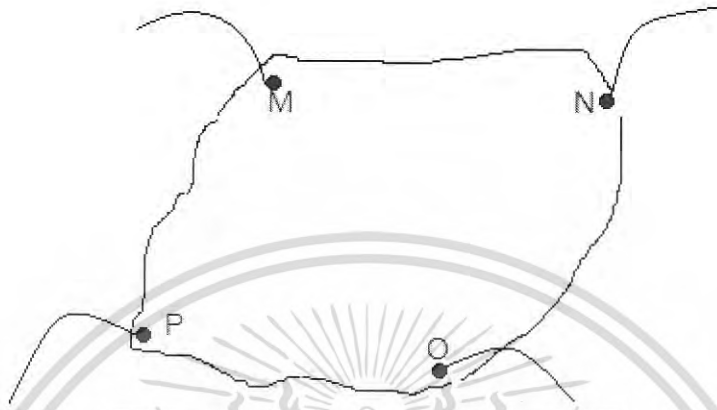
เทคนิคนี้ได้รับแวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพจน์ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.18 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว 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

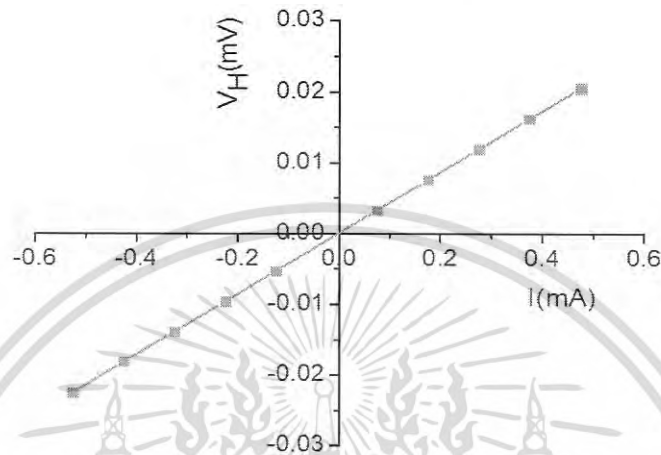
d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.51) จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

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

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

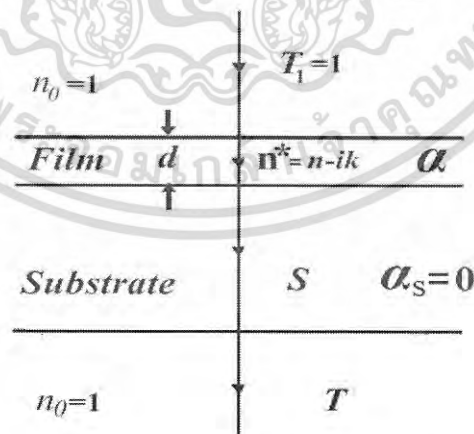
ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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) จะต้องพิจารณาการสะท้อนแสงทวีคูณ (multiple reflections) ที่รอยต่อ (ดังรูปที่ 2.20) จำนวน 3 รอยต่อ

ถ้าฟิล์มบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือความหนาไม่ลักษณะลาดชัน ลักษณะรีวการแทรกสอดของที่ส่งผ่านฟิล์มบางจะหายไป ดังนั้นจะเห็นเพียงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เป็นเส้นกราฟที่เรียงดังแสดงด้วยเส้นโค้ง T_α ของรูปที่ 2.21 จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่โปร่งแสง ค่า $\alpha = 0$ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะขึ้นกับ n และ s โดยจะต้องมีการสะท้อนแสงทวีคูณเกิดขึ้น สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบาง α มีค่าน้อยและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะเริ่มมีค่าลดลง ส่วนบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงปานกลาง α จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงเนื่องจากผลของ α นี้ และบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างมากด้วยอิทธิพลของ α ดังกล่าว เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียก T_α มักจะถูกนำไปใช้หาค่า $\alpha(\lambda)$ ในช่วงแสงตามองเห็นได้ และช่วงอินฟราเรดเสมอ



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (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 $R_s = \left\{ \frac{(s-1)}{(s+1)} \right\}^2 \quad (2.56)$

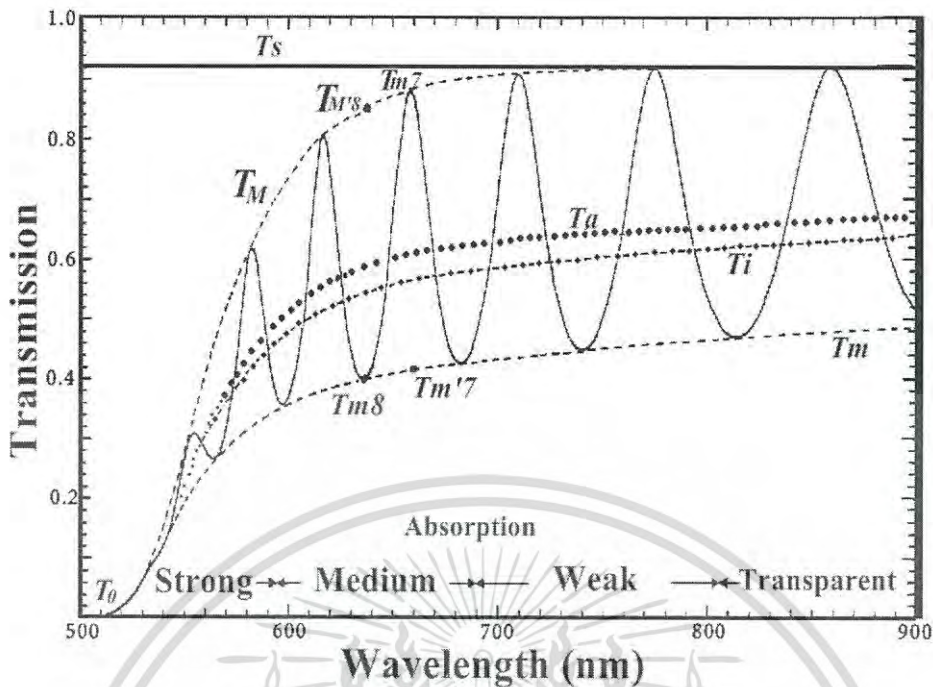
หรือ $T_s = \frac{2s}{s^2+1}$

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 2.21 แสดงรีฟลักซ์การแทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ α -Si:H ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส

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

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

เมื่อ $A' = 16s(n^2 + k^2)$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

ในกรณีที่แผ่นฐานรองรับมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มบางมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฐานรองรับมีความหนาเป็นอนันต์) แล้ว T จะกลายเป็น

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

เมื่อ

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

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

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

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

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (x) ของรูปที่ 2.20 สามารถเขียนอยู่ในพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นเส้นโค้งเรียบ ($T\alpha$) ดังนี้คือ

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

เมื่อ $Q = 2T_a(R_1R_2 + R_1R_3 - 2R_1R_2R_3)$

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อ $A = 16n^2s$ (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) อีกทั้ง 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)

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) ของการดุดกคลื่นแสงเริ่มปรากฏขึ้นแล้วดังนั้นค่า 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 ย่านที่มีการดุดกคลื่นแสงเบาบางและปานกลาง

ในบริเวณที่มีการดุดกคลื่นแสงเบาบางนี้ $\alpha \neq 0$ 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) ก็จะได้ทันที และค่า x สามารถคำนวณหาได้จากหลายวิธี สมการที่ (2.63) และ (2.64) เป็นสมการยกกำลังสอง (quadratic function) ของตัวแปร x จากการแก้สมการที่ (2.63) จะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ของรีวกการแทรกสอดของรูปที่ 2.21 เส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียก T_α สามารถที่จะคำนวณหาได้จากรีวกการแทรกสอดของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
$$H = \frac{4s^2}{(s^2 + 1)T\alpha^2} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

มานิฟายเซอร์และผู้ร่วมงานได้ทำการคำนวณหาค่า 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง รั้วการแทรกสอดจะไม่ปรากฏให้เห็น ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า n และ x จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงแต่เพียงอย่างเดียวได้ ค่า n ของบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรงนี้สามารถประมาณได้จากการลากส่วนต่อจากบริเวณอื่น เช่น จากบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง เป็นต้น 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 ค่าดัชนีหักเหจะเขียนในรูปของสมการคอชี (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 ต่อนานาโนเมตร

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 เป็นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ตามลำดับ จากสมการที่(2.57)จะได้ว่าความหนาของฟิล์มบางคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าสำหรับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตร จะเป็นเส้นโค้งเรียบแผ่นฐานรองรับเป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่มีความหนาในราว 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงประมาณว่า ความหนาของแผ่นรองรับเป็นอนันต์แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการที่ (2.59) ส่วน α จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า x 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) สำหรับในวัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่านโปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ ω_c 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) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลูอินโซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีแนวโน้มคลุมเคลือขึ้นกับรายละเอียดของการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายังวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิคเทิน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน์ (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อนิยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap; E_g) ในขณะที่ เวมเพิล-ไดโตเมนนิโค ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา (time dependent perturbation theory) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

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 โดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาถึงความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสงเช่นในย่านที่มีความถี่ในช่วง $\omega < \omega_{ij}$

เพนนี (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยการใช้แบบจำลอง 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกันโดยที่ยังคงรักษาพจน์ ω^2 จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยวมีค่าดังนี้คือ

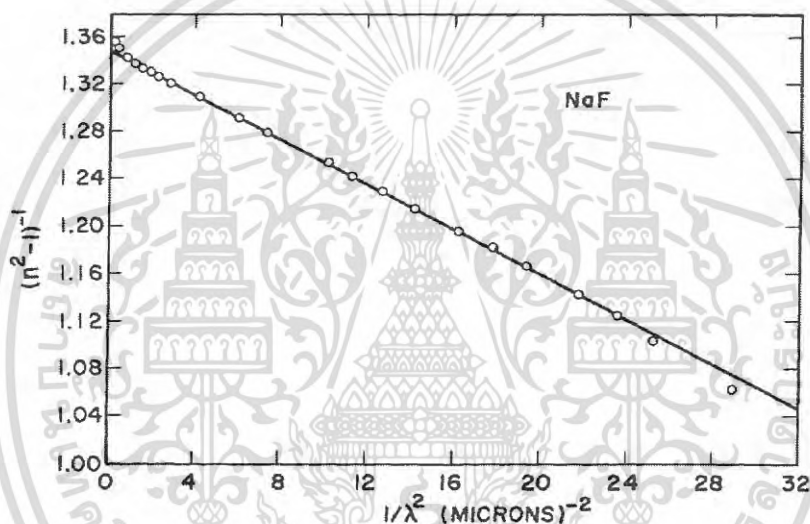
$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.91)$$

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) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์ E_0 และ F ที่ได้จากผลการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆได้หรือไม่ แวมเพิล-ไดโตนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนซ์ของสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะอีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $E_d = F/E_0$ ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.91) สามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

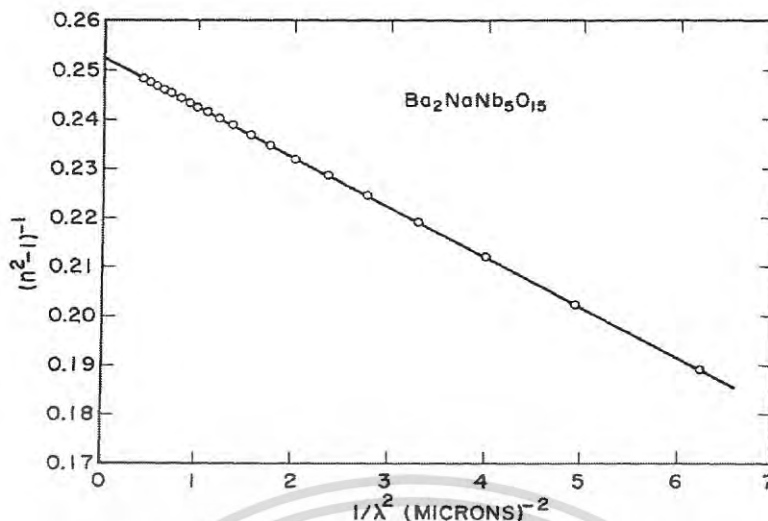
$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_0}{E_0^2 - (\hbar\omega)^2} \quad (2.92)$$

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, Ba₂NaNb₅O₁₅ และ CdS จะแสดงดังรูป 2.22-2.14 ที่ความยาวคลื่นยาว (long wavelength) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของแลตทิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับกรณีที่ความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ดังปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS



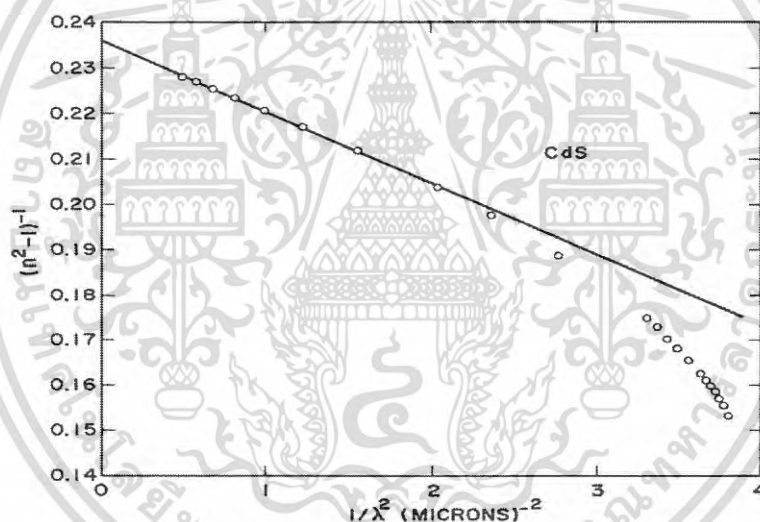
รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

$Ba_2NaNb_5O_{15}$



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างค่าพารามิเตอร์ E_0 กับ E_d ของออสซิลเลเตอร์เดียวกับสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้จากสมการที่ (2.82) กับสมการที่ (2.83) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่ r ของค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวแสงดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_1}^{\infty} E^r \varepsilon_2(E) dE \quad (2.93)$$

เมื่อ $E \equiv \hbar\omega$ ส่วน E_1 คือค่าพลังงานจุดคลื่นแสงขีดเริ่ม ค่าพารามิเตอร์ E_0 และ E_d จะสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสงดังนี้คือ

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

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 การให้น้ำหนักแก่ค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\varepsilon_2(\omega)$ 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} (ดังสมการที่ (2.97)) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา M_1 แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้ M_{-1}/M_{-3} เพื่ออธิบายความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ que แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ 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) อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมจะโพลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนแกนกลาง (ion core) โดยประมาณว่าทุกๆ อะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลเตอร์ชนิดเดียวกันที่เพียงพอกจากแบบจำลองของเวมเพิลและไดโดเมนนิโค (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) ซึ่งกรณีจึงค์เบแลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสเปกโทรสโกปี (dielectric spectroscopy)

2.9.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model)

อิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตริกจะยึดเหนี่ยวด้วยแรงคูลอมบ์อยู่กับไอออนคอร์ (ion core) ของแลตทิซ (lattice) เมื่อสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 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 คือค่านิจของสปริง

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

m คือมวลของอิเล็กตรอน

สมการคำตอบของค่าการกระจัดของออสซิลเลเตอร์ จะแสดงดังความสัมพันธ์

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

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ค่าโพลาริเซชันของ ออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว 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

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

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

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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

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

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

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

จำนวนเชิงซ้อนของค่าดัชนีหักเห (n^*) จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

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

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

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

เมื่อ n และ k คือ ค่าดัชนีหักเห และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวกลาง สำหรับในกลศาสตร์แผนเดิม ω_0 คือ ค่าความถี่กำหนดของออสซิลเลเตอร์ที่กวัดแกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหนึ่งตัวแต่สำหรับกลศาสตร์ควอนตัม ω_0 จะสอดคล้องกับผลต่างของระดับพลังงานตอนสุดท้ายกับระดับพลังงานตอนต้น สำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว (multiple oscillator) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ $\epsilon/\epsilon_0 = 1 + \chi$ ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon^* = 1 + \omega_p^2 \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.131)$$

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.131) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\epsilon^* = 1 + \frac{Nq^2}{m\epsilon_0} \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.133)$$

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

กรณีที่เป็นตัวกลางดิสเพอร์ชัน (dispersion medium) สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ใดๆคือ

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

จะได้สมการของคลื่นระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

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

จำนวนเชิงซ้อนของค่าเลขคลื่น (\tilde{k}) คือ

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

เมื่อเขียน \tilde{k} อยู่ในพจน์ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

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

จากสมการที่ (2.135) กลายเป็น

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

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

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

สมการที่ (2.139) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ $\frac{\omega}{k}$ และค่าดัชนีหักเหของตัวกลางคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวกลางที่เป็นแก๊สแล้ว พจน์ที่สองของสมการที่ (2.134) จะมีค่าน้อย และสามารถประมาณค่ารากที่สองในสมการที่ (2.137) โดยใช้พจน์แรกของการกระจายแบบไบน

เมียล $\sqrt{1+\varepsilon} \cong 1 + \frac{1}{2}\varepsilon$ จะได้ว่า

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

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

ถ้าพิจารณาในช่วงความถี่ที่ต่างจากความถี่กำทอน แล้วการห้วงสามารถตัดทิ้งได้และสูตรในการหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

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

วัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีความถี่ธรรมชาติ ω_j แต่สำหรับวัสดุที่โปร่งแสงแล้วค่าความถี่กำทอนจะอยู่ในย่านความถี่ของคลื่นอัลตราไวโอเล็ตดังนั้น $\omega < \omega_j$ 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

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

หรือในพจน์ของค่าความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ หรือในอากาศ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) (งามนิตย์, 2545;ฐิตินัย, 2549;ฐิตินัย, 2550;งามนิตย์, 2551;ฐิตินัย, 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 ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

2.11 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549;ฐิตินัย, 2550;งามนิตย์, 2551;ฐิตินัย, 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 โกลด์ดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทาง ไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดย อะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็น ไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ไอเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือพลังงานการแตก ตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซี แมกนีตรอนสเปกโตรริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาจาก ผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ไอเล็กตรอนหลุด ออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการ แลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอนและทำ ให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วย อิเล็กตรอนโดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน ของอะตอม ดังสมการ

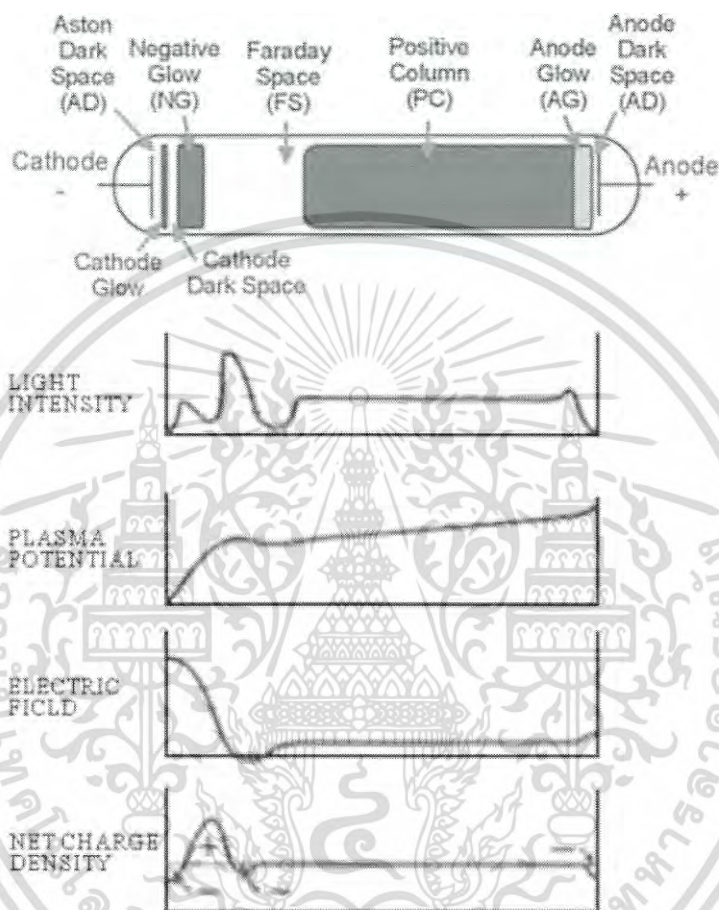
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.144)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิสชาร์จ คือ การเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ดิสชาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้ โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โครงสร้างของการโกลว์ดิสชาร์จ

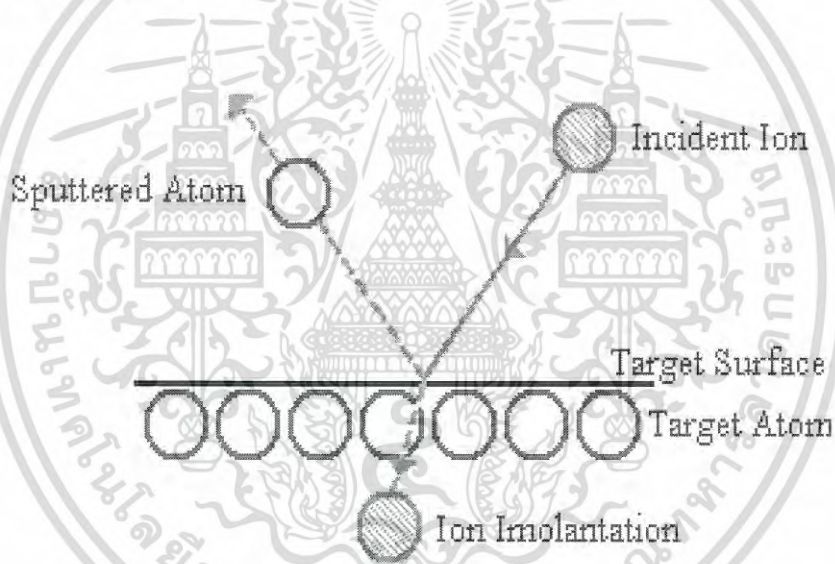
สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกความคุมไปจนถึงซีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งซีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของซีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนจะมีจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆอย่างของโกลด์ดิสชาร์จและให้เห็นในรูปที่ 2.25 (การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า) การเรืองแสงในสถานะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในสถานะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลด์ดิสชาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมีไอในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.12.2 สปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วยเนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในรูปที่ 2.26 (การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า)



รูปที่ 2.26 การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า

2.12.2.1 ยีลด์การสปัตเตอร์ริง (sputtering yields)

ยีลด์การสปัตเตอร์ริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.134 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่หลุดตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกลบสปัตเตอร์ริง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

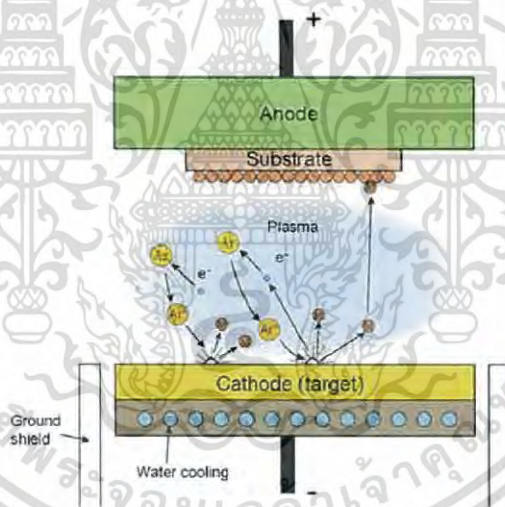
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่า yield ของธาตุชนิดต่างๆ

	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริง จะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนด วางอยู่ในระบบสุญญากาศ ภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโคล์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.27 การสปีดเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปีดเตอริง เกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของของไอออนบวกผิวเป่าดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
 F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่
 จะได้ว่า

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

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

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

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

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

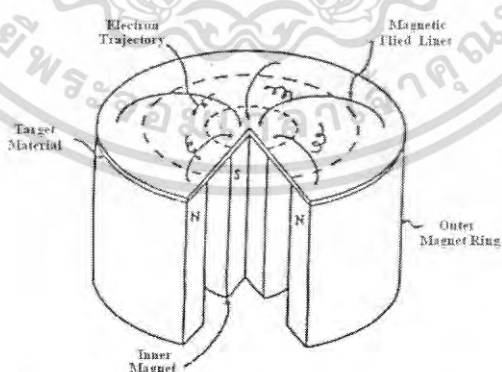
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

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

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

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและ มีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉาก ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในรูปที่ 2.28 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของก๊าซและกระบวนการแตกตัวไปเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะผลทำให้อัตราการสเปกโตรัมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีซีไอโอคสเปกโตรัม ส่งผลให้วิธีซีแมกนีตรอนสเปกโตรัมเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในหลายงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.28 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันและ จากความเร็ว V ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะได้ว่า

$$V = \sqrt{\frac{2|q|V}{m}} \quad (2.163)$$

แทนค่า (2.102) ลงใน (2.98)

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

โดยจะได้ รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

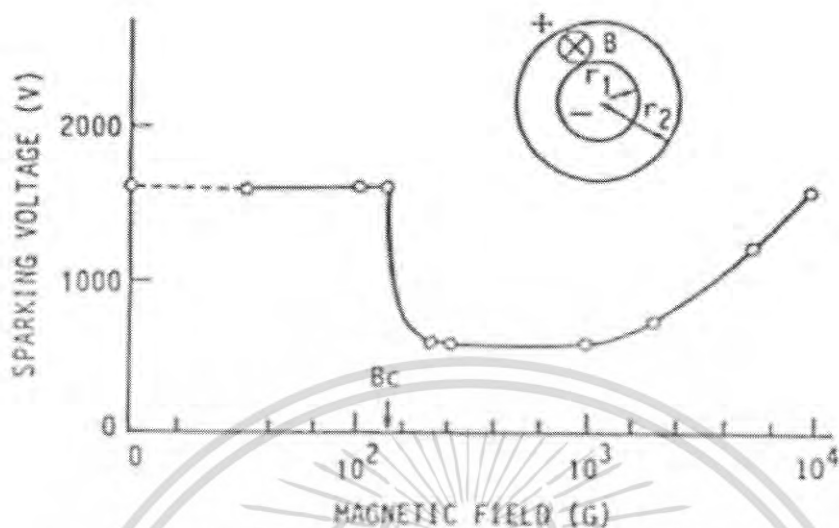
$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.165)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.106

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

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างข้ออิเล็กโทรด
 L คือ ระยะห่างระหว่างข้ออิเล็กโทรด

2.12.2.4. สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิซชาร์จ



รูปที่ 2.29 ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในหัวอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.29 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิซชาร์จที่วัดในหัวอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณหัวคาโทดจะไปถึงหัวแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างหัวอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปัตเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.1. วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

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

2.13.2 การให้ความเย็นที่เป่า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปัตเตอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป่ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป่าและ ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป่าในขณะที่เกิดการสปัตเตอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป่าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป่า และ โอริง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป่าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังการร้าวซึมของน้ำ

2.13.3. การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป่า

บริเวณของเป่าจะถูกล้อมรอบด้วยกำบังบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชิลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชิลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปัตเตอริงเกิดที่เป่าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป่าและตัวยึดเป่าอาจจะถูกสปัตเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความบริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป่าและกราวด์ชิลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ในบางโอกาสพบว่ามีตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งที่สกรุกขึ้นเล็กจะทำให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นของที่คมหรือสิ่งสกรุกเล็กๆต้องกำจัดออกไปเสียก่อนและเนื่องจากความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้นดังนั้นระยะห่างระหว่างเป่ากับกราวด์ชิลด์ควรมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบและภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมืดจะลดลงซึ่งแสดงให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ์
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

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

$$\omega \tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} P V_0^{1/2} \quad (2.168)$$

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

และความหนาของบริเวณมีด จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการ
ดิสชาร์จ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมีดกับความต่างศักย์
ของการดิวชาร์จ์ขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมีดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์มีความสัมพันธ์ ดังแสดงใน
สมการที่ 2.169

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

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

ความหนาของบริเวณมีด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไฮลด์ ซึ่งอยู่ใน
ความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อการขาขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมีดถูกแทนลงในสมการ (2.168) จะได้ความสัมพันธ์

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

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์
 n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบโดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือ แมกนีตรอนแบบสามัญ (conventional magnetron)

2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type 1)

3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงส่วนหนึ่งจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced magnetron type 2)

ในกรณีดีสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับ

อะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิสรจาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้าและจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น พิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำเป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร

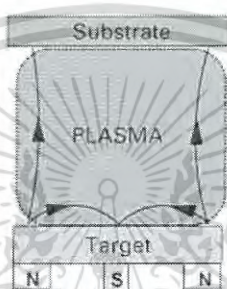


รูปที่ 2.30 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอกในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับจึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยวินโดวส์และซาว์โวด์และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมามีที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบ

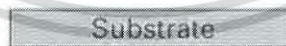
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริงและนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้าและอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คือ อัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ต่ออัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้นและการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเครียดที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเครียดภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1



รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีนี้แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการใช้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา

2.14.1. หัววัดลางมัวร์

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

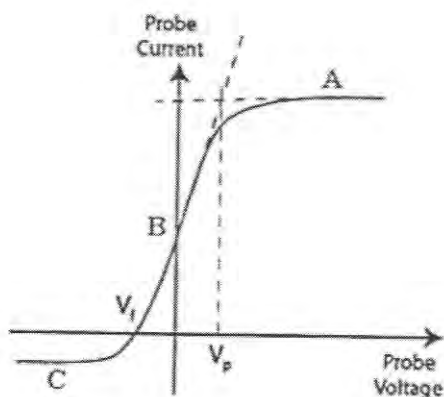
ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินการโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัวที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในรูปที่ 2.33 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาสำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววั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



รูปที่ 2.33 หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

2.14.2. ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยวลางมัวร์วิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาซีท อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

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

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัว (I_{e2})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักรอกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

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

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ล่อง (V_p) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด และจะสร้างพลาสมาซีทขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักรออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านของซีทจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณที่กระแสไอออนอิมิตัว (I_{i2}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออนจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.14.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (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-โบลซ์มานน์ ค่า $n_i = n_e = n$ จะได้ว่า

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

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I=0$)

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

จะได้ว่า

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

หน่วยของ kT_e/e คือโวลต์ ดังนั้นสามารถหา kT_e ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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 เพราะโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิมิต์แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ ที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์จะได้รับผลกระทบน้อยมาก

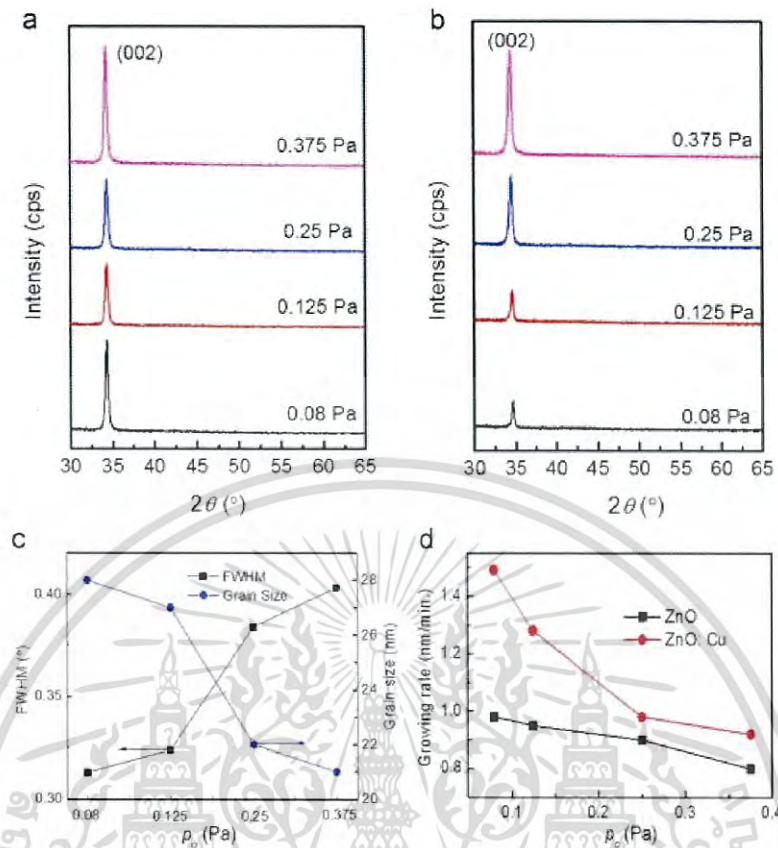
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 2.15.1 การศึกษาผลของความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อโครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยอะตอมของทองแดงซึ่งเตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ร่วมกันระหว่าง RF และ DC
Effects of oxygen partial pressure on the structural and optical properties of undoped and Cu-doped ZnO thin films prepared by magnetron co – sputtering (Liua et al., 2015)

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือและฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยอะตอมทองแดงถูกเคลือบลงบนฐานรองแก้วกระจกสไลด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ร่วมกัน ที่ความดันย่อยของออกซิเจนมีค่าแตกต่างกันซึ่งทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค, ลักษณะพื้นผิว, สภาพต้านทานไฟฟ้า และสมบัติทางแสงอย่างเป็นระบบ ผลปรากฏว่าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่มีค่าต่างๆจะสามารถลดความเป็นผลึกและลดแถบช่องว่างพลังงานได้ จะเห็นได้ชัดว่าฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เติมสารเจือจะไม่ได้รับอิทธิพลจากความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดันของแก๊สออกซิเจนมีค่าสูงๆ ในทางตรงกันข้ามฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยอะตอมทองแดงจะได้รับผลกระทบจากค่าความดันย่อยของออกซิเจนอย่างน่าประหลาดใจ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนเวคเคนซึ่งมีบทบาทสำคัญในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติและยังช่วยให้เราสามารถปรับการสร้างช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นหลักได้อย่างถูกต้อง

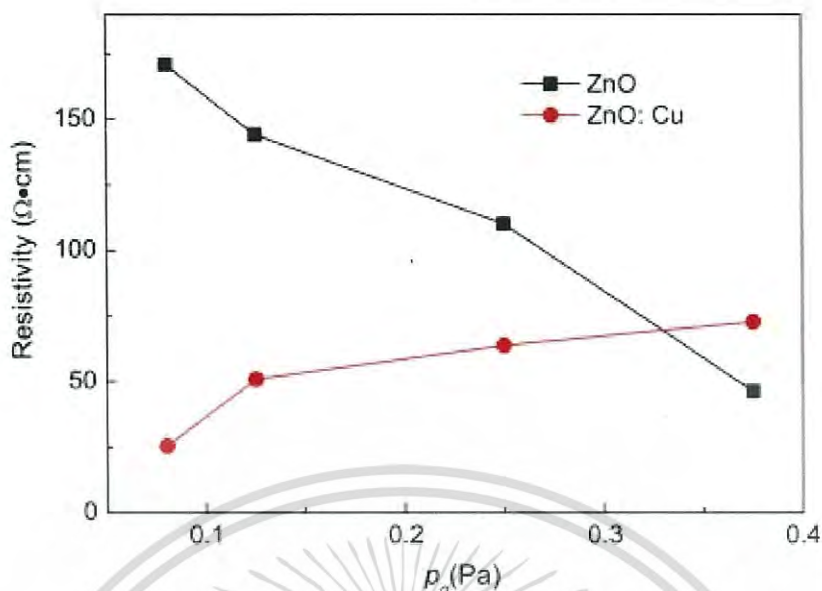


รูปที่ 2.35 a.) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือ
 b.) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยอะตอมทองแดง
 c.) ขนาดของเกรนและค่า FWHM
 d.) อัตราการเกิดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือด้วยอะตอมทองแดง

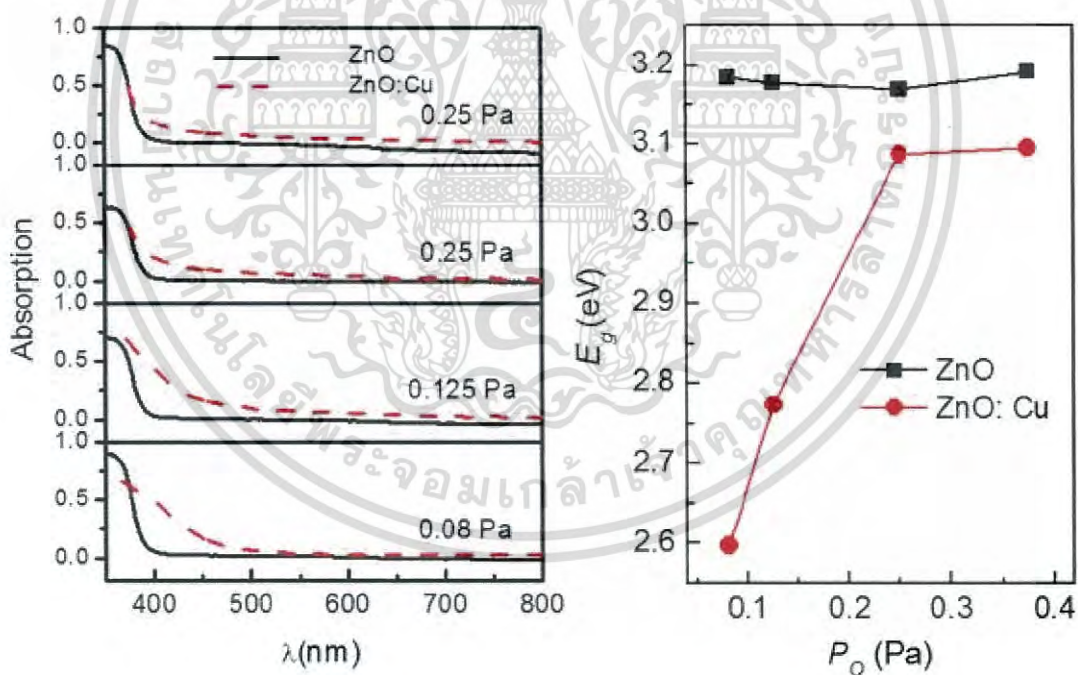


รูปที่ 2.36 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและทำการเจือด้วยอะตอมทองแดงโดยใช้ AFM ในการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมของทองแดงต่อความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.38 การศึกษาการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมทองแดงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer และค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือและเจือด้วยอะตอมทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ที่มีอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

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 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
 - น้ำปอดประจุ (DI water)
- แผ่นกระจกสไลด์ 12×25 มิลลิเมตร
- ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ (SnO_2) โดยวิธีรี

- แอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
 - กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
 - อะซีโตน (CH_3COOH)
 - สำลีสําหรับการเช็ดทำความสะอาด
 - เป่าดีบุก (Sn)
 - เครื่องสปัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

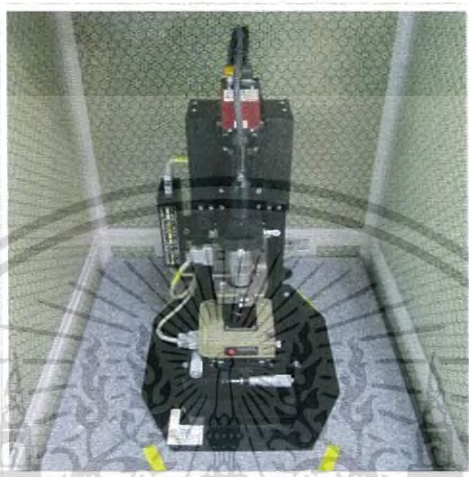
Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้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



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น FESEM-EDS (7610F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก
เชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนา
โน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดใน
ระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100

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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

- อิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง

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



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

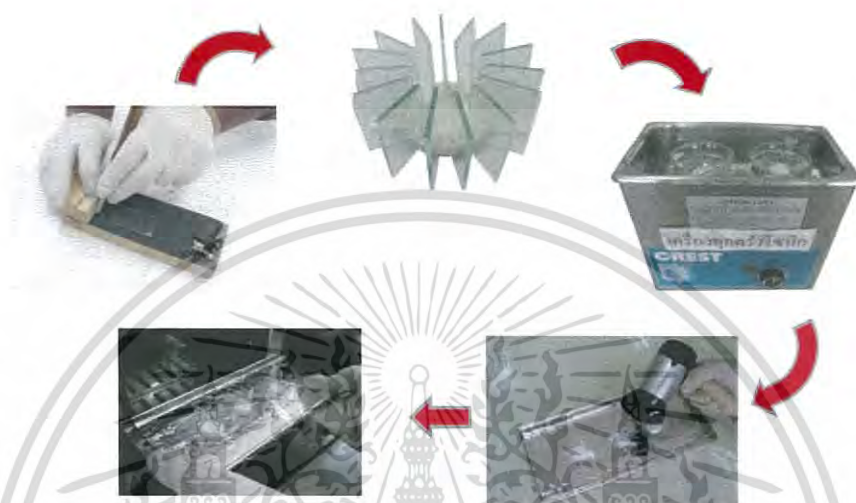
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ SnO_2 โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง (งามนิตย, 2543; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้ง
เป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

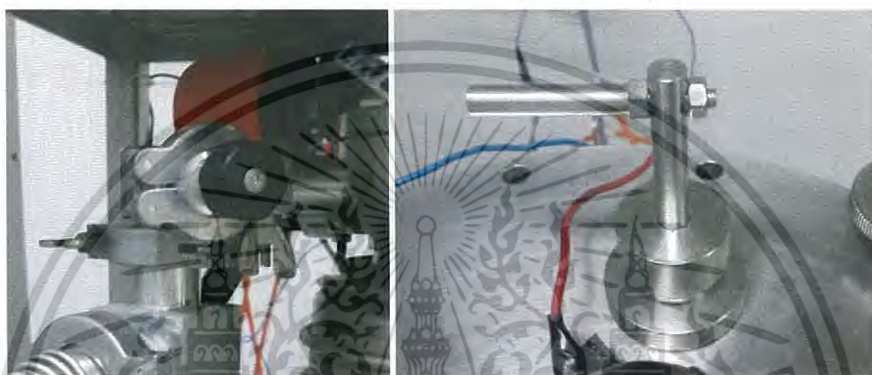
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องตั้งสวิตช์ปั๊มบีบน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ซิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชีลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างขั้วเตออร์และกราวด์ชีลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมუნนีออตหางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



(ก.)

(ข.)

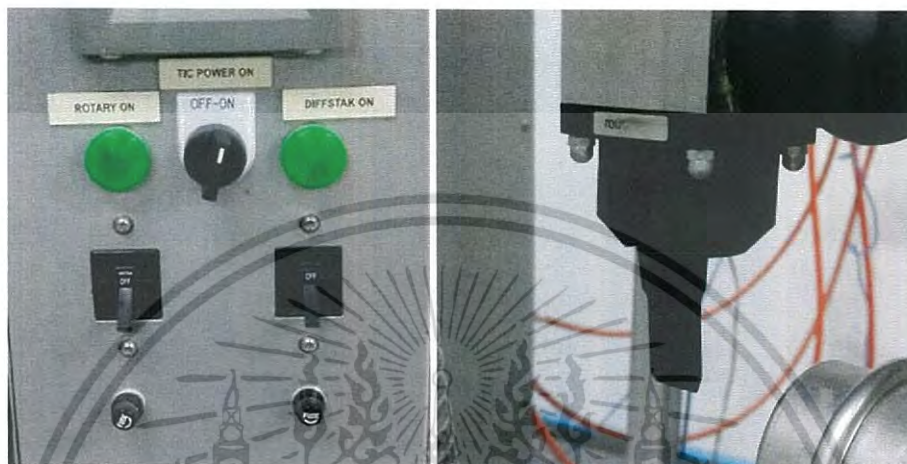
รูปที่ 3.10 (ก) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า

(ข) ภาพแสดงคันบังคับขั้วเตออร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

8. ปิดขั้วเตออร์ (คันบังคับขั้วเตออร์ที่อยู่ด้านบนห้องสุญญากาศ) 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



(ก.)

(ข.)

- รูปที่ 3.11 (ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มทกัลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย) (ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

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



(ก.)

(ข.)

- รูปที่ 3.12 (ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open

(ข) ภาพแสดง speedy valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พिरานิกเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิ่งเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก $10^{-3} - 10^{-6}$ ทอร์
16. การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุด และใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนอาร์กอนแล้วสูบลอกจำนวน 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 (สูบลอกครั้งที่ 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 (สูบลอกครั้งที่ 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 (สูบลอกครั้งที่ 3)
- เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.13 (ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ข) ภาพแสดง power supply นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.14 (ก) ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply

(ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

20. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆช้าจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสภาวะยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมามีพลังงานและสภาวะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก



ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.15 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. เมื่อพลาสติกให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 sccm
22. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปใช้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสติกโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



(ก.)

(ข.)

- รูปที่ 3.16 (ก) ภาพแสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด
(ข) ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

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

บทที่ 4

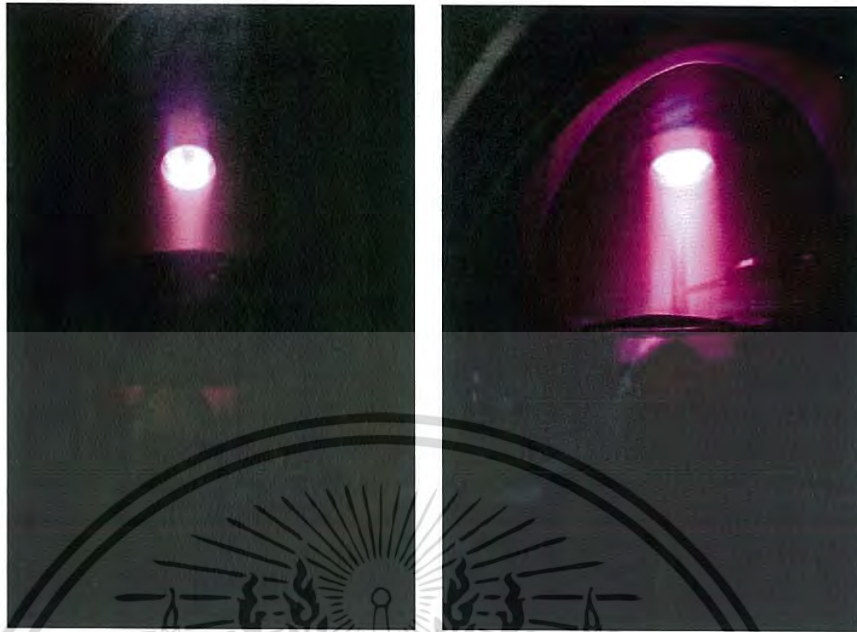
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟทีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทางแสงและศึกษาสมบัติทางแสงไฟฟ้าของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ด้วย

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการไกลดิสชาร์จ

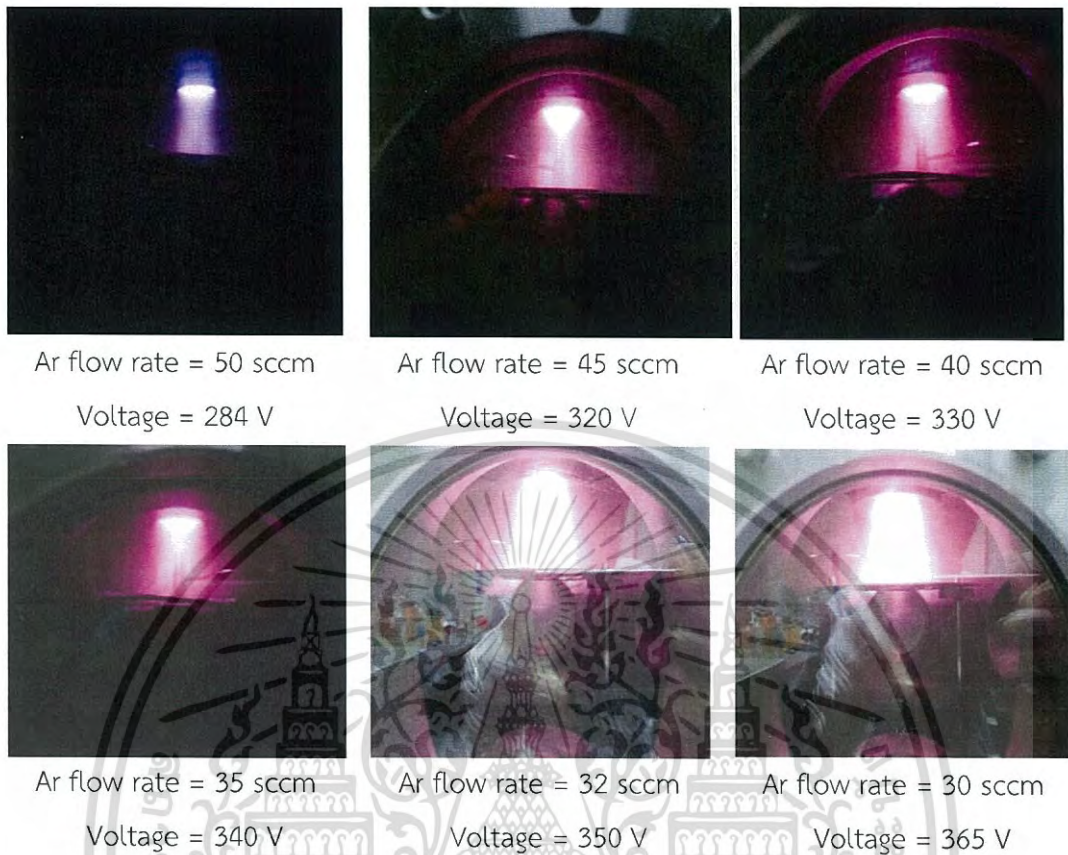
ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มบางดีบุกออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป่าดีบุกความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 360 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไอปฏิกริยา ป้อนสุญญากาศประกอบไปด้วยปั๊มแพร่ออน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 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 การไกลดิสชาร์จจึงเกิดขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสชาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทลายทาวนเซนต์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการไกลดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ เพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางดีบุก โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโคลดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ ตามลำดับ

เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงไปอีก พบว่าลำพลาสมาจะเร็วเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพื่อให้ลำพลาสมาพุ่งโตขึ้นและการโคลดิสชาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จต่อไปอีก สีของการโคลดิสชาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโคลดิสชาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ลำพลาสมาจะโตขึ้นและยืดออกมากขึ้น) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโคลดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
12.0	12.0	9.6 × 10 ⁻³ 1.5 × 10 ⁻⁴	365.0	0.320	116.8	20
		2.0 × 10 ⁻² 1.5 × 10 ⁻⁴	365.0	0.344	125.56	25
		2.2 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	365.0	0.356	129.94	30
		2.1 × 10 ⁻² 1.6 × 10 ⁻⁴	365.0	0.356	129.94	35
		2.0 × 10 ⁻² 1.6 × 10 ⁻⁴	365.0	0.360	131.4	40
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.381	140.97	20
13.0	14.0	3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.385	142.45	25
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.383	141.71	30
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.383	141.71	35
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.383	141.71	40
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.383	141.71	40
		3.5 × 10 ⁻² 1.7 × 10 ⁻⁴	370.0	0.383	141.71	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ต่อ)

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
14.0	12.0	4.2×10^{-2} 1.8×10^{-4}	360.0	0.385	138.60	20
		4.5×10^{-2} 1.8×10^{-4}	360.0	0.386	138.96	25
		4.3×10^{-2} 1.8×10^{-4}	360.0	0.391	140.76	30
		4.3×10^{-2} 1.8×10^{-4}	360.0	0.374	134.64	35
		4.4×10^{-2} 1.8×10^{-4}	360.0	0.362	130.32	40
15.0	8.0	6.0×10^{-2} 2.5×10^{-4}	363.0	0.328	119.06	20
		6.0×10^{-2} 2.4×10^{-4}	363.0	0.368	133.58	25
		5.6×10^{-2} 2.3×10^{-4}	363.0	0.336	121.96	30
		5.2×10^{-2} 2.2×10^{-4}	363.0	0.330	119.80	35
		5.7×10^{-2} 2.2×10^{-4}	363.0	0.335	121.61	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

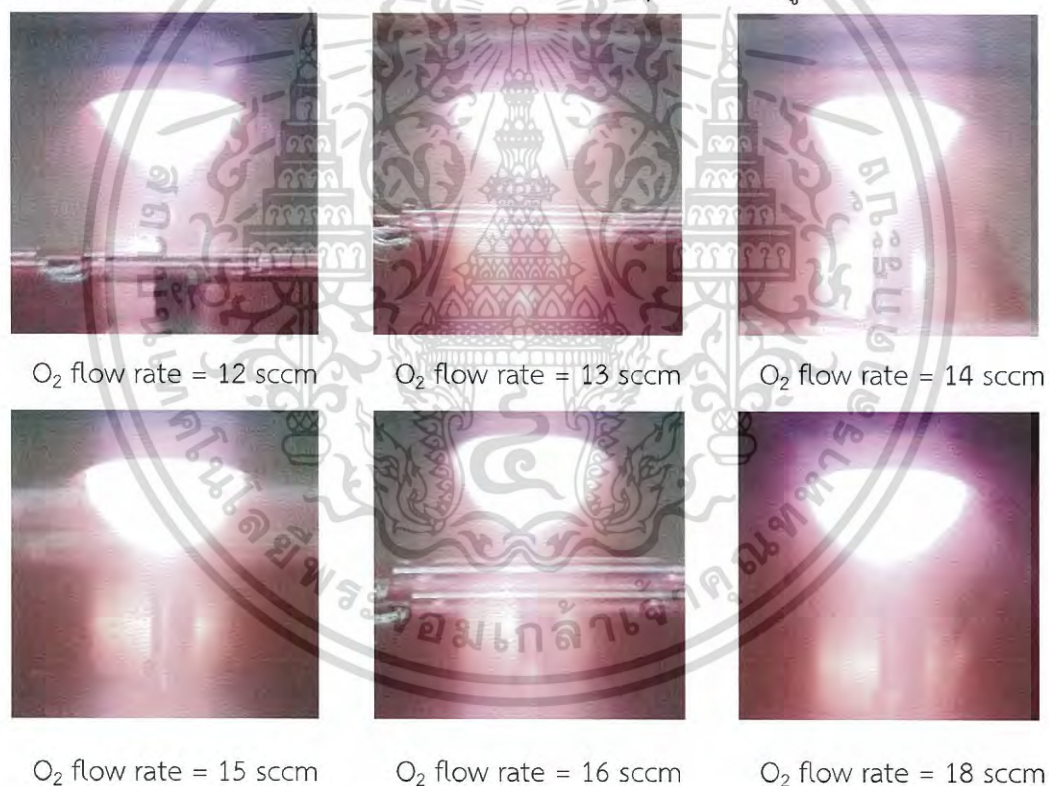
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง (ต่อ)

Oxygen Flow Rate (sccm)	Sputtering Conditions					
	Argon Flow Rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering Time (min)
16.0	10.0	4.2x10 ⁻²	365.0	0.365	133.23	20
		2.7x10 ⁻⁴				
		4.3x10 ⁻²	365.0	0.365	133.23	25
		2.7x10 ⁻⁴				
		4.1x10 ⁻²	365.0	0.365	133.23	30
		2.7x10 ⁻⁴				
18.0	12.0	3.6x10 ⁻²	370.0	0.373	138.01	20
		2.9x10 ⁻⁴				
		3.7x10 ⁻²	370.0	0.372	137.64	25
		3.8x10 ⁻⁴				
		3.8x10 ⁻²	370.0	0.375	138.75	30
		2.9x10 ⁻⁴				
		3.9x10 ⁻²	370.0	0.375	138.75	35
		2.9x10 ⁻⁴				
		4.0x10 ⁻²	370.0	0.374	138.75	40
		2.9x10 ⁻⁴				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง

การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง จะเริ่มจากการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตร ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้า ๆ ให้กับขั้วคาโทด จนกระทั่งถึง 280 โวลต์ สภาพโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จขึ้น จนได้ความดันความดันที่อ่านโดยเกจพิрани 4.0×10^{-2} - 6.0×10^{-2} ทอร์ ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงจะแสดงตามตารางที่ 4.2 และสภาพโกลวดิสชาร์จที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆจะแสดงตามรูปที่ 4.3

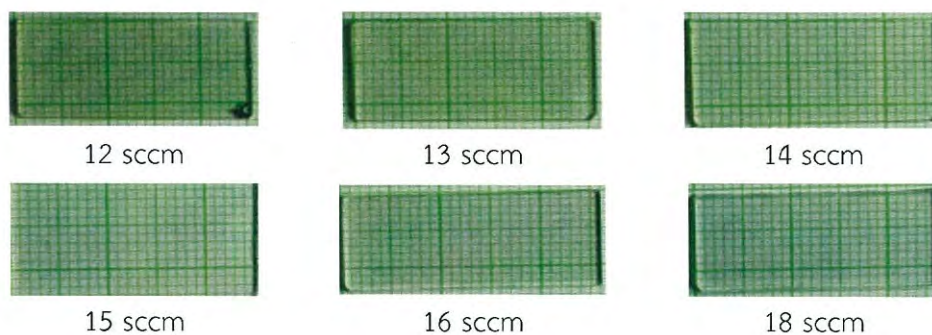


รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปคเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Sputtering Conditions					Film Characteristics
	Argon flow rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	
12	12	บน = 2.0×10^{-2} ล่าง = 1.6×10^{-4}	365.0	0.364	131.40	ฟิล์มสีใสอมเหลือง
13	14	บน = 3.5×10^{-2} ล่าง = 1.7×10^{-4}	370.0	0.383	141.71	ฟิล์มสีใส
14	12	บน = 4.4×10^{-2} ล่าง = 1.8×10^{-4}	360.0	0.362	130.32	ฟิล์มสีใส
15	11	บน = 5.7×10^{-2} ล่าง = 2.2×10^{-4}	363.0	0.364	121.61	ฟิล์มสีใส
16	10	บน = 4.0×10^{-2} ล่าง = 2.7×10^{-4}	365.0	0.365	133.23	ฟิล์มสีใส
18	13	บน = 5.7×10^{-2} ล่าง = 1.7×10^{-4}	362.0	0.358	129.59	ฟิล์มสีใส

ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะแสดงดังรูปที่ 4.4



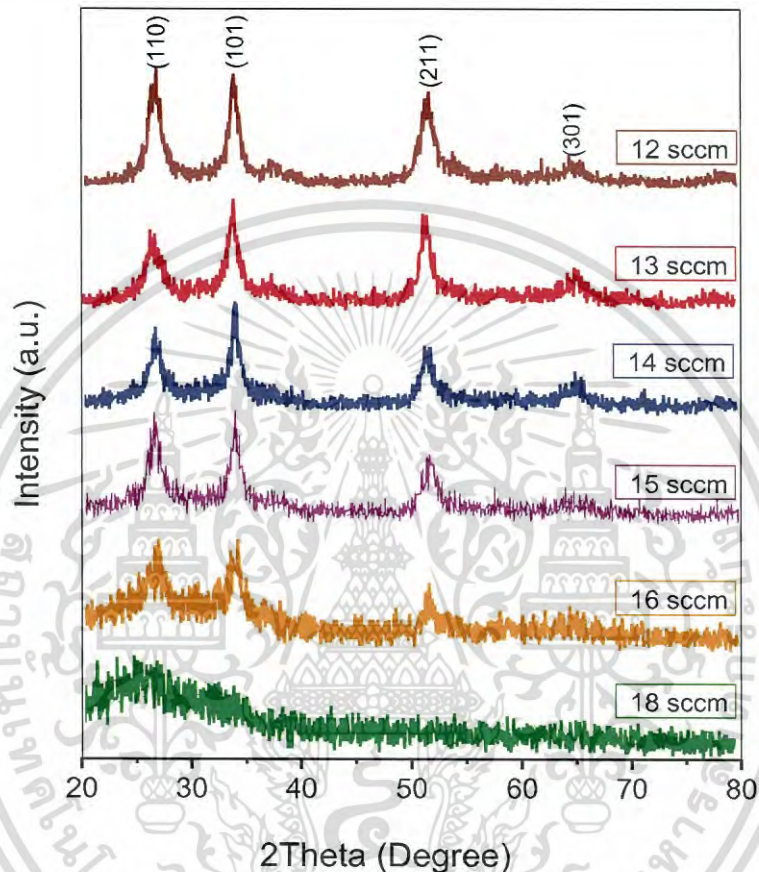
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะแสดงดังรูปที่ 4.5 จากพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ (SnO₂) เกิดระนาบการเลี้ยวเบน คือ (110), (101), (200) และ (211) ของโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทต์ ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับแก้วกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	ค่าคงที่ของโครงสร้าง (Å)		
	a	c	V (Å ³)
12	4.783	3.185	72.88
13	4.740	3.208	72.09
14	4.746	3.177	71.56
15	4.733	3.188	71.44
16	4.745	3.164	71.24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnO₂ ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

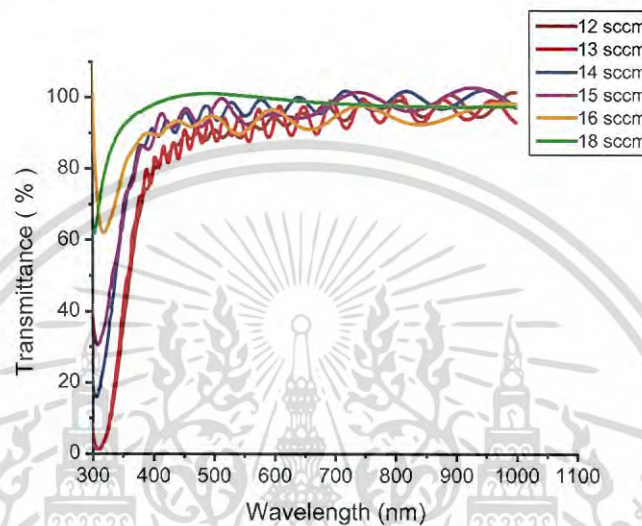
Oxygen Flow Rate (sccm)	Grain Size (nm)	Roughness(nm)
12	68	10.132
13	176	7.344
14	117	6.558
15	98	4.361
16	146	3.911
18	137	1.658



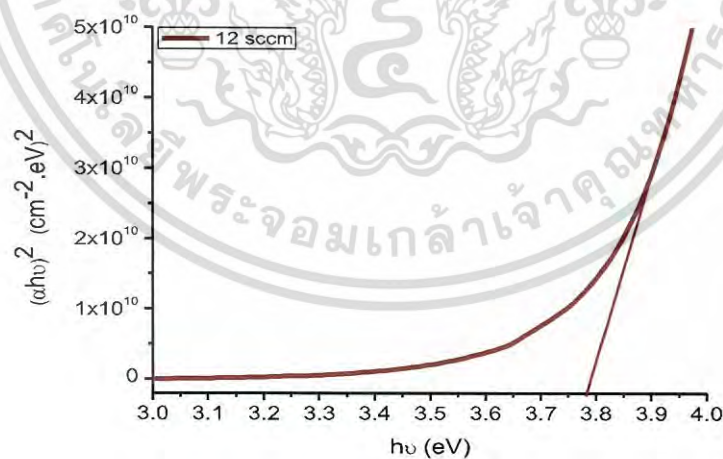
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

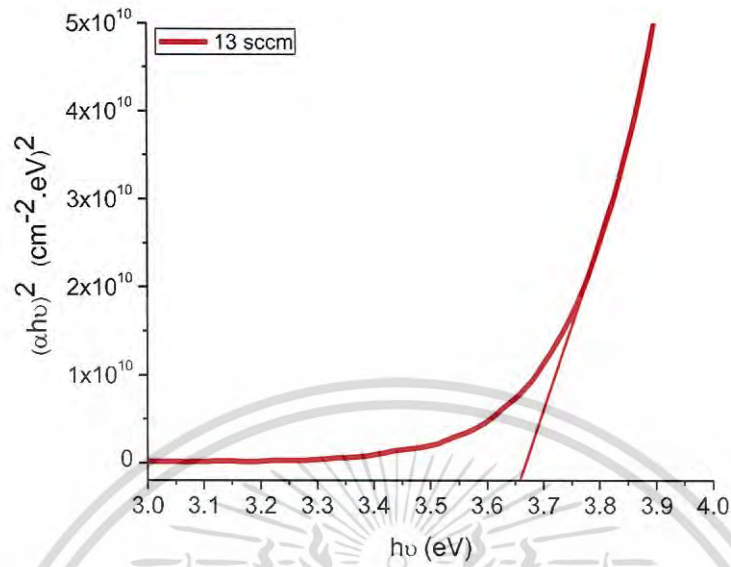


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ

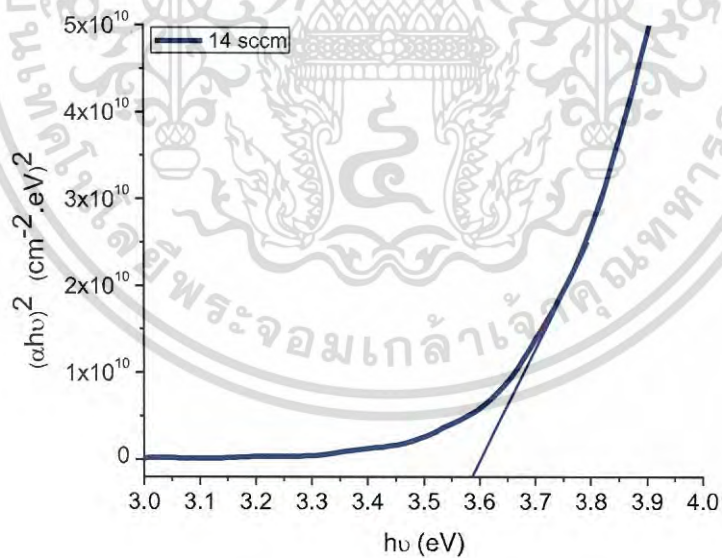


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

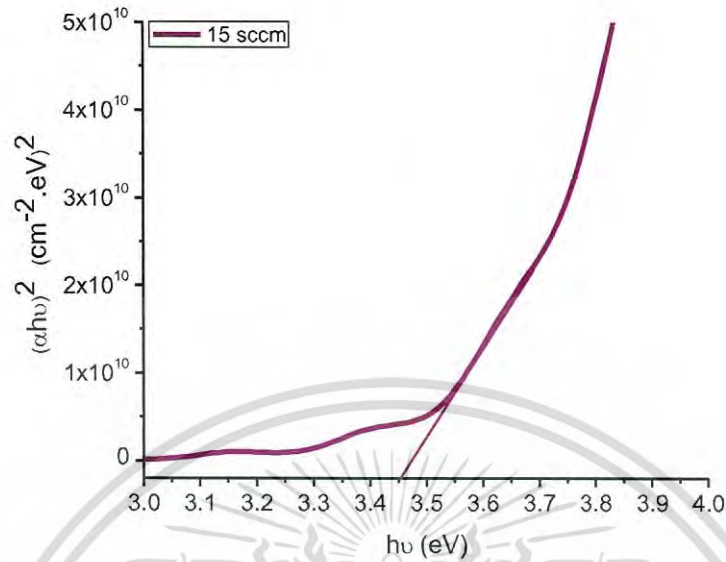


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

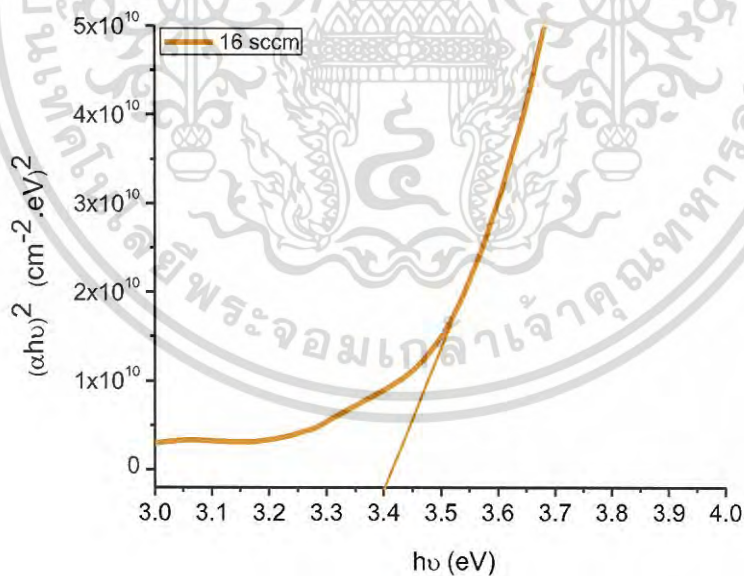


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรिंगที่อัตราการไหลของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

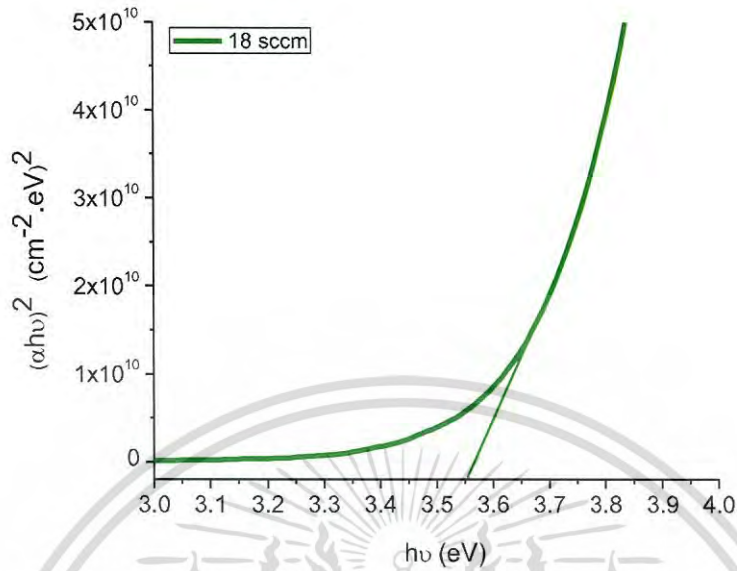


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

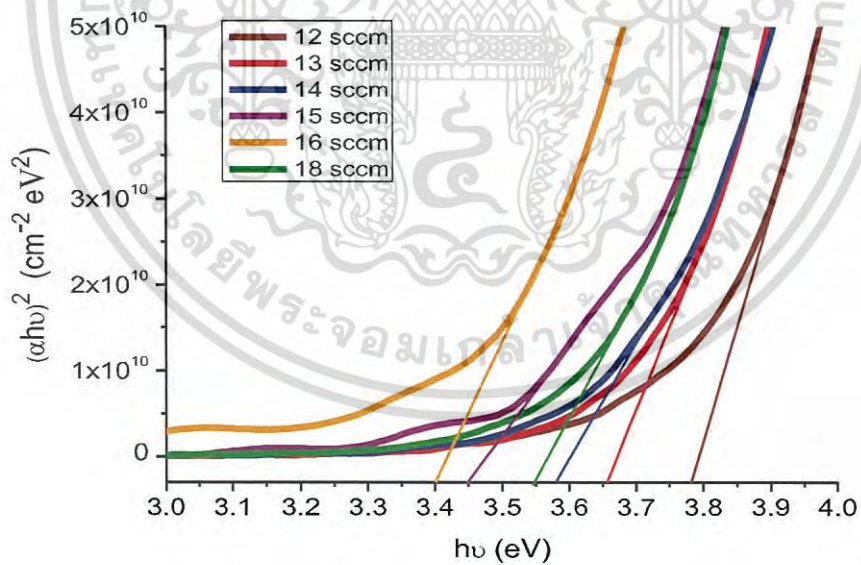


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรืงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

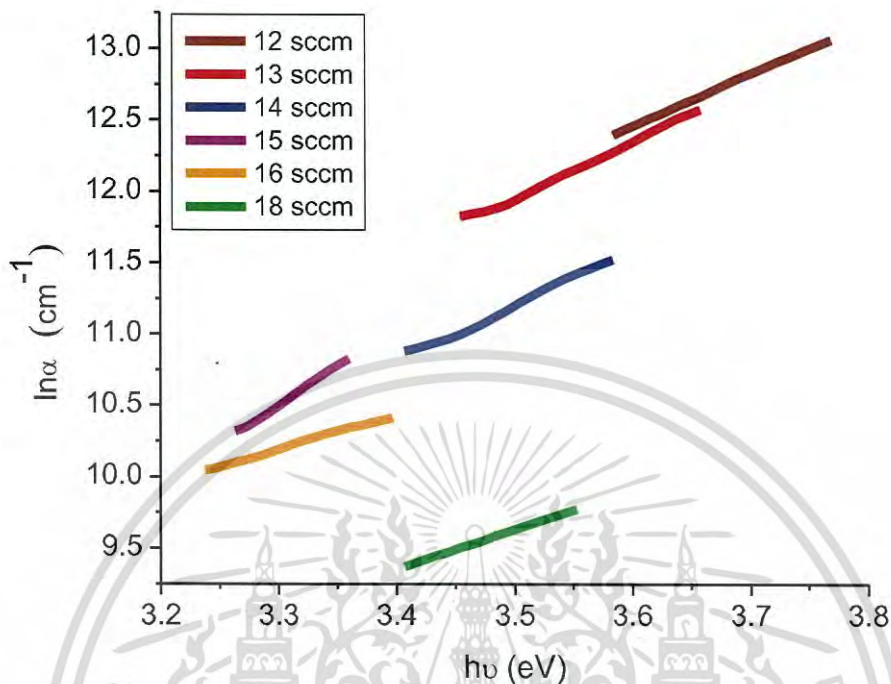


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอริ่งที่อัตราการไหลของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอริ่งที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

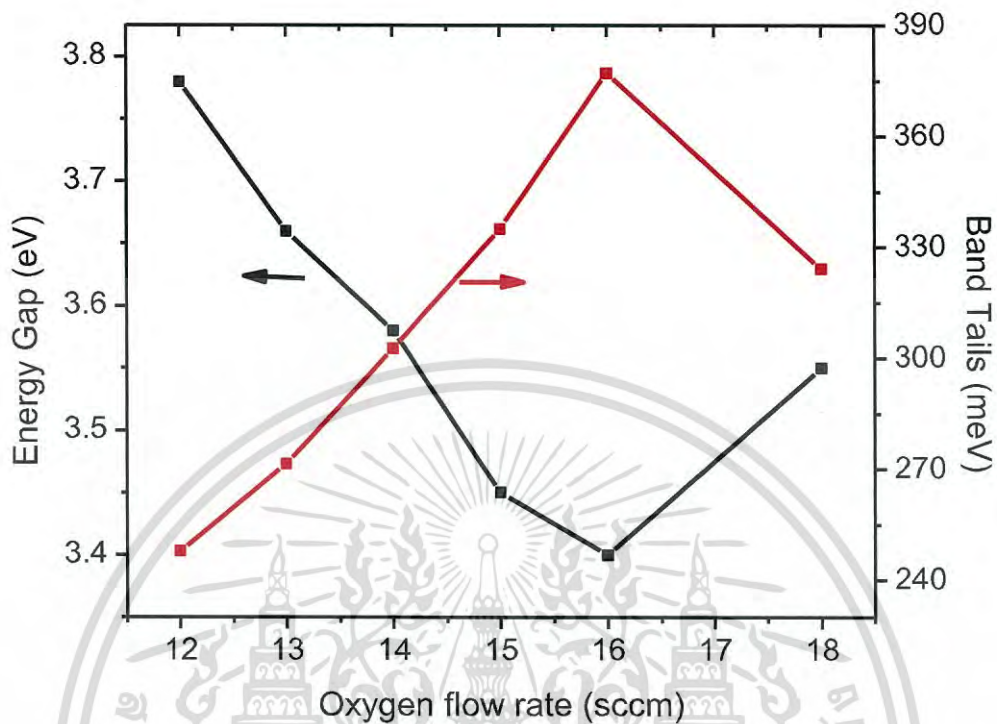


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ($\ln\alpha$) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.5 ค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่าง ๆ

O ₂ flow rate (sccm)	Energy Gap (eV)	Band Tails (meV)
12	3.78	247.80
13	3.66	271.30
14	3.58	302.71
15	3.45	334.92
16	3.40	377.08
18	3.55	324.14

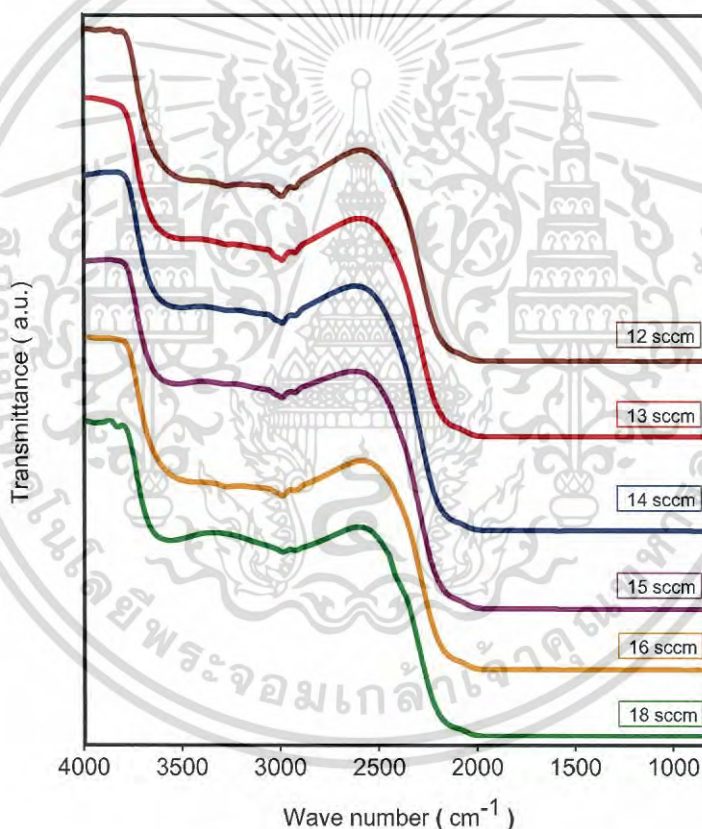
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



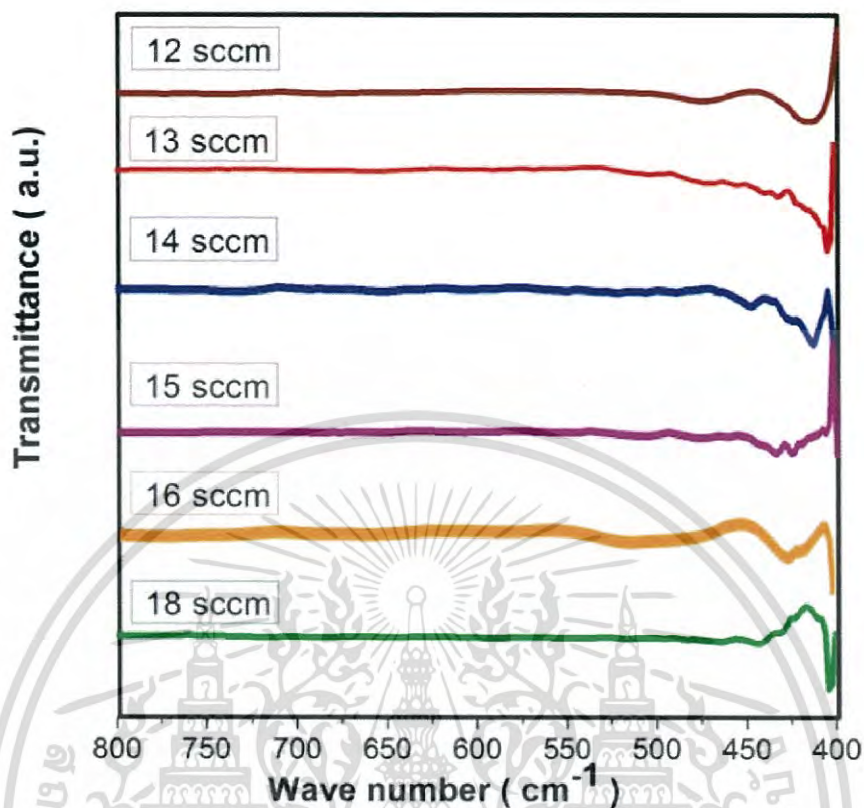
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) , band tails (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

4.4.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

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



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีในช่วงเลขคลื่น 4000-800 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีเอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีในช่วงเลขคลื่น 800-400 ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O ₂ flow rate (sccm)	Peak of FTIR (cm ⁻¹)	Assignment Vibration Mode	Reference
12	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	415	O-Sn-O	Ali, 2017
13	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	406	O-Sn-O	Ali, 2017
	420	O-Sn-O	Ali, 2017
	435	O-Sn-O	Majumder, 2009
14	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	415	O-Sn-O	Ali, 2017
	430	Sn-O	Majumder, 2009
	460	O-Sn-O	Vantran, 2010 Zhang, 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

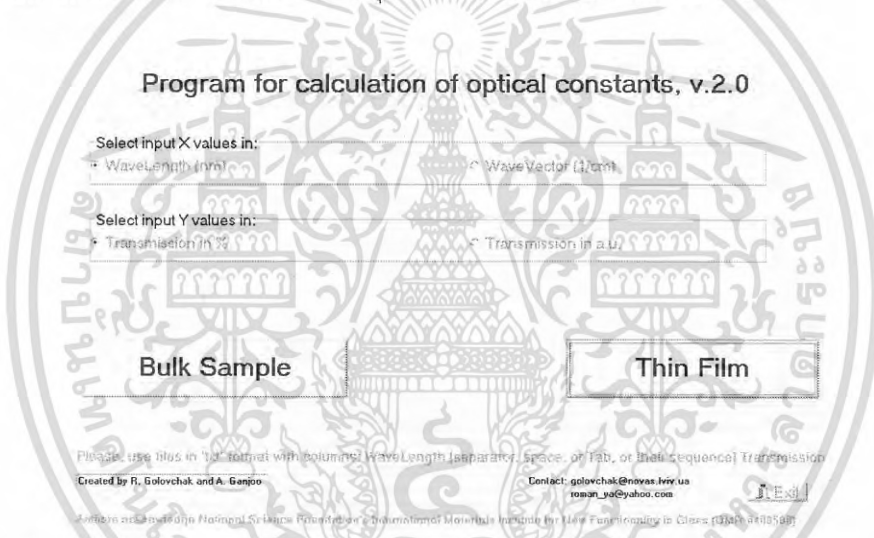
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตอกซ์ที่พีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่เปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O ₂ flow rate (sccm)	Peak of FTIR (cm ⁻¹)	Assignment Vibration Mode	Reference
15	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	406	O-Sn-O	Ali, 2017
	425	O-Sn-O	Ali, 2017
	435	Sn-O	Majumder, 2009
16	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	423	O-Sn-O	Ali, 2017
18	3240	Stretching Vibration of OH ⁻	Chaisitsak, 2015, Guo, 2015
	2924	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	2857	CH aliphatic hydrocarbon group	Vincent, 2005
	430	Sn-O	Majumder, 2009
	440	Sn-O	Majumder, 2009
	465	O-Sn-O	Vantran, 2010 Zhang, 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

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 และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ โดยโปรแกรม PARAV 2.0

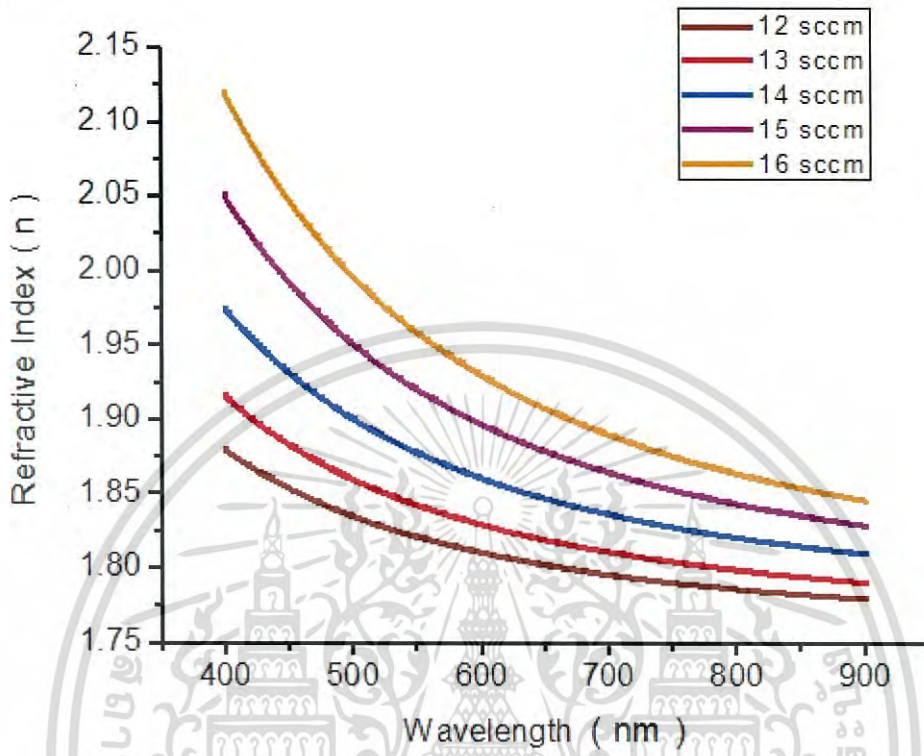


รูปที่ 4.19 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

โปรแกรม PARAV 2.0 จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400-900 นาโนเมตร โปรแกรม PARAV 2.0 จะต้องอาศัยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงในรูปแบบของ notepad จึงทำการสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางหลังจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกเป็นไฟล์ notepadถูกบันทึกเป็นนามสกุล .txt ภายในไฟล์จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ และค่าแถบช่องว่างพลังงาน ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง และค่า

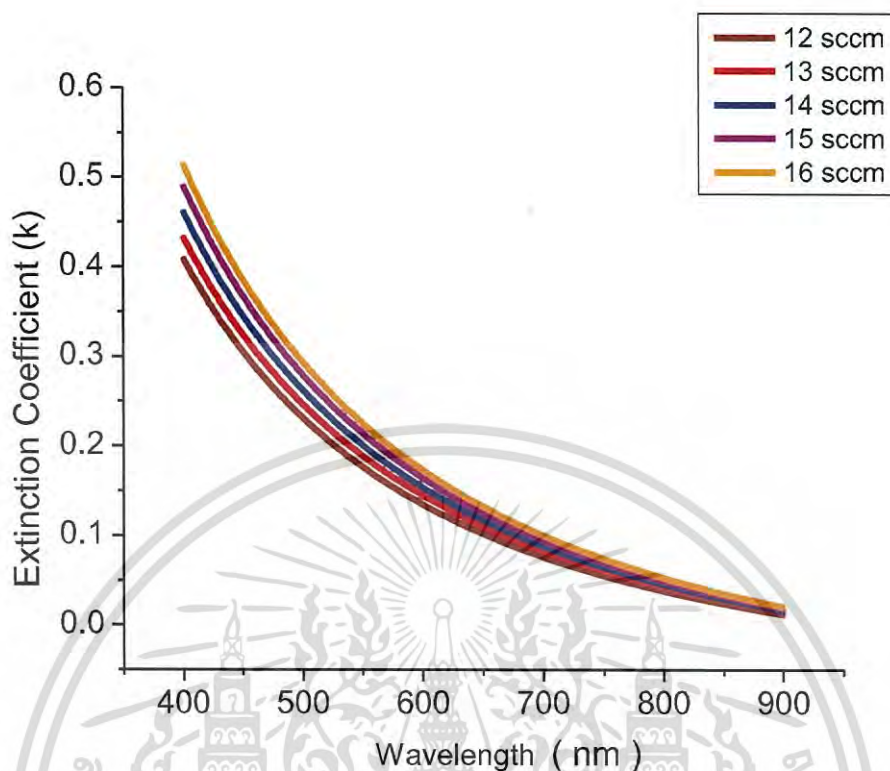
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณเสร็จเพื่อมาหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.20-4.21



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีอีพ็อกซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

หากพิจารณาความยาวคลื่นในช่วง 400-900 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะแสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะมีแนวโน้มลดลงโดยในช่วงความยาวคลื่นสั้น ๆ (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 650 นาโนเมตร) ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสูงกว่า 650 นาโนเมตร) แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตามความยาวคลื่นสอดคล้องดีกับสมการคอสซิงความสัมพันธ์ $n = a + (b/\lambda^2)$

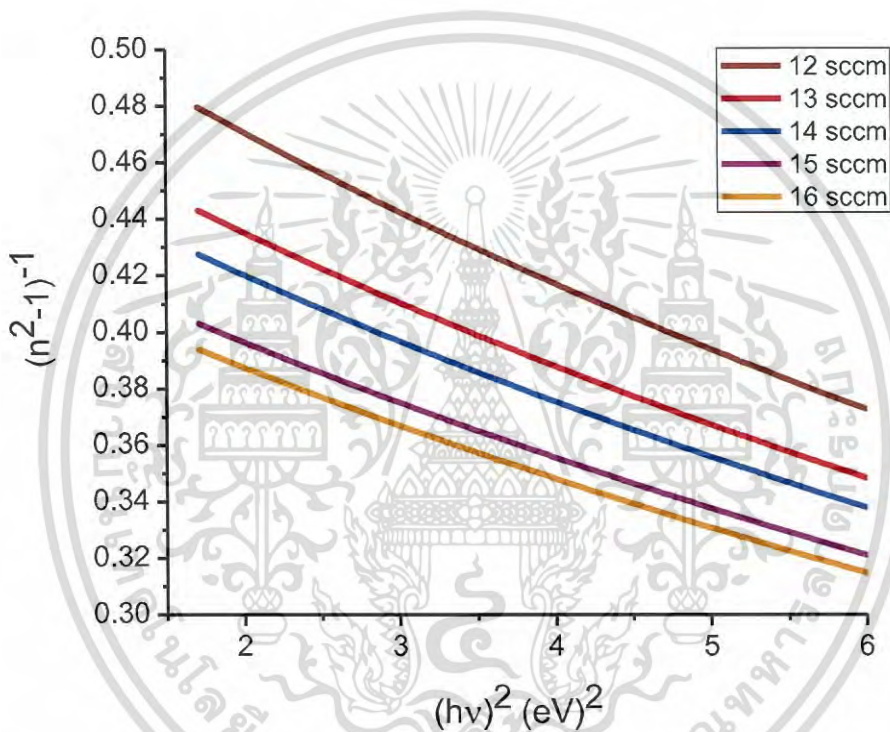


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสโดยวิธีอีพิตอกซ์แมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้า ๆ เข้าสู่ศูนย์นั้นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีบทบาทมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าวและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่มีความยาวคลื่นแสงมีค่าต่าง ๆ ดังความสัมพันธ์ $k = \alpha\lambda/4\pi$ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงที่มีค่าพลังงานสูงจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำในสารกึ่งตัวนำ

4.5.1 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองแก้วกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เวมเพิ่ม-โคโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.20-4.22 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

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

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.100) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

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

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d}$$

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

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

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

เมื่อ M_{-1} และ M_{-3} คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่ M_1 และ M_3 ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

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

เมื่อ $n^* = n - ik$

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

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

โดยที่

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

$$\epsilon_2 = 2nk$$

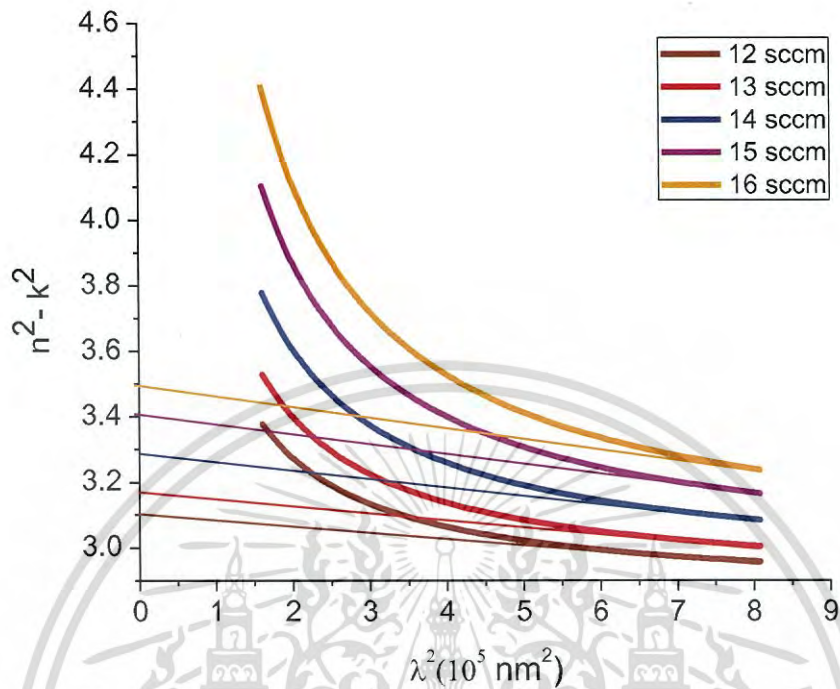
รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้คือ

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

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

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

ตารางที่ 4.7 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ M_1 และ M_3 จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด(ϵ_∞)(dielectric constant at higher wavelength) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคือ $n = a + (b/\lambda^2)$ เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงค่าอนันต์แล้วในพจน์ของ (b/λ^2) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด(ϵ_∞) จึงมีค่าเท่ากับ a และจากสมการที่ $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรดได้



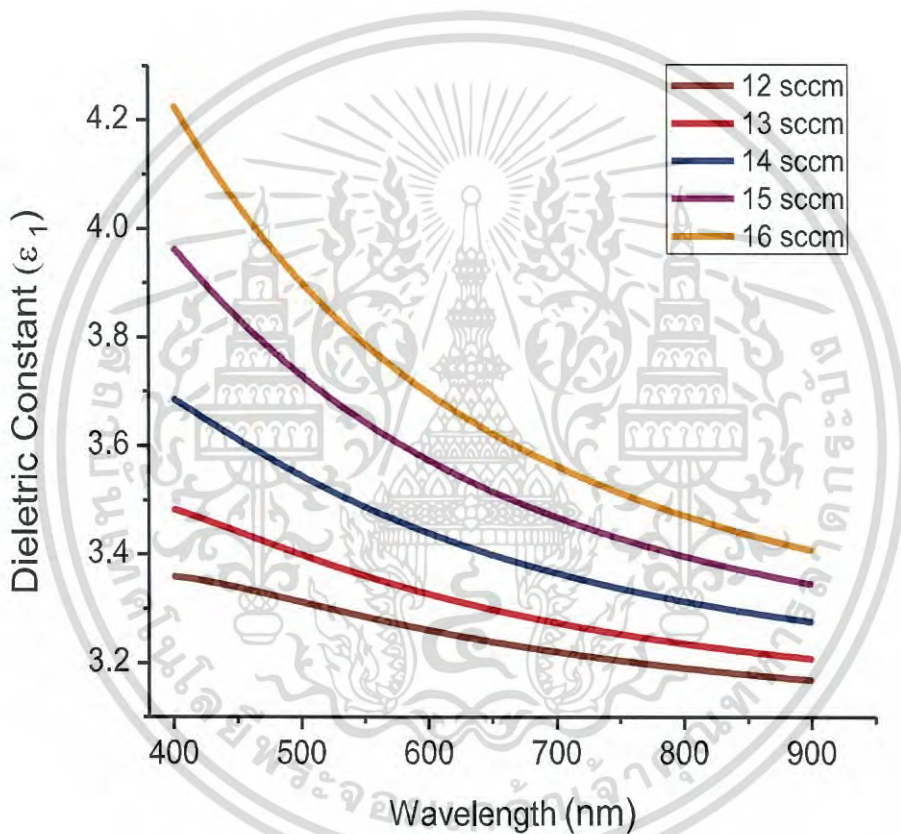
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า (n^2-k^2) กับ λ^2 ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุก ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	n = a+b/λ ²		Wemple-DiDomenico Analysis						E _t (meV)	E _g (eV)	E ₀ /E _g	ε _L	(N/m ³)
	a	b(nm) ²	E ₀ (eV)	E _d (eV)	M ₁	M ₃ (eV) ⁻²	f(eV) ²	(ε _∞)					
12	1.755	1.993×10 ⁴	4.768	9.317	1.954	0.085	44.424	3.081	247.80	3.78	1.281	3.068	1.542 ×10 ⁵²
13	1.760	2.492×10 ⁴	4.853	10.285	2.119	0.089	49.925	3.098	271.30	3.66	1.311	3.143	1.918 ×10 ⁵²
14	1.769	3.289×10 ⁴	4.892	10.751	2.197	0.091	52.603	3.130	302.71	3.58	1.329	3.268	2.525×10 ⁵²
15	1.774	4.426×10 ⁴	4.957	11.571	2.333	0.094	57.372	3.148	377.08	3.45	1.373	3.411	3.391 ×10 ⁵²
16	1.778	5.463×10 ⁴	4.983	11.908	2.389	0.096	59.347	3.163	334.92	3.40	1.444	3.542	4.181 ×10 ⁵²

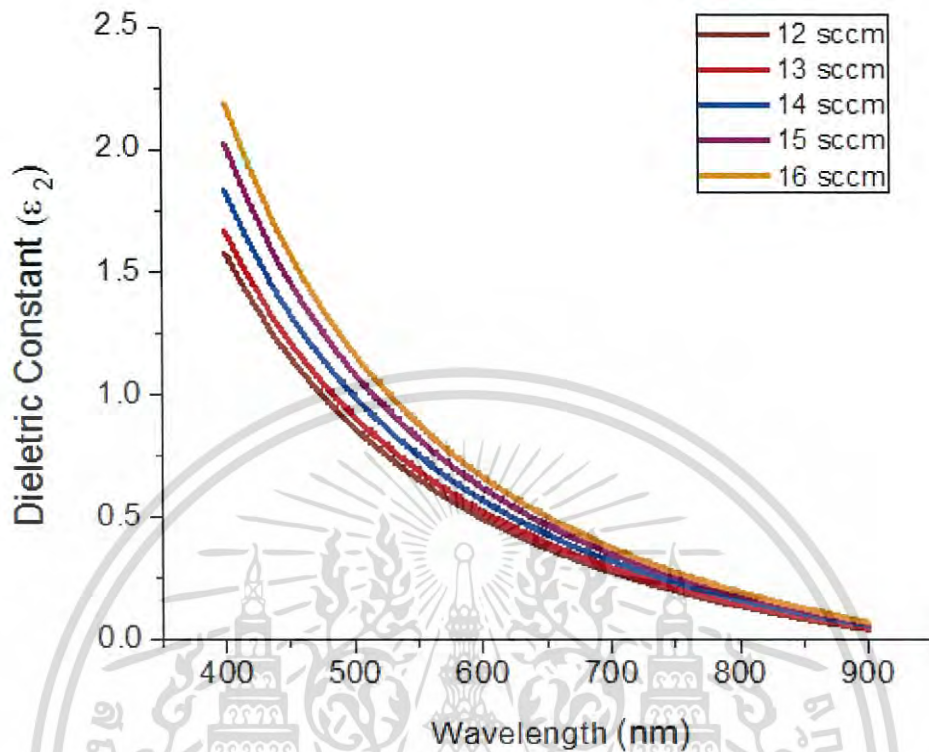
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง

4.5..2 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงควมมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความเป็นขั้วสูงและจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้ เนื่องจากการโพลาไรซ์โมเลกุลมีขั้วของวัสดุต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนประกอบไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

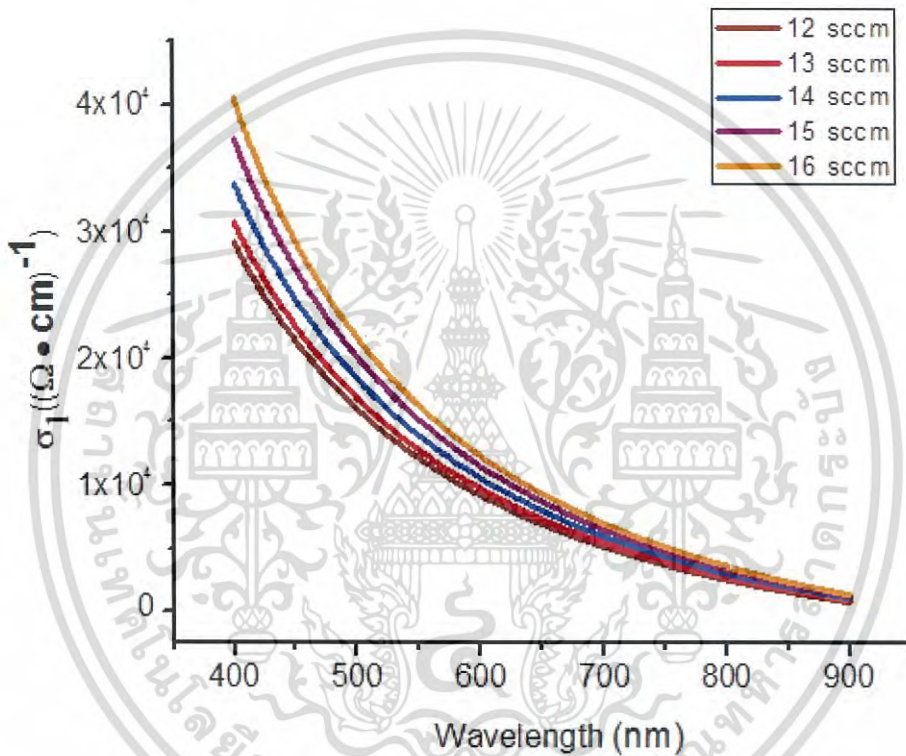


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีโพสิชันแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

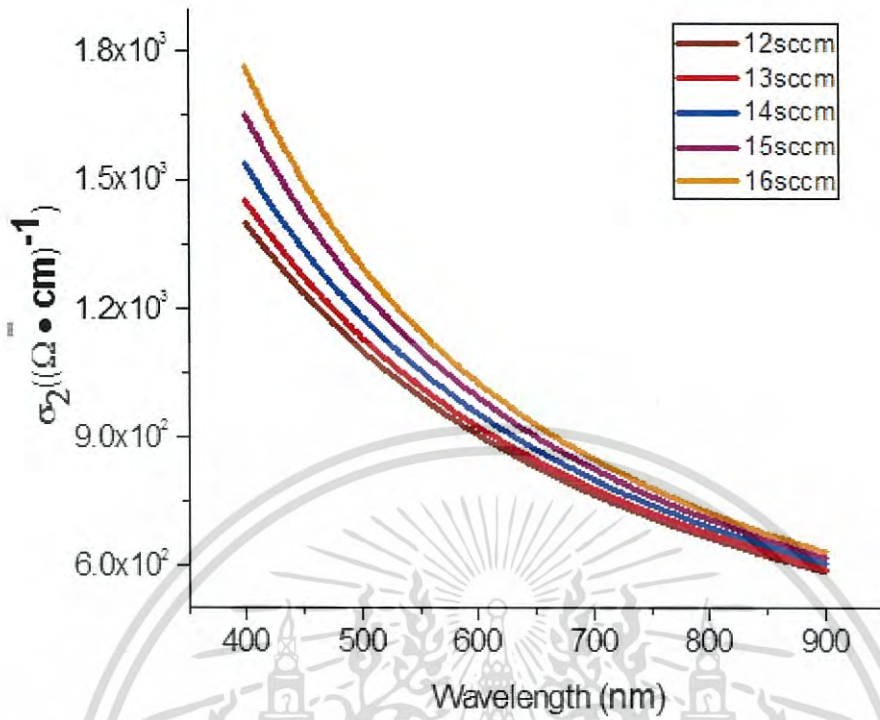
จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ พบว่าที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.26 และ 4.27 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกัน พิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นแล้วจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงจะมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าใดค่าหนึ่งทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของ

สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนแสงที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร



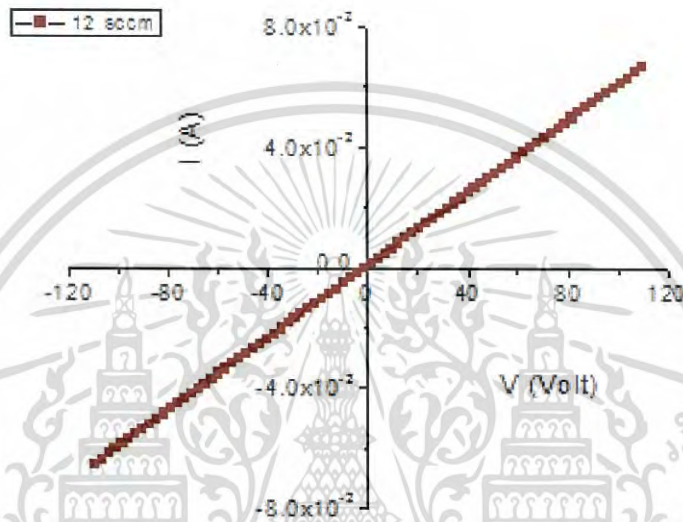
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง



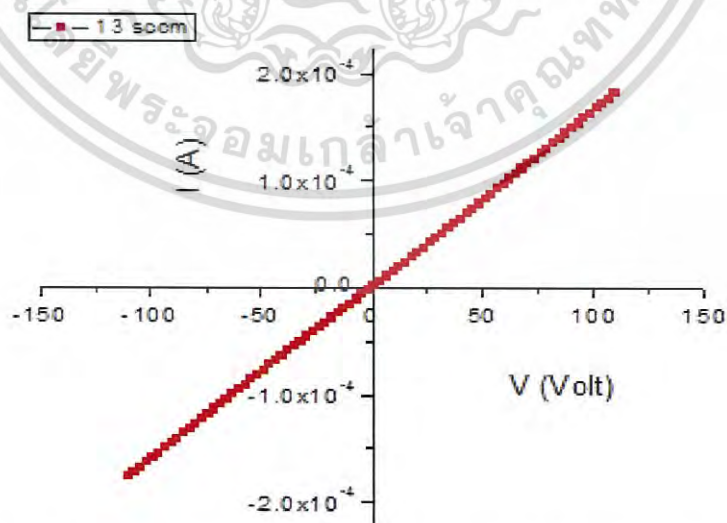
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์

4.6 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง

4.6.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง

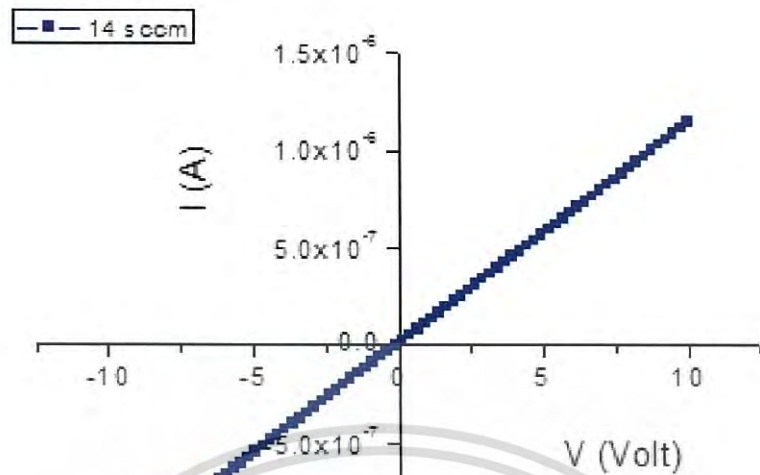


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

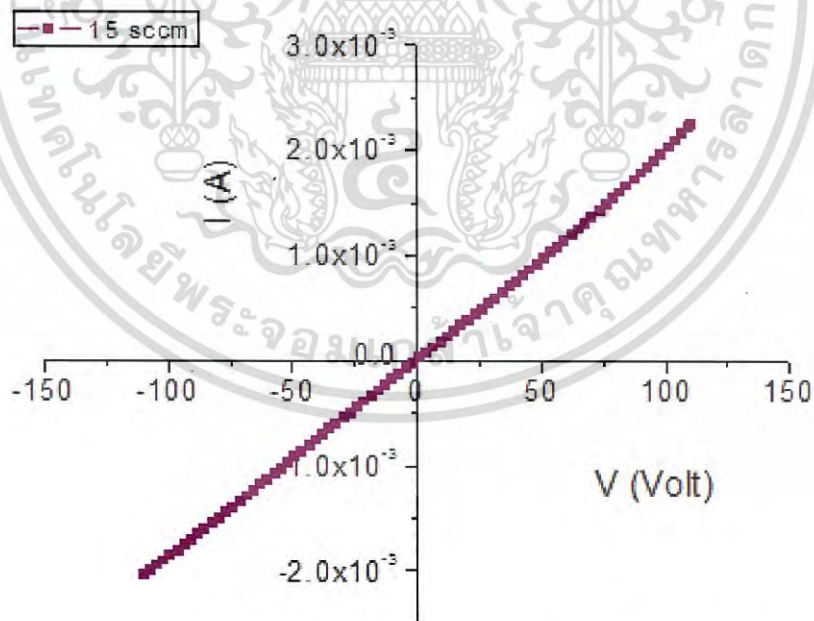


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

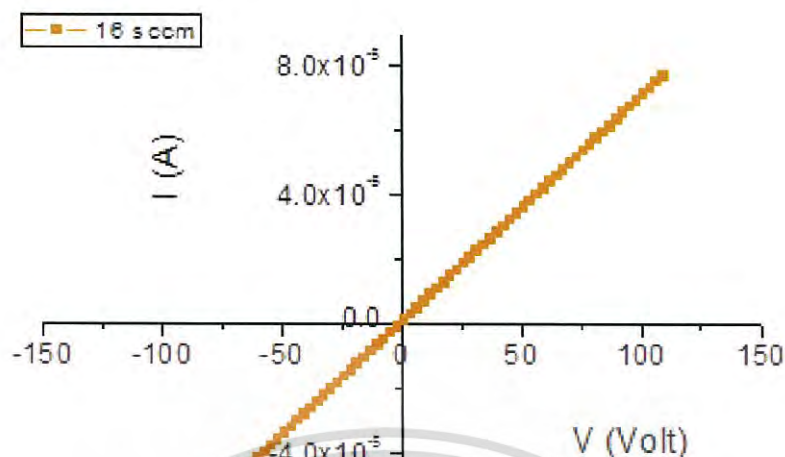


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

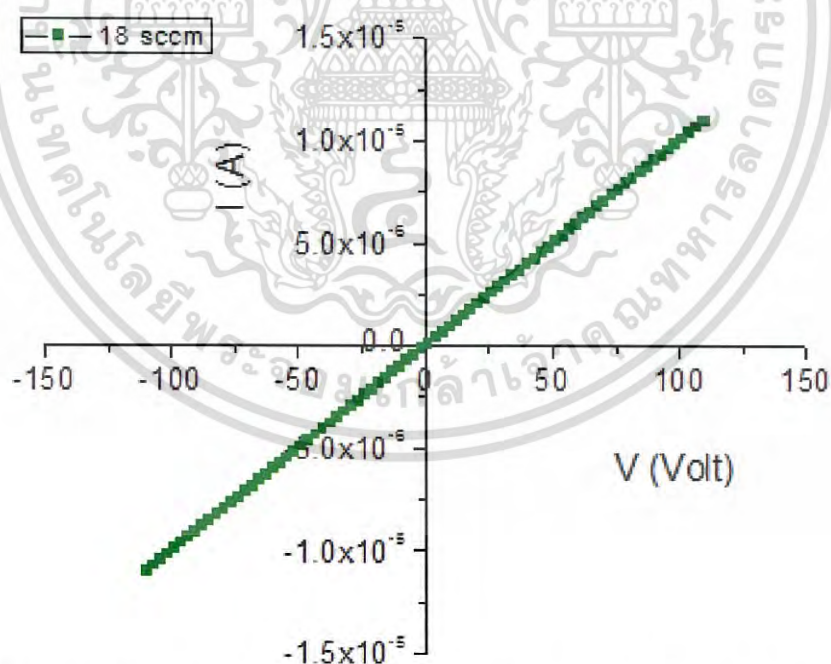


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

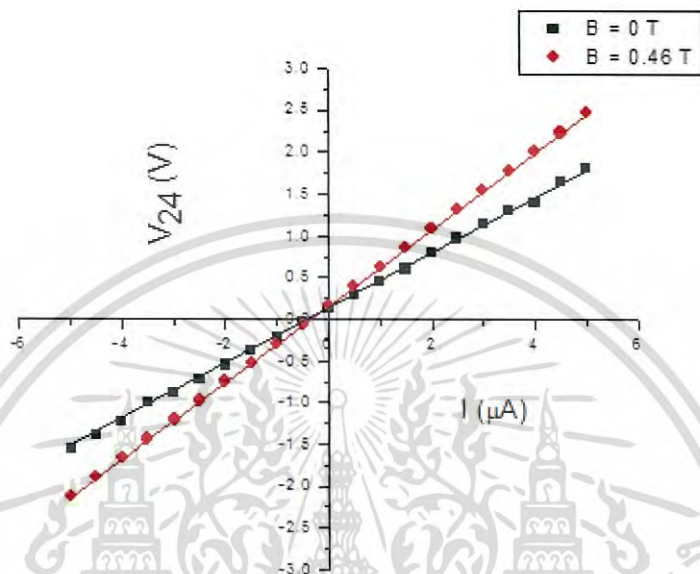
จากรูปที่ 4.19-4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทาน (resistance) ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) และ สภาพนำไฟฟ้า(resistivity)

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทาน ความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

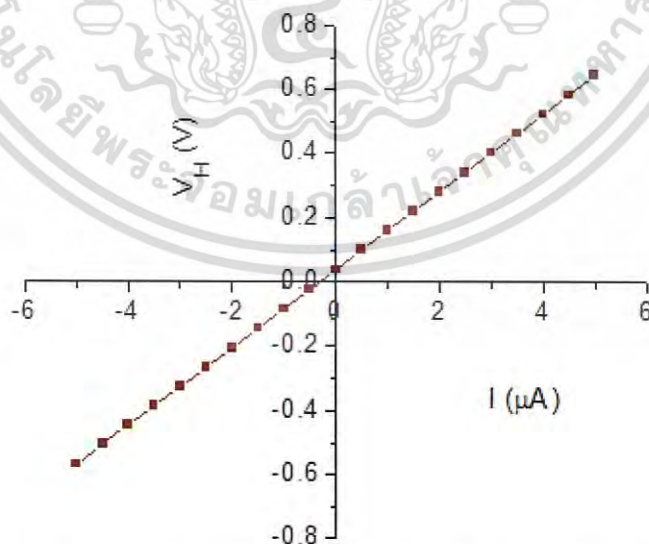
Oxygen flow rate (sccm)	Resistance Ω	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega.\text{cm}$)
12	8.81×10^6	3.52×10^6	176.00
13	6.17×10^6	2.46×10^6	123.00
14	3.33×10^5	1.33×10^5	6.65
15	5.20×10^4	2.07×10^4	1.03
16	1.43×10^6	5.71×10^5	28.55
18	1.00×10^7	4.00×10^6	200.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 กราฟและผลการศึกษาค้นคว้าปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

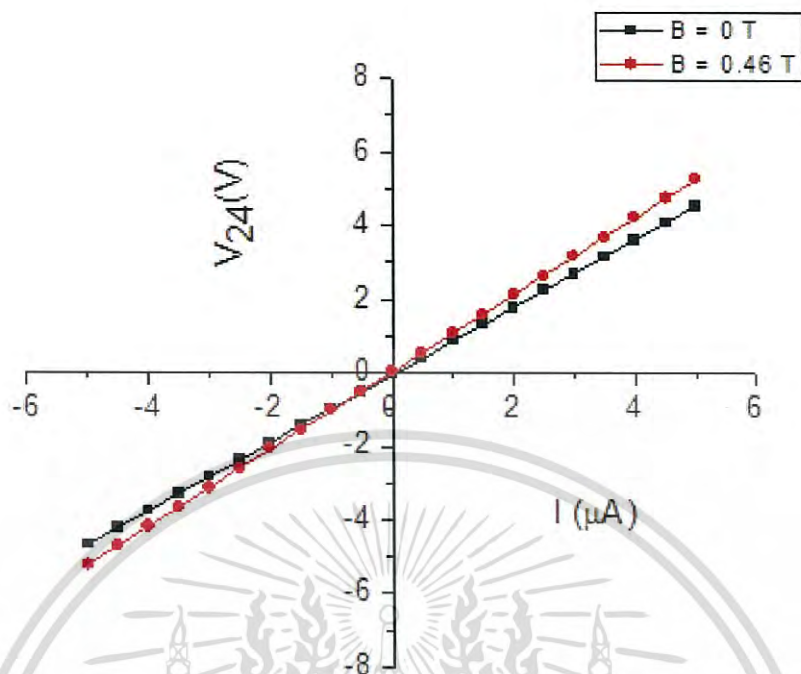


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

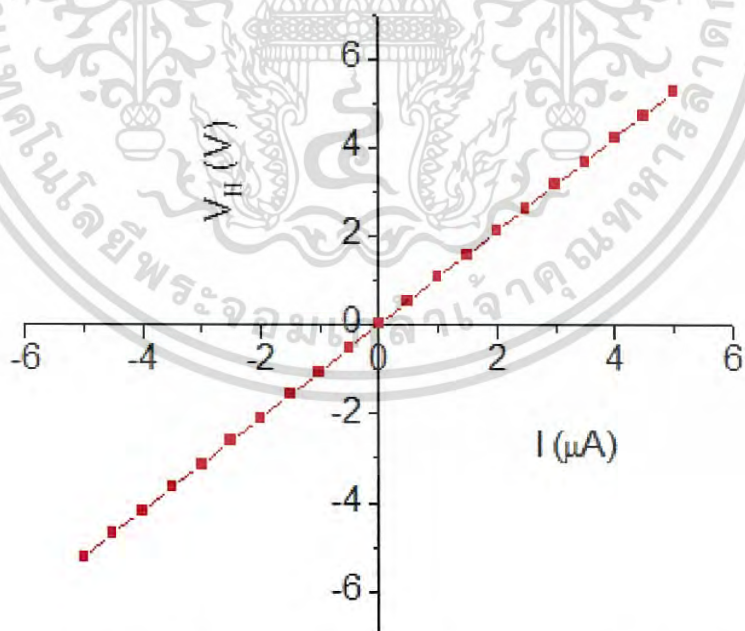


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

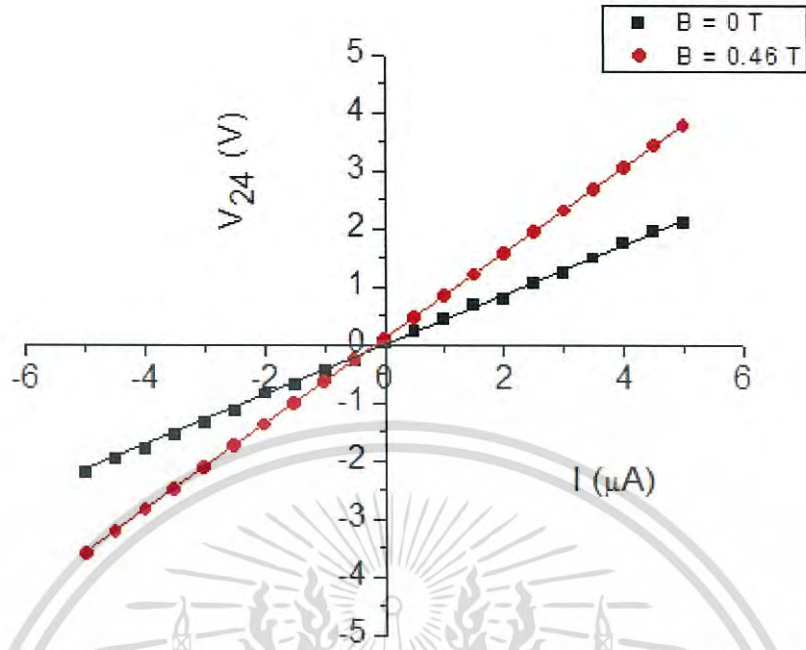


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

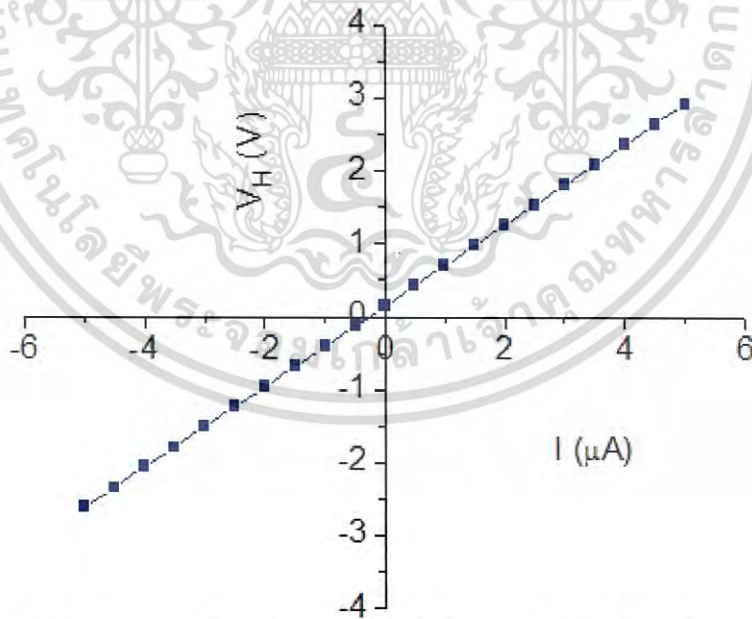


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

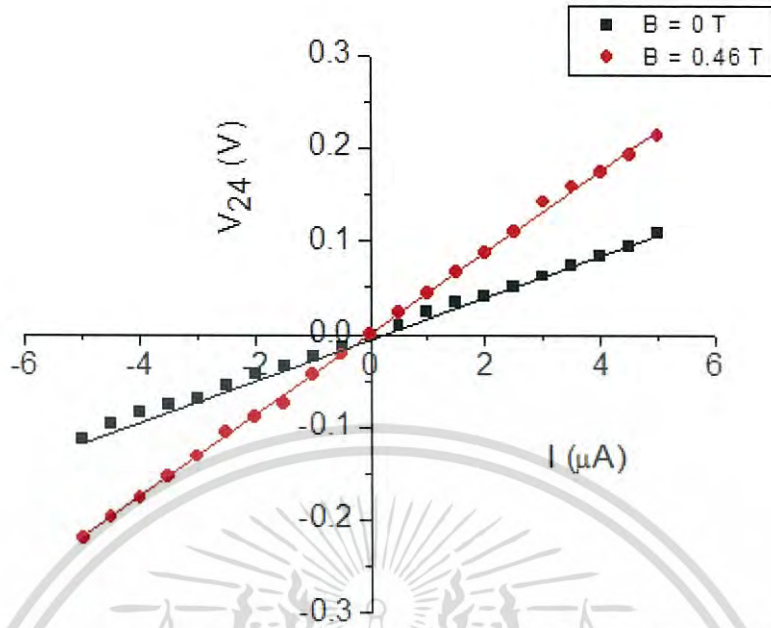


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

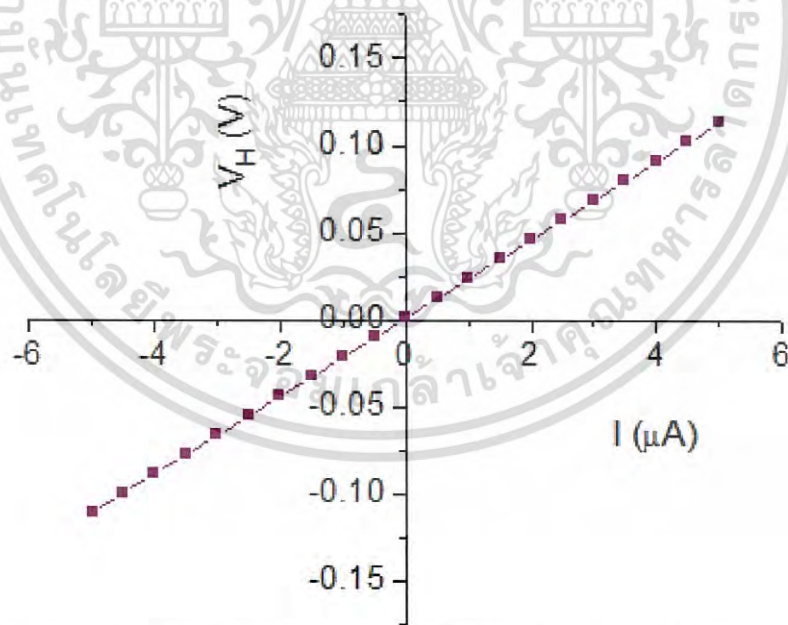


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

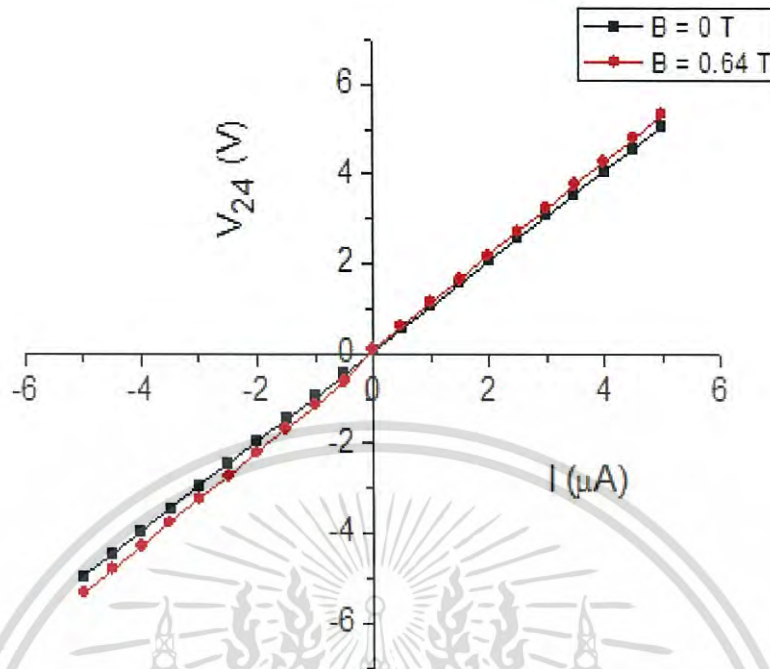


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

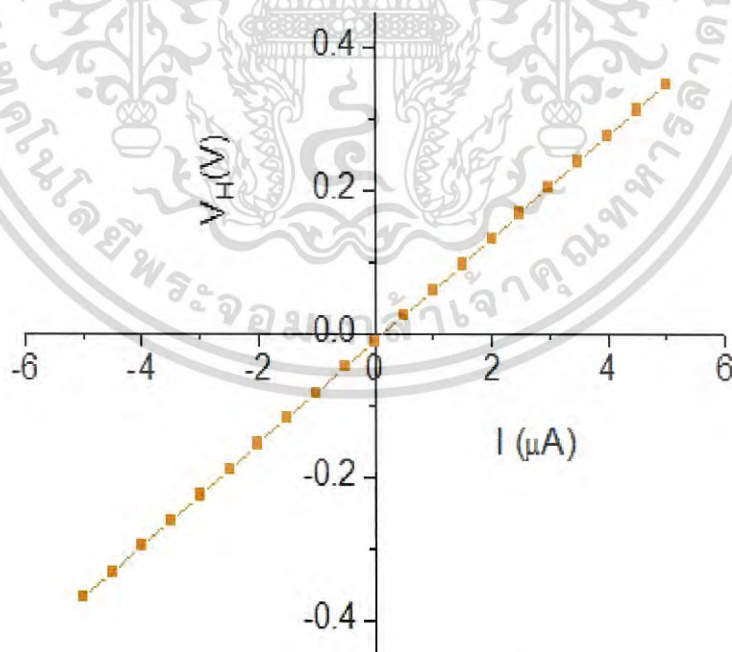


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

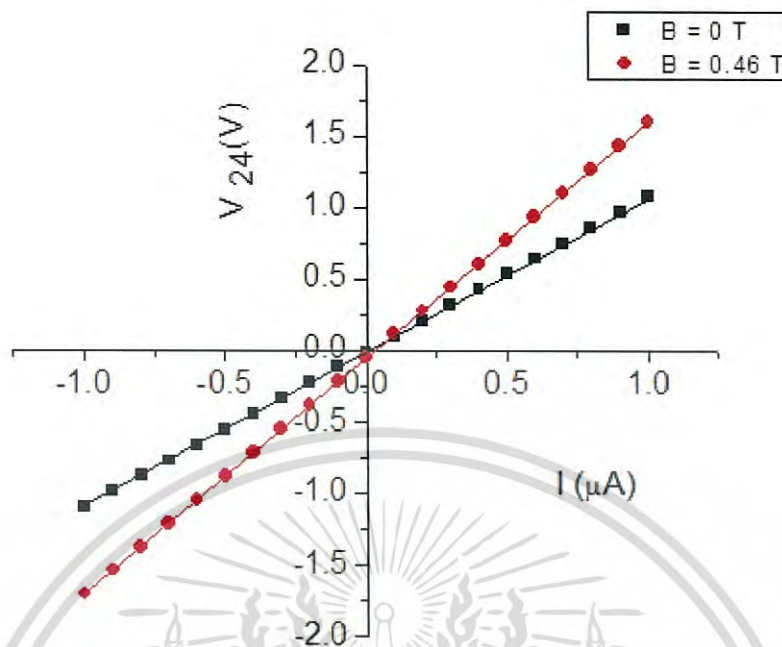


รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

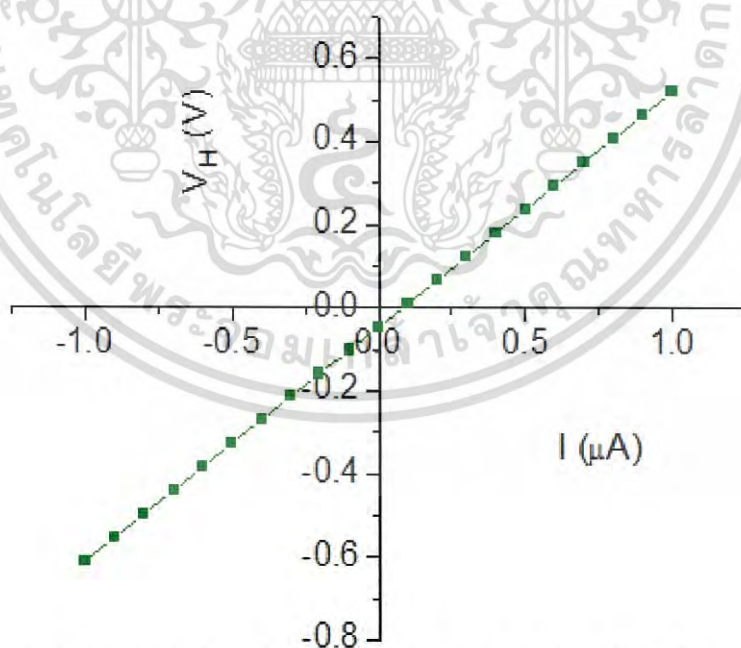


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

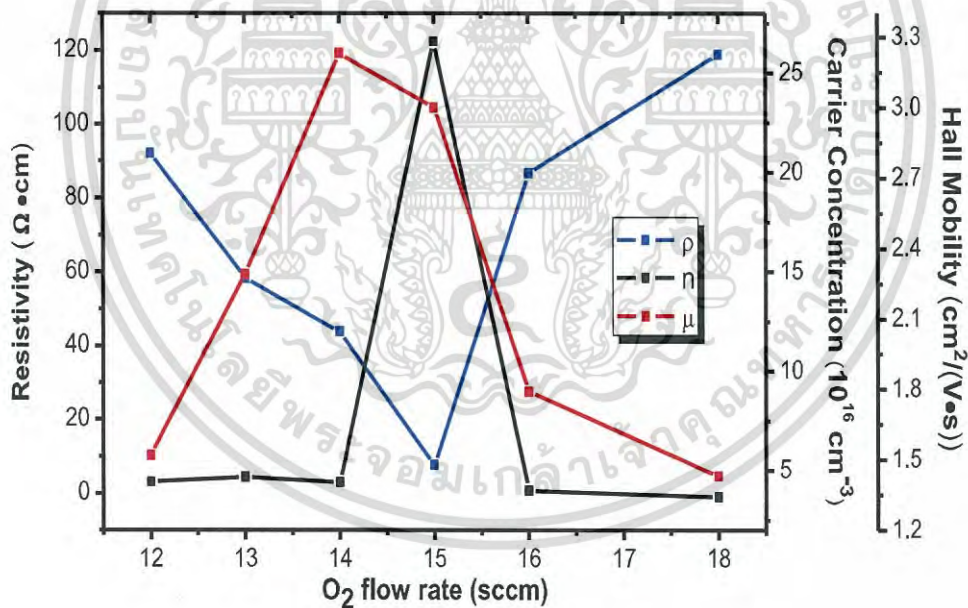


รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

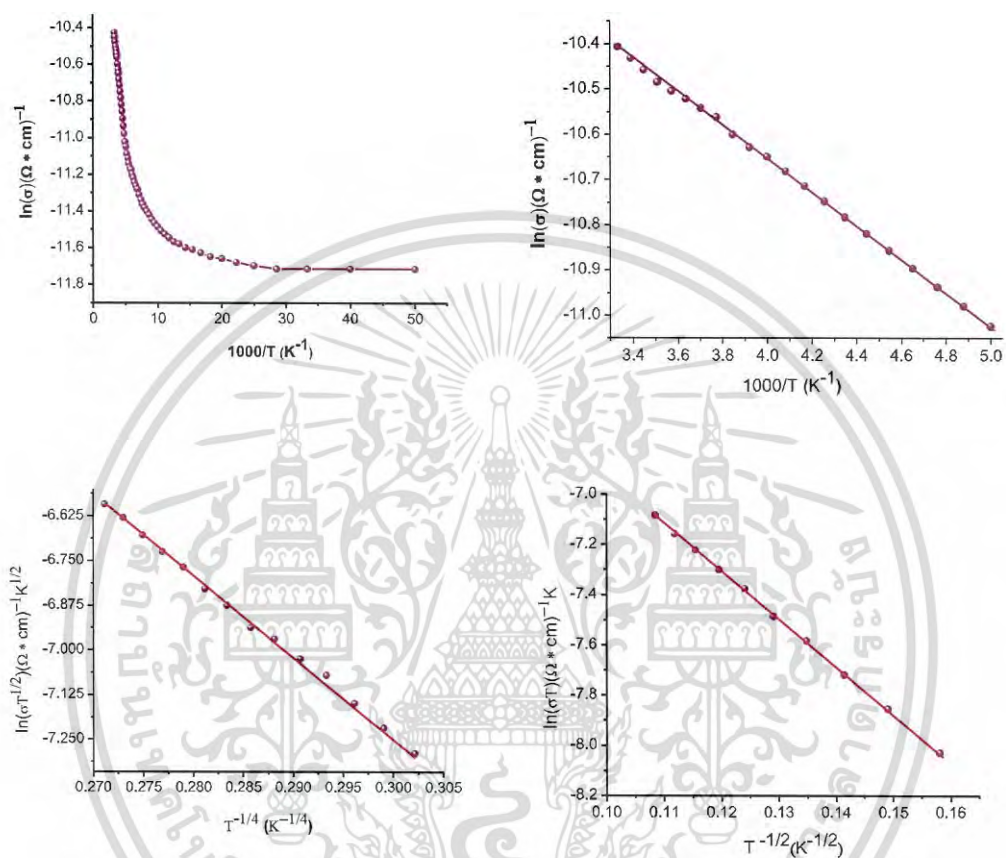
O ₂ flow rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Constant (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)
12	1.16×10^6	92.08	1.34×10^2	4.44×10^{16}	1.52
13	1.84×10^6	58.32	1.40×10^2	4.66×10^{16}	2.29
14	8.75×10^5	43.79	1.41×10^2	4.41×10^{16}	3.23
15	1.55×10^5	7.79	2.34×10^1	2.66×10^{17}	3.01
16	1.73×10^6	86.73	1.56×10^2	4.01×10^{16}	1.79
18	2.37×10^6	118.87	1.70×10^2	3.67×10^{16}	1.43



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_g)

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-200 เคลวิน พลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้จากกราฟ lnσ กับ 1000/T คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมด้วยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ 0.042 อิเล็กตรอนโวลต์

เมื่ออุณหภูมิต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnσ กับ 1000/T ดังสมการ

โดยที่

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

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

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่
 N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)
 E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด
 ϵ_s คือ เฟอร์มิตติวิตีของ SnO₂ (มีค่าเท่ากับ $11.65 \times 8.85 \times 10^{14}$ ฟารัดต่อเซนติเมตร)

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากสมการ

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

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

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

เมื่อพิจารณาให้ละเอียดเพิ่มขึ้นอีกจะพบว่ากราฟ $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ ในช่วงอุณหภูมิ 300-200 เคลวิน มีความชัน 2 ค่า โดยในช่วงอุณหภูมิ 300-270 เคลวิน เป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ไปยังแถบนำ ส่วนในช่วงอุณหภูมิ 265-200 เคลวิน อาจพิจารณาว่ากลไกการกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จะแสดงดังตารางที่ 4.9 แต่เนื่องจากค่า E_{NNH} มีค่าสูงเกินไป ดังนั้นกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน ไม่โดดเด่นไปกว่าการทรานซิชันจากระดับผู้ให้ไปยังแถบนำ

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

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

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

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงดัง

ความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

หรือ

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

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

หรือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หรือ

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

และ

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

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

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

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

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

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

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

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

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

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

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้ อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

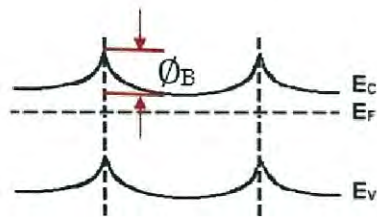
$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}}$$

หรือ

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



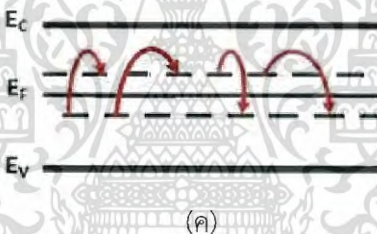
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



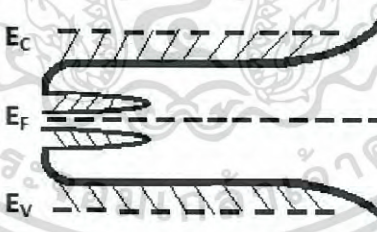
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.48 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

(ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโต

(ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน

(ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

(ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Temperature Range (K)	Temperature (K)	E_{NNH} (eV)	N_d (cm^{-3})	T_{C1} (K)
265-200	265	0.032	5.91×10^{18}	37.7

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

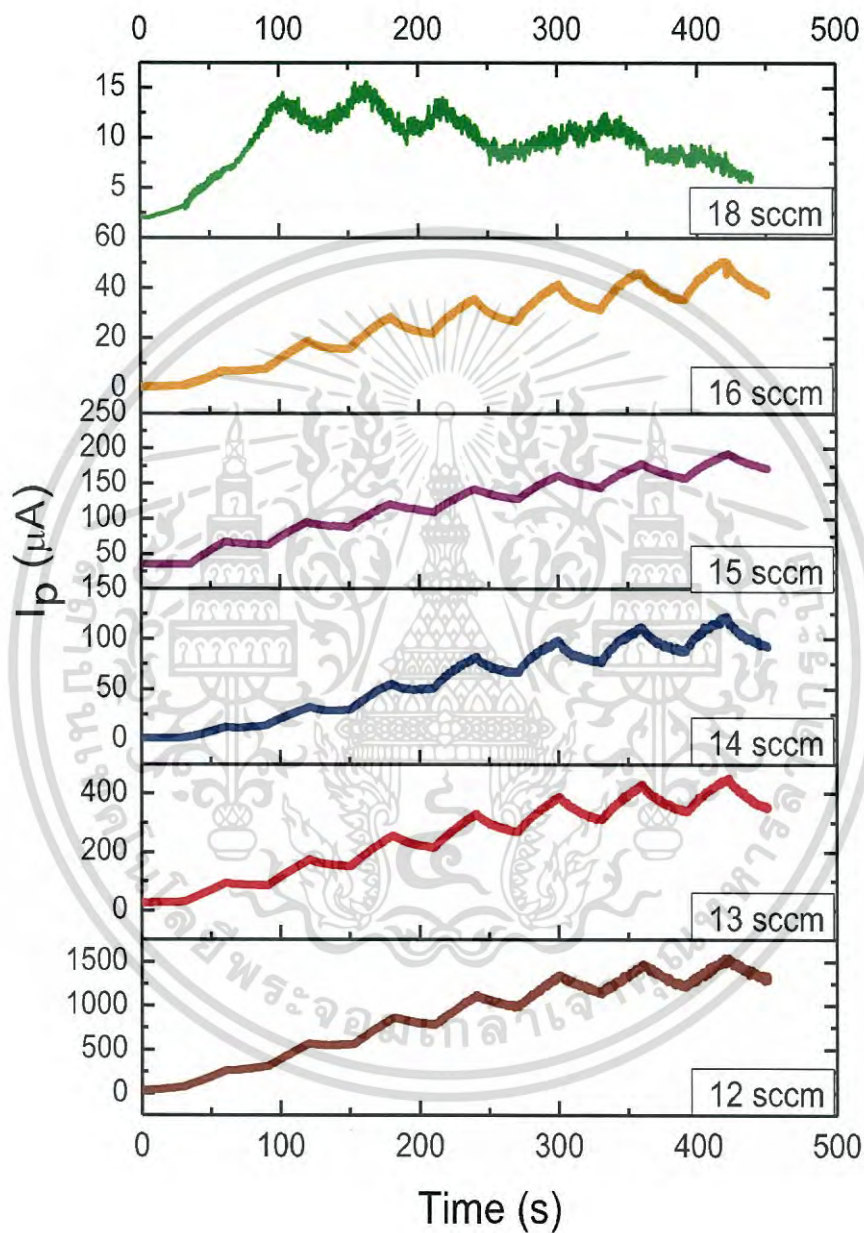
Temperature Range (K)	$\sigma_{0,Mott}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹	$T_{0,Mott}$ (10^4K)	$N_0(E_F)$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$)	$R_{hop,Mott}$ (10^{-7}cm)	$W_{hop,Mott}$ (eV)	$R_{hop,Mott}/\xi_{Mott}$	T_{C2} (K)
190-120	0.5613	24.27	1.64×10^{21}	1.8069	0.0246	2.24	8.42

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

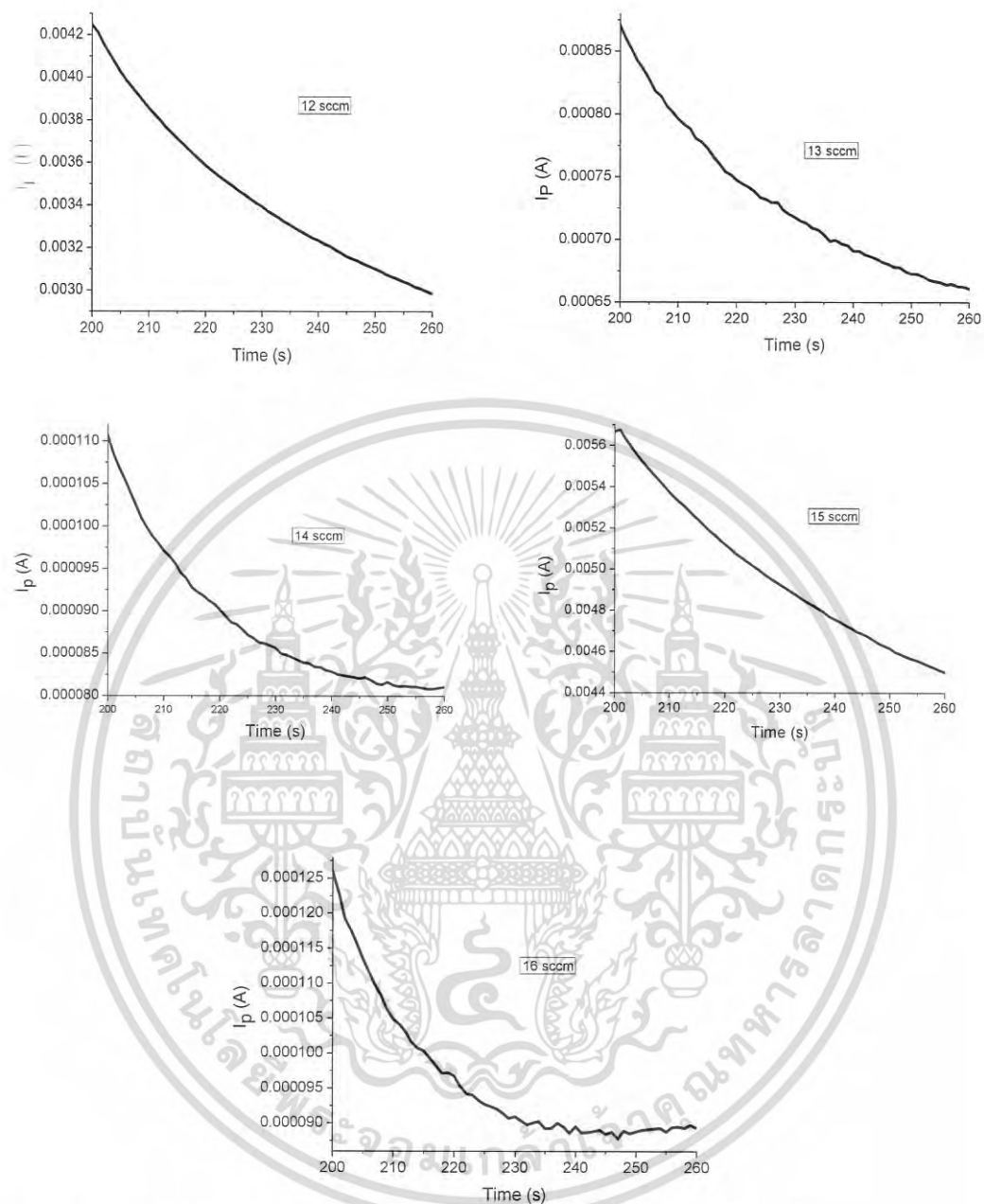
Temperature Range (K)	$\sigma_{0,ES}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹	$T_{0,ES}$ (K)	ξ_{ES} (cm)	$W_{hop,ES}$ (meV)	$R_{hop,ES}/\xi_{ES}$	Δ_{CES} (10^{-6}eV)
85-40	6.47×10^{-3}	357.47	1.98×10^{-5}	7.517	0.513	3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

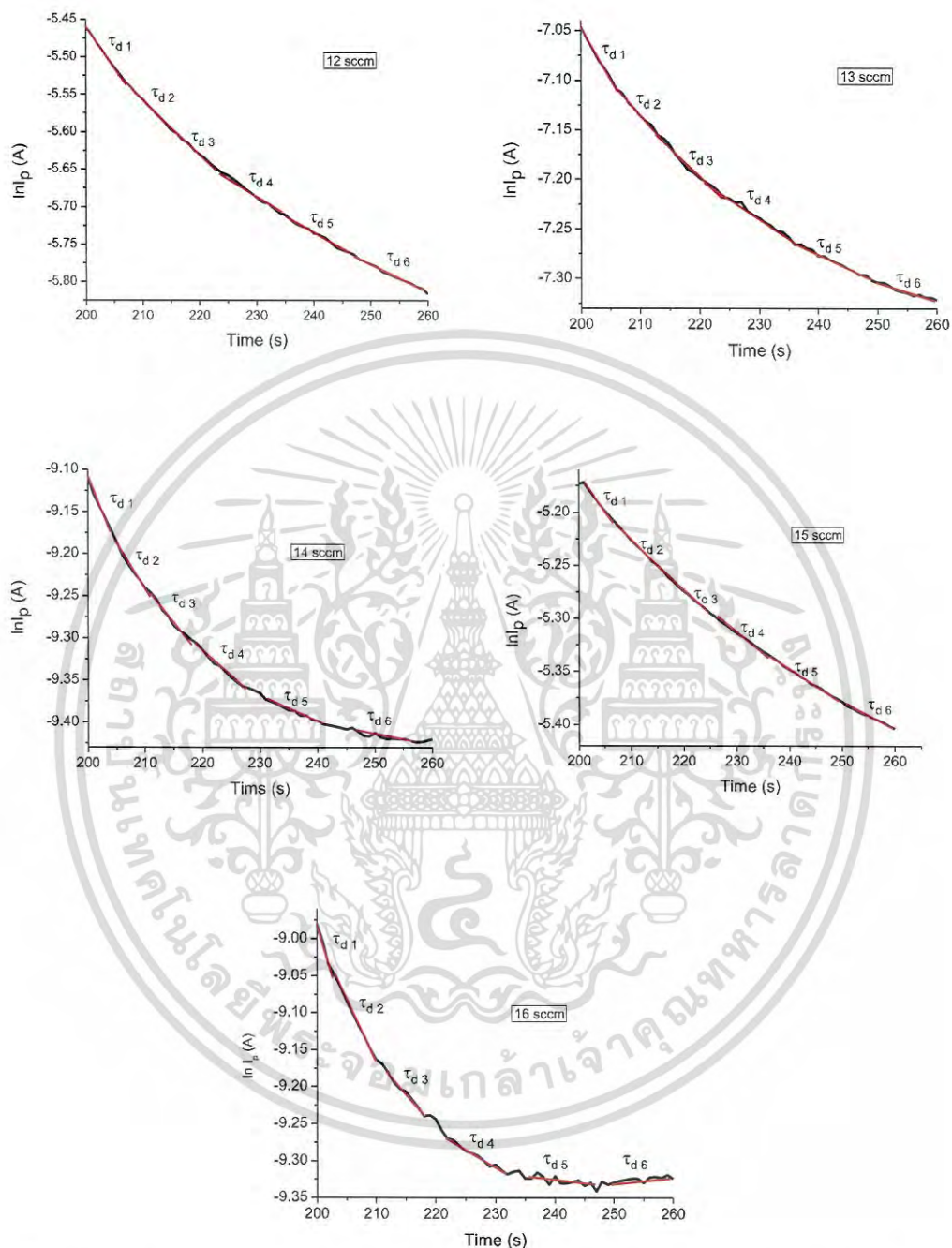


รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

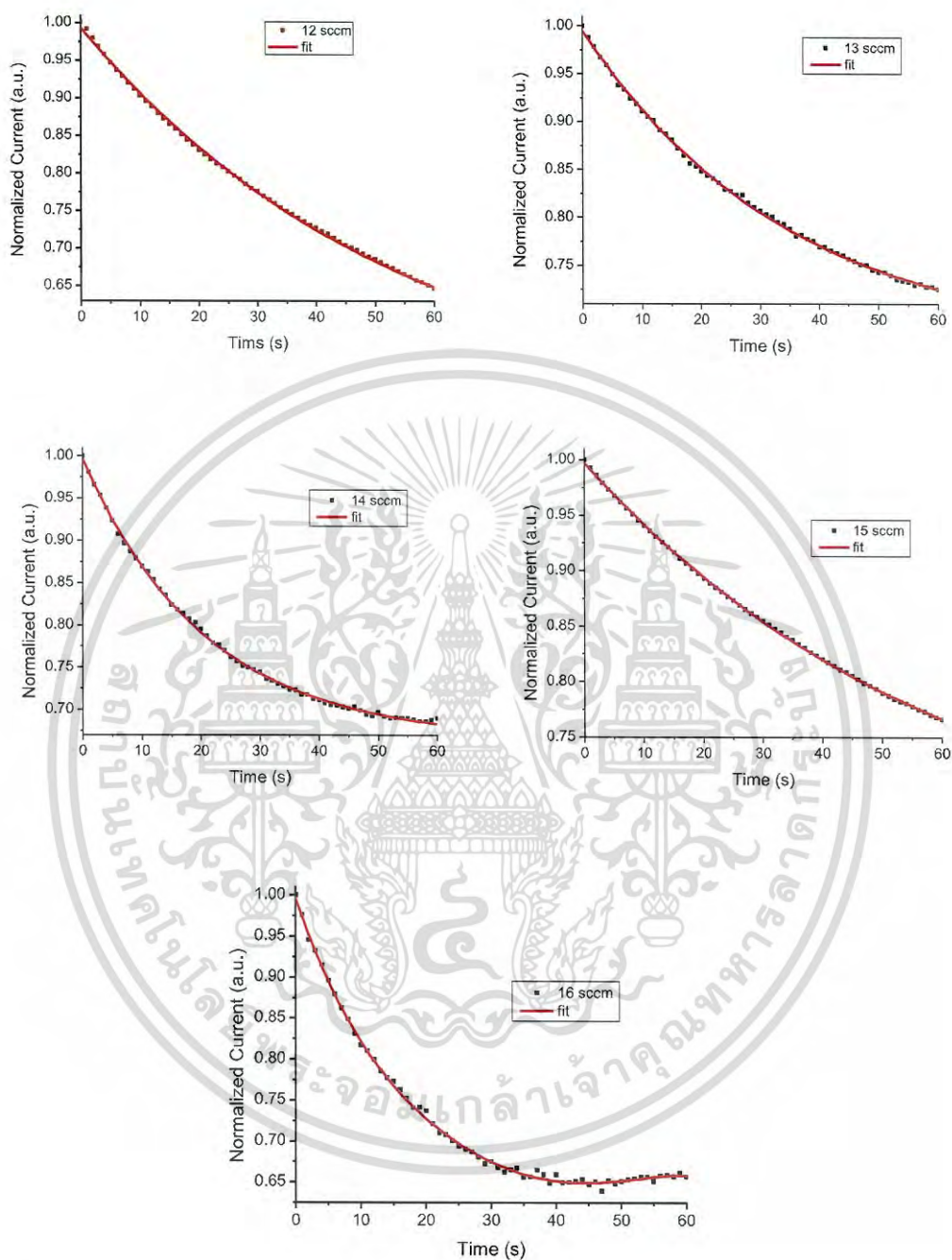


รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟิตีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร้งที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.52 การพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาหลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสาร กิ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟทีซีเอ็มแก๊สไนตรอนสปัตเตอร์ริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	Decay Time (s)					
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
12	$A_1 = 0.8643$ $\tau_{d1} = 88.73$	$A_2 = 80.92$ $\tau_{d2} = 126.10$	$A_3 = -372.3$ $\tau_{d3} = 159.74$	$A_4 = -206.9$ $\tau_{d4} = 228.83$	$A_5 = 497.5$ $\tau_{d5} = 192.31$	$A_6 = 0.869$ $\tau_{d6} = 261.09$
13	$A_1 = 203$ $\tau_{d1} = 92.59$	$A_2 = -1816$ $\tau_{d2} = 138.88$	$A_3 = 6933$ $\tau_{d3} = 200.00$	$A_4 = -6941$ $\tau_{d4} = 245.70$	$A_5 = 1622$ $\tau_{d5} = 362.32$	$A_6 = 0.236$ $\tau_{d6} = 463.47$
14	$A_1 = 10.64$ $\tau_{d1} = 120.68$	$A_2 = 13.37$ $\tau_{d2} = 222.73$	$A_3 = -184$ $\tau_{d3} = 258.73$	$A_4 = 961.9$ $\tau_{d4} = 349.65$	$A_5 = -802.2$ $\tau_{d5} = 367.28$	$A_6 = 1.274$ $\tau_{d6} = 447.45$
15	$A_1 = 81.97$ $\tau_{d1} = 140.92$	$A_2 = -793.1$ $\tau_{d2} = 181.159$	$A_3 = 2411$ $\tau_{d3} = 211.41$	$A_4 = 278.6$ $\tau_{d4} = 279.32$	$A_5 = -1977$ $\tau_{d5} = 229.94$	$A_6 = 0.06908$ $\tau_{d6} = 380.60$
16	$A_1 = 0.4208$ $\tau_{d1} = 18.97$	$A_2 = 9.992$ $\tau_{d2} = 80.71$	$A_3 = -24.21$ $\tau_{d3} = 112.99$	$A_4 = -13.38$ $\tau_{d4} = 187.96$	$A_5 = 8.923$ $\tau_{d5} = 663.59$	$A_6 = 1.04$ $\tau_{d6} = 824.30$

ตารางที่ 4.13 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟพีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที หมายเหตุ $V_a=50$ โวลต์, $W=1.2$ เซนติเมตร, $L=0.4$ เซนติเมตร

Composition (x)	Decay Component											
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term		4 th Term		5 th Term		6 th Term	
	I_1 (A) (10^{-4})	N_{t1} (cm^{-3}) (10^{17})	I_2 (A) (10^{-4})	N_{t2} (cm^{-3}) (10^{17})	I_3 (A) (10^{-4})	N_{t3} (cm^{-3}) (10^{17})	I_4 (A) (10^{-4})	N_{t4} (cm^{-3}) (10^{17})	I_5 (A) (10^{-4})	N_{t5} (cm^{-3}) (10^{17})	I_6 (A) (10^{-4})	N_{t6} (cm^{-3}) (10^{17})
12	42.00	10.08	38.00	9.78	36.00	9.27	34.50	8.88	32.40	8.34	31.60	8.14
13	8.60	2.21	8.20	2.11	7.64	1.96	7.36	1.89	7.12	1.83	6.74	1.73
14	1.10	0.28	1.04	0.26	0.98	0.25	0.94	0.24	0.85	0.22	0.83	0.21
15	56.82	14.64	54.01	13.91	51.83	13.35	49.22	12.68	47.31	12.19	45.92	11.83
16	1.30	0.33	1.18	0.30	1.10	0.28	0.98	0.25	0.94	0.24	0.91	0.23

ตารางที่ 4.14 ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงเส้นต่ออรัณของฟิล์มบางของสารถึงตัวนำไฟฟ้าเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟที่ซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการใช้ของออกซิเจน 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที **หมายเหตุ** $V_a=50$ โวลต์, $W=1.2$ เซนติเมตร, $L=0.4$ เซนติเมตร และ $\mu = 3.23$ (เซนติเมตร)²/โวลต์ • วินาที)

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานโครงการพิเศษ ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง มีลักษณะเป็นสีส้มเหลืองจนถึงสีเหมือนกระจกสไลด์และมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 12, 13, 14, 15 และ 16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอลรูไทล์ ปรางกุระนาบ (110), (101), (211) และ (310) ในส่วนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆแสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส จากการศึกษาคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a , c และ V ของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าประมาณ 4.746 Å, 3.177 Å และ 71.56 Å³ ตามลำดับ

จากการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ เกรนที่พบมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันในทุกอัตราการไหลของออกซิเจน

ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.78, 3.66, 3.58, 3.45, 3.40 และ 3.55 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 7.79-118.87 โอห์ม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.79 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเป็น 1.18×10^2 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มเดียวกันกับสภาพต้านทานไฟฟ้า แต่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่อัตราการไหลของออกซิเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-270 เคลวิน พลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้จากกราฟ $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมด้วยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรจากการทดลองพบว่ามีค่าประมาณ 0.042 อิเล็กตรอนโวลต์

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอยู่ในช่วง 265-200 เคลวิน พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเสตอย่างแรง (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} มีค่าสูงเกินไปและ T_{c1} มีค่าต่ำเกินไป ดังนั้น กลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไม่โดดเด่นไปกว่ากลไกการทรานซิสชันจากระดับผู้ให้ไปยังแถบนำสำหรับในช่วงอุณหภูมิ 120-190 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 กรณีที่อุณหภูมิต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 85-40 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และ ช่องว่างของคูลอมบ์

การหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงทำได้โดยการนำข้อมูลของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ที่ปรากฏไว้การแทรกสอด บ่อนข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นคำนวณหาค่าซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงที่สัมพันธ์กับ ค่าความยาวคลื่นแสงในช่วงของการวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าในช่วงความยาวคลื่นยาว ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนเลยช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน แนวโน้มค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง จุดนี้แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีบทบาทสำคัญในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบแปรผกผันกล่าวคือ เมื่อค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสนับสนุนแนวคิดหนึ่งที่ว่าวัสดุที่มีความโปร่งแสงสูงจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงและค่าดัชนีหักเหต่ำทำให้เกิดการหักเหได้น้อยลง แสงสามารถส่งผ่านฟิล์มบางได้ดีเช่นกัน การที่มีค่าดัชนีหักเหมากจะทำให้ทิศทางของแสงในฟิล์มบางเปลี่ยนไปมากโอกาสที่แสงจะสูญเสียภายในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีสูงขึ้นเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของแสงในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีอิทธิพลคนละย่านกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ จะมีอิทธิพลอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของวัสดุใดๆจะมีค่าน้อยเมื่อวัสดุนั้นมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะแปรผกผันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน

โดยอาจกล่าวได้ว่า สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงเมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็น 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์มีแนวโน้มลดลง เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 400 ถึง 900 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่ทุกๆค่าอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวเป็นแนวคิดที่สนใจรูปแบบการสั่นของอิเล็กตรอนเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปในผลึก อิเล็กตรอนจะสั่นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆ ไอออนคอร์ในรูปแบบที่มีทิศทางเดียวกัน ในการพิจารณาได้อาศัยการทราบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับ ค่าความยาวคลื่นแสง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางแสงที่บ่งบอกถึงรูปแบบการทรานซิชันของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพื้นฐาน (ground state) กับ ระดับพลังงานในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) การหาค่าดังกล่าวทำได้โดยเขียนความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

จากการทดลองสามารถหาค่าพารามิเตอร์ E_0 และ E_d ได้ ซึ่งค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ (E_0) และ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ (M_1 และ M_2) จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นสิ่งหนึ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของอิเล็กตรอนในอะตอมที่จะโพลาริซ์ตามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้ามาในผลึก โดยบทบาทของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแบ่งเป็นสองช่วงความยาวคลื่น ซึ่งอธิบายด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่า จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น และมีพลังงานที่สูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ O ที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มบางที่เกิดจากอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้

ในการศึกษาค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้พบว่า ค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพ ส่วนจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้นและมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ที่อัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนในช่วง 12-16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีเยี่ยมสำหรับ กระแสโฟโตชาลง สามารถที่ดกราฟได้ด้วยสมการมัลติเพิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตค่อนข้างยาวจำนวนหลายค่า แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกประพัตต์ตัวเป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{16} - 10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 12-16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เรียนรู้หลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 12, 13, 14, 15, 16 และ 18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. ได้เรียนรู้การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
3. ได้เรียนรู้สมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและพารามิเตอร์ทางแสงต่าง ๆ โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว
4. ได้เรียนรู้สมบัติทางไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางและสามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ควรระวังอย่าให้ผิวหน้าของกระจกเป็นรอย เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ควรทำความสะอาดเครื่องสปัตเตอริงทุกครั้งก่อนการใช้งานและหลังการใช้งานด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. การวัดค่าสมบัติต่างๆของต่างๆได้ฟิล์มบาง ควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบางให้อยู่ในสภาพที่ดี หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, รัฐินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.”, รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณที่สูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.”, รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.”, รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีสเปคโตรอโรสโคปีเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CdS/CdTe$.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CdS/CdTe$.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภารุจ บัณฑิตาวิทย์. 2539. “สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อารี วิเชียรฉาย. 2543. “เครื่องมือวัดและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ.” เอกสารประกอบการเรียน คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เฉลิมพล รุจดาวงศ์, บุศรา นรารักษ์ และเบญจวรรณ ใจสว่าง. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงบางชนิด.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อุปลักษณ์ นาครักษ์. 2548. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พัชรिता เนื้อแก้วงาม และ ศุภกร ผันผล. 2554. “สมบัติตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือด้วยอะตอม F และ Sb.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. การประดิษฐ์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรหมพร ชุ่มชัยศิริ และ สุธินี สุรเกษมสวัสดิ์. 2558. “การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีเอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Baco, S. Chik, A. and Yassid Md, F. 2003. “Study on Optical Properties of Tin Oxide Thin Films at Different Annealing Temperature.” *J.Sci Tech.*10:61-71.
- Elangvan, E. and Ramamurthi, K. 2003. “Studies on Optical Properties of Polycrystalline SnO₂:Sb Thin Films Prepared Using SnCl₂ Precursor.” *J Cryst. Res. Technol.* 38(9):779-784.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Serin, T. Serin, N. Karadeniz, S. Sari, H. Tugluoglu, N. and Pakma, O. 2006. "Electrical, Structural and Optical Properties of SnO₂ Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis." *J.Non-Cryst Solid.* 352:209-215.
- Ganjoo, A. and Golovchak, R. 2008. "Computer Program PARAV for Calculating Optical Constants of Thin Films and Bulk Materials: Case Study of Amorphous Semiconductors." *J. Optoelec. And Mater.* 10(6): 1328-1332.
- Choi, W.S. 2009. "The Fabrication of Tin Oxide Films by Atomic Layer Deposition Using Tetrakis (Ethylmethylamino) Tin Precursor." *J.Trans Electrical and Electronic Material* 27:123-129.
- Majumder, S. 2009. "Synthesis and Characterisation of SnO₂ Films Obtained by a Wet Chemical Process." *J.Mater Sci-Poland.* 27:123-129.
- Vantran, T. Turrell, S. Eddafi, M. Capoen, B. Bouzaoui, M. Roussel, P. Berneschi, S. Righini, M. Ferrari, M. Bhaktha, S.N.B. Cristini, O. Kinowski, C. 2010. "Investigations of the effects of the growth of SnO₂ nanoparticles on the structural properties of glass-ceramic planar waveguides using Raman and FTIR spectroscopies." *J. Mol. Struct.* 976:314-319
- Serin, N. Yildiz, A. Alsac, A.A. and Serin, T. 2011. "Estimation of Compensation Ratio by Identifying The Presence of Different Hopping Conduction Mechanisms in SnO₂ Thin Films." *J.Thin Solid Films.* 519:2302-2307.
- Yildirim A.M. 2012. The Effect of Copper Concentration on structural, Optical and Dielectric Properties of Cu_xZn_{1-x}S Thin Films." *J.Optics Communication.* 285:1215-1220.
- Bansal, S. Pandya K.D. and Kashyap C.S. 2012. "Charge Transport Mechanism in High Conductivity Undoped Tin Oxide Thin Films Deposited by Reactive Sputtering." *J.Thin Solid Films.* 524:30-34.
- Chetri, P. and Choudhury, A. 2013. "Investigation of Optical Properties of SnO₂ Nanoparticles." *J.Physica E.* 47:257-263.
- Ali, M.S. Hussain, T.S. Bakar, A.S. Muhammsd, J. and Rahman U.N. 2013. "Effect of Doping on the Structural and Optical Properties of SnO₂ Thin Films Fabricated by Aerosol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Assisted Chemical Vapor Deposition.” *J. of Physics : Conference Series* 439(2013) 012013.
- Bansal, S. Pandya, D.K. Kashyap, S. and Haranath, D. 2014. “Growth Ambient Dependence of Defects, Structural Disorder and Photoluminescence in SnO₂ Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering.” *J. Alloy and Comp* 583:186-190.
- Guo, D. Wang, L. Du, Y. Ma, Z. and Shen, L. 2015. “Preparation of Octahedral Cu₂O Nanoparticles by a Green Route.” *Mater. Lett.* 160:541-543.
- Gurakar, S. Serin, T. and Serin, N. 2015. “Studies on Optical Properties of Antimony Doped SnO₂ Films.” *J. Alloy and Comp* 583:186-150.
- Tripathy, K.S. 2015. “Refractive Indices of Semiconductors from Energy Gaps.” *J. App; Surf. Sci* 352: 16-22.
- Rana, M.P.S. Singh, F. Negi, S. Gautam, S.K. Singh, R.G. and Ramola, R.C. 2016. “Band Gap Engineering and Low Temperature Transport Phenomenon in Highly Conducting Antimony Doped Tin Oxide Thin Films.” *J. Ceramics Inter* 42 : 5932-5941.
- Ali, K. Iqbal, J. Jan, T. Wan, D. Ahmad, N and Ahamd, I. 2017. “Structural, Dielectric and Magnetic Properties of SnO₂-CuFe₂O₄ Nanocomposites.” *J. Magn. Magn. Mater* 428:417-423



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sn O₂
Tin Oxide

Lattice : Tetragonal
S.G. : P42/mnm (136)
a = 4.73700
c = 3.18500
Z = 2

Mol. weight = 150.69
Volume [CD] = 71.47
Dx = 7.002
I/|cor = 9.62

2th	l	h	k	l
26.591	100	1	1	0
33.888	74	1	0	1
37.959	20	2	0	0
38.991	3	1	1	1
42.645	1	2	1	0
51.787	50	2	1	1
54.767	12	2	2	0
57.855	6	0	0	2
61.892	10	3	1	0
62.618	<1	2	2	1
64.768	10	1	1	2
65.981	13	3	0	1
69.259	<1	3	1	1
71.306	5	2	0	2
74.477	<1	2	1	2
78.727	7	3	2	1
81.152	2	4	0	0
83.744	5	2	2	2
84.207	<1	4	1	0
87.246	2	3	3	0
89.817	5	3	1	2

ICSD COLLECTION CODE : 016635
REMARKS FROM ICSD : REM REF.
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.



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

*Acta Crystallogr., volume 9, page 515, (1956) :
Baur, W.H.

Radiation : CuKα1
Lambda : 1.54060

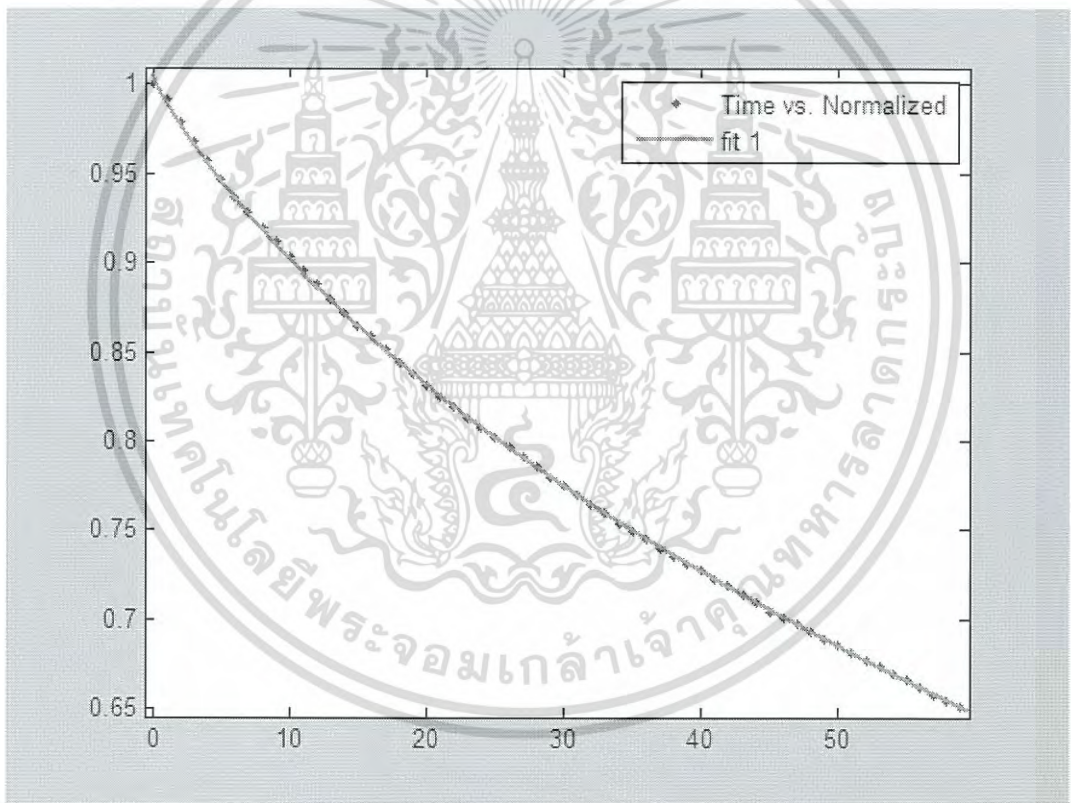
Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 12 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/88.73)))+(b*(\exp(-x/126.10)))+(c*(\exp(-x/159.74)))+ (d*(\exp(x/228.831))) + (e*(\exp(x/192.31)))+(f*(\exp(-x/261.09)^z))$$

a	0.8643	τ_1 (s)	88.73
b	80.92	τ_2 (s)	126.10
c	-372.3	τ_3 (s)	159.74
d	-206.9	τ_4 (s)	228.83
e	497.5	τ_5 (s)	192.31
f	0.869	τ_6 (s)	261.09
z	0.7595		

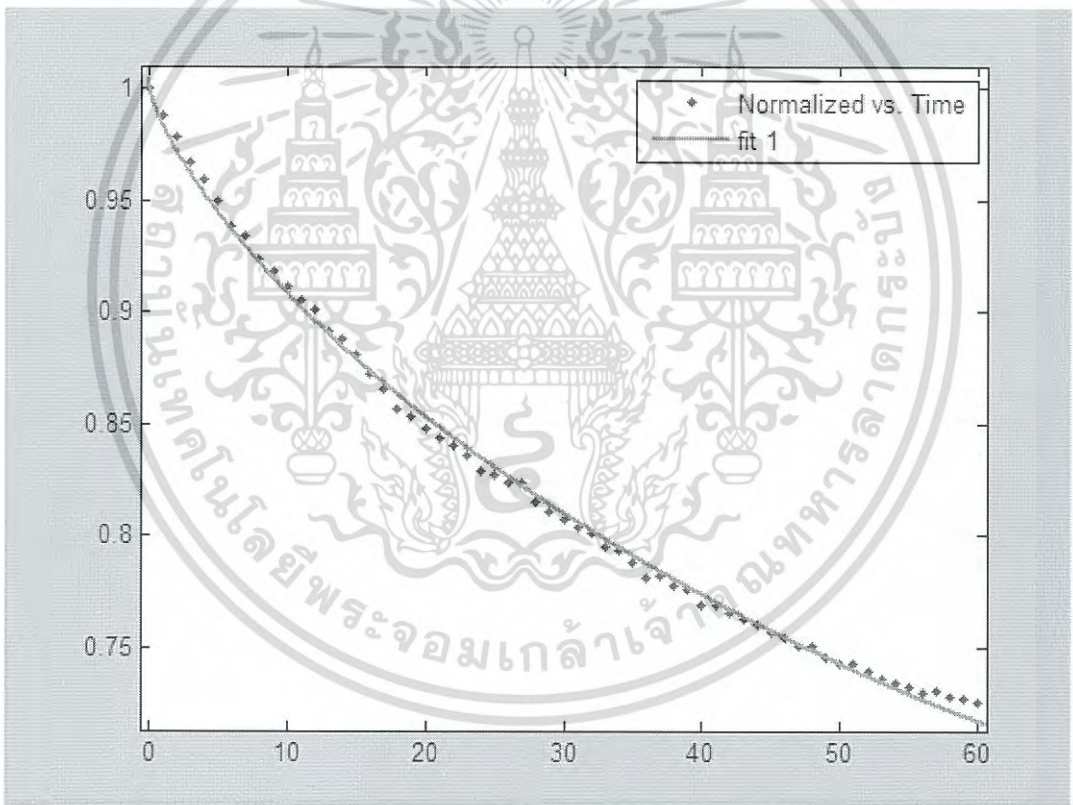


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 13 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/92.59)))+(b*(\exp(-x/138.88)))+(c*(\exp(-x/200.00)))+(d*(\exp(-x/245.70))) + (e*(\exp(-x/362.32)))+(f*(\exp(-x/463.47)^z))$$

a	203	τ_1 (s)	92.59
b	-1816	τ_2 (s)	138.88
c	6933	τ_3 (s)	200.00
d	-6941	τ_4 (s)	245.70
e	1622	τ_5 (s)	362.32
f	0.236	τ_6 (s)	463.47
z	0.4236		

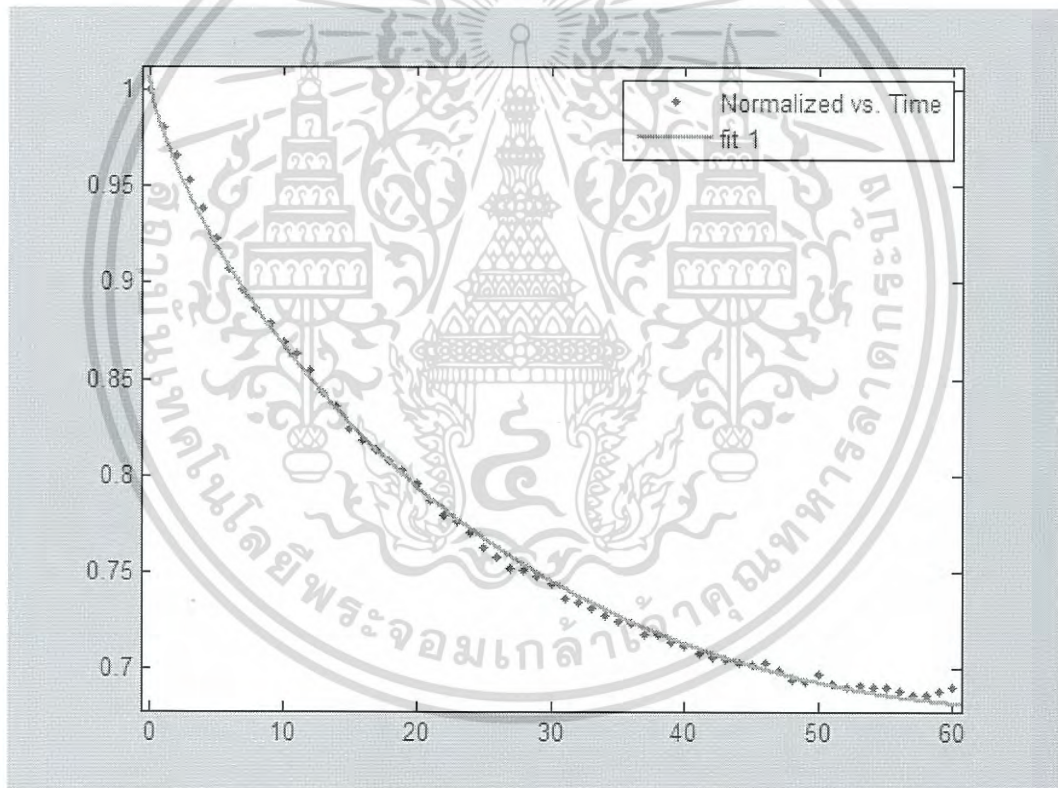


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 14 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/120.68)))+(b*(\exp(-x/222.73)))+(c*(\exp(-x/258.73)))+(d*(\exp(-x/349.65)))+(e*(\exp(-x/367.28)))+(f*(\exp(-x/447.45)^z))$$

a	10.64	τ_1 (s)	120.68
b	13.37	τ_2 (s)	222.73
c	-184	τ_3 (s)	258.73
d	961.9	τ_4 (s)	349.65
e	-802.2	τ_5 (s)	367.28
f	1.274	τ_6 (s)	447.45
z	0.6329		

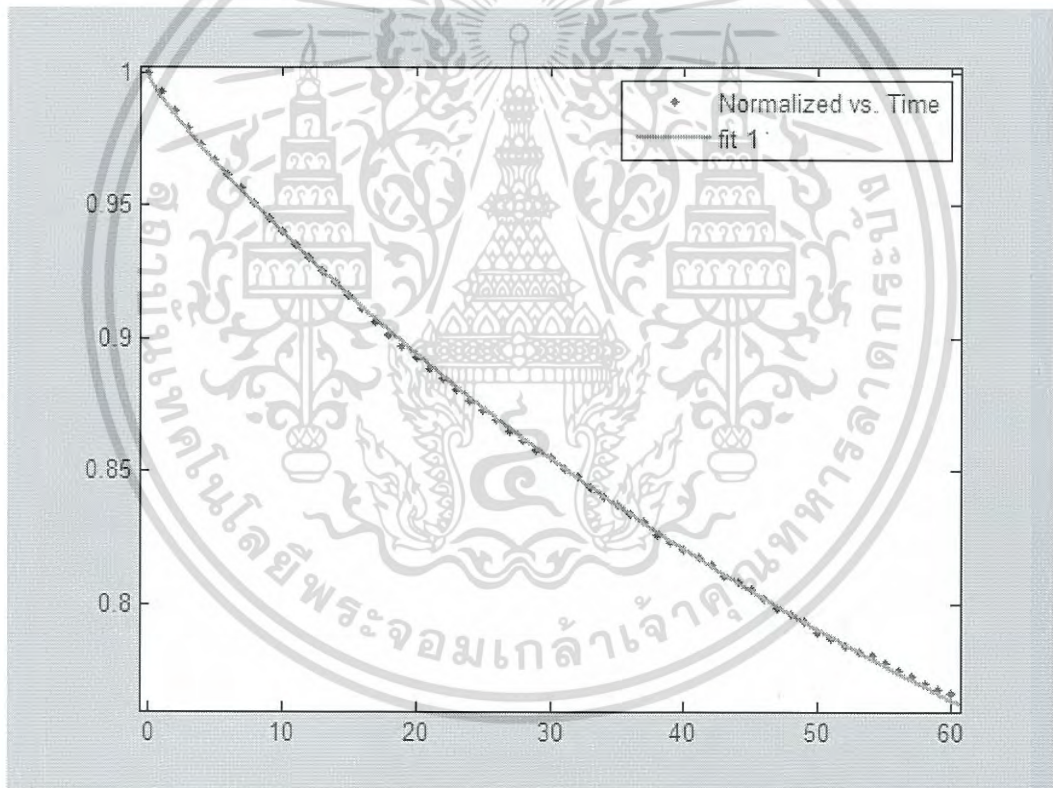


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 15 sccm

$$f(x) = (a*(\exp(-x/140.92)))+(b*(\exp(-x/181.159)))+(c*(\exp(-x/211.41)))+(d*(\exp(-x/279.32))) + (e*(\exp(-x/229.94)))+(f*(\exp(- (x/380.60)^z)))$$

a	81.97	τ_1 (s)	140.92
b	-793.1	τ_2 (s)	181.159
c	2411	τ_3 (s)	211.41
d	278.6	τ_4 (s)	279.32
e	-1977	τ_5 (s)	229.94
f	0.06908	τ_6 (s)	380.60
z	0.4693		

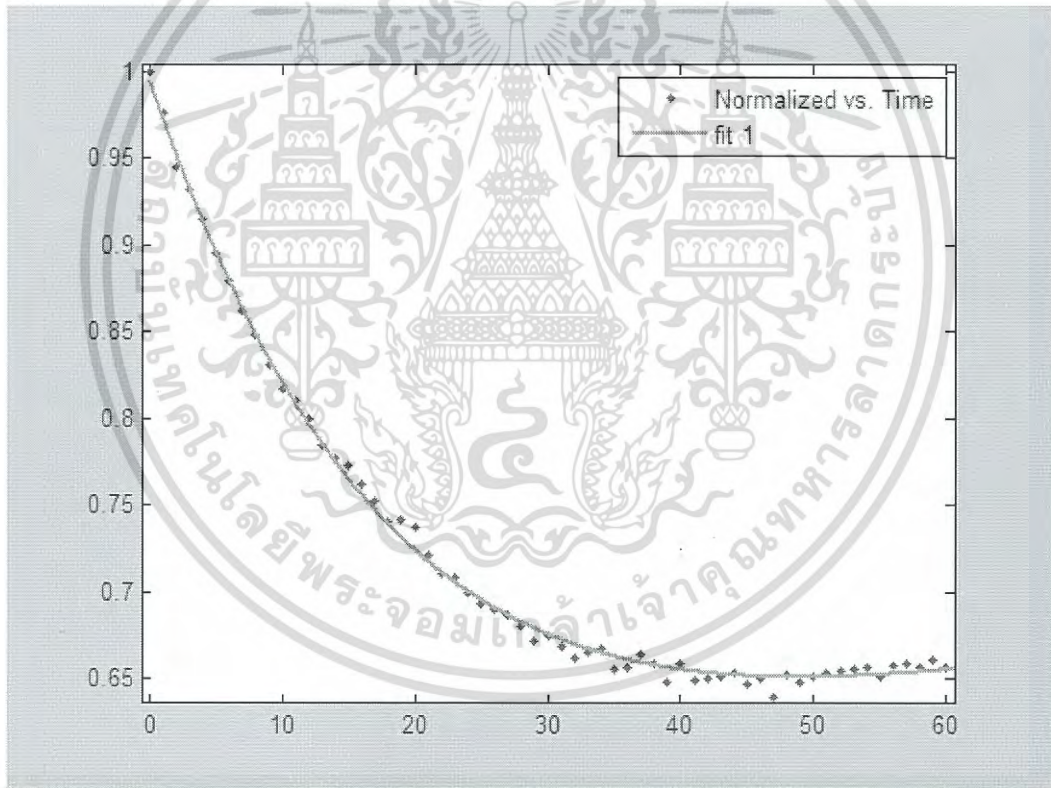


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay Time : 16 sccm

$$f(x) = (a \cdot \exp(-x/18.97)) + (b \cdot \exp(-x/80.71)) + (c \cdot \exp(-x/112.99)) + (d \cdot \exp(-x/187.96)) + (e \cdot \exp(-x/663.59)) + (f \cdot \exp(-x/824.30)^z)$$

a	0.4208	τ_1 (s)	18.97
b	9.992	τ_2 (s)	80.71
c	-24.21	τ_3 (s)	112.99
d	19.25	τ_4 (s)	187.96
e	-13.38	τ_5 (s)	663.59
f	8.923	τ_6 (s)	824.30
z	1.04		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้