

การศึกษาสมบัติทางแสงและการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
โดยวิธีการเอพแมกนีตรอนสปัตเตอริง

A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MAGNETRON
SPUTTERING

นายชยากร ศอกจะบท

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การศึกษาสมบัติทางแสงและการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MAGNETRON
SPUTTERING

นายชยากร สอกจะบก

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556


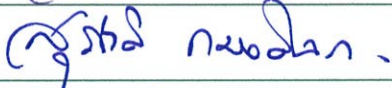


**A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MAGNETRON
SPUTTERING**

MR.CHAYAKORN SOKJABOK

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

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติทางแสงและการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MAGNETRON SPUTTERING
ชื่อนักศึกษา	นายชยากร ศอกจะบก
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ		ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ	เตชิตธีระ	
อ.สุรชาติ	กมลคิดก	
อ.ธนภรณ์	ลีลาวพัฒนานนท์	
รศ.ดร.วราวุฒิ	เถาถัดดา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติทางแสงและการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MAGNETRON SPUTTERING
ชื่อนักศึกษา	นายชยากร ศอกจะบก
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดคคา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยเจือธาตุคิบุกในอินเดียมทินออกไซด์ (Indium oxide:ITO) ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดย Target เป็นอินเดียมออกไซด์ - ทินออกไซด์ (Indium Oxide – Tin Oxide Target,90/10 wt % 3.00”Diamater x 0.25” Thick,99.99% Pure Kurt J.Lesker company)โดยใช้ฐานรองแผ่นแก้ว (Microscope Sides Germany)โดยเงื่อนไขการปลูกฟิล์มที่ระยะห่างระหว่างTarget ฐานรองรับ 7.5 เซนติเมตร power rf 50w อบที่ 400 องศาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบาง พบว่าผลของการอบมีผลโดยตรงกับโครงสร้างทางกายภาพ สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติทางแสง พบว่าฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่ก่อนการอบจะมีสีเข้มกว่าฟิล์มหลังการอบ ซึ่งฟิล์มก่อนการอบและหลังการอบ มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า $2.74 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ และ $1.11 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ ตามลำดับ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางด้านการพัฒนาพลังงานทดแทน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง, ระบบสุญญากาศ,สปัตเตอริง,อินเดียมทินออกไซด์

Title	A STUDY OF OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF INDIUM TIN OXIDE THIN FILM BY RF MEGNETRON SUTTERING
Student	Chayakorn Sokjabok
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
Co-Advisor	Dr. S Tipawan Khlayboonme

ABSTRACT

This special project to study the growing thin film indium tin oxide. The elements doped tin Indium Tin Oxide (Indium oxide: ITO) technique with RF magnetron sputtering Sterling by Target as indium oxide - tin oxide (Indium Oxide - Tin Oxide Target, 90/10 wt% 3.00 "Diameter. x 0.25 "Thick, 99.99% Pure Kurt J.Lesker company) with the base glass (Microscope Sides Germany) the conditions of the growing film, the distance between the base 7.5 cm power rf 50w Target bake at 400 degrees for 1 hour. and check the conductivity properties . Optical properties and structure of thin films. Found that the effect of a direct effect on the physical structure. Conductivity properties Light gray and properties The indium tin oxide films before baking is darker than the film after drying. These films before baking and after baking. Conditions are $2.74 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ resistivity and $1.11 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ resistivity respectively conditions can be applied in the development of renewable energy. Dye-sensitized solar cells .

Keywords: thin films, vacuum , sputtering Sterling , indium tin oxide .

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดีเนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา และ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำทางในการดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอบคุณพระองค์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.อมร เทศสกุลวงศ์ ช่วยแนะนำทางในการดำเนินงานวิจัยและเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสมทบ แซ่เจี่ย พี่ๆและเพื่อนๆทุกคนในห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และฟิสิกส์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปได้อย่างดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ด้านต่างๆ จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบพระคุณ คุณแม่ คุณพ่อ ผู้ให้กำเนิดและอบรมสั่งสอน แนะนำแนวทางในการดำเนินชีวิต ขอคุณญาติพี่น้องทุกท่าน บุคคลอันเป็นที่รัก ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องตลอดมา ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้ลุล่วงได้อย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมี จากโครงการพิเศษนี้ข้าพเจ้าขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชยากร สอกจะบก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อินเดียมทินออกไซด์.....	4
2.1.1 โครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์.....	4
2.1.2 สมบัติที่สำคัญของอินเดียมทินออกไซด์.....	4
2.2 ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน.....	5
2.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2.2 คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	11
2.3 ระบบสเป็คเตอรिंग.....	12
2.3.1 การเคลือบฟิล์มบาง.....	12
2.3.2 กระบวนการสเป็คเตอรिंग.....	14
2.3.3 กระบวนการ โกรว์ดิซซาร์จ.....	15
2.3.4 อาร์เอฟสเป็คเตอรिंग (RF Sputtering).....	16
2.3.5 แมกนีตรอน (Magnetron).....	18
2.4 การก่อเกิดฟิล์มบาง.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 เทคนิคการวัดเพื่อวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง	27
2.5.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	28
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	30
2.5.3 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง.....	34
2.5.4 ปრაกฏการณ์ของฮอลล์	40
2.5.5 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด	43
2.5.6 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีระบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม.....	47
2.5.7 รามานสเปกโทรสโกปี	50
2.5.8 การวัดมุมสัมผัส	53
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
3.1 ระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	58
3.1.1 ระบบสุญญากาศ	58
3.1.2 อุปกรณ์วัดและแสดงผลความดัน	60
3.1.3 หัวแมกนีตรอน	62
3.1.4 ชุดแท่นยึดจับแผ่นฐานรอง	63
3.1.5 ระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ	64
3.1.6 แหล่งกำเนิดวิทยุ	67
3.1.7 ระบบทำความเย็น	68
3.1.8 แผ่นเป่าสารเคลือบ.....	70
3.1.9 เตาเผา.....	71
3.2 การเตรียมระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง	72
3.2.1การเตรียมแผ่นฐานรอง	74
3.3 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	75
3.3.1 ขั้นตอนการเปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	75
3.3.2 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	76
3.3.3 ขั้นตอนการปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	77
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	78
3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy	78

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดแบบ 4 จุด (4 Point Probe)	100
3.4.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contant Angle)	103
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	107
4.1	การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์	107
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	107
4.2	ผลการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ.....	108
4.2.1	การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	108
4.2.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	110
4.2.3	เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง	119
4.2.4	ปรากฏการณ์ของฮอลล์	122
4.2.5	การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด.....	123
4.2.6	อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีระบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	124
4.2.7	รามานสเปกโทรสโกปี.....	125
4.2.8	การวัดมุมสัมผัส	125
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	128
5.1	สรุปผลการวิจัย	128
5.2	ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น	130
เอกสารอ้างอิง	131
ภาคผนวก ก	132
ภาคผนวก ข	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน	3
2.1 แสดงมุมมองสัมพัทธ์ค่าต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง.....	54
4.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นฐานรองแก้วสไลด์.....	107
4.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..	109
4.3 ผลการทดลองฮอลล์เอฟเฟกต์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ	122
4.4 ผลการทดลองฮอลล์เอฟเฟกต์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	123
4.5 ผลการทดลองการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ.....	123
4.6 ผลการทดลองการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่หลังการอบ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	123
4.7 ผลการคำนวณมุมมองสัมพัทธ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างอินเดียมออกไซด์(ก)และโครงสร้างทินออกไซด์	4
2.2 แถบพลังงานของวัสดุต่างๆ.....	5
2.3 อิเล็กตรอนและโฮลที่เป็นพาหะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า.....	6
2.4 อิเล็กตรอนอิสระจำนวนเท่ากันเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน	7
2.5 โครงผลึกแบบเยอรมันเนียม.....	8
2.6 สารเจือปนฟอสฟอรัสเข้าไปในผลึกเยอรมันเนียม ในจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวของฟอสฟอรัสจะไปสร้างพันธะกับเยอรมันเนียม 4 ตัว อีก 1 ตัวจะถูกฟอสฟอรัสดึงดูและวิ่งวนไปรอบๆฟอสฟอรัส	9
2.7 สารเจือปนอินเดียม(In) ในผลึกเยอรมันเนียมทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนของอินเดียมขาด 1 ตัว ดังนั้นอิเล็กตรอนจากเยอรมันเนียม (Ge) จะวิ่งแทนทำให้เกิด โฮลที่พันธะระหว่างเยอรมันเนียมด้วยกัน	10
2.8 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำ	11
2.9 การแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ.....	13
2.11 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าสารเคลือบ	14
2.12 กระแสที่เกิดจากการไบแอสโดยศักย์พลาสมา	17
2.13 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสปัตเตอร์ริง	18
2.14 การเกิดศักย์บนเป้าสารเคลือบที่สัมพันธ์กับศักย์ลอย	18
2.15 โครงสร้างระบบแมกนีตรอนแบบพลาสมา	19
2.16 การไหลของพลาสมาจากเป้าสารเคลือบ ไปยังฐานรองรับในระบบแม่เหล็กแบบไม่สมมูล	20
2.17 Single Atom Arrives	21
2.18 Migration Re-evaporation.....	21
2.19 Collision & Combination of Single Atoms	22
2.20 Nucleation.....	22
2.21 Growth	22
2.22 Island Shape.....	23
2.23 Coalescence	23
2.24 Continuity	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม	24
2.26 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม	24
2.27 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ	26
2.28 X-Ray Diffractometer (XRD) ผลิตโดย Bruker AXS, German รุ่น Model D8 Advance สถานที่ตั้ง ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	28
2.29 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์	29
2.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	30
2.31 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ผลิตโดย JEOL JAPAN รุ่น JSM-7001F สถานที่ตั้งศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของฟิล์มบางภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	30
2.32 องค์ประกอบภายในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	33
2.33 Uv-vis nir light source ผลิตโดย Ocean Optic รุ่น DH-2000 mikropack สถานที่ตั้ง ห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	34
2.34 Fiber Optic Spectrometer ผลิตโดย Ocean Optic รุ่น USB 4000 สถานที่ตั้ง ห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	34
2.35 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	35
2.36 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น.....	36
2.37 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ ด้วย Uv-vis Spectrophotometer	36
2.38 ส่วนประกอบของเครื่อง Single beam UV-Vis Spectrophotometer.....	37
2.39 ส่วนประกอบของเครื่อง Double beam UV-Vis Spectrophotometer	38
2.40 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของอินเดียมทินออกไซด์.....	39
2.41 ปฏิกิริยาการเกิดของฮอปล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	41
2.42 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ.....	44
2.43 โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่อยู่บนแผ่นผลึกฐานรอง.....	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.44 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลิตโดย Nicolet รุ่น 6700 สถานที่ตั้ง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	47
2.45 ส่วนประกอบของ Dispersive Infrared Spectrometer	48
2.46 ส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer.....	49
2.47 Raman Spectroscopy ผลิตโดย Thermo Scientific รุ่น DXR Smart Ramanสถานที่ตั้ง วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	50
2.48 พลังงานในการเกิดรามานสเปกตรัม	53
2.49 มุมสัมผัสระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ ของเหลว-ของแข็ง.....	53
2.50 คุณสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว.....	55
2.51 การวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง.....	55
2.52 มุมสัมผัสของหยดน้ำ	56
3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง.....	57
3.2 ระบบปั๊มสุญญากาศปั๊มไอฟุ้งกระจาย (ซ้าย) และปั๊มโรตารี (ขวา)	58
3.3 แคมเบอร์สุญญากาศภายนอก.....	59
3.4 แคมเบอร์สุญญากาศภายใน.....	60
3.5 หัววัดพิราณี	60
3.6 หัววัดเพนนิ่ง	61
3.7 ตัวแสดงผล Active gauge controller บริษัทเอดวาร์ด	61
3.8 หัวแมกนีตรอน.....	62
3.9 หัวแมกนีตรอนที่ใส่เป้าสารเคลือบอินเดียมทินออกไซด์	62
3.10 ชุดแม่เหล็กถาวรและแผ่นเหล็กฐานรองภายในหัวแมกนีตรอน	63
3.11 ชุดแท่นยึดจับแผ่นฐานรอง.....	63
3.12 รายละเอียดการเชื่อมต่อคอนเนกเตอร์แบบดีบี 15 ของหัวควบคุมอัตราการไหล รุ่น Sierra 810.....	64
3.13 เครื่องควบคุมอัตราการไหลก๊าซ	64
3.14 ก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบการปลูกฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (Ultra High Purity Argon Purity 99.999% min).....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 กล้องควบคุมการเปิดปิด การจ่ายก๊าซ และกำลังแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ.....	65
3.16 การเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดวิทยุ	66
3.17 V27D-T1 Digital LED Voltmeter.....	66
3.18 แหล่งจ่ายไฟ $\pm 5 V$ และ $\pm 15 V$	67
3.19 ET-EAZY168 STAMP Controller.....	67
3.20 เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุขนาดกำลังสูงสุด 650 วัตต์.....	68
3.21 เครื่องทำความเย็นปั๊มไอฟุ้งกระจาย (ซ้าย) เครื่องทำความเย็นของเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุและหัวแมกนีตรอน (ขวา)	69
3.22 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย	69
3.23 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของหัวแมกนีตรอน	70
3.24 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของเครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ	70
3.25 เป้าสารเคลือบอินเดียมออกไซด์-ทินออกไซด์ (Indium Oxide-Tin Oxide Target 90/10 wt%) 3.00" Diameter x 0.25" Thick, 99.99% Pure ของ Kurt J.Lesker company.....	71
3.26 เตาเผาฮีท้อ Nabertherm รุ่น NAB-1 L15/11/B 170	71
3.27 อุปกรณ์สำหรับตรวจเช็คระบบปลุกฟิล์มบาง	72
3.28 อุปกรณ์ต่างๆภายในแชมเบอร์สุญญากาศ	72
3.29 การทำความสะอาดโดยการขัดคราบสกปรกและความปนเปื้อน	73
3.30 ระบบสุญญากาศที่มีการห่อลুমินีเยมฟอย.....	73
3.31 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรอง	74
3.32 ขั้นตอนการเปิดระบบการปลุกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	75
3.33 ขั้นตอนการปลุกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	76
3.34 ขั้นตอนการปิดระบบการปลุกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	77
3.35 สเปกโทรสโกปีบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000.....	79
3.36 สเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศา (c°) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	79
3.37 โปรแกรม MATLAB	80
3.38 หน้าต่าง โปรแกรม MATLAB 2009a.....	80
3.39 ขั้นตอนการ Import Data.....	81
3.40 หน้าต่าง โปรแกรม Import Data	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.41 หน้าต่างโปรแกรม Import Wizard.....	82
3.42 หน้าต่าง Workspace โปรแกรม MATLAB.....	82
3.43 คำสั่งที่หน้าต่าง Command window.....	83
3.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางและ ค่าความยาวคลื่น.....	83
3.45 คำสั่งที่หน้าต่าง Command window.....	84
3.46 สเปกตรัมการส่องผ่านในช่วงที่มีรีวิการแทรกสอด.....	84
3.47 หน้าต่าง Curve Fitting Tool ของโปรแกรม MATLAB.....	85
3.48 หน้าต่าง DATA ของโปรแกรม MATLAB.....	85
3.49 หน้าต่างการ Smooth Graph.....	86
3.50 หน้าต่างการ Smooth Graph.....	86
3.51 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่นำมา Smooth Graph.....	87
3.52 หน้าต่าง Save Smoothed Data To Workspace ของโปรแกรม MATLAB.....	87
3.53 การกำหนดค่าตัวแปรและการเปิดไฟล์ evomax.m.....	88
3.54 หน้าต่าง Editor ของไฟล์ evomax.m.....	88
3.55 การหาจุดสูงสุดรีวิการแทรกสอด.....	89
3.56 ตัวแปร table ที่หน้าต่าง Workspace.....	89
3.57 ตัวแปรที่แสดงบนหน้าต่าง Workspace.....	90
3.58 การกำหนดค่า DATA เพื่อทำการ Fitting Graph.....	90
3.59 การเลือกข้อมูลในหน้าต่าง DATA.....	91
3.60 กราฟ T_{max} และ T100 เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ.....	91
3.61 หน้าต่าง Fitting ของโปรแกรม MATLAB.....	92
3.62 การกำหนดค่าในการ Fitting Graph.....	93
3.63 กราฟ T_{max} และ T100 เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ เมื่อทำการ Fitting Graph.....	94
3.64 หน้าต่าง Analysis ของโปรแกรม MATLAB.....	94
3.65 เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง.....	95
3.66 การสร้างตัวแปร Wavelength และ T100 ในโปรแกรม MATLAB.....	95
3.67 การกำหนดค่า DATA ในหน้าต่าง DATA ของโปรแกรม MATLAB.....	96
3.68 การตั้งค่าต่างๆ ในการ Fitting Graph.....	96

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.69 กราฟที่ทำกร Fitting	97
3.70 หน้าต่าง Analysis ของโปรแกรม MATLAB	97
3.71 โปรแกรม Thicknesscal	98
3.72 ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนีหักเหของแผ่นฐานรองที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Thicknesscal	98
3.73 ข้อมูล T_{\min} และ T_{\max} ที่ได้จากตัวแปร table	99
3.74 ข้อมูล T_{\min} และ T_{\max} ที่ได้จากตัวแปร table ที่ถูกจัดเรียงจากสูงไปต่ำ	99
3.75 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง.....	100
3.76 อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด	100
3.77 การวางชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	101
3.78 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด.....	102
3.79 การบันทึกผลจากเครื่อง Multimeter.....	102
3.80 การวัดชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ ด้วยอุณหภูมิ 400 องศา (c°) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	103
3.81 ภาพถ่ายที่นำไปตัดเพื่อที่จะเห็นบริเวณรอยต่อ.....	103
3.82 หน้าจอการแสดงผลของโปรแกรม	105
3.83 การหาค่ามุมสัมผัสและระยะห่างระหว่างขอบของหยดน้ำโดยใช้ระบบ Manual	105
3.84 การหาค่ามุมสัมผัสและระยะห่างระหว่างขอบของหยดน้ำโดยใช้ระบบ Auto.....	105
3.85 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างขอบของหยดน้ำในหน่วยของ Pixel.....	106
4.1 แก้วสไลด์ ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	108
4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	109
4.3 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า.....	110
4.4 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 30,000 เท่า.....	111
4.5 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 50,000 เท่า.....	111

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบที่อุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า	112
4.7 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบที่อุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดกำลังขยาย 30,000 เท่า	112
4.8 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบที่อุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดกำลังขยาย 50,000 เท่า	113
4.9 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 1	114
4.10 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 2	114
4.11 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 3	115
4.12 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุดที่ 1	115
4.13 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุดที่ 2	116
4.14 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุดที่ 3	116
4.15 ผลที่ได้จากการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบาง อินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ	117
4.16 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด EDS	118
4.17 ผลที่ได้จากการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบาง อินเดียมทินออกไซด์หลังทำการอบด้วยอุณหภูมิ400 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	118

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราดโหมด EDS.....	119
4.19 สเปกตรัมการดูดกลืนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	120
4.20 สเปกตรัมการสะท้อนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	120
4.21 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบเมื่อทำการวัด 3 ตำแหน่ง	121
4.22 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเมื่อทำการวัด 3 ตำแหน่ง	121
4.23 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	122
4.24 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนและหลังการอบ ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	124
4.25 ผลการวัดด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี	125
4.26 การวัดมุมสัมพัทธ์แผ่นแก้ว.....	125
4.27 การวัดมุมสัมพัทธ์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	126
4.28 การวัดมุมสัมพัทธ์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ	126

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
ITO	Indium Tin Oxide
TCO	Transparent Conducting Oxides
OLED	Organic Light Emitting Diode
XRD	X-ray Diffraction Spectrometer
SEM	Scanning Electron Microscope
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
CRT	Cathode Ray Tube
EM	Electron Microscope
OM	Optical Microscope
PMT	Photomultiplier Tube
CCDs	Charge Coupled devices
Thin Film	ฟิล์มบาง
Semiconductor	สารกึ่งตัวนำ
E	สนามไฟฟ้า
B	สนามแม่เหล็ก
V	ความต่างศักย์
I	กระแสไฟฟ้า
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ρ	สภาพความต้านทานไฟฟ้า
c	ความเร็วแสง
λ	ค่าความยาวคลื่น
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อน
A	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
T	สัมประสิทธิ์การส่องผ่าน
n	ดัชนีหักเห
n_0	ดัชนีหักเหในตัวกลาง 0
n_1	ดัชนีหักเหในตัวกลาง 1
T_s	การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นใดของแผ่นฐานรอง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายโดยสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ได้มีการศึกษาค้นคว้าพัฒนาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า กระบวนการปลูกฟิล์มบางหลายวิธีงานวิจัยนี้ใช้วิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง(RF Magnetron Sputtering) ในปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide:ITO)เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดต่อสิ่งแวดล้อมและให้การยึดเกาะของเนื้อฟิล์มที่ทนทาน

อินเดียมออกไซด์(Indium Oxide)และอินเดียมทินออกไซด์(Indium Tin Oxide) เป็นโลหะออกไซด์และมีสภาพนำไฟฟ้า ทฤษฎีของแถบพลังงานนี้สามารถอธิบายวัสดุขั้วไฟฟ้า(Transparent Conducting Oxides: TCO) เช่น ทินไดออกไซด์ด้วย (SnO₂)เจือด้วยพลวง(Antimony:Sb)หรือฟลูออรีน (fluorine : F)อินเดียมออกไซด์เจือด้วยดีบุก (Tin :Sn) และแคดเมียมออกไซด์(cadmium oxide)เจือด้วยซิงค์ออกไซด์(zinc oxide : ZnO₂)จะมีแถบพลังงานที่กว้างและให้การส่องผ่านแสงช่วงตามมองเห็น(Visible Light)สูงขึ้น

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าค่าค่าความโปร่งแสงสูงที่ความยาวคลื่นที่ช่วงตามมองเห็นได้ (Visible light) ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีพันธะที่แข็งแรง สามารถนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จอภาพ Organic Light-Emitting Diode (OLED)มอนิเตอร์Liquid Crystal Display (LCD)เครื่องมือทางแสง(Optical Instrument)เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dry Sensitized Solar cell) ส่วนประกอบของไมโครชิพ (Microchip) และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.เพื่อศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 2.เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เพื่อตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง
2. ศึกษาเทคนิคการวัดสมบัติของฟิล์มบาง ดังนี้
 - 2.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectrometer : XRD)
 - 2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning electron microscope : SEM)
 - 2.3 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy : UV-vis)
 - 2.4 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)
 - 2.5 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด (4-point probe)
 - 2.6 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีระบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม
(Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR)
 - 2.7 รามานสเปกโทรสโกปี (Ramann Spectroscopy)
 - 2.8 การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)
3. ปลูกฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงบนฐานรองแผ่นแก้ว
4. ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

- ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง
- ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบระบบสุญญากาศและหัวแมกนีตรอนของระบบปลูกฟิล์มบาง
- ขั้นตอนที่ 3 ปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์
- ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ขั้นตอนที่ 5 สรุปผลและจัดทำรายงานปริญญาานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	ปี 2556							ปี 2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ขั้นตอนที่ 1	■	■	■							
ขั้นตอนที่ 2				■	■	■				
ขั้นตอนที่ 3							■			
ขั้นตอนที่ 4								■	■	
ขั้นตอนที่ 5										■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจระบบเครื่องปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง
2. มีความรู้ความเข้าใจวิธีการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง
3. มีความรู้ความเข้าใจขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดต่างๆได้

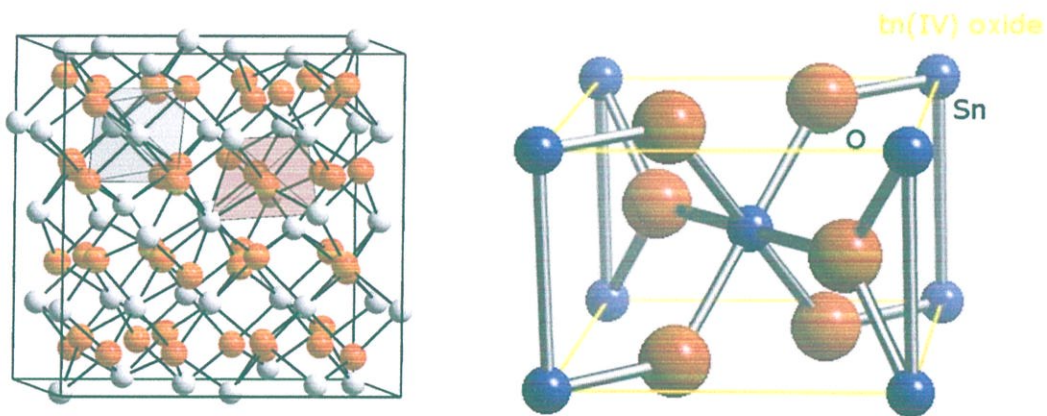
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ลักษณะเด่นของอินเดียมคือขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงการเตรียมอินเดียมทินออกไซด์ โดยเจืออินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) และดีบุก(Sn) ในสุญญากาศด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF Magnetron sputtering) ลงบนแผ่นกระจก เรียกว่ามีลักษณะโปร่งใสเหมือนกระจกแต่นำไฟฟ้าได้ดี เช่นเดียวกับโลหะ

2.1 อินเดียมทินออกไซด์

2.1.1 โครงสร้างของอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอินเดียมออกไซด์และ โครงสร้างทินออกไซด์

2.1.2 สมบัติที่สำคัญของอินเดียมทินออกไซด์

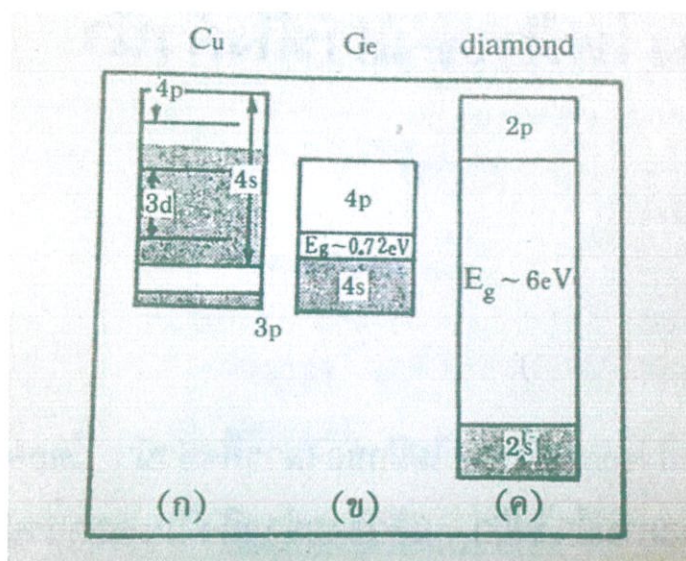
1. จุดหลอมเหลว 1900 องศาเซลเซียส
2. อินเดียมทินออกไซด์มีสีเหลืองอ่อนถึงน้ำตาล
3. สมบัติการส่องผ่านแสงสูงในช่วงตามองเห็น
4. ความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
5. เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมีสูง
6. มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าอินเดียมออกไซด์

เนื่องจากอินเดียมออกไซด์ มีลักษณะ โครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic) ซึ่งมีความเสถียรสูงทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้าได้ดี แต่การควบคุมทิศทางการส่งผ่านของไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก วิธีการแก้ไขก็คือ นำสารประกอบออกไซด์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับอินเดียมออกไซด์สารทินออกไซด์ ส่งผลให้

โครงสร้างอินเดียมออกไซด์เกิดการบิดเบี้ยวจากเดิมไปเล็กน้อย จึงทำให้ทิศทางการส่งผ่านไฟฟ้าได้ คีขึ้น

2.2 ตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

ในแถบพลังงานสามารถบรรจุอิเล็กตรอนเป็นจำนวน 2 เท่าของอะตอมในหนึ่งเซลล์ปฐมภูมิ (Primitive cell) ดังนั้นในแถบพลังงานที่สูงที่สุดในของแข็งที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็นเลขคี่จะมี อิเล็กตรอนอยู่ครึ่งหนึ่งดังรูป 2.2(ก) วัสดุที่มีแถบพลังงานเช่นนี้จะมีสภาพความนำไฟฟ้าที่สูง ซึ่งเรา เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า (โลหะ) เช่น โลหะอัลคไลน์ ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 1



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของวัสดุต่างๆ

ส่วนของแข็งที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ในหนึ่งเซลล์ปฐมภูมิ (Primitive cell) จะมี แถบพลังงานดังรูป 2.2(ค) ซึ่งแถบพลังงานจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน (Filled Band หรือ Valence Band) และแถบพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย (Empty Band) ซึ่งแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยก ด้วยแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden band) ถ้ามีอิเล็กตรอนอยู่เต็มเป็น Filled band โมเมนตัมของ อิเล็กตรอนจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงไม่ไหล เราเรียกของแข็งชนิดนี้ว่าฉนวน (Insulator) ดังนั้นผลึกที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนในเซลล์ปฐมภูมิ (primitive cell) เป็นเลขคู่จะ เป็นฉนวน แต่สมบัตินี้จะใช้ได้ในกรณีหนึ่งมิติเท่านั้น ถ้าเป็นผลึกแบบสามมิติมีโอกาสที่ แถบพลังงานจะซ้อนกันซึ่งทำให้บางส่วนของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ สามารถกระโดดขึ้นไป อยู่ในชั้นแถบพลังงานว่างข้างบนได้ เช่น พวกแร่ที่มีธาตุโลหะหายาก Rare earth ดังรูป 2.2(ข)

วัสดุที่เป็นฉนวน ต้องอยู่ในอุณหภูมิที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ เพราะอุณหภูมิที่สูงกว่าศูนย์องศา สัมบูรณ์ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบช่องว่าง (Empty Band) ด้วยความ

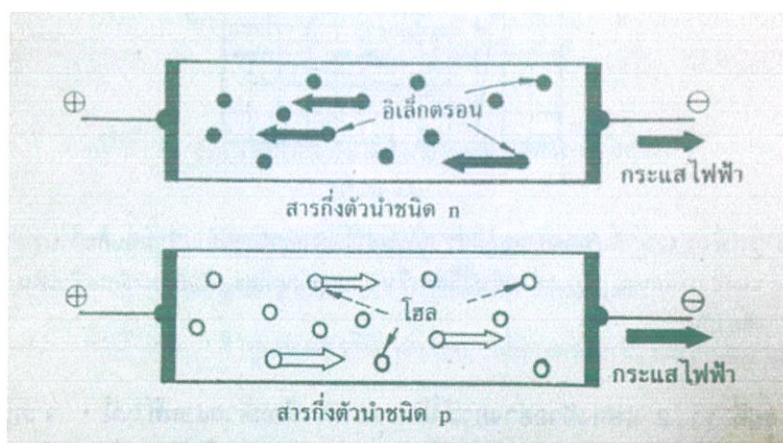
ร้อน ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นมาอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และโฮลที่เหลือในแถบวาเลนซ์ วัสดุที่มีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามหลาย eV จะมีสมบัติเป็นฉนวน เช่น เพชรซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 7 eV ส่วนเยอรมันเนียม (Ge) และซิลิกอน (Si) ซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1 eV อิเล็กตรอนจำนวนมากจึงถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้าและโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์จะเป็นพาหะนำไฟฟ้า ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้บ้าง ค่าสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน เราเรียกว่าสารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

โดยทั่วไปค่าสภาพความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในช่วง $10^{-5} - 10^8 \Omega m$ สารกึ่งตัวนำนั้นอาจเป็นได้ทั้งธาตุเดี่ยวและสารประกอบ

2.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

1. การนำไฟฟ้าแบบ Ambipolar

ข้อแตกต่างระหว่างกลไกการนำไฟฟ้าในโลหะและสารกึ่งตัวนำคือ ในสารกึ่งตัวนำนั้นพาหะที่จะเป็นตัวนำไฟฟ้ามีทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ดังรูป 2.3 อิเล็กตรอนจะไหลในทิศสวนทางกับสนามไฟฟ้า ส่วนโฮลจะไหลในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า แต่โดยทั่วไปแล้วสารกึ่งตัวนำชิ้นหนึ่งอาจมีพาหะทั้งสองชนิดพร้อมๆกัน ในเวลาเดียวกันได้ เราเรียกการนำไฟฟ้าด้วยพาหะอิเล็กตรอนและโฮลพร้อมๆกันว่าเป็นการนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Ambipolar Conduction)



รูปที่ 2.3 อิเล็กตรอนและโฮลที่เป็นพาหะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. ถ้าจำนวนของอิเล็กตรอนมีมากกว่าจำนวนของโฮล เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor)
2. ถ้าจำนวนของโฮลมีมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอนเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี

(P-Type Semiconductor)

3. ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนและจำนวนโฮลเท่ากันเรียกว่า สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

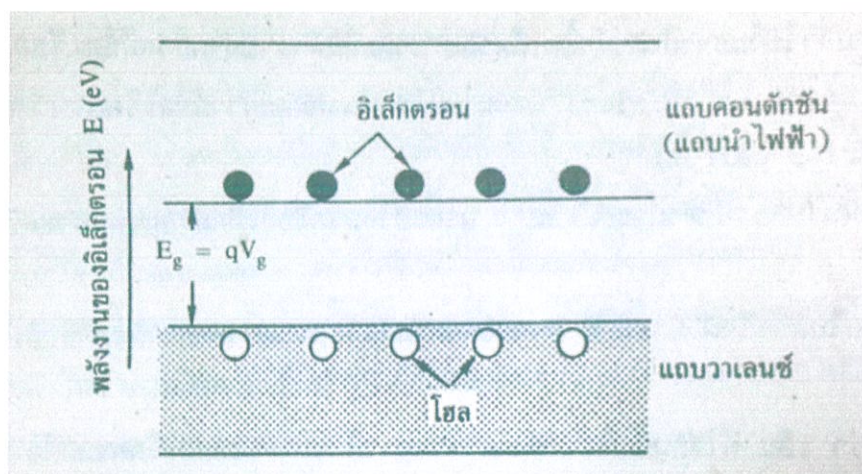
(Intrinsic Semiconductor)

โดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันพาหะที่มีจำนวนมากกว่าเรียกว่าพาหะข้างมาก (Majority Carrier) และพาหะที่มีจำนวนน้อยกว่า เรียกว่า พาหะข้างน้อย (Minority Carrier) ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พาหะข้างมากคืออิเล็กตรอน พาหะข้างน้อยคือโฮล ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี พาหะข้างมากคือโฮลและพาหะข้างน้อยคืออิเล็กตรอน

2. การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์

จากทฤษฎีแถบพลังงาน การนำไฟฟ้าในโลหะนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานที่ยังไม่เต็ม และต้องเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่แถบบนของแถบพลังงาน

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ ดังรูป 2.2 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยแถบเต็ม (filled band) และแถบที่ว่าง (vacant band) ซึ่งแถบทั้งสองนี้ถูกแยกออกจากกันด้วยแถบต้องห้ามซึ่งไม่กว้างมากนัก (forbidden band) ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนบางส่วนที่อยู่ในชั้นแถบเต็มจะได้รับพลังงานความร้อนแล้วถูกกระตุ้น (thermal excited) ให้กระโดดขึ้นไปในชั้นแถบว่างข้างบน ทำให้เกิดช่องว่างคือโฮลขึ้นในแถบเต็ม จำนวนโฮลนี้เท่ากับจำนวนของอิเล็กตรอนที่กระโดดขึ้นไปดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 อิเล็กตรอนอิสระจำนวนเท่ากันเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน

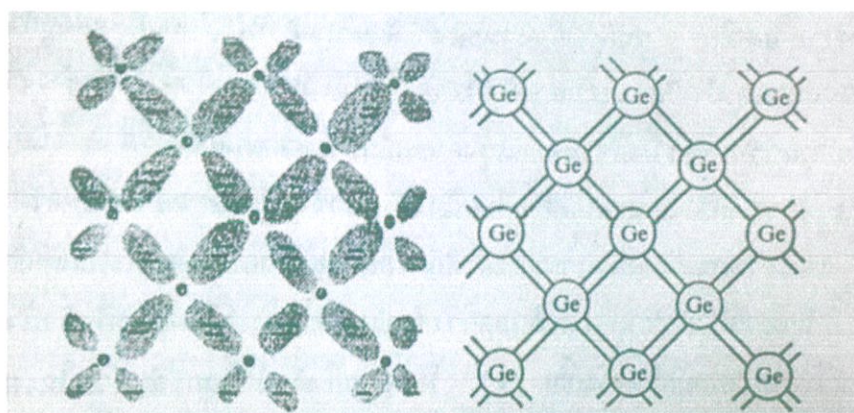
ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะมีผลในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากแถบว่างนั้นจะนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ เรียกแถบว่างนี้ว่าแถบนำไฟฟ้าหรือแถบคอนดักชัน (Conduction Band)

กลไกการนำไฟฟ้าเช่นนี้ของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า การนำไฟฟ้าแบบบริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำ (Intrinsic Conduction) สารกึ่งตัวนำจะแสดงคุณสมบัตินำไฟฟ้าแบบบริสุทธิ์ได้เฉพาะกรณีวัสดุเป็นสารที่บริสุทธิ์มากๆซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากสารเจือปน หรือในกรณีที่อุณหภูมิสูงมากๆ จนกลไกการนำไฟฟ้าแบบบริสุทธิ์แสดงตัวเด่นชัดกว่าสารเจือปนมากๆ

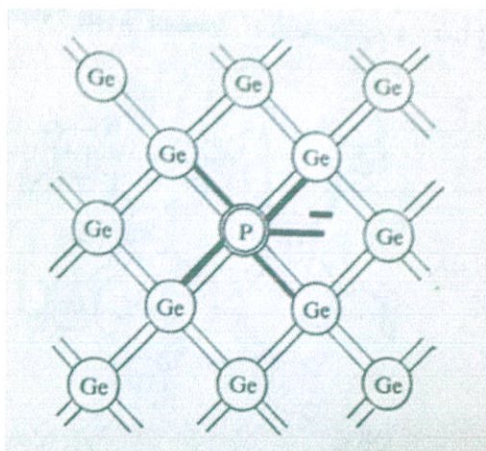
ขนาดของแถบพลังงานต้องห้ามมีผลต่อค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น กรณีของเพชร เนื่องจากแถบพลังงานต้องห้ามของเพชรกว้างมาก ดังนั้นการที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้กระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าต้องใช้พลังงานที่สูงมาก เพราะฉะนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าของเพชรจึงวัดได้ต่ำมาก การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากๆ จะช่วยเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า ช่วยเพิ่มได้แต่ถ้าแถบพลังงานต้องห้ามกว้างมากๆ กว่าพลังงานความร้อนจะมากที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอน บางครั้งวัสดุที่ทำการทดลองอาจจะหลอมเหลวหรือสลายตัวได้

3. การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแบบไม่บริสุทธิ์

เมื่อเราเติมสารเจือปน (Impurity) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นกลายเป็นสารกึ่งตัวนำแบบไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductor) เช่น เยอรมันเนียมเป็นธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 การจัดตัวหรือพันธะของอะตอมเยอรมันเนียมเกิดจากพันธะของโควาเลนต์ของวาเลนซ์อิเล็กตรอน แถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบเต็ม (Filled Band) ดังรูป 2.2 เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence Band)

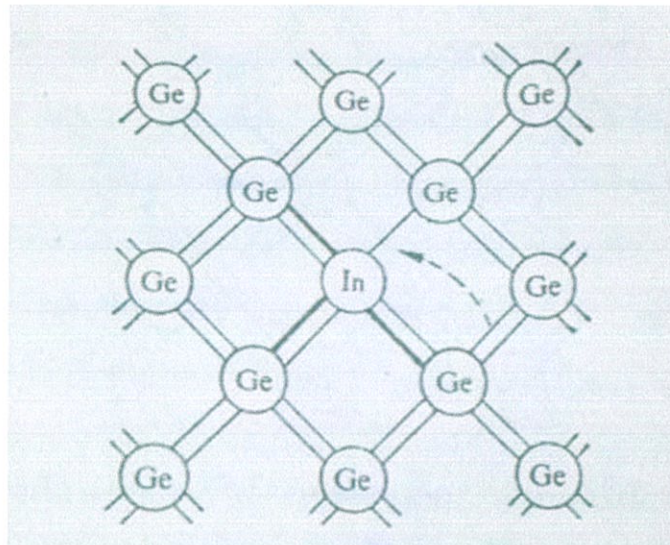


รูปที่ 2.5 โครงผลึกของเยอรมันเนียม



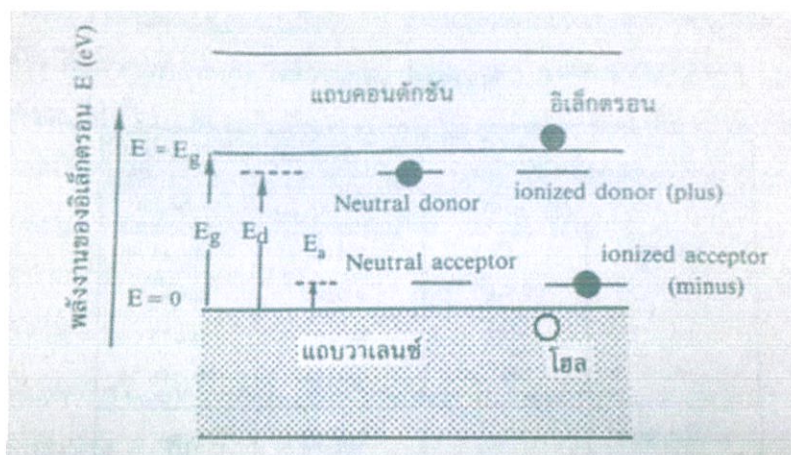
รูปที่ 2.6 สารเจือปนฟอสฟอรัสเข้าไปในผลึกเยอรมันเนียม ในจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวของฟอสฟอรัสจะไปสร้างพันธะกับเยอรมันเนียม 4 ตัว อีก 1 ตัว จะถูกฟอสฟอรัสดึงดูและวิ่งวนไปรอบๆฟอสฟอรัส

ถ้าใส่อะตอมอื่นที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 5 เช่น ฟอสฟอรัส(P) และพลวง(Sb)ในผลึกเยอรมันเนียม(Ge) และอะตอมที่ใส่ลงไปนั้นสามารถเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่แทนอะตอมเยอรมันเนียมได้ (Interstitial) เรียกอะตอมที่ใส่เข้าไปนั้นว่าเป็นอะตอมของสารเจือปน (Impurity Atom) ฟอสฟอรัสที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว แต่วาเลนซ์อิเล็กตรอนของฟอสฟอรัสไปจับสร้างพันธะกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของเยอรมันเนียม 4 ตัว ดังนั้นวาเลนซ์อิเล็กตรอนของฟอสฟอรัสจึงเหลือเพียง 1 ตัว อิเล็กตรอนที่เหลือ 1 ตัวนี้จะถูกแรงดึงดูดจากนิวเคลียสของฟอสฟอรัสดึงดูดอ่อนๆ และวิ่งวนอยู่รอบๆ อะตอมของฟอสฟอรัสเนื่องจากอิเล็กตรอนที่เหลือ 1 ตัวนี้ ไม่ได้เป็นอิสระอย่างสมบูรณ์แบบภายในผลึก ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่เหลือตัวนี้จึงมีอยู่ที่ระดับต่ำกว่าขอบล่างของแถบคอนดักชัน (Conduction Band) ถ้าอิเล็กตรอนตัวนี้ได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย จะสามารถเป็นอิสระจากแรงดึงดูดของอะตอมฟอสฟอรัสได้ เนื่องจากอะตอมฟอสฟอรัสสามารถให้อิเล็กตรอนอิสระในผลึกได้ เรียกอะตอมฟอสฟอรัสว่า โดเนอร์(donor) และเรียกพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ใต้ขอบของแถบคอนดักชันว่า ระดับ donor ถ้าสารกึ่งตัวนำถูกเติมด้วยสารเจือปนชนิดโดเนอร์ (donor) ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันเพิ่มขึ้น เรียกสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยโดเนอร์ว่า เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)



รูปที่ 2.7 สารเจือปนอินเดียม (In) ในผลึกเยอรมันเนียม (Ge) ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนของอินเดียมขาด 1 ตัว ดังนั้นอิเล็กตรอนจากเยอรมันเนียม (Ge) จะวิ่งแทน ทำให้เกิดโฮลที่พันธะระหว่างเยอรมันเนียมด้วยกัน

พิจารณากรณีการเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์น้อยกว่าเยอรมันเนียม (Ge) เช่น อะตอมของอินเดียม (In) ถูกเติมให้เข้าไปแทนที่ของอะตอมของเยอรมันเนียม (Ge) เนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอินเดียมมี 3 ตัว ดังนั้นในการสร้างพันธะกับอะตอมเยอรมันเนียมรอบๆ ทั้ง 4 ตัว จึงขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัวนี้จะเป็นช่องว่างหรือที่เรียกว่า โฮล (Hole) เกิดขึ้นโฮลดังรูป 2.7 เนื่องจากโฮลมีคุณสมบัติคล้ายช่องว่างหรือมีประจุบวกที่จะรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงได้ แต่ต้องอาศัยพลังงานเข้าช่วย ดังนั้นระดับพลังงานสารเจือปนของอินเดียมจึงอยู่เหนือขอบของแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะสามารถคอยรับอิเล็กตรอนที่จะกระโดดขึ้นมาแถบวาเลนซ์ได้ เราจึงเรียกอะตอมอินเดียมว่าเป็น อะตอมผู้รับ (acceptor atom) และเรียกระดับพลังงานของโฮลที่อยู่เหนือขอบแถบวาเลนซ์ว่าระดับ acceptor ถ้าสารกึ่งตัวนำถูกเติมด้วยสารเจือปนชนิดอะเซปเตอร์ (acceptor) ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีโฮลในแถบวาเลนซ์เพิ่มขึ้น เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วย acceptor ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

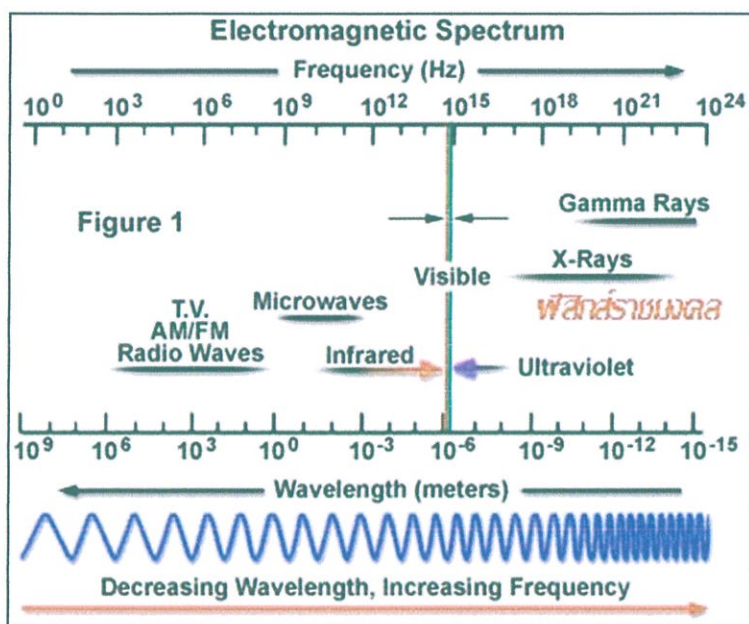
เมื่อฉายแสงลงบนวัตถุใดๆ แสงที่ฉายนั้นจะได้รับอิทธิพลบางอย่างจากวัตถุนั้น เช่น

1. ถูกดูดกลืน (Absorbtion) โดยวัสดุ
2. ถูกสะท้อนกลับ (Reflection) ที่ผิววัสดุ
3. เกิดการหักเห (Refraction) และเกิดการแพร่กระจาย (Dispersion)
4. เกิดการโพลาไรเซชัน (Polarization)

ปรากฏการณ์ดูดกลืน การสะท้อนและการหักเห การแพร่กระจาย และการโพลาไรเซชันเหล่านี้ สามารถอธิบายได้จากแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้สมการของแมกเวลล์ (Maxwell) เป็นพื้นฐาน

สมบัติของวัตถุนั้นสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของอนุภาค เช่น อะตอม โมเลกุล และอิเล็กตรอนได้ทั้งแบบกลศาสตร์คลาสสิกและแบบกลศาสตร์ควอนตัม อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแสงจะอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีควอนตัม

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังรูป 2.9 แสดงการแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกตามความยาวคลื่นหรือความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีตั้งแต่คลื่นสั้นรังสีแกมมา (γ) ซึ่งถูกเปล่งออกมาจากวัสดุกัมมันตภาพรังสีไปจนถึงคลื่นยาวซึ่งมีความถี่ต่ำขนาดไม่ถึง 100 Hz เรียกว่า ความถี่เชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.9 การแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

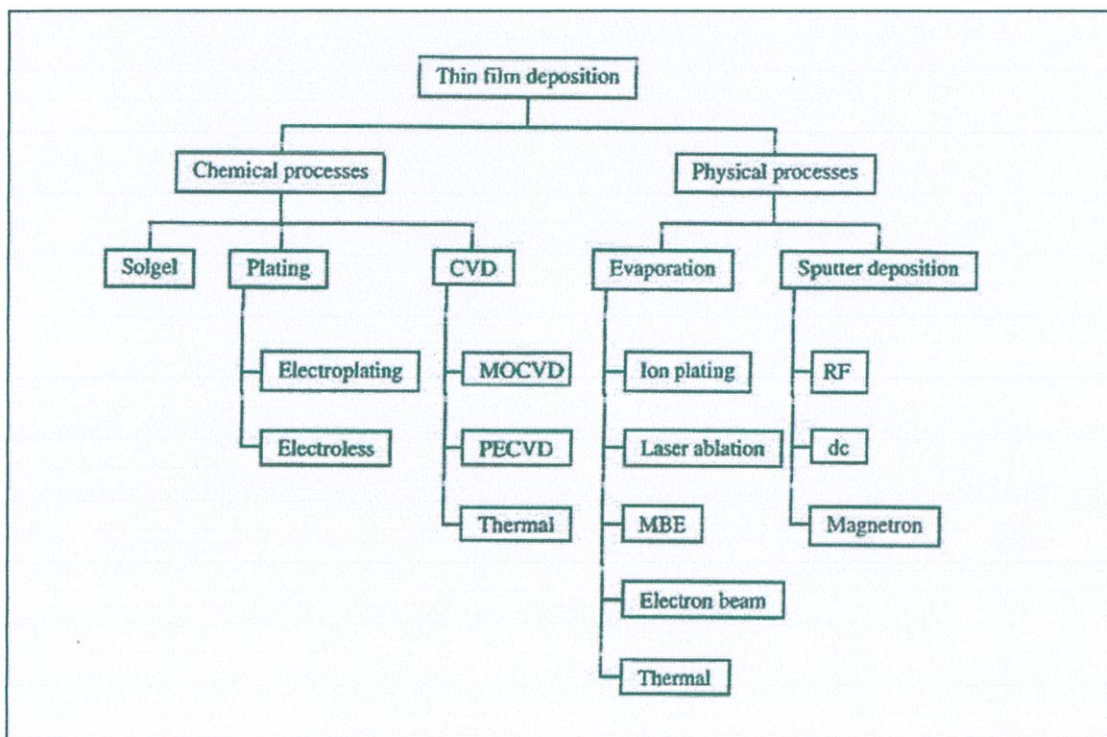
2.3 ระบบสปัตเตอร์ริง

2.3.1 การเคลือบฟิล์มบาง

วิธีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางนั้นสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่อบเคลือบบนแผ่นฐานรอง ซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) และวิธีโซลเจล (Sol-Gel)

2. วิธีกายภาพ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดกับผิวของแผ่นฐานรอง โดยการใช้ความร้อน (Thermal) กระบวนการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)



รูปที่ 2.10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

วิธีการทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ ดังต่อไปนี้

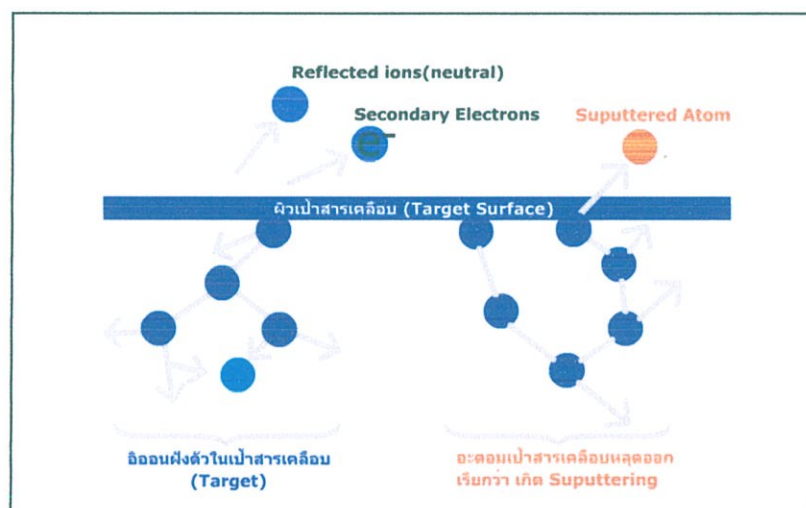
1. การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสาร (Evaporation) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้เกิดการระเหยในสุญญากาศ โดยให้ความร้อนที่มากพอที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นฐานรองจะไม่สูง นอกจากนี้แล้วฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะของสารเคลือบได้ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ หรือมีความใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริง ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อไอออนสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริงวิ่งชนแผ่นฐานรอง และมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อไอออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นฐานรอง ก็ฝังตัวลงในแผ่นฐานรองมากกว่าวิธีระเหยสารทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นฐานรองดีกว่า

2.3.2 กระบวนการสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสปัตเตอริงมีกระบวนการที่สำคัญคือ การอาศัยการคายประจุ (Discharge) ไฟฟ้าของอาร์กอน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนจากนั้นทำการเร่ง ไอออน ให้วิ่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ (Target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วย ไอออนของก๊าซ จะหลุดออกจากเป้าสารเคลือบ และวิ่งด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นรองรับในทุกทิศทาง ซึ่งพบว่า พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมานั้นสูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกมาด้วยวิธีการระเหยมาก ดังนั้นเมื่ออนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการ สปัตเตอริงตกกระทบฐานรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อฐานรองรับ

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 2.11 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าสารเคลือบ

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง ไอออนกับเป้าเมื่อ ไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบอาจจะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้

- 1) ไอออนบางส่วนสะท้อนกลับจากผิวหน้า และส่วนมากจะเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ
- 2) การชนของ ไอออนบางครั้งอาจทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากเป้าเรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
- 3) การชนของ ไอออนบางครั้งอาจเกิดการฝังตัวของไอออนในเป้าสารเคลือบ

4) การชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice Defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

5) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องของอะตอมของเป้าสารเคลือบคล้ายการชนกันของลูกบิลเลียดทำให้อะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบ เรียกว่ากระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)

2. อัตราการสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S)

ค่า Yield ของสปัตเตอริงคือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบ ต่อปริมาณการชนของไอออนหนึ่งอนุภาค ค่า Yield จะมามีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสถานะต่างๆ ดังนี้

1) ค่า Yield แปรเปลี่ยนไปตาม ค่าพลังงานของไอออน คือ ไอออนต้องมีพลังงานมากกว่าพลังงานเทรช โชลด์ (Threshold Energies) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคู่การชนของอนุภาค เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมี โอกาสฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้ค่า Yield ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของ ไอออนให้สูงขึ้น

2) ค่า Yield มีค่าแปรเปลี่ยน ไปตาม ระบายผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ พบว่าค่า Yield สูงเมื่อ ไอออนชนเป้าในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบ

3) ค่า Yield มีค่าแปรเปลี่ยน ไปตามมวลของ ไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบอนุภาคที่มีมวลเท่ากันจะสามารถถ่ายเทพลังงานและ โมเมนตัม ได้ดีที่สุด แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับ อะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลอะตอมเดี่ยวๆ ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้ค่า Yield สูงเราต้องใช้ ไอออนที่มีมวลสูงกว่า มวลอะตอมของเป้า (จึงเลือกใช้ ไอออนจากก๊าซเฉื่อย)

4) ค่า Yield แปรเปลี่ยนตาม มุมตกกระทบของ ไอออนที่ทำบนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ คือ มุมตกกระทบยิ่งมากยิ่งมีค่า Yield สูงจนถึงมุมที่มากกว่า 45 องศาเล็กน้อย (เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ Back scattering เป็น Forward scattering) จากนั้นเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบค่า Yield จะลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่า 90 องศา

2.3.3 กระบวนการโกร้วดิซซาร์จ

โกร้วดิซซาร์จถูกใช้อย่างหลากหลายในกระบวนการทำฟิล์มบางแบบต่างๆเช่น ระบบสปัตเตอริง (Sputtering) การกัดด้วยพลาสมา (Plasma Etching) ไอออนอิมเพลนเตชัน (Ion Implantation) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอาศัยการกำเนิดพลาสมาและสมบัติพื้นฐานของพลาสมาเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการทำฟิล์มบางส่วนใหญ่จะประกอบด้วยก๊าซที่ถูกทำให้แตกตัวบางส่วนที่ระดับความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นอย่างมาก และเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับ

ระบบปลูกฟิล์มบางดังกล่าว จำเป็นจะต้องศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพลาสมาและโกรว์ดิซซาร์จ รวมทั้งวิธีการกำเนิดพลาสมาและวิธีการรักษาสถานะพลาสมาให้คงอยู่

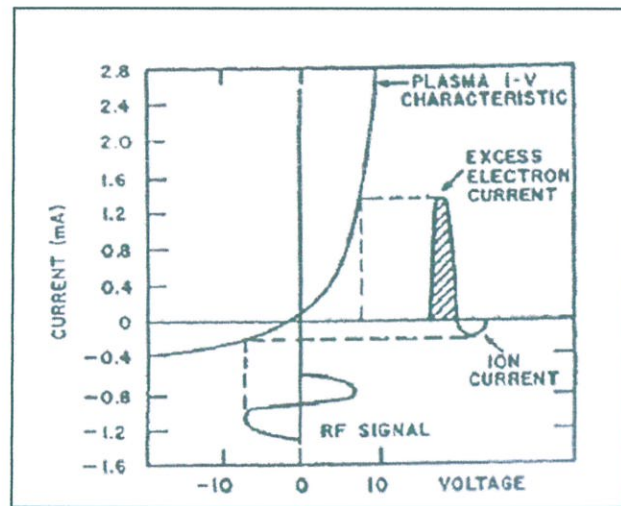
พลาสมาคือก๊าซที่ถูกรบกวนทำให้แตกตัวบางส่วนประกอบด้วยไอออนอิเล็กตรอนอิสระ และอนุภาคที่เป็นกลางรวมกันอยู่ มีสภาพปกติเป็นกลางทางไฟฟ้า การรบกวนความเป็นกลางทางไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ในที่ขอบพลาสมา พลาสมามีลักษณะคล้ายกับตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อมีบริเวณใดที่มีประจุไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลขึ้นจะถูกชดเชยอย่างรวดเร็วโดยการเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้าภายในพลาสมา ประจุพาหะหลักในพลาสมาคืออิเล็กตรอนเนื่องจากมีมวลน้อยและตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่าไอออนมาก

2.3.4 อาร์เอฟสปัตเตอริง (RF Sputtering)

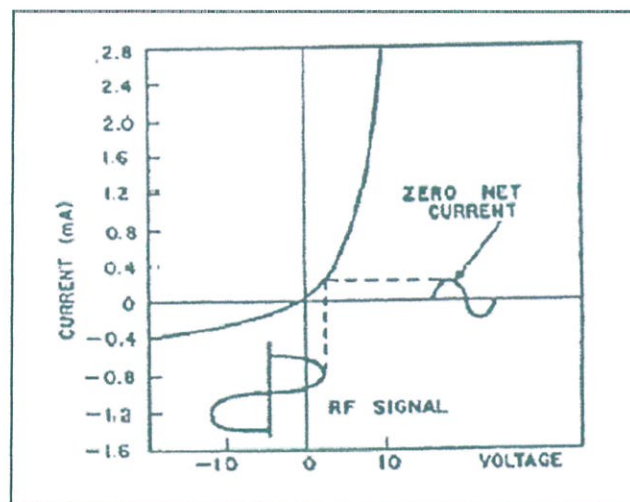
การนำระบบการเคลือบด้วยคลื่นความถี่วิทยุมาใช้กับเป่าสารเคลือบที่เป็นฉนวน รวมทั้งสามารถใช้ได้กับเป่าสารเคลือบทั้งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำได้ด้วยและมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย วัสดุทั้งที่ไม่ใช่ตัวนำและสารกึ่งตัวนำที่ปลูกโดยระบบสปัตเตอริงรวมไปถึงสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ แกลเลียมแอนติโมนี แกลเลียมไนไตรด์ และอลูมิเนียมไนไตรด์ สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ และ แคดเมียมซัลไฟด์ กลุ่ม IV-VI ได้แก่ PbTe เป็นต้น

ข้อดีของการปลูกฟิล์มบางด้วยคลื่นวิทยุเป็นผลมาจากแรงดันไบแอสในตัวซึ่งเป็นแรงดันลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา ก่อให้เกิดกระบวนการโกรว์ดิซซาร์จ โดยศักย์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของความคล่องตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออน ดังรูป 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกระแส-แรงดันของอิเล็กโทรด 2.12(ก) ศักย์ลอย (floating potential) เป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา (plasma potential) โดยปริมาณแรงดันขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมา แต่โดยทั่วไปแรงดันไบแอสอยู่ระหว่าง -20 ถึง -50 โวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำสำหรับกระบวนการสปัตเตอริง เมื่อแรงดันสลับถูกป้อนให้กับอิเล็กโทรด กระแสอิเล็กตรอนจะไหลเมื่ออิเล็กโทรดเป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์ลอยมากกว่าที่ไอออนไหลเมื่ออิเล็กโทรดเป็นลบสัมพันธ์กับศักย์ลอยดังรูป 2.12(ข)

ที่ความถี่ระดับ MHz ไอออนจำนวนมากไม่สามารถที่จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายได้ทัน ยกเว้นอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนในพลาสมาและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามความถี่ เมื่อกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนไปยังอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง จะเกิดไอออนบวกกระจายอยู่ที่อิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่ง การกระจายของไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเท่ากับศักย์ที่จ่ายให้



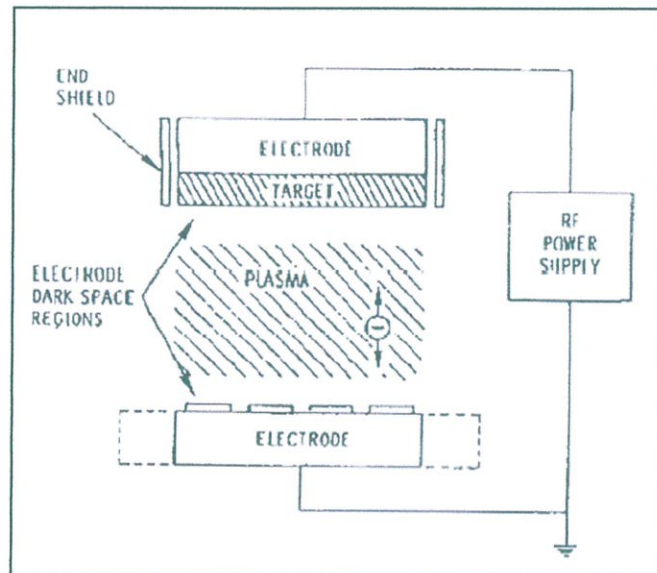
(ก)



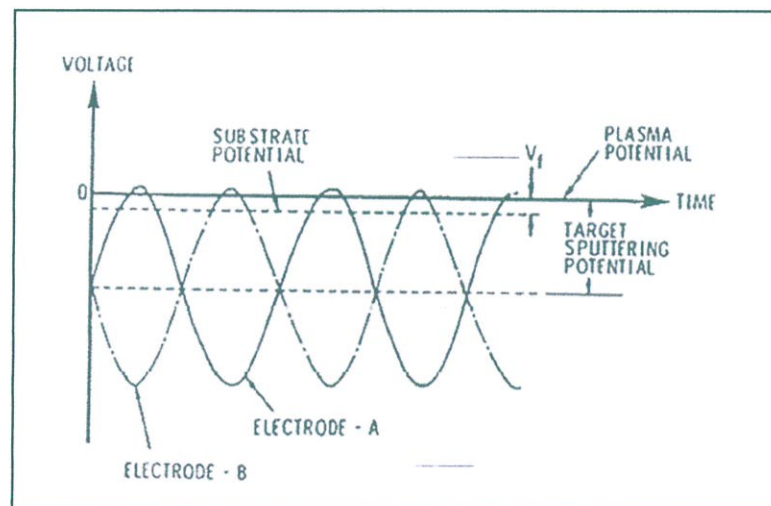
(ข)

รูปที่ 2.12 กระแสที่เกิดจากการไบแอสโดยศักย์ของพลาสมา

เป้าสารเคลือบที่นำไฟฟ้าจะทำตัวเหมือนตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้าระหว่างขั้ว กระแสที่ไหลจึงไม่มีองค์ประกอบของดิซี ทั้งไอออนและประจุอิเล็กตรอนที่ไหลไปยังขั้วในรอบไซเคิลจะต้องเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่มีจำนวนมากไหลไปที่ขั้วเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนทำให้เกิดแนวสัมผัสขึ้นมา ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะไปที่ขั้วเฉพาะช่วงครึ่งไซเคิล ในสถานะลงที่ขั้วทั้งสองจะสร้างไบแอสลบที่สัมพันธ์กับศักย์ของพลาสมาขึ้นมา ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสปัตเตอริง



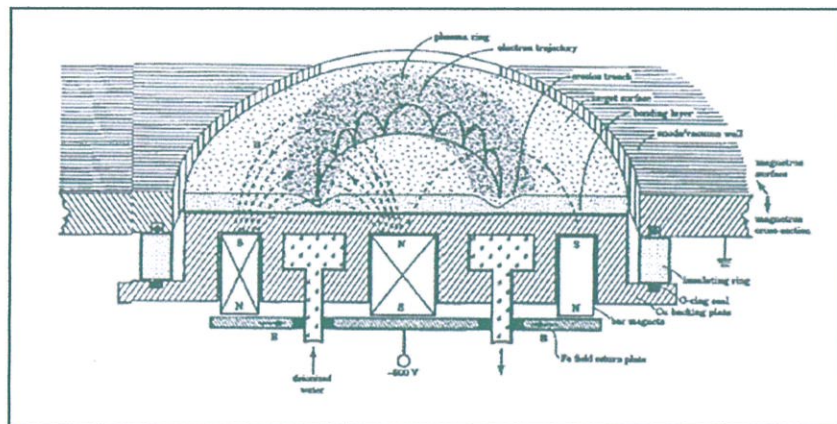
รูปที่ 2.14 การเกิดศักย์บนเป้าสารเคลือบที่สัมพันธ์กับศักย์ลอย

2.3.5 แมกนีตรอน (Magnetron)

ในกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process) เพื่อให้ไอเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดชนกับก๊าซแล้วให้เกิดการแตกตัวก่อนที่มันจะไปถึงแอโนด จะกำหนดโดยระดับความดันของก๊าซ เพื่อที่จะรักษาสภาพพลาสมาเอาไว้ แม่เหล็กเป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งในการพัฒนากระบวนการสปัตเตอริง หลักการพื้นฐานแม่เหล็กจะสร้างสนามในแนวขวางเหนือแคโทด ซึ่งจะบังคับไอเล็กตรอน ให้วิ่งในตำแหน่งวงโคจรเพื่อเพิ่มระยะทางก่อนที่จะหลุดไปยังแอโนด เนื่องจากเส้นทางเดินของไอเล็กตรอนยาวกว่าระยะของอิเล็กโทรมาก ระดับความดันที่รักษาสภาพพลาสมา

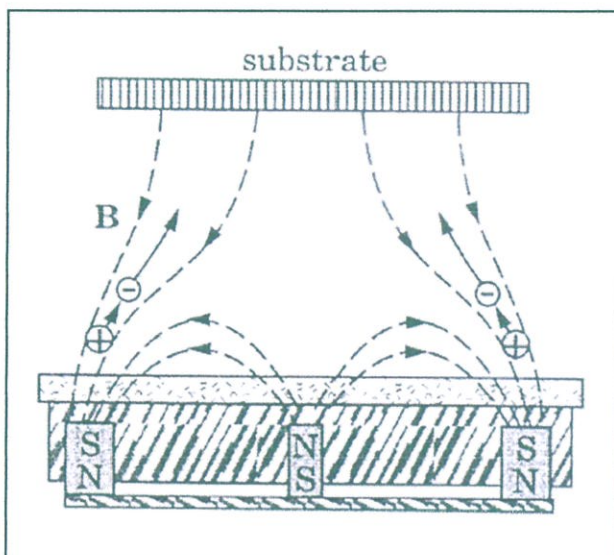
จะต่ำกว่าระบบสปีดเตอริงแบบเดิม อนุภาคที่หลุดออกมาจะรักษาพลังงานจลน์ทั้งหมดเพื่อให้ไปถึงฐานรองรับ ดังนั้นพลังงานนี้จะมีผลต่อโครงสร้างในฟิล์ม นอกจากนี้ อัตราการปลูกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของอะตอมลดลง และประสิทธิภาพของการใช้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น

โครงสร้างแม่เหล็กและแคโทดจะมีด้วยกันหลายรูปแบบแต่ในที่นี้จะอธิบายหลักการของแม่เหล็กแบบพลาเนียร์ดังรูป 2.15 เป้าสารเคลือบหนา 3 ถึง 10 มิลลิเมตรซึ่งประกบติดกับแผ่นทองแดงที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำไว้ไอออนเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สำหรับแคโทดแยกออกจากกราวด์โดยใช้แหวนเซรามิก ซึ่งสามารถเป็นส่วนที่แยกระบบสุญญากาศโดยซีลด้วยโอริง ผงโลหะส่วนที่เชื่อมต่อกกราวด์จะทำหน้าที่เป็นแอโนด แม่เหล็กที่นิยมใช้เป็นชนิด Nd-Fe-B ซึ่งให้ความเข้มของสนามประมาณ 1 กิโลเกาส์



รูปที่ 2.15 โครงสร้างระบบแมกนีตรอนแบบพลาเนียร์

การแก้ปัญหาคความหนาของฟิล์มไม่เท่ากันทำได้โดยการหมุนฐานรองรับไปรอบๆระหว่างการปลูก วิธีการปลูกโดยทั่วไปจะใช้แม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า การจำกัดพลาสมาเหนือเป้าสารเคลือบโดยการวางสนามแม่เหล็กในแนวขวาง เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสนามแม่เหล็กหรือแบบไดโอดพลาเนียร์ พิจารณาอนุภาคของเป้าสารเคลือบที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า จำเป็นต้องมีพลังงานจลน์เพียงพอที่จะทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่ฐานรองรับ สำหรับอนุภาคที่มีประจุ สนามแม่เหล็กจะมีผลต่ออัตราการปลูกฟิล์ม รูปแบบของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการปลูกฟิล์ม วิธีการอันหนึ่งที่ใช้กันคือการวางแม่เหล็กแบบไม่สมดุล ดังรูป 2.16 แม่เหล็กตำแหน่งตรงกลางจะมีขนาดเล็กกว่าแม่เหล็กที่วางเป็นวงแหวนรอบนอกเพื่อให้เส้นสนามแม่เหล็กบางส่วนหลุดออกไปยังฐานรองรับ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ขนานไปกับสนามแม่เหล็ก สนามจะไม่มีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน ซึ่งทำให้อนุภาคหลุดไปยังฐานรองรับได้ และไอออนบวกจะถูกดึงโดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองวิธีนี้เป็นการเพิ่มฟลักซ์ที่ฐานรองรับ

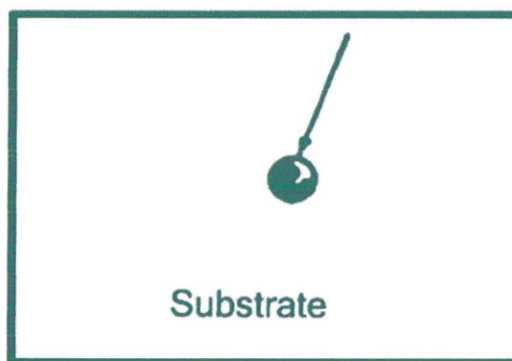


รูปที่ 2.16 การไหลของพลาสมาจากเป้าสารเคลือบไปยังฐานรองรับ
ในระบบแม่เหล็กแบบไม่สมดุ

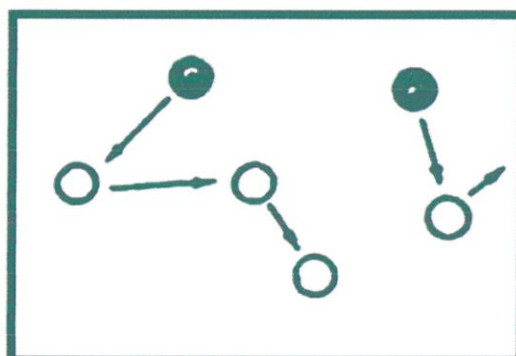
2.4 การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบในสุญญากาศสารเคลือบที่ตกกระทบแผ่นฐานรองส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล ดังรูป 2.17 โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิวแผ่นฐานรอง อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่า ตำแหน่งการดูดซับ (Absorption Site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจจะเข้าไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกไปจากตำแหน่งนั้นไป ดังรูป 2.18 อะตอมสารเคลือบอาจถูกชนจากอะตอมที่เข้ามาใหม่หรืออาจเกิดการระเหยกลับและรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ ดังรูป 2.19 ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยวทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่ที่เกิดขึ้นอาจมีการรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวเกิดเป็นสามอะตอม (Triples) ที่อะตอม (Quadruplets) อื่นๆ การรวมตัวในลักษณะนี้เรียกว่า การเกิดนิวเคลียส ดังรูป 2.20 ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตจนกลายเป็นกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands Growth) ดังรูป 2.21 และ 2.22 กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการแตะและชนกับกลุ่มข้างๆ จะเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) ดังรูป 2.23 ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน พบว่าอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลว (Liquid Like Behavior) ในระหว่างการรวมกันของกลุ่มอะตอมจะมี

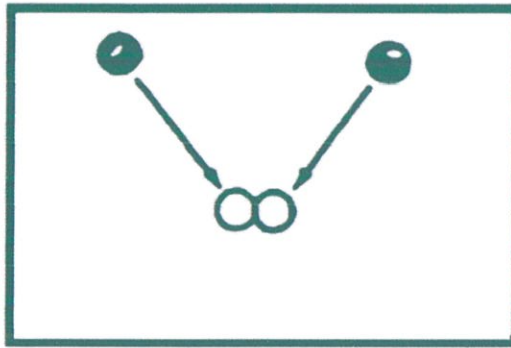
การจัดเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) การรวมกลุ่มของอะตอม จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากการรวมกันของกลุ่มอะตอมพบว่าพื้นที่ของอะตอมที่รวมกลุ่มกันบนแผ่นฐานรอง (Projected Area) มีขนาดน้อยลง ดังรูป 2.25 แต่ความสูงของกลุ่มอะตอมมีค่ามากขึ้นดังรูป 2.26 การรวมกันของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นจนฟิล์มบางเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องกันดังรูป 2.24 ในบางกรณีการเชื่อมต่อของฟิล์มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 นาโนเมตร ลักษณะผิวของฟิล์มโดยทั่วไปในขณะที่เกิดการรวมกลุ่มของอะตอมจะมีลักษณะเป็นหุบเขาและเนินเขา การเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจจะเป็นผลึกเดี่ยวหรือมีจำนวนผลึกประกบกันเพียง 2-3 ผลึก โดยถ้าเคลือบลงบนแผ่นฐานรองที่เป็นหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมจะเป็นแบบสุ่ม จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้าเคลือบลงบนแผ่นฐานรองที่เป็นผลึกเดี่ยว เรียกกระบวนการนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy) ในขณะที่เคลือบฟิล์มอะตอมจะมีการเคลื่อนที่เพื่อเลือกไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยความสามารถในการเคลื่อนที่จะมีมากขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวแผ่นฐานรองที่มีค่าสูง และพบว่าเมื่ออัตราการเคลือบลดลงช่วยทำให้การโตของผลึกเกิดได้ดีขึ้น อุณหภูมิของแผ่นฐานรองที่สูงและอัตราการเคลือบต่ำจะทำให้ฟิล์มเคลือบมีขนาดเกรนใหญ่มีความบกพร่อง (defect) ในเกรนน้อย



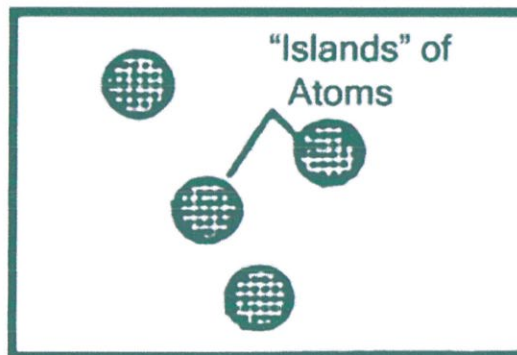
รูปที่ 2.17 Single Atom Arrives



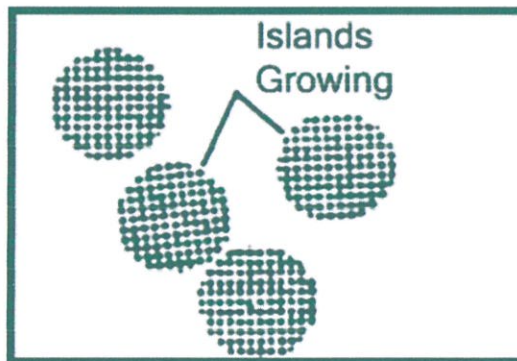
รูปที่ 2.18 Migration Re-evaporation



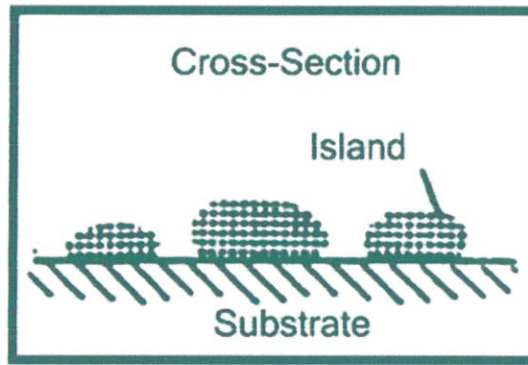
រូបភាព 2.19 Collision & Combination of Single Atoms



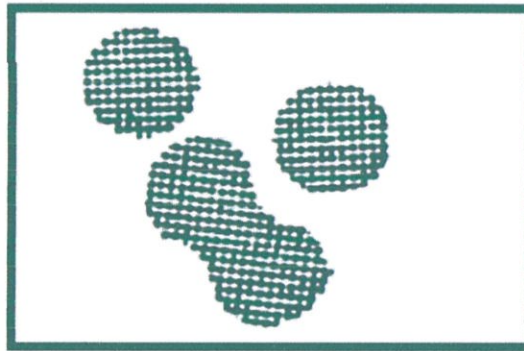
រូបភាព 2.20 Nucleation



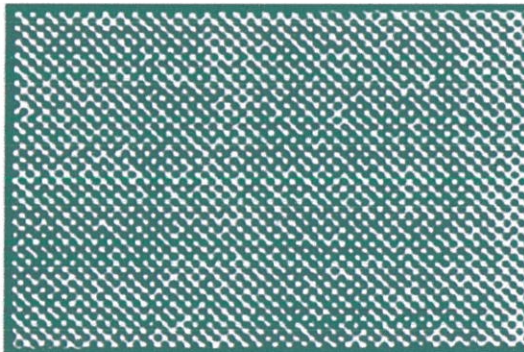
រូបភាព 2.21 Growth



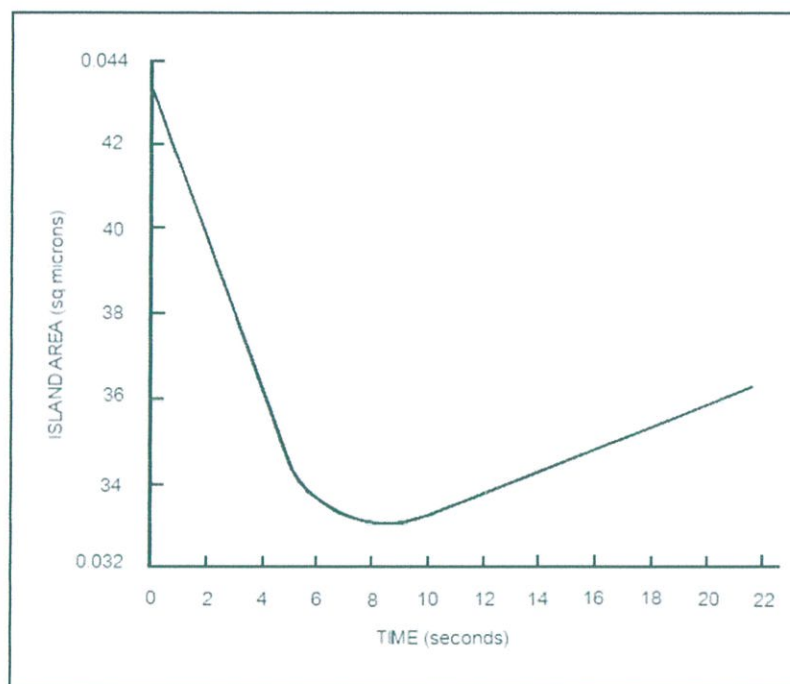
รูปที่ 2.22 Island Shape



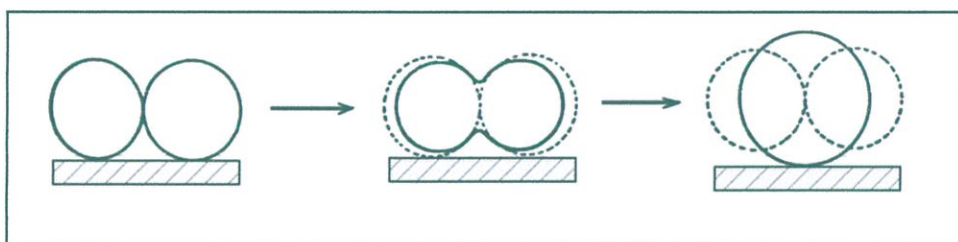
รูปที่ 2.23 Coalescence



รูปที่ 2.24 Continuity



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอม และหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม



รูปที่ 2.26 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้น สารเคลือบที่ตกกระทบผิวรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล และเกิดการฟอร์มตัวจนพอกพูนเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น มีปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบด้วยกัน อุณหภูมิระหว่างอะตอมสารเคลือบ (Bonding energy) กับแผ่นฐานรองและอะตอมสารเคลือบเข้าด้วยกัน อุณหภูมิของแผ่นฐานรอง (Substrate temperature) และตำแหน่งของอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบ การเกิดและการโตของฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นได้ดังนี้

1. อะตอมจากเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนบวก ที่มีพลังงานสูงจะหลุดออกและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ผ่านระบบสุญญากาศ ที่มีอนุภาคของก๊าซ และพลาสมาบรรจุอยู่

2. เมื่ออะตอมตกลงมาที่แผ่นฐานรอง อะตอมที่ตกลงมาจะมีพลังงานที่ได้รับจากการถ่ายเทโมเมนตัมจากการชน ทำให้อะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิว (surface mobility) ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปบนแผ่นฐานรองได้ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดนิวเคลียส

3. หลังจากทีอะตอมเคลื่อนที่ไปบนผิวรองรับ อะตอมจะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสได้หลายรูปแบบดังนี้

3.1 เกิดปฏิกิริยาแผ่นฐานรอง โดยอะตอมที่ตกลงมาเกิดพันธะเคมีกับผิวแผ่นฐานรอง อะตอมกับอะตอม ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับผิวแผ่นฐานรองแข็งแรง การเคลื่อนตัวของอะตอมที่ผิวหน้าจะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นนิวเคลียสและอะตอมอื่นบนผิวจะสามารถเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียสที่เกิดขึ้นแล้ว เพื่อลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างฟิล์มเคลือบกับแผ่นฐานรอง

3.2 ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับแผ่นฐานรองมีค่าต่ำ อะตอมก็มีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวสูง ทำให้สามารถเคลื่อนที่มารวมตัวกัน ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส คือเป็นตำแหน่งที่สามารถสร้างพันธะได้แข็งแรงกว่า โดยตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียสนั้น ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องหรือรอยขีด ความบกพร่องของระนาบบนผิว แผ่นฐานรองอะตอมแปลกปลอมบนแผ่นฐานรอง บริเวณที่มีประจุบนผิวแผ่นฐานรองที่เป็นฉนวนพื้นผิวที่มีความแตกต่างทางเคมีหรือเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างออกไป เป็นต้น

3.3 เกิดนิวเคลียสจากการที่อะตอมเคลื่อนที่ไปชนอนุภาคอื่นที่เคลื่อนที่และอยู่บนผิวแผ่นฐานรอง และฟอร์มตัวกันเป็นนิวเคลียสที่เสถียร เมื่ออะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสแล้ว ถ้าทำการเคลือบต่อไปก็จะมีจำนวนนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือความหนาแน่นของนิวเคลียสมากขึ้น ซึ่งนิวเคลียสจะเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์ม และครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาแน่นของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของแผ่นฐานรอง หรือลักษณะการเรียงตัวของผลึกของแผ่นฐานรองสามารถเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียสที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเคลือบ เพิ่มอัตราเคลือบเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิว เพิ่มการชนเพื่อเพิ่มความบกพร่องในระนาบเพื่อให้แผ่นฐานรองขรุขระ เป็นต้น

4. กลไกการโตของนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแยกตามความแตกต่างของการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสารเคลือบและแผ่นฐานรอง

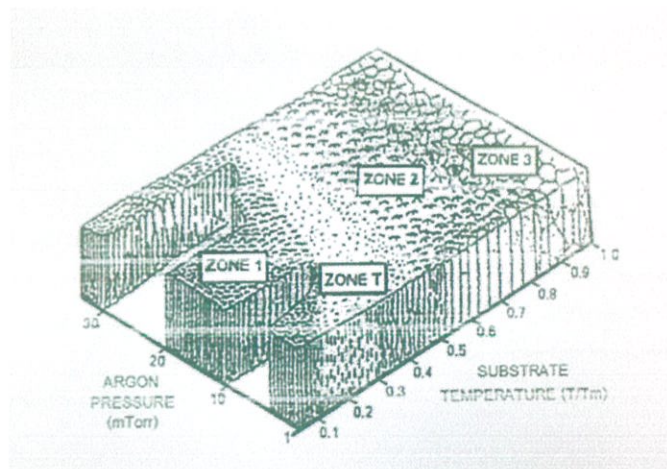
4.1 กลไกการเกิดการโตแบบขั้นต่อขั้น

4.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ (Three Dimension Volmer-Weber) เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของชิ้นงานกับวัสดุเคลือบแตกต่างกันและโตขึ้นทุกทิศทาง

4.3 กลไกการเกิดนิวเคลียสโดยการฟอร์มตัวกันระหว่างชั้นแผ่นฐานรองกับวัสดุเคลือบ ส่วนใหญ่มักเกิดกับการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นฐานรองที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวก็ต่ำด้วย ในเงื่อนไขนี้การโตของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับเทอร์โมไดนามิกกับ

พลังงานพื้นผิวงานนั้น พิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ พบว่าเมื่อเกิดการสะสมของอะตอมที่แพร่ไปบนผิวแผ่นฐานรองรับ และเริ่มเกาะตัวกันเป็นนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสในแนวนอนจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีกับผิวที่เรียกว่า การเติบโตแบบเวทติง (Wetting Growth) เช่น ทองบนคาร์บอน อลูมินา ซิลิกอนออกไซด์และโพลีเมอร์ การเติบโตและการรวมตัวกันของนิวเคลียสสามารถลดช่องว่างระหว่างรอยต่อหรือความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างที่รอยต่อของแผ่นฐานรองได้ เพราะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างนิวเคลียสและวัสดุที่เป็นแผ่นฐานรอง

กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีเล็กน้อยระหว่างแผ่นฐานรองกับนิวเคลียส จะเกิดการโตอีกแบบต่างหากที่เรียกว่า ลำดับขั้นการโตของเกรนแบบการเกาะตัวช่องแคบต่อเนื่อง (Island Channel Continuous Film) ก่อนจะรวมตัวกัน นิวเคลียสจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลวก็สามารถหมุนและจัดเรียงโครงสร้างผลึกได้เอง การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มของนิวเคลียสเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของนิวเคลียสมีค่าสูงพอที่จะเกิดการแพร่ของอะตอม และการจัดเรียงตัวเป็นนิวเคลียสแบบบอลอัพ (Ball up) ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเคลือบกับแผ่นฐานรองสูงจะมีอัตราการแพร่ต่ำหรือเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบที่แผ่นฐานรอง โดยโครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอุณหภูมิหลอมเหลว แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ ดังรูป 2.27



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ

บริเวณ 1 (zone 1)

เป็นการเคลือบที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันก๊าซขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นฐานรองจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มๆ กระจุกกระจายและเกิดเป็น โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวแหลม (Tapers crytsallites) จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อยอังสตรอม ที่ T/T_m เท่ากับ 0-0.1 ที่ความดัน 1 mTorr ถ้าความดันก๊าซสูงบริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดัน

สูงความหนาแน่นของก๊าซในภาชนะสุญญากาศมีมากขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของผิวเคลื่อนตกลงมาได้น้อยและขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่นทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลือบที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิจึงมีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจากการระดมยิงของไอออน (Ion Bombardment) เป็นส่วนใหญ่

บริเวณ T (Zone T)

เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์โดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1-0.5 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr เกิดอยู่ในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นฐานรองจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นฐานรองจะเพิ่มขึ้นค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของผิวหน้าก็เพิ่มขึ้นและโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็เข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous Grain) เต็มพื้นที่และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นมา จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็นคอลัมน์ (Columnar) ต่อไปโดยปราศจากช่องว่างบริเวณ

บริเวณ 2 (Zone 2)

ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5-0.8 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็น โครงสร้างคอลัมน์ (Columnar) ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม ขนาดของคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลัมน์

บริเวณ 3 (Zone 3)

บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8-1.0 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr การแพร่จะมีค่าสูงและส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของคอลัมน์จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored Strain Energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบเกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจากคอลัมน์เป็นผลึกเดี่ยว

2.5 เทคนิคการวัดเพื่อวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการของเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ฟิล์มบางอินทรีย์ทินออกไซด์ที่ได้ ดังนี้

1. การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectrometer : XRD)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)
3. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy : UV-vis)
4. ฮอลล์ เอฟเฟกต์ (Hall effect)
5. การวัดแบบ 4 จุด (4-point probe)
6. อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีระบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR)
7. รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)
8. การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

2.5.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectrometer, XRD)



รูปที่ 2.28 X-Ray Diffractometer (XRD) ผลิตโดย Bruker AXS, German

รุ่น Model D8 Advance สถานที่ตั้ง ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path Different) เป็นจำนวน

เท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.1)

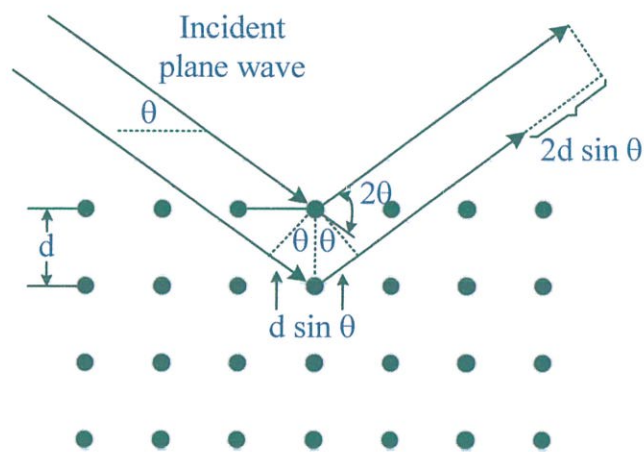
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

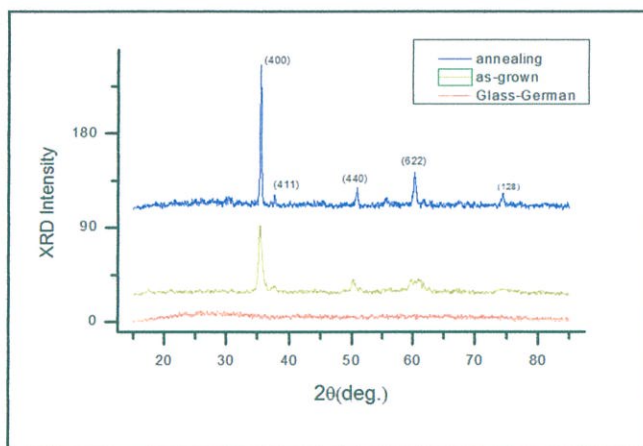
θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ



รูปที่ 2.29 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

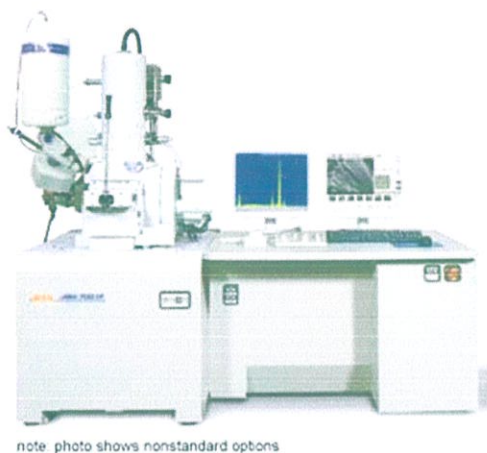
ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) ดังรูป 2.29 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction Angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray Diffractometer นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ดังรูป 2.29 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตเห็นจากฟิสิกในรูปแบบการเลี้ยวเบน และฟิสิกเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ สำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 2.31 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ผลิตโดย JEOL Japan รุ่น JSM-7001F สถานที่ตั้ง ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope: EM) เครื่องแรกสร้างขึ้นในปีค.ศ.1930 โดย Manfred Von Ardenne ลักษณะ โครงสร้างและองค์ประกอบ โดยทั่วไประหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) มีความคล้ายคลึงกันแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความซับซ้อนกว่ามาก และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาต้องมีการเตรียมแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ตัวอย่างต้องแห้งและนำไฟฟ้า เนื่องจากระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศและใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการกำเนิดภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่างทำให้ไม่สามารถโฟกัสภาพ และควบคุมความสว่างได้ เราเรียกปรากฏการณ์ที่มีอิเล็กตรอน

สะสมมากเกินไปว่าCharging Effects ทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กรอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ ทำให้สามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จากลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron

Microscope: TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่าง ซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นบางให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (Fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกรูปถ่ายไมโครกราฟ (Micrograph) ได้โดยตรง

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope:

SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10-300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง โดยมีหลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ Cathode Ray Tube (CRT)

หลักการทำงาน

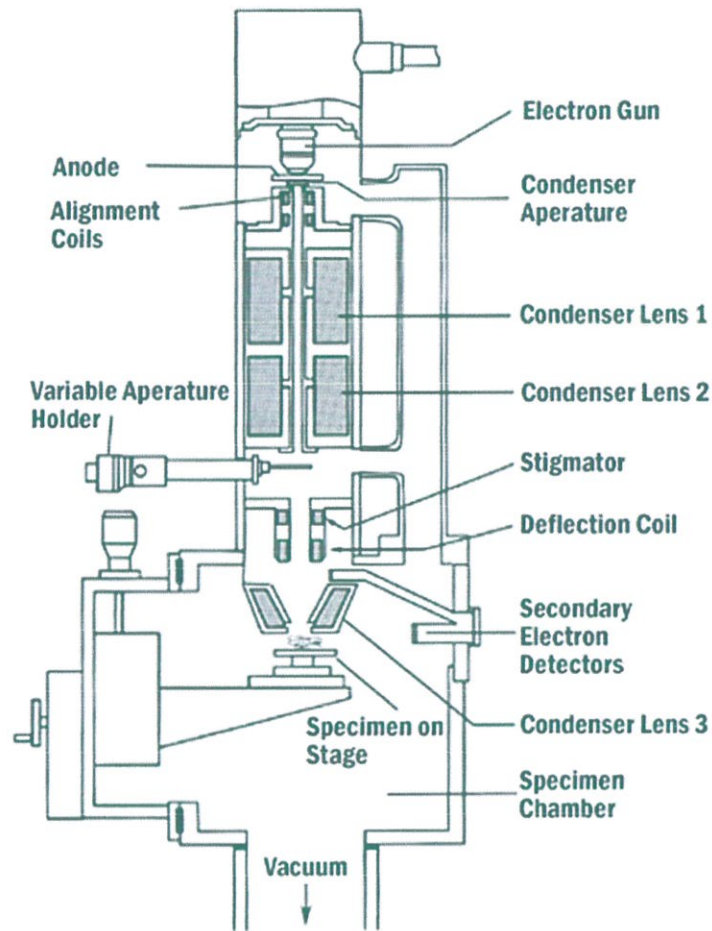
การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1-40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวดังตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x-y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับ

องค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจาก บริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron: PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของ ตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจาก อะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่อ อิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะ ถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะหลุดออกออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่าง อิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ใน กรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่ บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอส ศักคาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไป เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำ อิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการ กราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณ ต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของ จอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุม ปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนในกล้อง จุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$



รูปที่ 2.32 องค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

ชุดของ Scanning Coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ดังรูป 2.32

2.5.3 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)



รูปที่ 2.33 UV-vis nir light source ผลิตโดย Ocean Optics รุ่น DH-2000 mikropack
สถานที่ตั้ง ห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



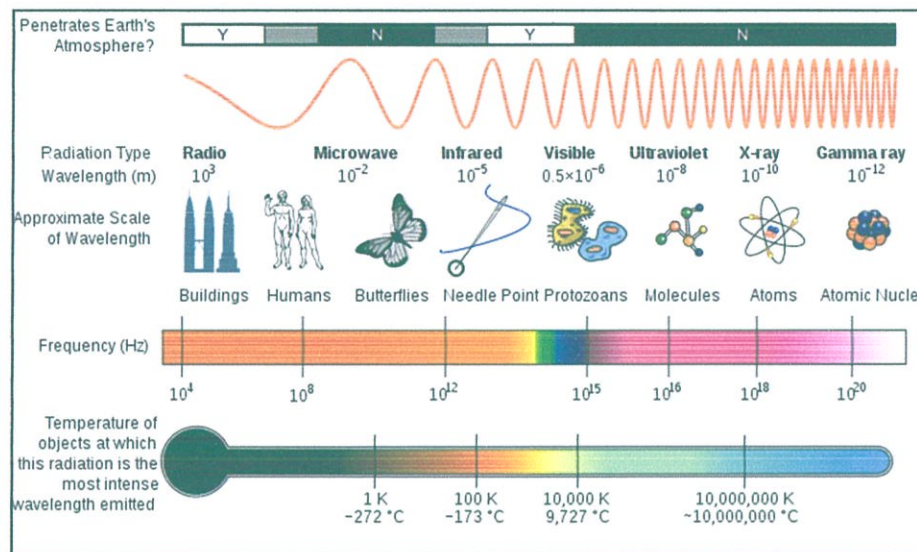
รูปที่ 2.34 Fiber Optic Spectrometer ผลิตโดย Ocean Optics
รุ่น USB 4000 สถานที่ตั้ง ห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิว ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

UV-Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด ปริมาณแสง ในช่วงรังสียูวี (Ultraviolet) และช่วงแสงขาว (Visible Light) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ใน เครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งโดย

ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

1. UV-Vis Spectrum

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแถบสเปกตรัม ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นสั้น (รวมทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์) ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาว (รวมถึงไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ) รังสียูวีและแสงขาวเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูป 2.33 โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร

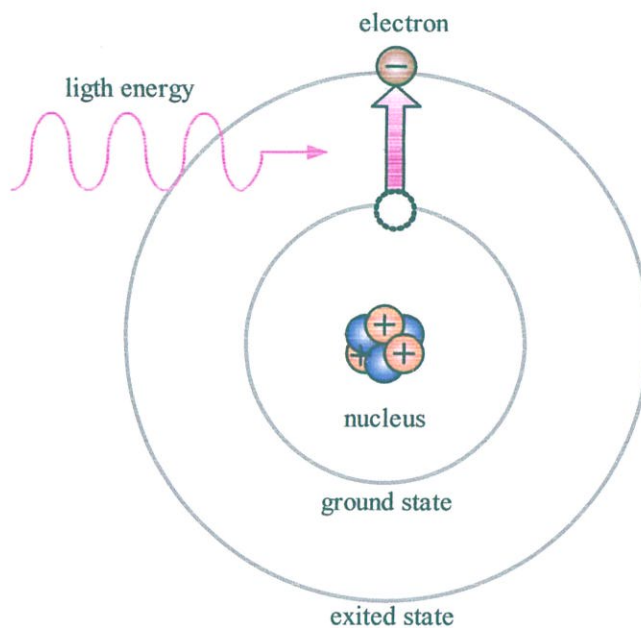


รูปที่ 2.35 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

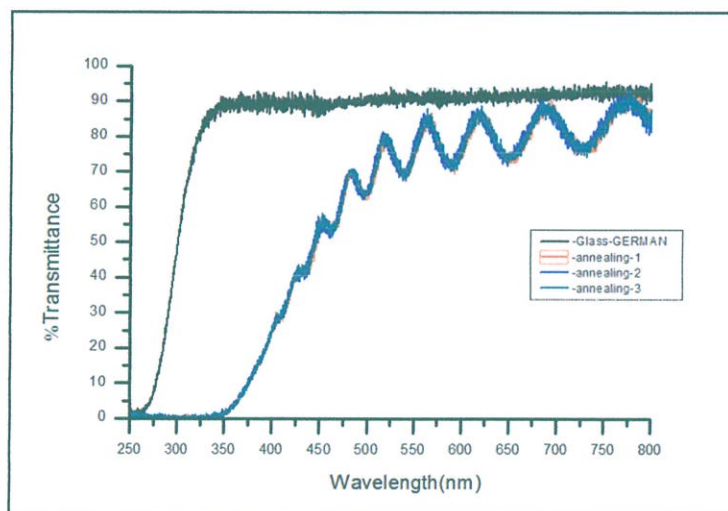
2. UV-Vis Spectroscopy

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิค UV-Vis spectroscopy ได้ถูกนำไปใช้งานต่าง ๆ อย่างมากมาย แม้ว่าทุกวันนี้เครื่องมือที่นำเทคนิคนี้ไปใช้จะมีความแตกต่างจากเครื่องมือตัวแรกที่มีการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก แต่เครื่องมือเหล่านี้ก็ทำงานบนหลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาว คลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืน

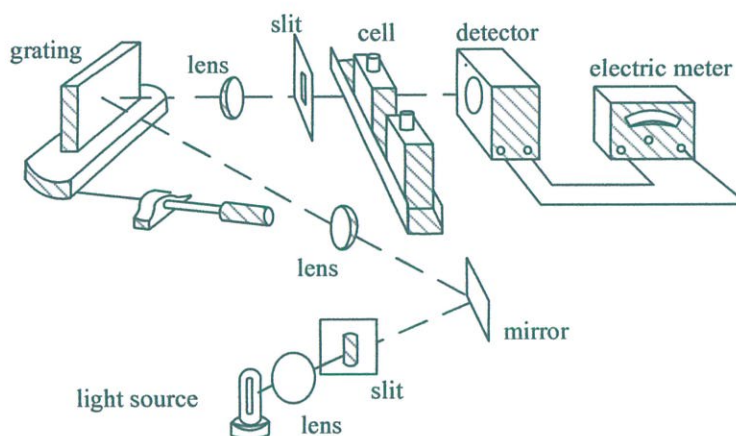
แสง(Absorbance)ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.36 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น



รูปที่ 2.37 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer



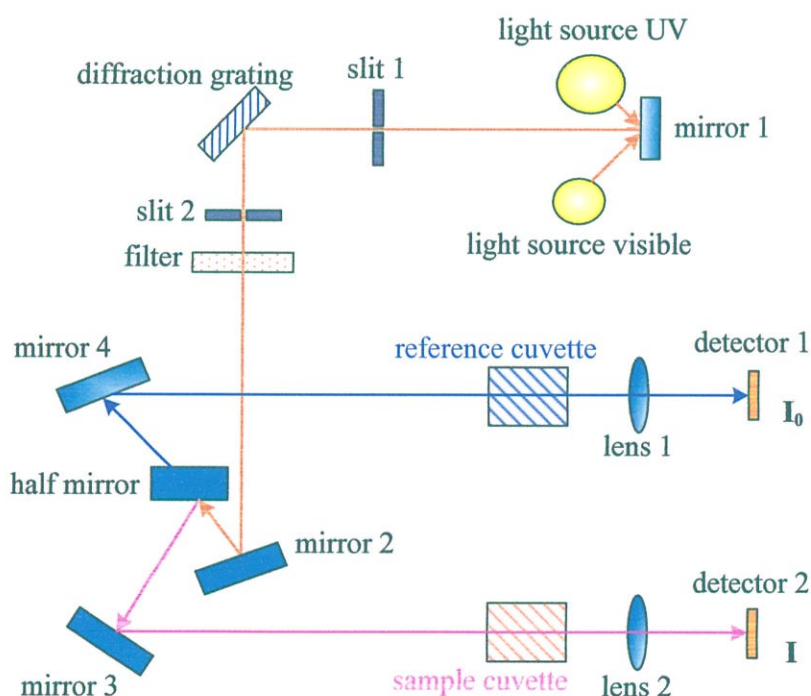
รูปที่ 2.38 ส่วนประกอบของเครื่อง Single beam UV-Vis spectrophotometer

3.UV-Vis Spectrophotometer

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิค UV-Vis spectroscopy เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุ สารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสง จะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้คือ หลอดทังสเตนฮาโลเจน ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร สำหรับ แหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดควิที่เรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 นาโนเมตร แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออกเพื่อให้แสงที่จะผ่านไปยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่นค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายในกว้าง 1 เซนติเมตร (ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างตามกฎของ Beer-Lambert) เครื่อง UV-Vis spectrophotometer บางรุ่น สามารถใช้หลอดทดลองเป็น cuvettes ได้ แต่ cuvettes ที่ดีที่สุดนั้นทำมาจากควอตซ์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับ cuvettes ที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้น เพราะแก้วและพลาสติกดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีแสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านตัวอย่างมาถึงเครื่องตรวจวัด สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ได้แก่ PMT (photomultiplier tube), diode arrays และ CCDs (charge coupled devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ผลของสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของ

กราฟระหว่างค่า absorbance และค่าความยาวคลื่น เครื่อง UV-Vis spectrophotometer สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายสะดวกและมีราคาไม่แพงมากนัก

สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้นแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัว เพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่าง ได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่น จะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว beam chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้



รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของเครื่อง Double beam UV-Vis spectrophotometer

4. การศึกษาสมบัติเชิงแสงด้วยวิธี สเวนนิโพล

สเวนนิโพล ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาค่าความหนาและดัชนีหักเหของฟิล์มบาง โดยการใช้อัตราการส่งผ่านของฟิล์มด้วยวิธีการหาค่าจุดสูงสุดต่ำสุดของรีฟลักทีวิตีที่ได้

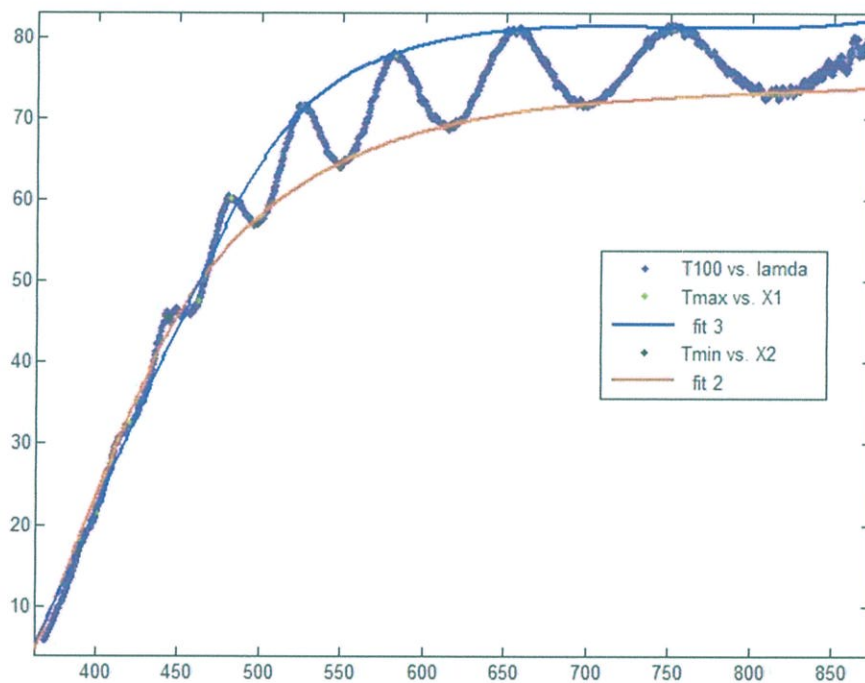
จากการวัดการส่องผ่าน โดยสามารถหาค่าดัชนีหักเหที่เป็นค่าประมาณ (n_1) ได้จากบริเวณที่มีการดูดกลืนในระดับกลางและระดับต่ำ ได้จากความสัมพันธ์

$$n_1 = \left[N_1 + (N_1^2 + S^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

เมื่อ
$$N_1 = 2S \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{S^2 + 1}{2} \quad (2.3)$$

T_M คือ จุดสูงสุดของรีฟlection แทรกสอด

T_m คือ จุดต่ำสุดของรีฟlection แทรกสอด



รูปที่ 2.40 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

สำหรับค่า T_M , T_m ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นใดๆนั้น ค่าใดค่าหนึ่งจะได้รับการวัดส่วนอีกค่าได้จากการคำนวณโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยสร้างเส้นแนวโน้มขึ้นมาให้ครอบคลุมกราฟสเปกตรัมการส่องที่วัดได้ ดังรูปที่ 2.39

ส่วนค่าดัชนีหักเหของแผ่นฐานรอง (s) สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่องผ่านของแผ่นฐานรอง (T_s) เพียงอย่างเดียวได้จากสมการ

$$S = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s} + 1 \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

เมื่อ T_s คือ การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นใดๆ ของแผ่นฐานรอง

ในเบื้องต้นดัชนีหักเห (n_1) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 ซึ่งค่าที่ได้ในตอนแรกสามารถนำมาคำนวณใหม่ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นหลังจากได้ค่าความหนาของฟิล์ม (d) ซึ่งความหนาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_{e2} - \lambda_2 n_{e1})} \quad (2.5)$$

เมื่อ λ_1 และ λ_2 คือความยาวคลื่นที่จุดต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ

n_{e1} และ n_{e2} คือดัชนีหักเหที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นข้างต้น

โดยค่าความหนาที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 นั้นจะสอดคล้องเฉพาะที่บริเวณที่มีการดูดกลืนในระดับกลางและระดับต่ำเท่านั้น จากความหนาที่ได้ในข้างต้นนั้นจะถูกนำมาหาค่าความหนาเฉลี่ย (\bar{d}_1) และนำไปคำนวณกลับเพื่อหาลำดับการแทรกสอด (m_0) ที่ความยาวคลื่นใดๆ จากสมการที่ 2.6

$$2nd = m\lambda \quad (2.6)$$

โดยค่า m_0 ที่ได้จะถูกปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มและครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ให้เป็นค่าลำดับการแทรกสอดที่ถูกต้อง (m) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนา (d_2) และหาค่าเฉลี่ย (\bar{d}_2) ออกมา คือความหนาของฟิล์มบางที่คำนวณได้จากวิธีนี้นั้นเองจากค่าความหนาของฟิล์มบางที่คำนวณได้และค่าลำดับการแทรกสอดที่ปรับปรุงแล้วนั้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเห (n_2) ที่ถูกต้องได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ จากสมการที่ 2.5

สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงมากนั้นสามารถใช้ Cauchy dispersion ดังสมการที่ 2.7 เพื่อหาค่าได้

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

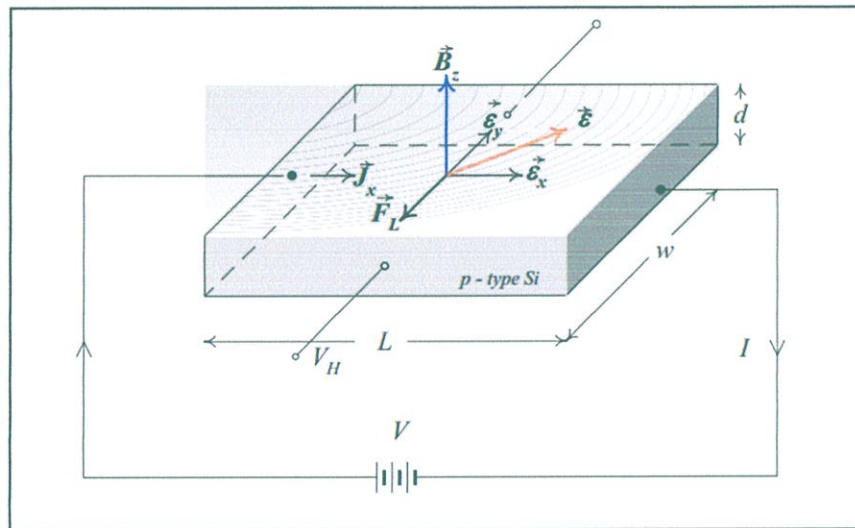
โดยคำนวณค่าเพียงสองพจน์แรกของ Cauchy dispersion สามารถนำค่าดัชนีหักเห (n_2) และส่วนกลับความยาวคลื่นกำลังสองมาเขียนกราฟเพื่อหาค่าคงที่ a และ b ได้จากสมการเส้นตรง เมื่อได้ค่าตัวแปร a และ b ก็สามารถหาค่าดัชนีหักเห (n) ได้ที่ทุกค่าของความยาวคลื่น

2.5.4 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ เป็นการทดลองเพื่อวัดความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ หลักการทดลองคือ ขณะที่กระแส J_x ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง ($+x$) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศ z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแส J_x จะทำให้มีสนามไฟฟ้าด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง Y ซึ่งตั้งฉากกับทิศของกระแส

และทิศทางสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ของฮอลล์” (Hall effect) ผลจากการทดลองนี้ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสารกึ่งตัวนำมีพาหะนำประจุอยู่สองชนิดที่แตกต่างกันคือ โฮลและอิเล็กตรอน นอกจากนี้ผลการทดลองทำให้สามารถวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งนี้ยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆได้อีกด้วย

พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีแท่งหนึ่ง ซึ่งยาว L กว้าง w และหนา d ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันความต่างศักย์ V_x โวลต์ ทำให้เกิดกระแส J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามไฟฟ้า B_z ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศ z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

โฮลที่เป็นพาหะส่วนมาก ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกอยู่ภายในแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_x ในทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่าน โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมี “แรงลอเรนซ์” (Lorentz force) กระทำต่อโฮลโดย

$$\vec{F}_L = q\vec{V}_x \times \vec{B} \quad (2.8)$$

ซึ่ง \vec{F}_L คือแรงลอเรนซ์และมีขนาดเป็น

$$|F| = qV_x B_z \quad (2.9)$$

ทิศทางของแรงลอเรนซ์คือ $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาบนทางแกน $-y$ และมาสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_y มีทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮล ซึ่งถูก

กระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในภาวะสมดุล Steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศทาง $+x$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์และแรงจากสนามไฟฟ้าภายในมีค่าเท่ากัน

$$\text{หรือ} \quad F = q\varepsilon_y = F_L = qV_x B_z \quad (2.10)$$

$$\text{หรือ} \quad q\varepsilon_y = qV_x B_z \quad (2.11)$$

$$\text{จาก } J_x = pqV_x \text{ หรือ } V_x = \frac{J_x}{pq}$$

เมื่อแทนค่า V_x ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

$$\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pq} \quad (2.12)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\varepsilon_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H \quad (2.13)$$

โดยที่ R_H คือ “สัมประสิทธิ์ของฮอลล์” (Hall coefficient)

$$\text{จาก} \quad V_y = V_H = \varepsilon_y \cdot w \quad (2.14)$$

โดยที่ V_H คือ “แรงดันฮอลล์” (Hall voltage) หรือคือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ เมื่อแทนค่า $J_x = \frac{I}{wd}$ และ $\varepsilon_y = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการที่ (2.13) จะทำให้ได้

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I \cdot B_z} = \frac{1}{pq} \quad (2.15)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของโฮลคือ

$$\rho = \rho_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{qd V_H} \quad (2.16)$$

$$\text{และ สภาพต้านทานไฟฟ้า} \quad \rho = R \frac{wd}{L} \quad (2.17)$$

โดย R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร (โอห์ม)

$$\text{และ } \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \mu_p = \frac{1}{\rho \cdot p \cdot q} = \frac{1}{R_H} \quad (2.18)$$

จากสมการที่(2.16) (2.17) และ (2.18) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำคือ ความหนาแน่นพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องพาหะได้เป็นอย่างดีคือนอกจากนี้แล้วสมการ (2.18) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่อง และค่าความหนาแน่นพาหะที่อุณหภูมิต่างๆได้

ในทำนองเดียวกันในกรณีที่ป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จะมีค่าลบ โดยเฉพาะแรงฮอลล์จะมีค่าเป็นตรงข้ามกรณีของสารชนิดพีมีค่าเป็นลบด้วยดังนั้นการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำ ว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้อีกด้วย

นอกจากนี้แล้วในการวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้ ไม่ได้มีการพิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะ หรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงไม่ถูกต้อง ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะจะได้ว่า

$$R_{H\text{ชนกัน}} = 1.18R_H \quad (2.19)$$

และ
$$\mu_{H\text{ชนกัน}} = 1.18\mu_H \quad (2.20)$$

อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์ การวัด และทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ จะให้ผลที่ต้องการ โดยสมการต่างๆที่กล่าวมาแล้วสามารถใช้ได้ ก็เฉพาะกับสารตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กทริเนซิค ที่ถูกเติมด้วยอะตอมของสารเจืออย่างเข้มข้น เนื่องจากสามารถพิจารณาได้ว่ามีพาหะเพียงชนิดเดียว แต่ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทริเนซิค หรือสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมของสารเจือเล็กน้อย จะมีผลของพาหะทั้งสองชนิด อิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นการวิเคราะห์ ผลการทดลองจึงยุ่งยากมากขึ้น และไม่น่ามากกล่าวในที่นี้

2.5.5 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพรบที่โพรบ (four point probe)

ในการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ของแท่งสารกึ่งตัวนำ สามารถทำได้โดยง่ายกรณีที่สามารถเตรียมแท่งสารนั้น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมพื้นที่หน้าตัด A มีขนาดยาว l ที่สำคัญก็คือ ต้องทำขั้วไฟฟ้า (metal contact) ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้สมบูรณ์เป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ได้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลโดยตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร ซึ่งกรณีนี้ เมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์ และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ I จะได้ว่า

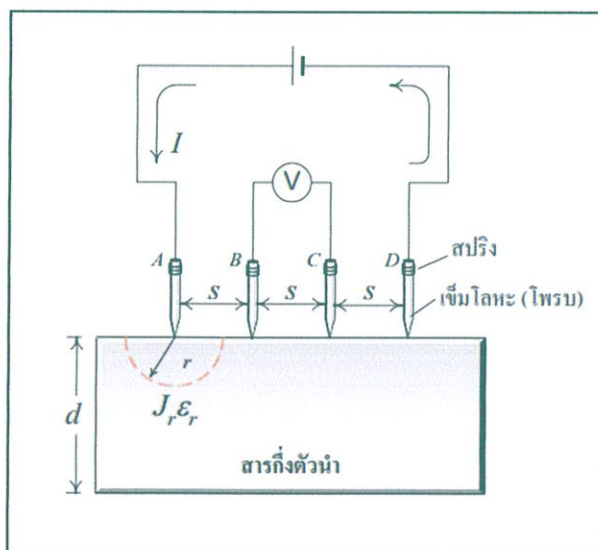
$$J = \sigma \cdot \varepsilon$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{V}{l}$$

ดังนั้นสภาพต้านทาน หรือ Resistivity
$$\rho = \frac{\ddot{A}}{I} \cdot \frac{V}{l} \quad (2.21)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงไปที่สมการ (2.21) สามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของสารได้ ในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกสารกึ่งตัวนำออกจากแผ่นผลึก และทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้ เพราะจะทำให้แผ่นผลึกเสียหายได้เมื่อทำรอยสัมผัสแล้วสารกึ่งตัวนำนั้นไม่สามารถนำกลับไปใช้งานอื่นได้อีก รวมทั้งการกำหนดขนาดความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดให้แน่นอนทำได้ยาก ดังนั้นการวัดวิธีนี้จึงเป็นปัญหาและไม่นิยมกัน วิธีที่ได้รับความนิยมสูงคือ “วิธีโฟร์พอยท์โพรบ” (Four point probe) หรือ “เข็ม 4 จุด” ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ทำการวัดได้ง่ายและสะดวก สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสารไม่ว่าจะมีขนาดรูปร่างอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถวัดบนแผ่นผลึกที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกได้และไม่ต้องตัดแยกออกมา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดลอง ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลมและอาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวด้านหน้าที่ขัดมันของชิ้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ A B C และ D อยู่ห่างกันเป็นระยะ s เท่าๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป จะมีค่าราว 0.5-1 มม. ดังรูป 2.41 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด คือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงกดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำกระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.42 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี โฟร์พอยท์โพรบ

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของชิ้นสารกึ่งตัวนำนี้มีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) หรือ $d \gg s$ กระแสจากขั้ว A จึงสามารถผ่านออกไปที่

ขั้ว D ได้ ความหนาแน่นของกระแสจากขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J_r) ที่รัศมี r ใดๆ ที่กระจายออกไปจากจุด A คือ

$$J_r = \frac{1}{2\pi r^2} \quad (2.22)$$

โดยที่ $2\pi r^2$ คือครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีรัศมี r จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้า ϵ_r ที่จุด r คือ

$$\epsilon_r = \frac{J}{\sigma} \quad (2.23)$$

โดย σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของแท่งสารนี้ และจากนิยามที่ว่า ศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ในรัศมี a คือ

$$V_a = -\int_{-a}^a \epsilon_r dr = -\frac{I}{2\pi\sigma} \int_{-a}^a \frac{1}{r^2} dr = \frac{I}{2\pi\sigma a} \quad (2.24)$$

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และขั้ว C ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแส I ไหลผ่าน คือ

$$V_{B-C} = \frac{I}{2\pi\sigma s} - \frac{I}{2\pi\sigma \cdot 2s} = \frac{I}{4\pi\sigma s} \quad (2.25)$$

และเมื่อพิจารณาว่า มีกระแสไหลออกที่ปลายเข็ม D โดยผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ และทำให้เกิดมีความแตกต่างของศักย์ที่ขั้ว B และ C ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาครั้งแรก ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟารวมระหว่างขั้ว B และขั้ว C จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าคือ

$$V_{B-C-Total} = 2\left(\frac{I}{4\pi\sigma s}\right) \quad (2.26)$$

$$\text{สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)} \quad \sigma = \frac{1}{2\pi s} \frac{I}{V} \quad (2.27)$$

$$\text{และสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resisivity)} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (2.28)$$

อย่างไรก็ดี สมการที่ (2.27) และ (2.28) จะใช้ได้ดีและถูกต้อง ในกรณีที่ความหนาของชิ้นสาร มีค่ามากกว่าระยะห่างของเข็ม หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ เช่นในการวัดชิ้นสารที่มีขนาดของความหนาบางๆ ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดจากความเป็นจริง ซึ่งจะได้ว่า

$$\rho_{corrected} = \rho_{measured} \cdot F \quad (2.29)$$

โดยที่ $\rho_{corrected}$ คือ สภาพต้านไฟฟ้าที่ถูกต้อง

$\rho_{measured}$ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ตามสมการที่ (2.28)

และ F คือ แฟกเตอร์ความถูกต้อง (Correction factor)

สำหรับค่าแฟคเตอร์ความถูกต้อง F จะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนา และรูปร่างของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำการวัด โดยเฉพาะอัตราส่วนของค่า d/s

ในกรณีการวัดชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาน้อยๆ หรือบางมากๆ เช่นการวัดชิ้นบางๆของสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือ บนแผ่นผลึกฐานรอง ดังรูป 2.42 ซึ่งในกรณีนี้ ความหนาของชิ้นสารมีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย หาได้จากสมการที่ (2.30)



รูปที่ 2.43 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำที่อยู่บนแผ่นผลึกฐานรอง

$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} X_j = 4.532 \frac{V}{I} \quad \text{โอห์ม-เซนติเมตร} \quad (2.30)$$

โดยที่ X_j คือความหนาของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำการวัดหรือเท่ากับความลึกของรอยต่อ พี-เอ็น นอกจากนี้แล้ว จากสมการที่ (2.31) “สภาพต้านทานแผ่น” หรือ *Sheet resistivity* ρ_s สามารถแสดงได้ว่า

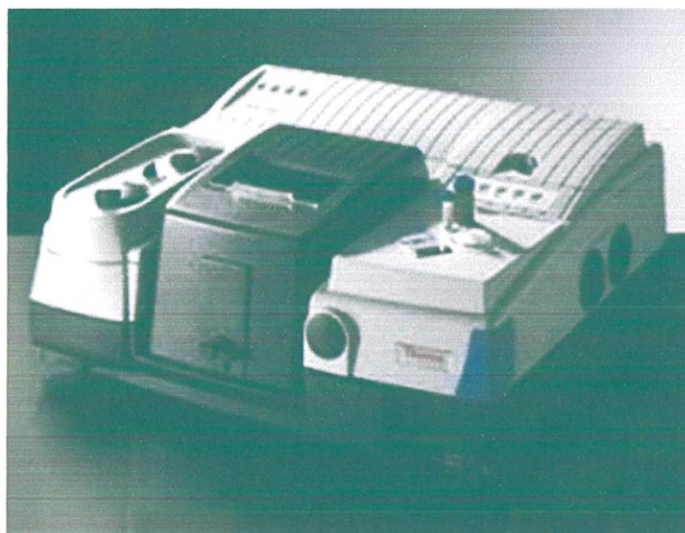
$$\rho_s = \frac{\bar{\rho}}{X_j} = 4.532 \frac{V}{I} \quad \text{โอห์ม-เซนติเมตร} \quad (2.31)$$

ซึ่งในทางปฏิบัติ สมการที่ (2.31) ถูกนำมาใช้มากที่สุด เพราะในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ด้วยสารเจือ ซึ่งมีขนาดบางๆราว 1-3 ไมโครเมตร อยู่ด้านบนของแผ่นผลึกสะดวกต่อการนำไปใช้เพื่อการคำนวณและการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์อื่นๆต่อไป

ข้อเสียในการวัดด้วยวิธีโพร์พอยท์โพรบนี้ คืออาจทำให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำมีรูรอยและเสียหายได้ เพราะถูกปลายแหลมของเข็มกดจี้ทับ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเอาวิธีการใหม่มาใช้ เป็นวิธีการวัดโดยที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่นำมาวัดไม่ถูกจี้ หรือสัมผัส อุปกรณ์ที่ใช้วัด เราเรียกว่า “วิธี *Non contacting*” วิธีนี้ใช้หลักการเหนี่ยวนำให้เกิด *Eddy current*

ในสารกึ่งตัวนำด้วยสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการนำเอาระบบอัตราซาวด์มาช่วยในการวัดความหนาของชั้นสารอีกด้วย ทำให้ได้ระบบการวัดที่ไม่ต้องมีการสัมผัสแบบอัตโนมัติ ซึ่งสะดวกต่อการใช้งานมาก และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป

2.5.6 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)



รูปที่ 2.44 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)ผลิตโดยNicolet รุ่น 6700
สถานที่ตั้ง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ใน โมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลายพิมพ์โมเลกุล เทคนิค FTIR นี้มีความไวใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

1.การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

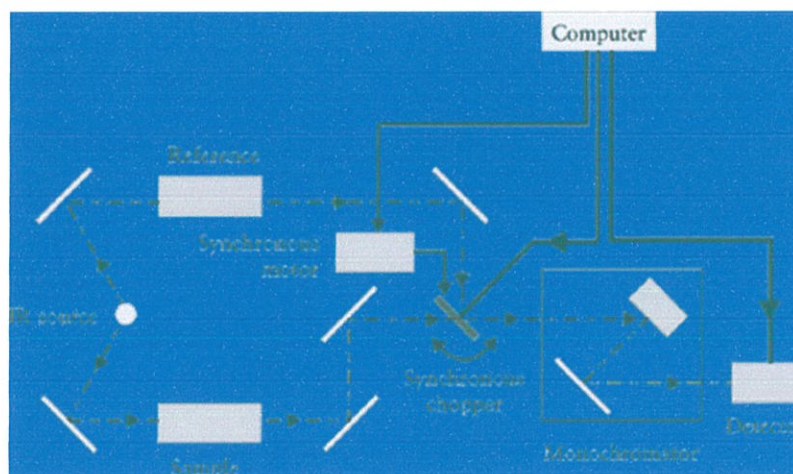
ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($0^{\circ} K$) อะตอมทุกตัวใน โมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายัง โมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของ

โมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

2. ส่วนประกอบ

ในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสี Interferometer และเครื่องตรวจวัด แต่สำหรับตัวแยกรังสีของ FTIR จะเป็น Interferometer โดย Interferometer จะแยกลำรังสีออก ทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง แล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอด ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ Path difference โดยเครื่องตรวจวัด

เครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับ FTIR คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) เวลาในการตอบสนองของเครื่องตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ที่ใช้ใน Dispersive Infrared Spectrometer เช่น Thermocouple หรือ Thermistor จะช้ากว่าเวลาที่ Interferometer ทำการสแกนมาก DTGS เป็นเครื่องตรวจวัดประเภท Pyroelectric ที่สามารถส่งสัญญาณการตอบสนองได้อย่างรวดเร็วเพราะอุปกรณ์ตัวนี้ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สำหรับ MCT เป็นเครื่องตรวจวัดโฟตอนซึ่งขึ้นกับ quantum nature ของรังสี และให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วมกขณะที่ DTGS ทำงานที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว $77 (K^{\circ})$ MCT จะทำงานได้ดี โดยทั่วไป MCT จะเร็วกว่าและมีความไวมากกว่า DTGS



รูปที่ 2.45 ส่วนประกอบของ Dispersive Infrared Spectrometer

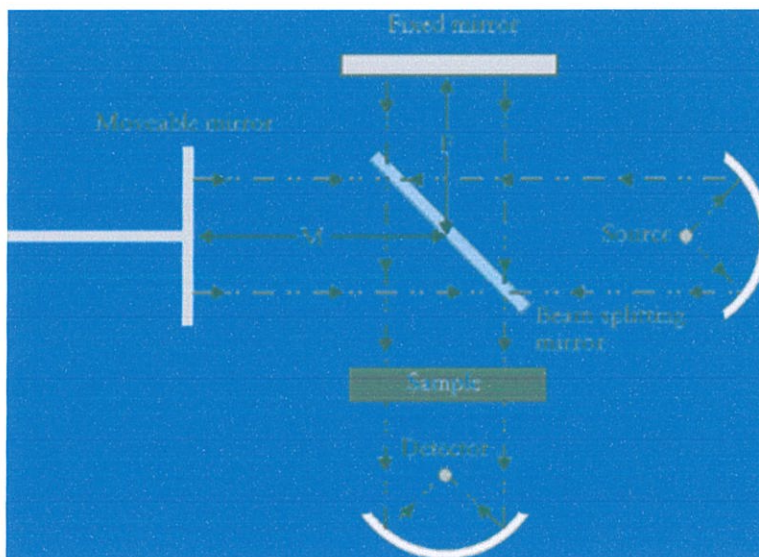
3. การทำงาน

เครื่องมือหลักๆ จะถูกออกแบบมาอย่างง่ายๆ รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้ คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันและตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง โดยส่วนใหญ่ทำมาจากการนำฟิล์มบางของเจอร์มาเนียมวางลงบน KBr

ที่ตัวแยกแสงลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด

Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสองถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากันลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกันทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศาการแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น λ รังสีทั้งสองลำจะกลับมาจะมีเฟสตรงกัน

เมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดวัดได้จะมีลักษณะของ Interferogram เป็นรูปคลื่น sine โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่



รูปที่ 2.46 ส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer

2.5.7 เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)



รูปที่ 2.47 Raman spectroscopyผลิตโดย Thermo Scientific รุ่น DXR Smart Raman
สถานที่ตั้ง วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดของสารและใช้ในการวิเคราะห์โมเลกุลของสาร โดยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลที่คล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีแต่จะมีข้อดีที่ได้เปรียบที่สำคัญกว่าคือ ไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากและบางครั้งก็สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการเตรียมตัวอย่าง เช่นวิเคราะห์สารที่อยู่ในภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะใส ได้แก่ แก้วหรือพลาสติก หรือสารละลายที่อยู่ในน้ำ

เทคนิครามานสเปกโตรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากได้ชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ โดยการผ่านคลื่นแสงเอกรงค์ไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรคลื่นแสงเมื่อชนกับโมเลกุลแล้ว ถ้าเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังการชนมีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงดังกล่าวเรียกว่า “การกระเจิงแบบเรย์ลี” (Rayleigh scattering) แต่ถ้าการชนนั้นเป็นแบบไม่ยืดหยุ่นจะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนมีพลังงานสูงหรือต่ำกว่าพลังงานของคลื่นที่ตกกระทบโมเลกุลการกระเจิงดังกล่าวเรียกว่า “การกระเจิงแบบรามาน” (Raman scattering)

ปรากฏการณ์รามานแบบปกติสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแผนเดิม (Classical wave theory) โมเมนตัมไฟฟ้า m ในพันธะโมเลกุลถูกเหนี่ยวนำเมื่อโมเลกุลนี้อยู่ในสนามของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า E โมเมนตัม m ซึ่งแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้า ดังนั้น

$$m = \alpha E \quad (2.32)$$

เมื่อ α เป็นสภาพมีขั้วได้ (polarizability) ของพันธะ ซึ่งเป็นการวัดความผิดปกติของสนามไฟฟ้า โดยที่สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของโคไซน์สามารถเขียนได้เป็น

$$E = E_0 \cos 2\pi vt \quad (2.33)$$

เมื่อ E_0 คือ แอมพลิจูดสูงสุด และ v คือความถี่

สภาพมีขั้วจะเปลี่ยนไปเมื่อ โมเลกุลที่มีสองอะตอมเกิดการสั่นแบบยืด สภาพมีขั้วจึงขึ้นกับ ระยะห่างระหว่างอะตอม r และมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้น มีค่าลดลงเมื่อพันธะ หดสั้น ระหว่างที่โมเลกุลมีการสั่น สภาพมีขั้วได้ของพันธะจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นจังหวะด้วย อัตราเร็วที่กำหนดจากอนุพันธ์ย่อย (partial derivative) ของสภาพมีขั้วได้เป็นฟังก์ชันระยะทาง $\partial\alpha/\partial r$ สภาพมีขั้วได้ขณะใดขณะหนึ่งเขียนแทนด้วย

$$\alpha = \alpha_0 + (\partial\alpha/\partial r)r_0 \cos 2\pi v_m t \quad (2.34)$$

เมื่อ r_0 ระยะสมดุระหว่างอะตอม α_0 สภาพมีขั้วได้ของพันธะที่ระยะนี้ v_m คือ ความถี่โมเลกุลที่มีการ สั่น เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.33) ลงในสมการ (2.22) จะได้

$$m = [\alpha_0 + (\partial\alpha/\partial r)r_0 \cos 2\pi v_m t] / E_0 \cos 2\pi vt \quad (2.35)$$

$$m = \alpha_0 E_0 \cos 2\pi vt + (\partial\alpha/\partial r)r_0 \cos 2\pi v_m t E_0 \cos 2\pi vt \quad (2.36)$$

จากความสัมพันธ์ $\cos x \cos y = \frac{1}{2} \cos (x+y) + \cos (x-y)$ สมการที่ (2.33) เขียนใหม่ได้เป็น

$$m = \frac{1}{2} (\partial\alpha/\partial r)r_0 E_0 \cos 2\pi v(-v_m) \quad (2.37)$$

องค์ประกอบ โมเมนต์ไฟฟ้าในส่วนของทอมแรกคือ การกระเจิงแบบเรย์ลีที่ความถี่ v ของ ลำรังสีที่ชน ทอมที่สองและสามเป็น โมเมนต์ไฟฟ้าของรังสีที่ถูกกระเจิงขณะที่ความถี่ของรังสีที่ชน ถูกมอดูเลตมีค่า $\pm v_m$ หรือความถี่การสั่นของพันธะความถี่ของรังสีที่ชนจึงเปลี่ยน ไป โดยความถี่ของ โมเลกุลที่มีการสั่นทำให้เห็นแถบรามานเส้นรามานจะเกิดเมื่อสภาพมีขั้วได้ของพันธะเปลี่ยนไปเมื่อ ระยะห่างของอะตอมเปลี่ยนนั้นคือ $\partial\alpha/\partial r$ ไม่เป็นศูนย์ถ้าพันธะเป็นแบบ active Raman

ทฤษฎีอนุภาค(The particle theory) จากทฤษฎีคลื่นจะได้เส้นสโตกส์และแอนติสโตกส์ที่มีความเข้มเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงเส้นสโตกส์มีความเข้มมากกว่า ทฤษฎีคลื่นจึงไม่สามารถ

อธิบายอัตราส่วนความเข้มของรังสีแอนติสโตกส์ต่อสโตกส์ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงต้องหันมาใช้ทฤษฎีอนุภาคและกลศาสตร์ควอนตัมในการอธิบายดังกล่าว

ความเข้มของการกระเจิงแบบรามานมีค่าประมาณ 10^{-10} - 10^{-12} เท่าของคลื่นแสงตกกระทบโมเลกุล จึงทำให้การตรวจวัดเป็นไปได้ยากดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มแสงสูง โดยในการวัดโดยเทคนิครามานนี้จะใช้คลื่นแสงจากแสงเลเซอร์ และการกระเจิงแบบรามานเกิดจากคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียวไปชนโมเลกุลและเกิดการกระเจิงจนทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานกึ่งสถานะเร็ว (Virtual state หรือ Quasi-excited state) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างสถานะพื้นและสถานะเร็ว แล้วกลับสู่พลังงานสถานะพื้นจากนั้นจะเกิดการกระเจิงแบบรามาน โดยสเปกตรัมที่เกิดจะเป็นสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

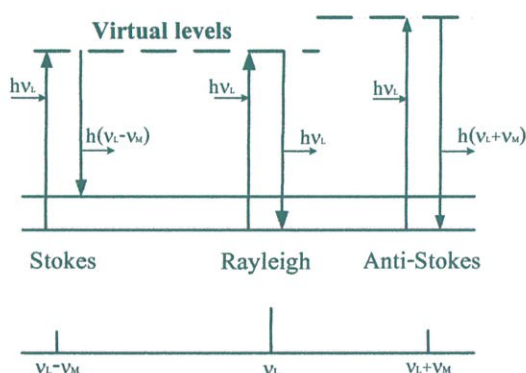
เส้นสโตกส์ (Stoke line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คลื่นแสงเลเซอร์ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นของระดับพลังงานการสั่น ($v=0$) เป็นผลทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอนจะอยู่ในสถานะเร็วและกลับลงมาสู่ระดับพลังงาน E_0 ให้พลังงาน E_{ST} เป็นพลังงานของเส้นสโตกส์

เส้นแอนติสโตกส์ (Anti-stoke line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะเร็วของระดับพลังงานการสั่น ($v=1$) ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุล ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือโมเลกุลกลับลงสู่สถานะพื้น E_0 และโฟตอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ให้พลังงาน E_{ST} ซึ่งเป็นพลังงานของเส้นแอนติสโตกส์

โดยสรุปคือกลไกของการเกิดอินฟราเรดและรามานสเปกตรัมเกิดจากการสั่นของโมเลกุล แต่แตกต่างกันตรงกลไกของการสั่นของโมเลกุล โมเลกุลที่เกิดการสั่นและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในโมเลกุลจะดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความถี่เดียวกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลนั้นและทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนพลังงานจากระดับพลังงานสถานะพื้นไปยังสถานะเร็วจึงได้อินฟราเรดสเปกตรัม ส่วนรามานสเปกตรัมนั้นเกิดจากโมเลกุลเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) อันเนื่องมาจากการกระจายของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรอบๆพันธะเคมีในโมเลกุลตามด้วยการกระเจิงแสงขณะกลับมาสู่สถานะพื้น ซึ่งโมเลกุลที่บิดเบี้ยวนี้เป็นผลจากการที่โมเลกุลถูกโพลาไรซ์และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นมาชั่วคราว สภาพขั้วจะหายไปเมื่อโมเลกุลนั้นปลดปล่อยคลื่นแสงออกมา (relaxation) ซึ่งการกระเจิงแสงขึ้นอยู่กับว่าโมเลกุลนั้นมีพันธะเคมีที่สามารถจะถูกทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปจากตำแหน่งสมดุลมากน้อยเพียงใด จึงกล่าวได้ว่าการโพลาไรซ์ของพันธะเคมีมีผลต่อการกระเจิงและทำให้เกิดการเลื่อนของสเปกตรัมรามาน (Raman shift) มากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ ซึ่งสเปกตรัมรามานสามารถใช้ศึกษาสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้โดย

1. สเปกตรัมรามานในการวิเคราะห์สารอนินทรีย์ (Raman spectra of inorganic species)
 เทคนิครามานที่ใช้วิเคราะห์สารอนินทรีย์เป็นเทคนิคที่เหนือกว่าเทคนิคอินฟราเรดเนื่องจากสามารถหาพลังงานการสั่นของพันธะลิแกนด์ซึ่งอยู่ในช่วง 1000-700 ต่อเซนติเมตร วิธีรามานยังใช้หาองค์ประกอบ โครงสร้าง ความเสถียร ของสารเชิงซ้อน และเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากพันธะโลหะกับออกซิเจน

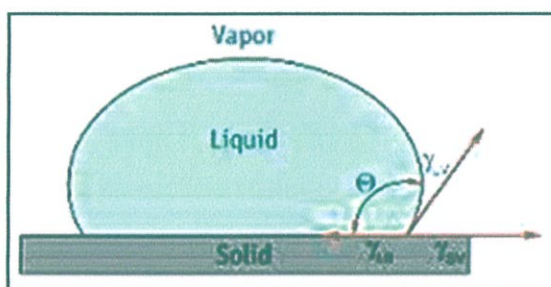
2. สเปกตรัมรามานในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ (Raman spectra of organic species)
 เทคนิครามานที่ใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้หาข้อมูลรูปแบบของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ความเข้มข้นในการสั่นแบบยืดของพันธะสองของโอเลฟิน หรืออนุพันธ์ของไซโคลโอเลฟินในช่วง 700-1200 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเกิดจากการนิลอิเลคชั่นเข้าและออกแบบสมมาตรเทียบกับวงตรงกลาง เป็นต้น



รูปที่ 2.48 พลังงานในการเกิดรามานสเปกตรัม

2.5.8 มุมสัมผัส (Contact Angle)

มุมสัมผัส (Contact Angle) คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสของหยดของเหลวที่ไม่เคลื่อนที่บนพื้นผิว โดยจุดเริ่มต้นอยู่ ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสัมผัสของทั้งอากาศ ของเหลวและของแข็ง แสดงดังรูป 2.48



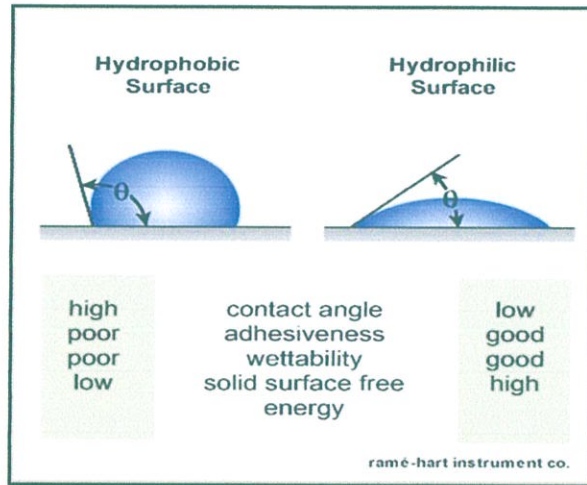
รูปที่ 2.49 มุมสัมผัสระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง

มุมสัมผัสนี้ก็จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว(wetting) และค่าของมุมสัมผัสจะขึ้นอยู่กับพลังงานของพื้นผิวและแรงดึงดูดของของเหลว มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

สำหรับกรณี ถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งวด (Superhydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150° ทำให้มีน้ำสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"

ตารางที่ 2.1 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง

Contact angle	Degree of wetting	Strength of:	
		Sol./Liq. interactions	Liq./Liq. interactions
$\theta = 0$	Perfect wetting	strong	weak
$0 < \theta < 90^\circ$	high wettability	strong	strong
		weak	weak
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	low wettability	weak	strong
$\theta = 180^\circ$	perfectly non-wetting	weak	strong



รูปที่ 2.50 คุณสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

2.5.8.1 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส

1. การวัดมุมสัมผัสสถิต (Static Contact Angle)

การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีนี้เป็นประเภทของการวัดที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ โดยใช้ในการอ่านค่าในส่วนของหยดน้ำหรือของเหลวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเวลาเพียงสั้นๆ ก็คือเมื่อหยดหยดน้ำหรือของเหลวลงไปบนพื้นผิวของแข็งตัวอย่างก็จะสามารถถ่ายรูปของหยดน้ำหรือของเหลวออกมาแล้วทำการคำนวณหาค่ามุมสัมผัสได้เลยวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำวิธีนี้ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความสะอาดของพื้นผิวของแข็งตัวอย่าง ซึ่งสิ่งปนเปื้อนสารอินทรีย์พวกนี้จะเป็นตัวขัดขวางคุณสมบัติการเปียก สำหรับพื้นผิวที่มีค่ามุมสัมผัสมากหรือเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) เมื่อพื้นผิวของแข็งถูกทำความสะอาดและได้รับการปรับสภาพเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนออก ค่ามุมสัมผัสก็จะลดลงจากเดิมจนกลายเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ขณะเดียวกันคุณสมบัติการเปียกจะมากขึ้นและจะส่งผลให้ค่าพลังงานของพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย

2. การวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง (Tilting Plate Method)

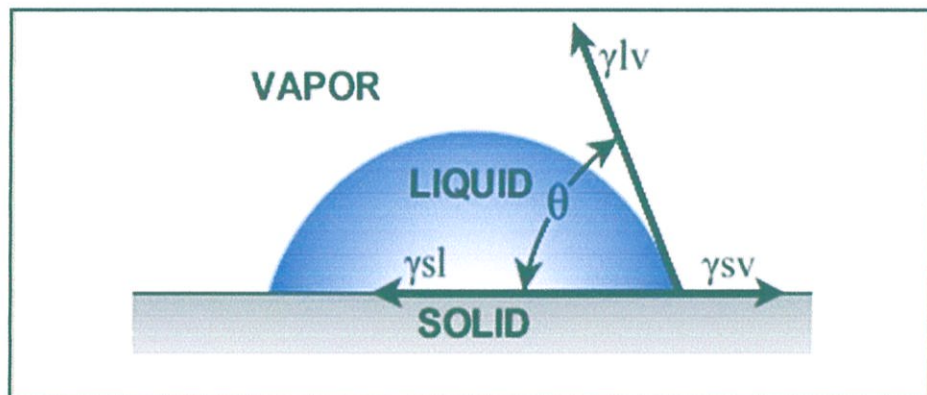


รูปที่ 2.51 วิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง

จากรูปที่ 2.50 การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง เป็นการวัดมุมสัมผัสโดยการถ่ายภาพ Sessile Drop ทั้งสองข้าง (ทั้งซ้ายและขวา) จากรูปในขณะที่ยกพื้นผิวของของแข็งทำให้เอียงจาก 0° จนถึง 90° มุมสัมผัสด้านบนที่เป็นเนินลาดลงมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมุมสัมผัสที่เนินด้านบนลดลงมาตามลำดับ

2.5.8.2 การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Measurement)

การวัดมุมสัมผัสเป็นการวัดความสามารถของของเหลวที่แพร่กระจายไปบนพื้นผิว วิธีการนี้จะประกอบไปด้วยการวัดมุมระหว่างเส้นสัมผัสเคี้ยวของหยดน้ำที่ตำแหน่งจุดสัมผัสและพื้นผิวของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะเชื่อมโยงกันกับค่าพลังงานพื้นผิวทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิวได้ โดยที่จะแยกเป็นอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่เป็นขั้วและส่วนที่ไม่เป็นขั้ว



รูปที่ 2.52 มุมสัมผัสของหยดน้ำ

การวัดมุมสัมผัสให้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง : ของเหลวที่ใช้ในการวัดมุมสัมผัสสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติของพื้นผิว คือถ้าพื้นผิวเป็น hydrophobic แสดงถึงมุมสัมผัสที่มีขนาดใหญ่ และพื้นผิวเป็น hydrophilic แสดงถึงมุมสัมผัสที่มีขนาดเล็ก

2. การหาค่ามุมสัมผัสสามารถนำไปคำนวณตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงที่สุดสำหรับการทดลองในการวัดมุมสัมผัสโดยวิธีการ Taguchi methods

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ระบบปลูกฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยสำหรับการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมนั้นระบบจำเป็นต้องทำงานภายใต้ความเป็นสุญญากาศที่รักษาระดับความดันขณะทำการปลูกฟิล์ม และมีอุณหภูมิขณะทำการปลูกไม่สูงมาก ซึ่งระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงเป็นระบบที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับความต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีส่วนประกอบหลัก คือ ระบบสุญญากาศ ระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ระบบทำความเย็น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

3.1 ระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

3.1.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับความดันขณะทำการปลูกฟิล์มให้เหมาะสม เพื่อกำเนิดพลาสมาซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้ในการสปัตเตอริง นอกจากนี้การรักษาความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ยังช่วยลดการปนเปื้อนเนื่องจากการตกค้างของก๊าซที่ไม่ต้องการขณะทำการปลูกฟิล์มได้อีกด้วย โดยระบบสุญญากาศประกอบด้วย ระบบปั๊มสุญญากาศซึ่งทำหน้าที่ในการดูดอากาศออกจากระบบแชนเบอร์สุญญากาศซึ่งเป็นภาชนะปิดทำหน้าที่ป้องกันอากาศภายนอกรั่วไหลเข้าสู่ระบบ และอุปกรณ์วัดพร้อมชุดแสดงผลความดัน

1. ระบบปั๊มสุญญากาศ

การเลือกใช้งานระบบปั๊มสุญญากาศจะต้องมีความเหมาะสมกับขนาดของแชนเบอร์สุญญากาศ โดยต้องพิจารณาถึงอัตราการปั๊มของระบบว่าจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาระดับความดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการหรือเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป โดยในระบบสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศสองชนิด คือปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump) และปั๊มโรตารี (rotary pump)



รูปที่ 3.2 ระบบปั๊มสุญญากาศ ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (ซ้าย) และปั๊มโรตารี (ขวา)

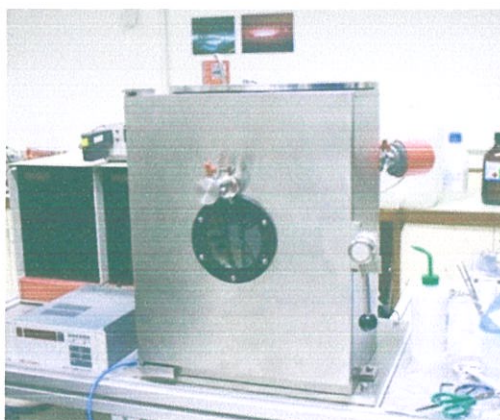
ปั๊มไอฟุ้งกระจายที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือรุ่นดิฟสแต็ก 160/700 (Diffstack 160/700) ของบริษัทเอดวาร์ด (Edwards) มีความเร็วในการปั๊มที่ปากของปั๊ม 700 ลิตรต่อวินาที โดยสามารถทำ ความดันสุญญากาศได้ต่ำกว่าระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ จนถึงระดับความดันขณะทำการปลูกฟิล์ม ซึ่ง

จำเป็นต้องอาศัยปั๊มโรตารีเป็นปั๊มสนับสนุนขณะทำการปั๊ม สำหรับปั๊มชนิดนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายก๊าซด้วยการฟุ้งของไอน้ำมันที่ถูกต้มจนเดือดกลายเป็นไอด้วยความร้อนสูงจากขดลวดความร้อนให้ฟุ้งออกจากช่องเจต ที่อยู่ภายในตัวปั๊มเข้าชนกับผนังภายในปั๊มที่มีระบบน้ำหล่อเย็นอยู่รอบนอกของตัวปั๊ม ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซภายในห้องสุญญากาศเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง และรวมกันอยู่บริเวณด้านล่างของปั๊มและถูกดูดออกไปด้วยปั๊มโรตารีในที่สุด

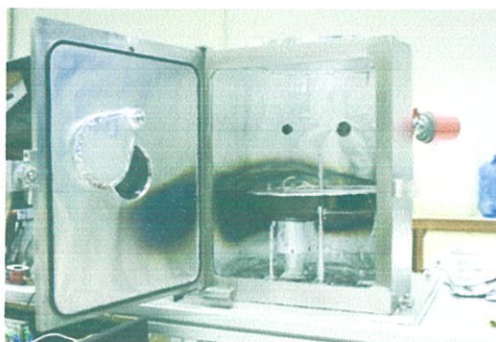
ปั๊มโรตารี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปั๊มโรตารีของเอดวาร์ดรุ่น อาร์วี 12 (Edward RV12) ทำหน้าที่สร้างสุญญากาศขั้นต้นให้กับแชมเบอร์สุญญากาศ โดยปั๊มชนิดนี้มีความสามารถในการสร้างสุญญากาศได้ตั้งแต่ระดับความดันบรรยากาศลงไปจนถึงความดันระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ และเป็นปั๊มซึ่งอาศัยหลักการอย่างง่ายโดยการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ซึ่งอยู่ภายในปั๊มเป็นกลไกหลักในการขับอากาศออกจากแชมเบอร์สุญญากาศ ซึ่งบางครั้งจะเรียกปั๊มชนิดนี้ตามลักษณะการทำงานว่า ปั๊มกล

2.แชมเบอร์สุญญากาศ

แชมเบอร์สุญญากาศเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับการติดตั้งหัวแมกนีตรอน อุปกรณ์จับยึดแผ่นฐานรอง ทำมาจากสแตนเลสมีพอร์ตเชื่อมต่อกับพอร์ตขยายขนาดเดียวกันและต่อเข้ากับปั๊มไอฟุ้งกระจาย มีพอร์ตสำหรับต่อเกจวัดความดันชนิดเพนนิ่งเกจและพิรานีเกจอยู่ด้านหลัง ด้านหน้ามีช่องหน้าต่างสำหรับสังเกตการณ์ภายในระบบ และมีพอร์ตใช้ต่อกับฟีดทรู (feed-through) แบบหมุนได้ของแผ่นกั้นหน้าต่าง (window shutter) เพื่อป้องกันการเคลื่อนของฟิล์มบนกระจกหน้าต่างขณะทำการปลูกฟิล์ม



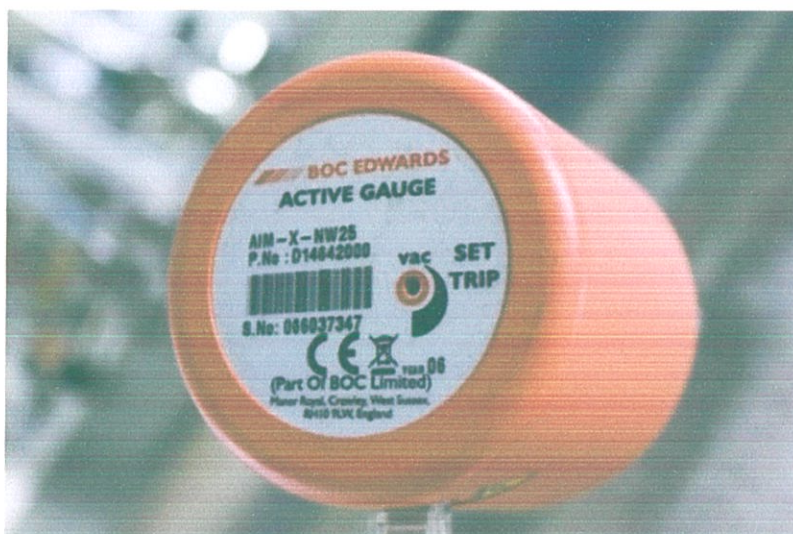
รูปที่ 3.3 แชมเบอร์สุญญากาศภายนอก



รูปที่ 3.4 แคมเบอร์สุญญากาศภายใน

3.1.2 อุปกรณ์วัดและแสดงผลความดัน

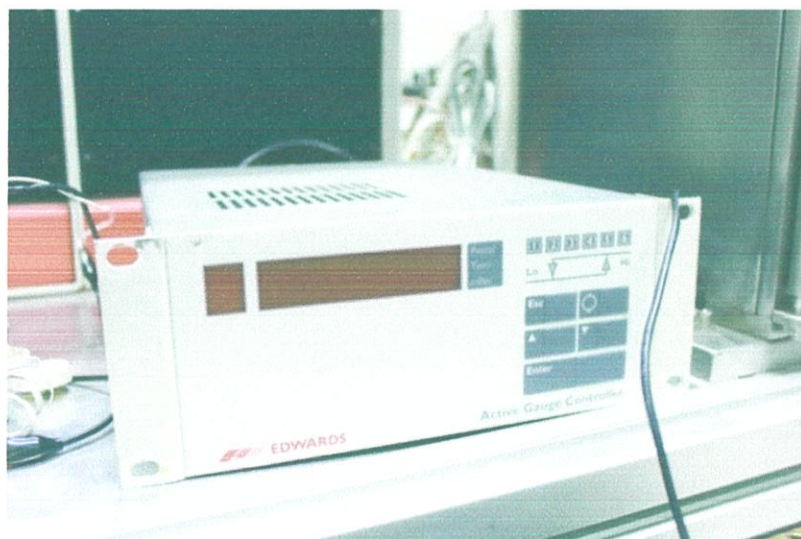
ในการแสดงความดันของระบบสุญญากาศ จะใช้หัววัดความดันของบริษัทเอดวาร์ด 2 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีย่านการวัดที่แตกต่างกัน คือ หัววัดพิรานี (Pirani gauge) สำหรับวัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศจนถึงไม่ต่ำกว่า 10^{-3} มิลลิบาร์ และหัววัดชนิดเพนนิ่ง (Penning gauge) สำหรับวัดความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-7} มิลลิบาร์ โดยในระบบสุญญากาศนี้ จะใช้หัววัดพิรานี 2 ตัว และหัววัดเพนนิ่ง 1 ตัว และต่อเข้ากับตัวแสดงผล Active gauge controller ของบริษัทเอดวาร์ด



รูปที่ 3.5 หัววัดพิรานี (Pirani gauge)



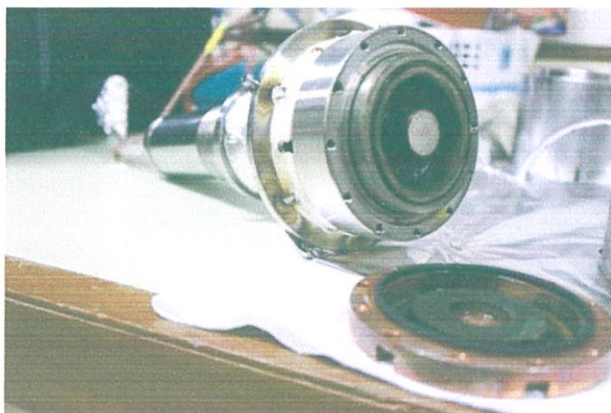
รูปที่ 3.6 หัววัดเพนนิ่ง (Penning gauge)



รูปที่ 3.7 ตัวแสดงผล Active gauge controller บริษัทเอดวาร์ด

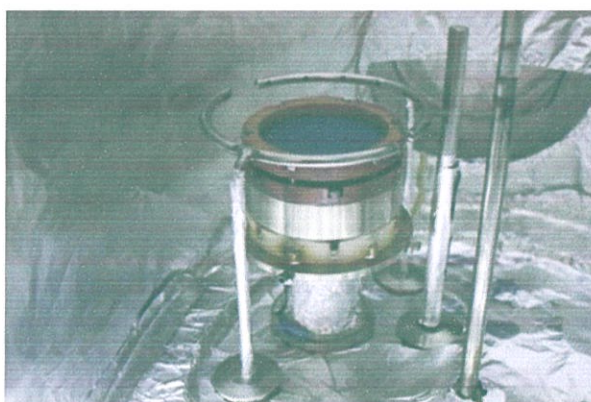
3.1.3 หัวแมกนีตรอน

หัวแมกนีตรอนเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา เพื่อสร้างไอออนให้วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 3.8 หัวแมกนีตรอน

สำหรับชุดแม่เหล็กและเหล็กฐานรองประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรรูปวงแหวน 1 ชั้น และแม่เหล็กทรงกระบอกอีก 1 ชั้น วางอยู่บนเหล็กฐานรองเคลือบสังกะสีโดยชั้นของแม่เหล็กทรงกระบอกจะวางอยู่ด้านในของแม่เหล็กรูปวงแหวน โดยการวางแม่เหล็กในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงลัพท์เนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่เป็นเกลียวอยู่บริเวณเหนือแผ่นเป้าสารเคลือบเป็นรูปวงแหวน ก่อให้เกิดพลาสมาซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออนขึ้นที่บริเวณดังกล่าว และไอออนบวกในพลาสมาวิ่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับบริเวณที่เกิดพลาสมา ส่งผลให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงขึ้นที่แผ่นเป้าสารเคลือบตามแนววงแหวน ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของเป้าสารเคลือบหลุดออกไปตกสะสมกลายเป็นฟิล์มบนแผ่นฐานรองต่อไป



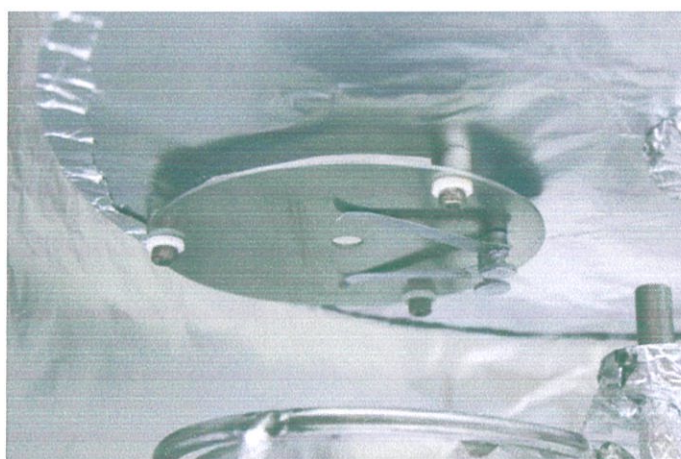
รูปที่ 3.9 หัวแมกนีตรอนที่ใส่เป้าสารเคลือบอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 3.10 ชุดแม่เหล็กถาวรและแผ่นเหล็กฐานรองภายในหัวแมกนีตรอน

3.1.4 ชุดแท่นยึดจับแผ่นฐานรอง

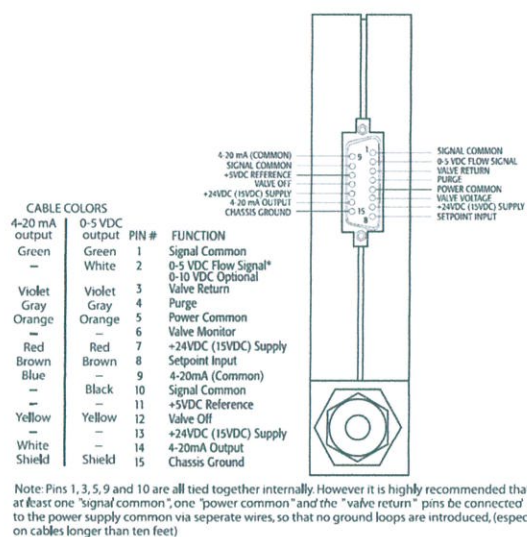
ชุดแท่นยึดจับแผ่นฐานรองประกอบด้วย แผ่นจานกลมขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่บนแกนหมุนผ่านพอร์ต ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแชมเบอร์สุญญากาศ ซึ่งสามารถปรับระดับความสูงได้และแผ่นจานกลมขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.3 เซนติเมตร สำหรับยึดจับแผ่นฐานรอง ติดตั้งอยู่ในแนวรัศมีห่างจากจุดศูนย์กลางของแชมเบอร์สุญญากาศ เท่ากับระยะห่างของหัวแมกนีตรอน โดยแผ่นดังกล่าวจะวางอยู่บนฉนวนเซรามิกซึ่งจะทำให้แผ่นจานกลมขนาดเล็กแยกออกจากแผ่นใหญ่ ทำให้สามารถเชื่อมต่อสัปดาห์ไฟฟ้าไบอัสเข้ากับแผ่นฐานรองเพื่อปรับเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มตามความต้องการได้



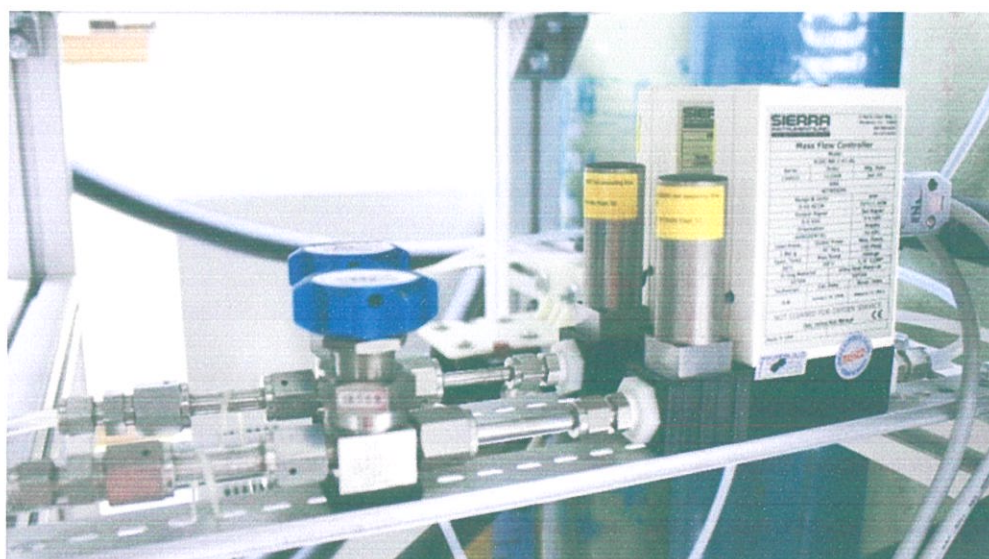
รูปที่ 3.11ชุดแท่นยึดจับแผ่นฐานรอง

3.1.5 ระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ

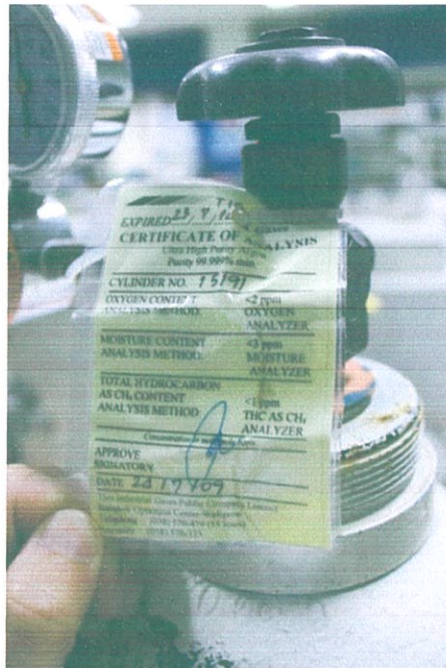
ในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรืง การควบคุมปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าสู่ระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมความดันภายในระบบ และกำหนดเงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางในแต่ละครั้ง โดยเลือกใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลของบริษัท Sierra instrument รุ่น Sierra 810 ขนาด 100 sccm สำหรับก๊าซอาร์กอน และขนาด 50 sccm สำหรับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเมื่อป้อนแรงดันไฟเลี้ยง 24 V โดยทำการปรับระดับแรงดันควบคุมและแสดงอัตราการไหลเป็นแรงดันไฟฟ้า ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อแบบดีบี 15



รูปที่ 3.12 รายละเอียดการเชื่อมต่อคอนเนกเตอร์แบบดีบี 15 หัวควบคุมอัตราการไหลรุ่น Sierra 810

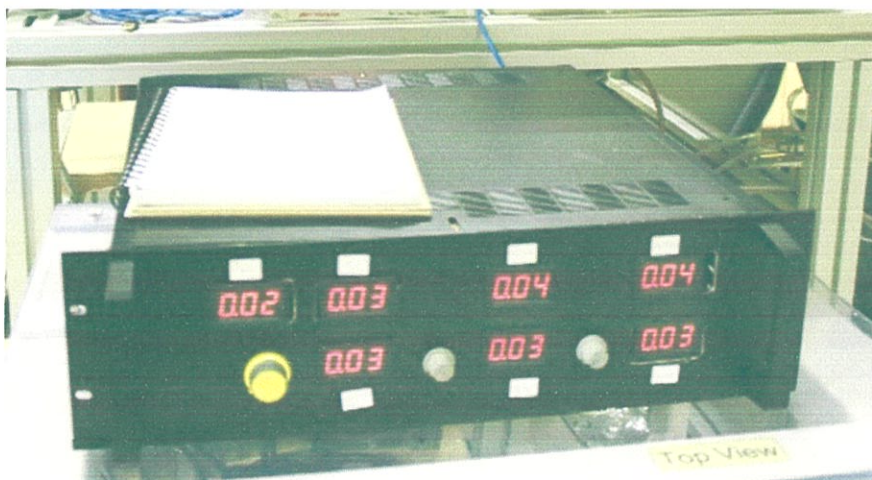


รูปที่ 3.13 เครื่องควบคุมอัตราการไหลก๊าซ



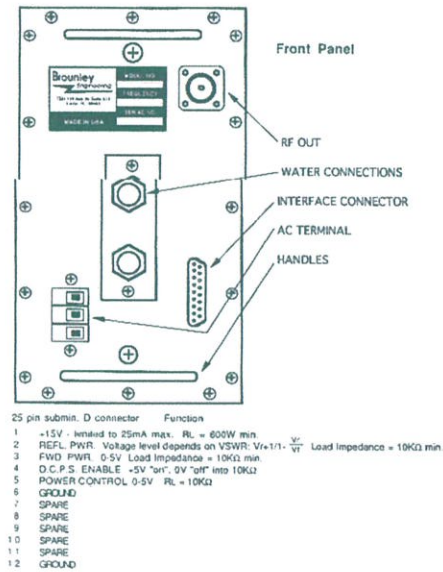
รูปที่ 3.14 ก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบการปลูกฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์
(Ultra High Purity Argon Purity 99.999% min)

ในโครงการพิเศษนี้ได้ออกแบบและทำการสร้างกล่องควบคุมการเปิดปิด การจ่ายก๊าซ และกำลังแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ซึ่งภายในกล่องประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ ส่วนควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ส่วนควบคุมกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ส่วนแสดงผลและส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.15 กล่องควบคุมการเปิดปิด การจ่ายก๊าซ และกำลังแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

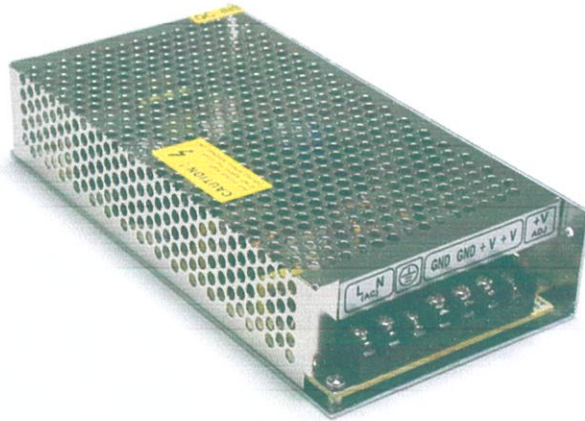
การควบคุมกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุสามารถและควบคุมอัตราการไหลของก๊าซทำได้โดยการป้อนแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ ผ่านพอร์ตแบบดีบี 15 อุปกรณ์ควบคุมสวิตช์ไฟฟ้าผ่านวงจรแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ สวิตช์เปิดปิดระบบและแสดงผลผ่าน V27D-T1 Digital LED Voltmeter



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

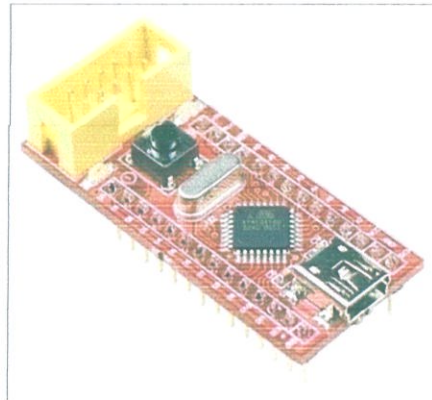


รูปที่ 3.17 V27D-T1 Digital LED Voltmeter



รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟ + 5 V และ $\pm 15V$

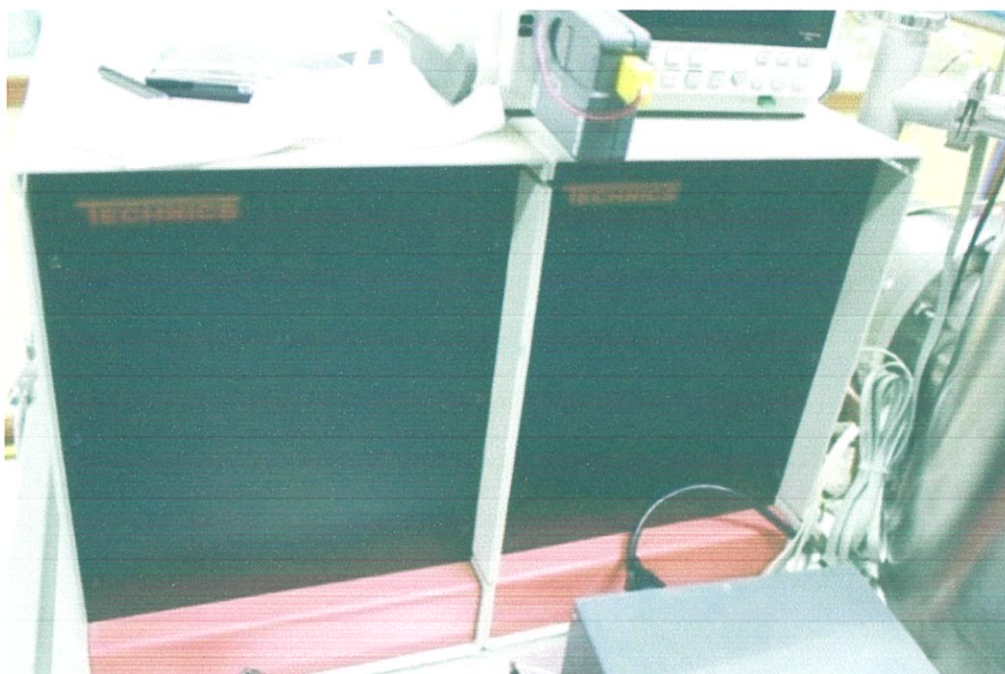
งานวิจัยนี้ได้จัดทำบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและจ่ายกำลังแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ เพื่อสามารถควบคุมผ่านทางหน้าจอระบบสัมผัสได้ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ET-EAZY168 STAMP



รูปที่ 3.19 ET-EAZY168 STAMP CONTROLLER

3.1.6 แหล่งกำเนิดวิทยุ

แหล่งจ่ายกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับระบบปลุกฟิล์มในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ BROULEY: รุ่น BE-1113 ซึ่งกำเนิดคลื่นความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ต กำลังสูงสุด 650 วัตต์ และอุปกรณ์ปรับจูนอิมพีแดนซ์อัตโนมัติของ TRAZAR: รุ่น AMUSC-1 ทำหน้าที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ของเอาต์พุตให้เหมาะสมกับโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการเกิดพลาสมา



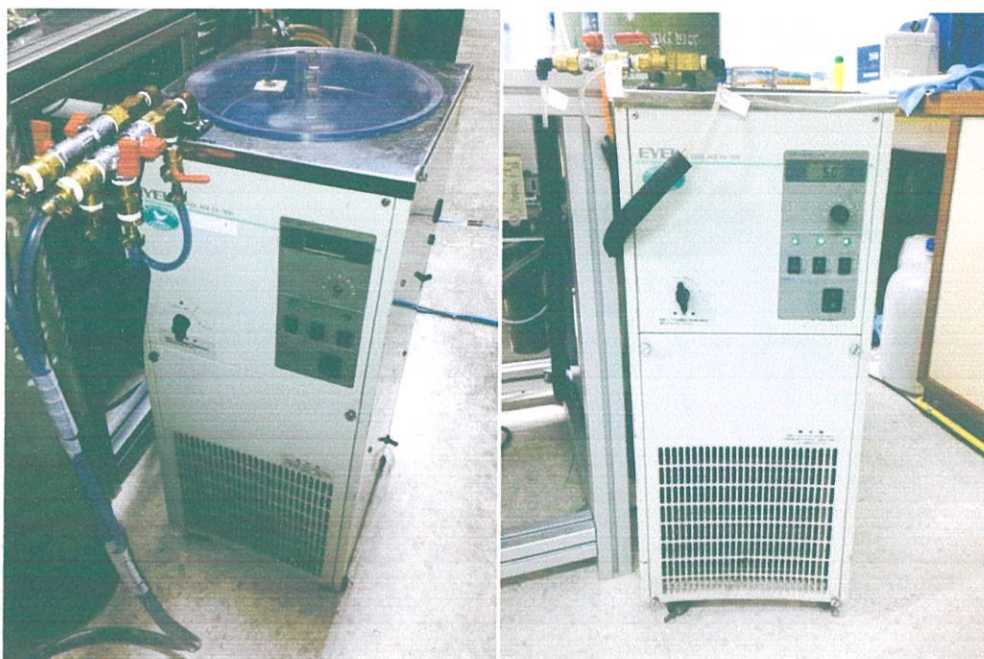
รูปที่ 3.20 เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุขนาดกำลังสูงสุด 650 วัตต์

แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุความถี่ 13.56 เมกกะเฮิร์ตซ์ของ Technics inc. Model 220 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลัก คือ แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุของบริษัท Brounley และตัวปรับจูนอิมพีแดนซ์อัตโนมัติของบริษัท TRAZAR

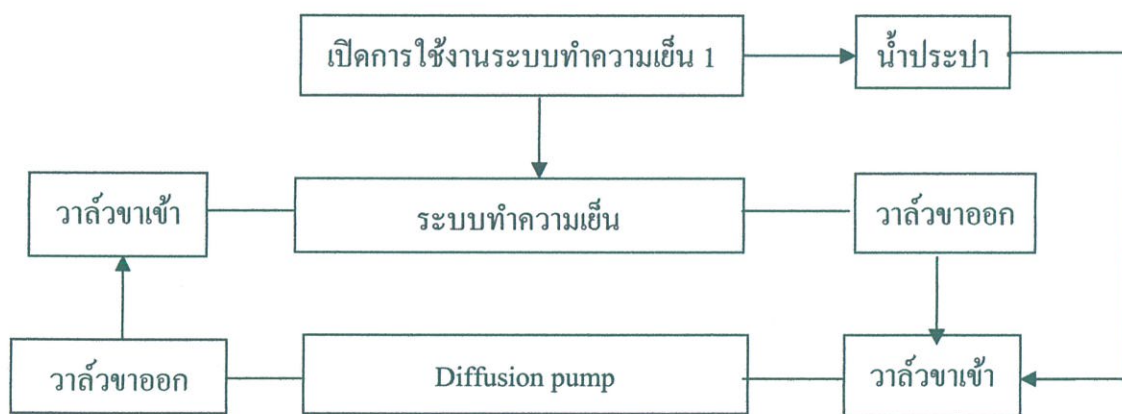
3.1.7 ระบบทำความเย็น

ระบบทำความเย็นที่ใช้ในระบบการปลูกฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยเครื่องทำความเย็น 2 เครื่อง

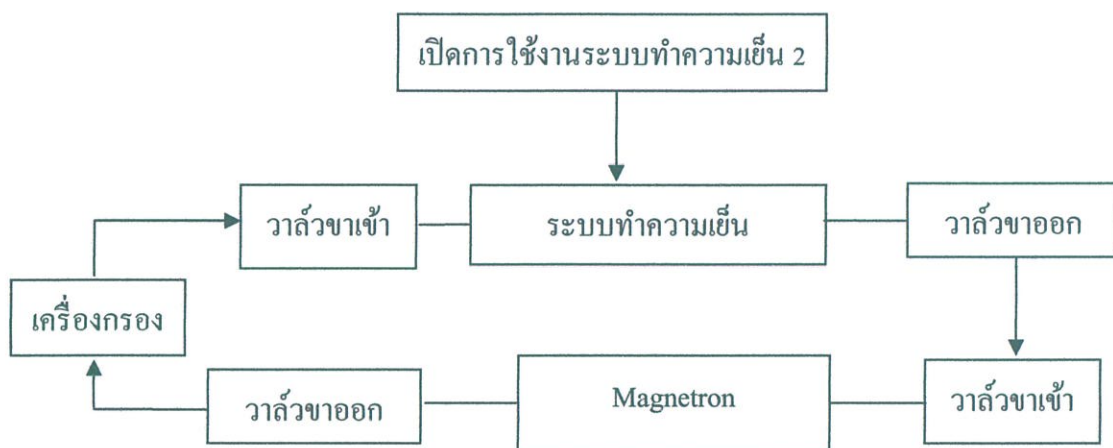
- (1.) เครื่องทำความเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump) ของ EYELA COOL AEE CA – 1100
- (2.) เครื่องทำความเย็นของ เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ , หัวแมกนีตรอนของ EYELA COOL AEE CA – 1100



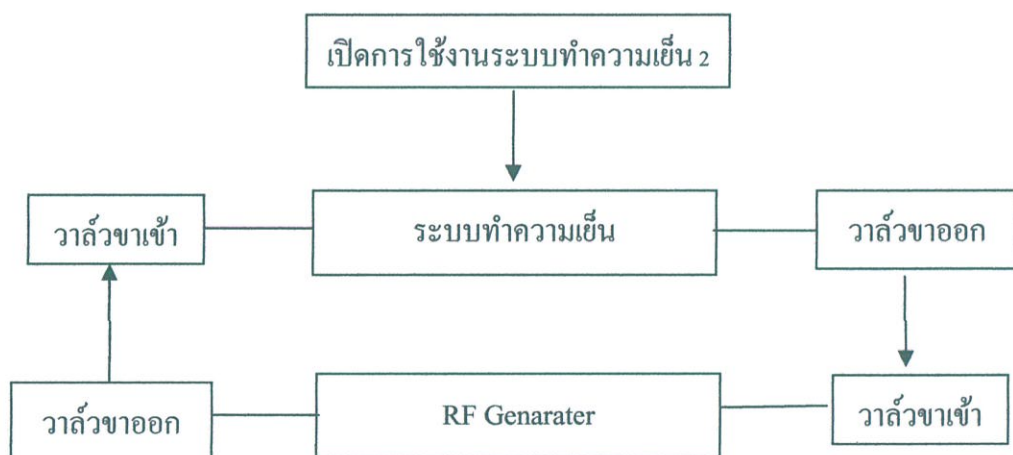
รูปที่ 3.21 เครื่องทำความเย็นปั๊มไอฟุ้งกระจาย (ซ้าย)
เครื่องทำความเย็นเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุและหัวแมกนีตรอน(ขวา)



รูปที่ 3.22 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย



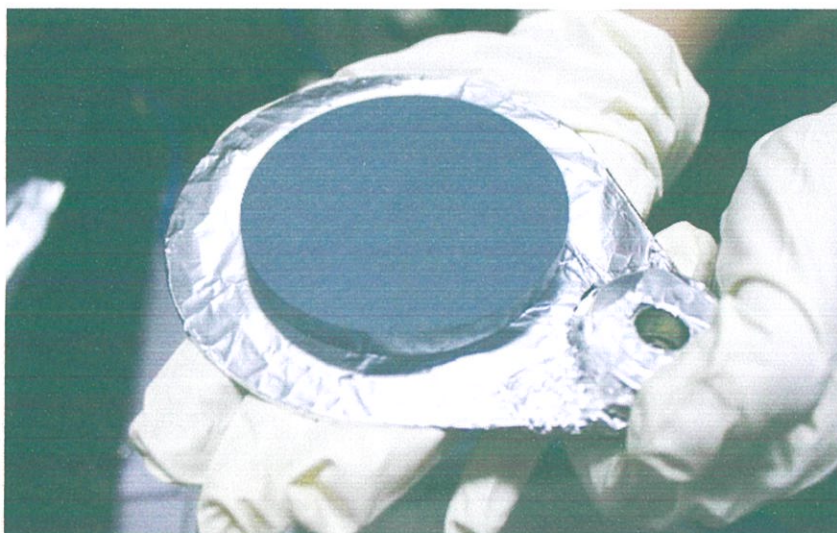
รูปที่ 3.23 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของหัวแมกนีตรอน



รูปที่ 3.24 แผนภาพการทำงานระบบทำความเย็นของเครื่องแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

3.1.8 แผ่นเป้าสารเคลือบ

ในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น หัวแมกนีตรอนสามารถติดตั้งแผ่นเป้าสารเคลือบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร (3 นิ้ว) ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่มีการใช้สำหรับหัวแมกนีตรอนโดยทั่วไปในปัจจุบัน สำหรับในงานวิจัยนี้ ใช้แผ่นเป้าสารเคลือบที่เป็นอินเดียมออกไซด์-ทินออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.9% โดยในรูปที่ 3.25 แสดงการแผ่นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 3.25 เป้าสารเคลือบอินเดียมออกไซด์-ทินออกไซด์ (Indium Oxide-Tin Oxide Target, 90/10 wt% 3.00" Diameter x 0.25" Thick, 99.99% Pure ของ Kurt J. Lesker company)

3.1.9 เตาเผา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ และนำไปอบที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง โดยเตาอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เตาเผา ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น NAB-1 L15/11/B 170 ดังรูป



รูปที่ 3.26 เตาเผา ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น NAB-1 L15/11/B 170

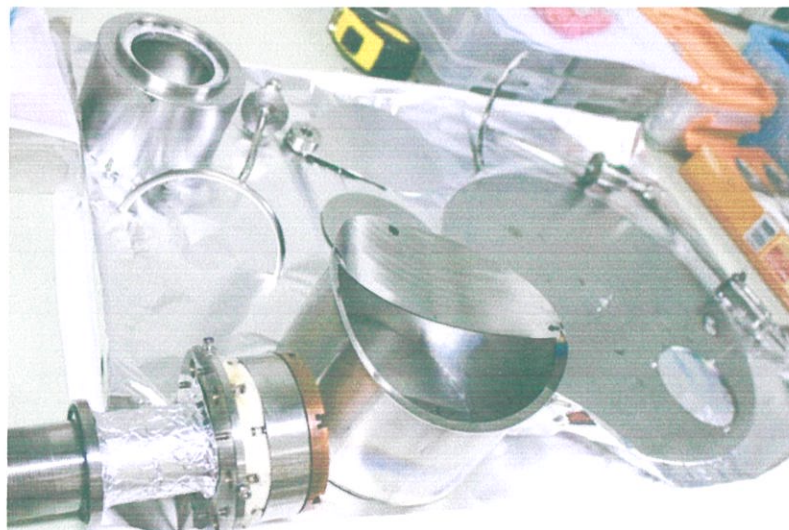
3.2 การเตรียมระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง

ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบางและนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ โดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนนั้น จะต้องทำการตรวจเช็คเพื่อให้ระบบพร้อมใช้งาน โดยเริ่มจากการทำความสะอาดอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ติดตั้งภายในแชมเบอร์สุญญากาศเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มบาง

1. การเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ
2. นำอุปกรณ์ต่างๆ ภายในแชมเบอร์สุญญากาศออกมาเตรียมทำความสะอาด
3. ทำความสะอาด โดยการขัดคราบสกปรกและความปนเปื้อนต่างๆ



รูปที่ 3.27 อุปกรณ์สำหรับตรวจเช็คระบบปลูกฟิล์มบาง

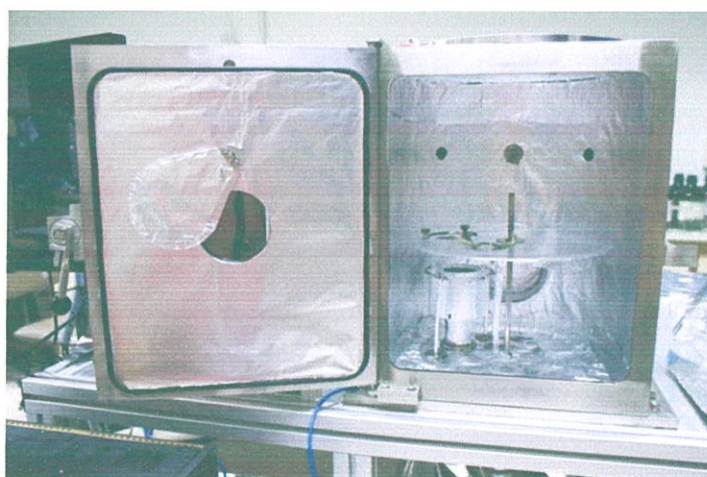


รูปที่ 3.28 อุปกรณ์ต่างๆ ภายในแชมเบอร์สุญญากาศ



รูปที่ 3.29 การทำความสะอาดโดยการขัดคราบสกปรกและความปนเปื้อน

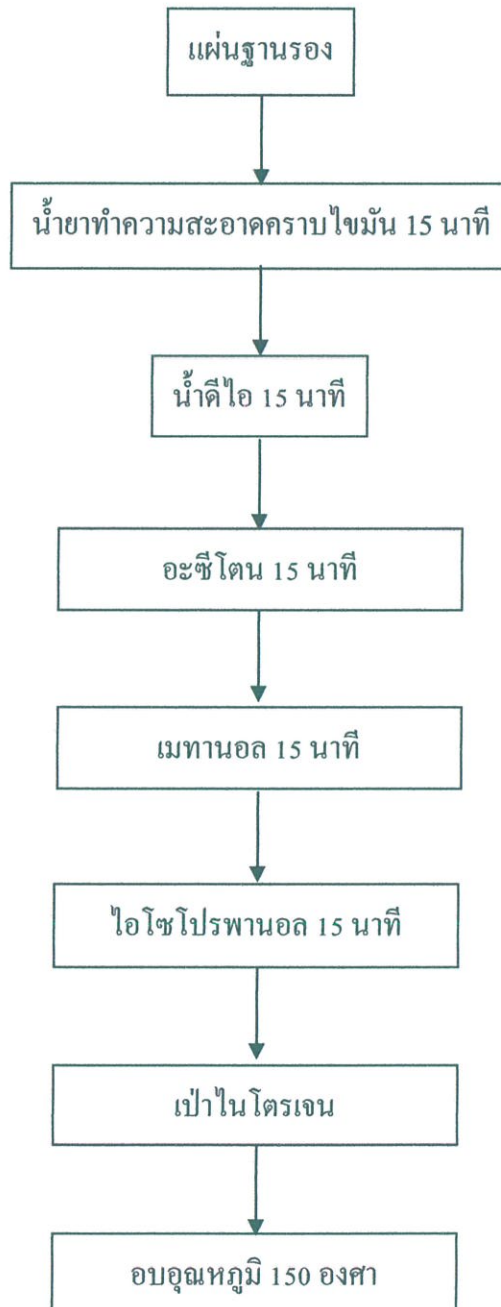
4. ล้างเนื้อและสกรูด้วยอะซิโตนในอ่างอันตรายไซคลิก 30 นาที แล้วล้างด้วยเมทานอลในอ่างอันตรายไซคลิก 30 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
5. เช็ดทำความสะอาดแชมเบอร์สุญญากาศด้วยผ้าไร้ฝุ่นชุบอะซิโตนและเช็ดซ้ำด้วยเมทานอลเพื่อขจัดคราบไขมันที่อาจติดอยู่ตามผนังแชมเบอร์สุญญากาศ
6. ติดและห่ออลูมิเนียมฟอยในแชมเบอร์สุญญากาศและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มไปติดโดยตรงจากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดภายในแชมเบอร์สุญญากาศให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.30 ระบบสุญญากาศที่มีการห่ออลูมิเนียมฟอย

3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

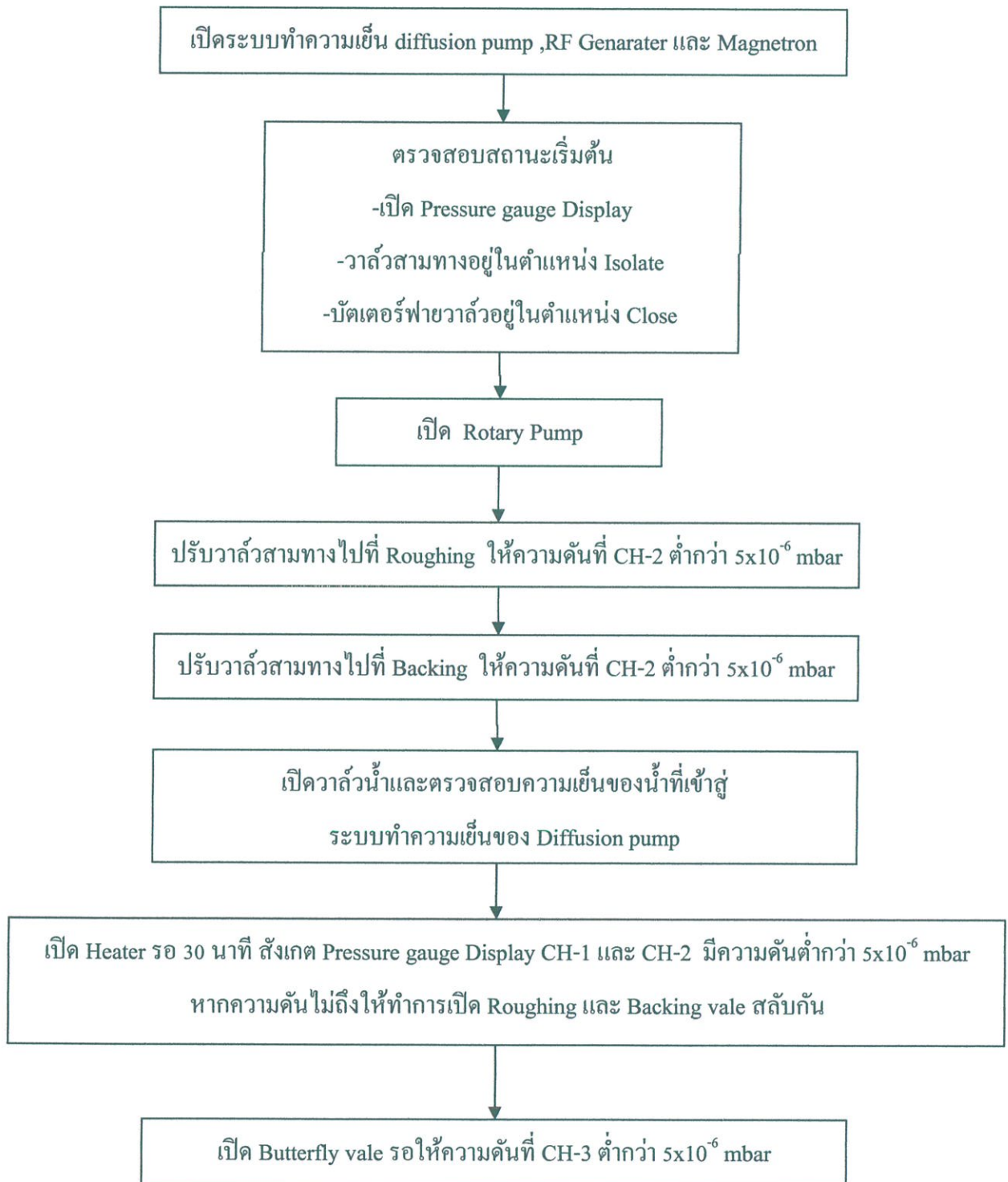
เนื่องจากการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในงานวิจัยนี้ทำการปลูกฟิล์มบนแผ่นฐานรองแก้วสไลด์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองก่อนนำไปทำการปลูกฟิล์มบาง โดยแผ่นฐานรองจะมีกระบวนการทำความสะอาดในอ่างอัลตราโซนิก ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.31 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรอง

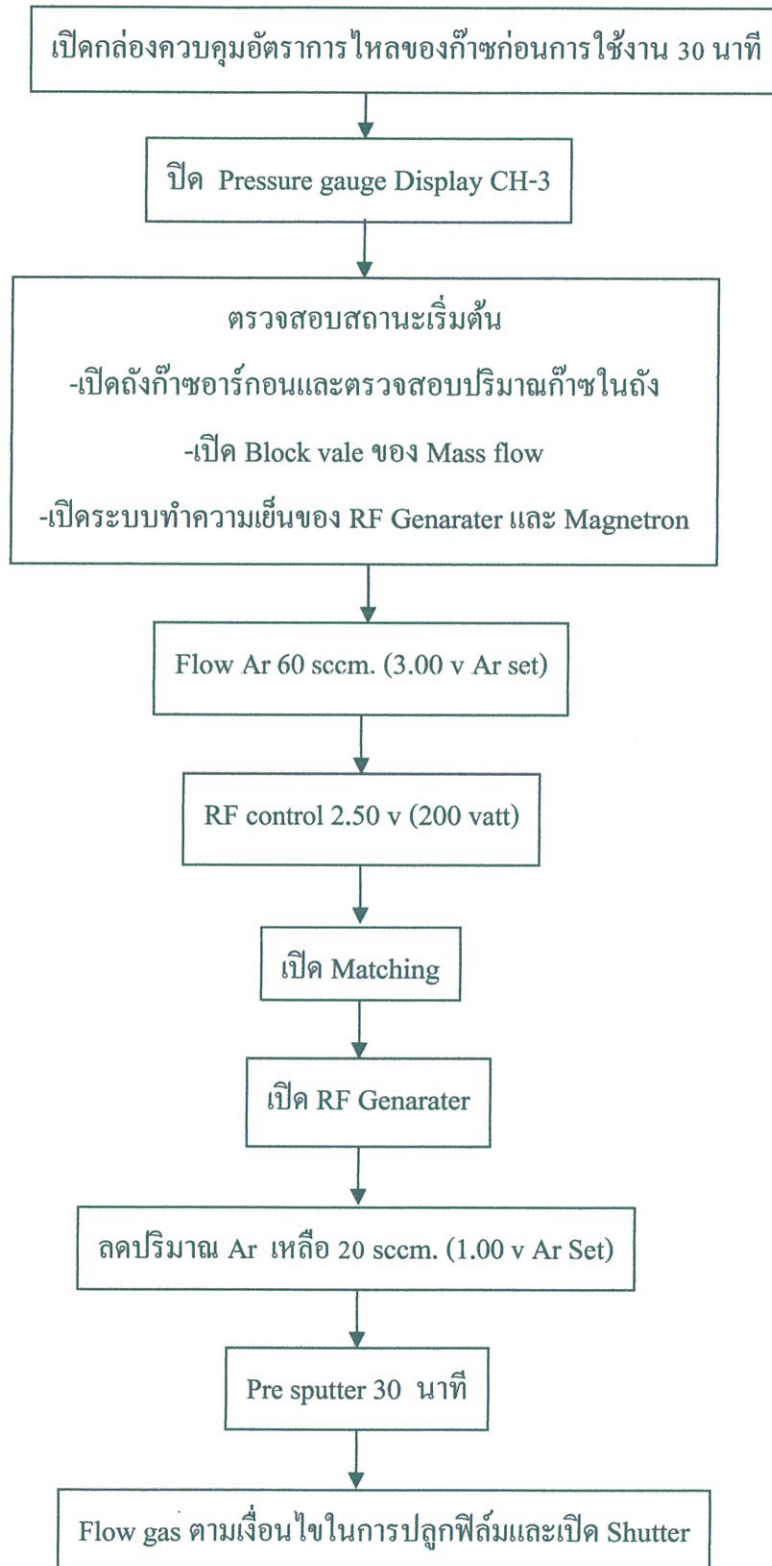
3.3 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

3.3.1 ขั้นตอนการเปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



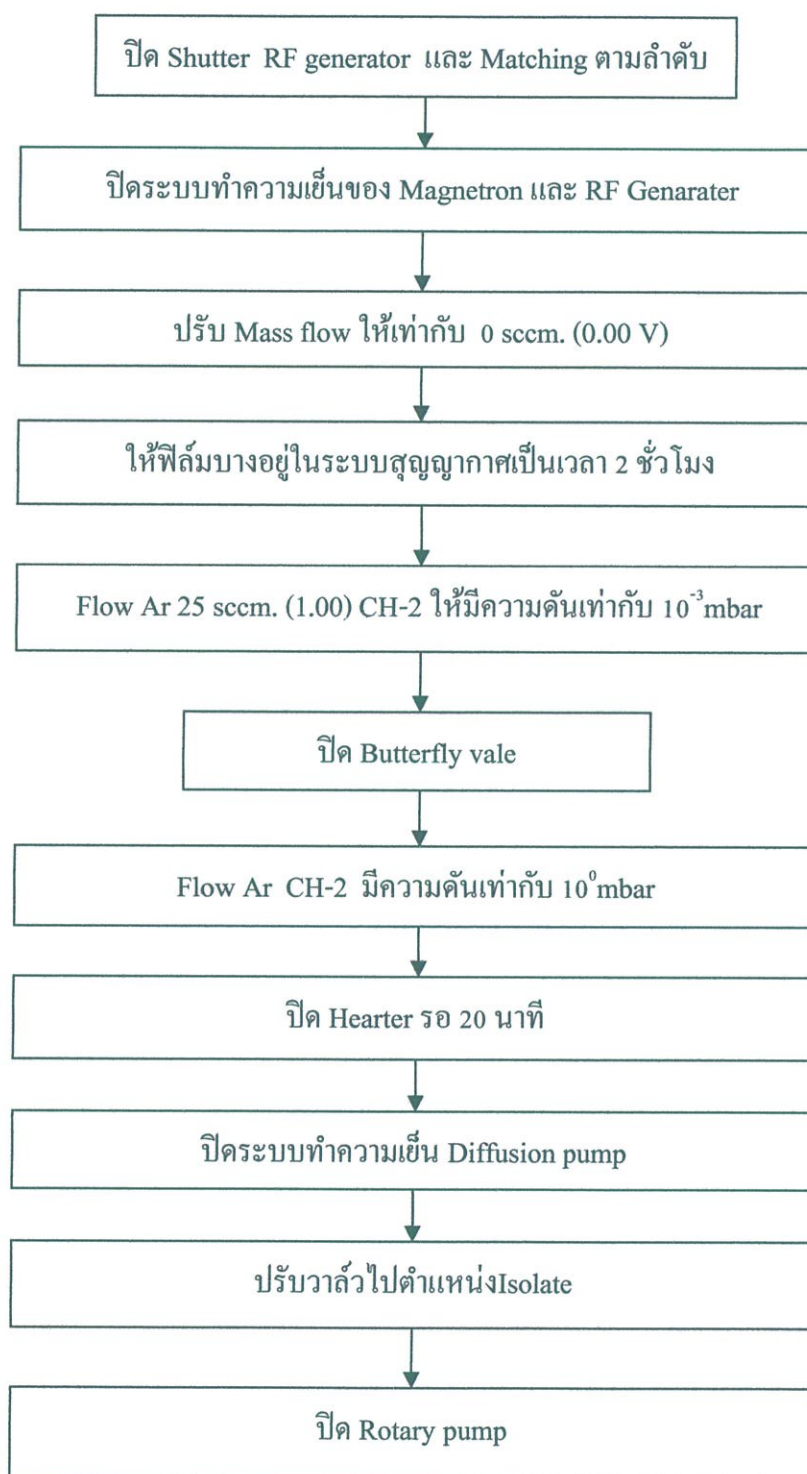
รูปที่ 3.32 ขั้นตอนการเปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

3.3.2 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 3.33 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

3.3.3. ขั้นตอนการปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 3.34 ขั้นตอนการปิดระบบการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ในการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง จำเป็นต้องใช้ในเทคนิคในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของฟิล์มบาง ดังนี้

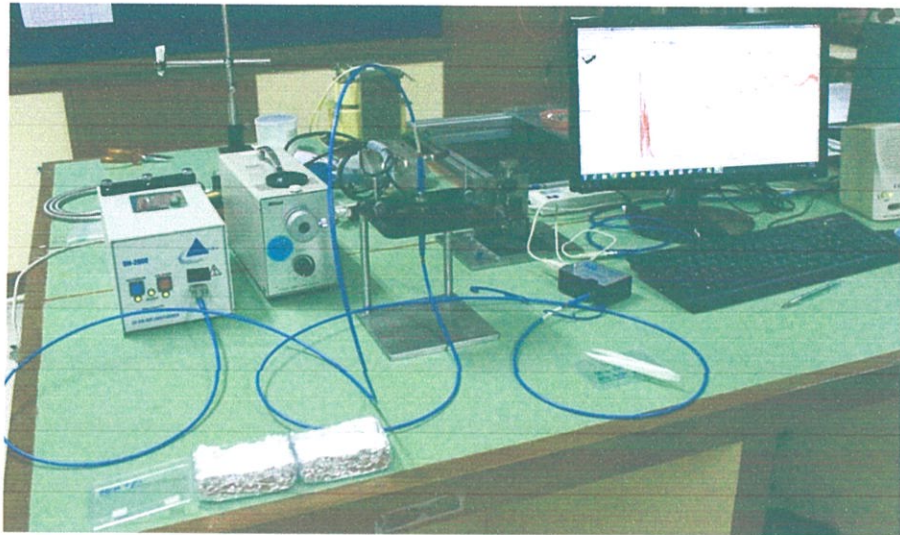
1. การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectrometer : XRD)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope :SEM)
3. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectroscopy :UV-vis)
4. ฮอลล์ เอฟเฟกต์ (Hall effect)
5. การวัดแบบ 4 จุด (4-point probe)
6. อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีระบบฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectroscopy :FTIR)
7. รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)
8. การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

ซึ่งแต่ละเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

1. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดแบบ 4 จุด (4 Point Probe)
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคUV-Vis Spectroscopy

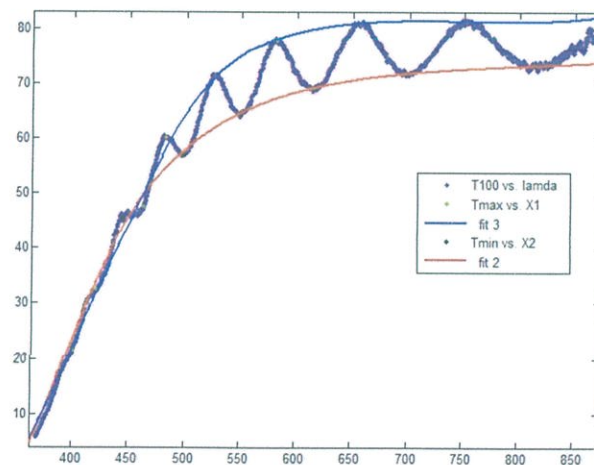
ตรวจสอบการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ซึ่งทำการตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น 200 - 900 นาโนเมตร จากข้อมูลการส่องผ่านของแสง นำไปวิเคราะห์หาค่าความหนาชั้นหักเหของแสงสำหรับฟิล์มบางได้ด้วยวิธี Swanepol นอกจากนี้ยังสามารถนำไปหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางได้อีกด้วย



รูปที่ 3.35 สเปกโตรสโกปีของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000

วิธีการวัดสเปกตรัมการส่งผ่าน

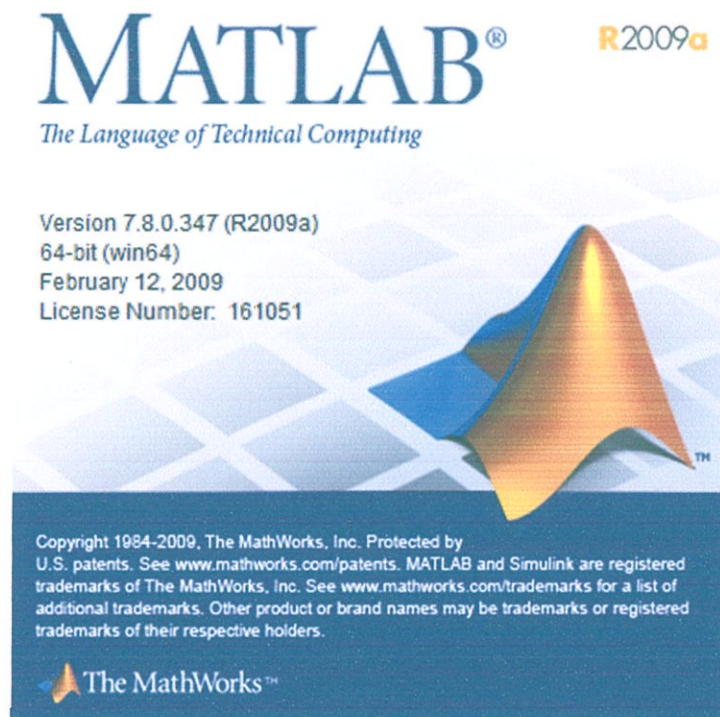
1. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.35
2. เปิดโปรแกรม Ocean Optics
3. เลือกโหมดการวัดแบบส่องผ่าน
4. บันทึกค่า Dark spectrum ขณะนำแผ่นโลหะมาบังลำแสง
5. ทำการวัดฟิล์มบางตัวอย่าง
6. บันทึกค่าที่สเปกตรัมการส่งผ่านที่ได้



รูปที่ 3.36 สเปกตรัมการส่งผ่านของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศา (c°) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

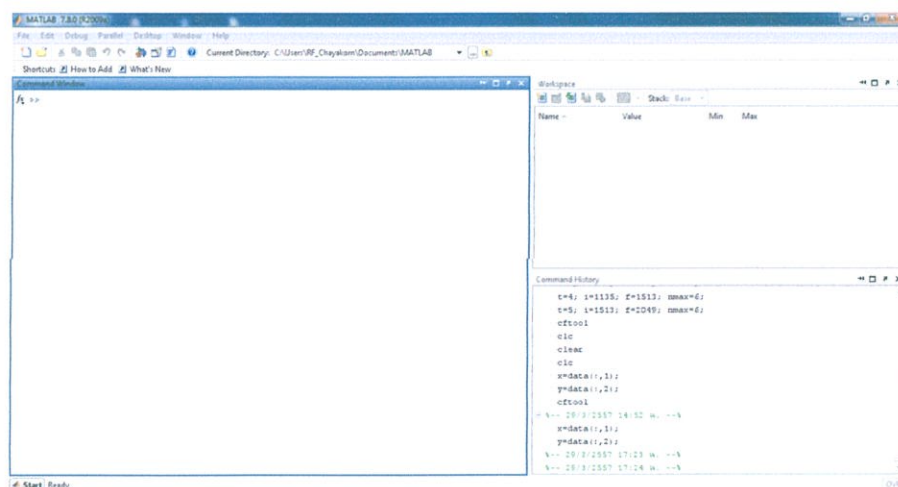
3.4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีสแวนนีโพล

- 1.เตรียมข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางบันทึกข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel
- 2.เรียกใช้โปรแกรม MATLAB (เวอร์ชัน R2009)



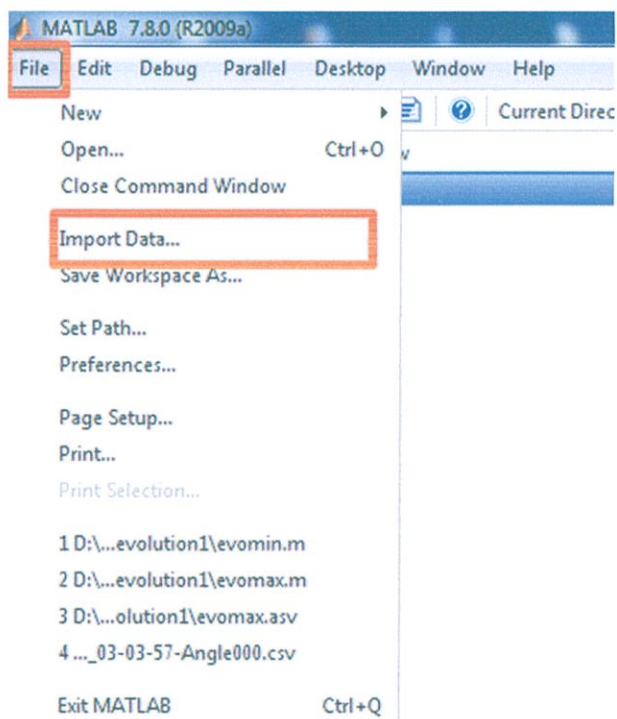
รูปที่ 3.37 โปรแกรม MATLAB

3.เมื่อเปิดใช้งาน โปรแกรม MATLAB จะพบหน้าจอ ดังรูป 3.38



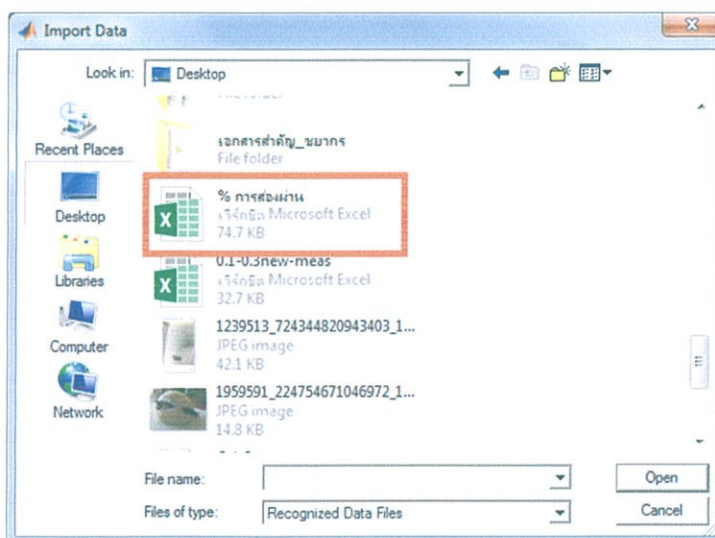
รูปที่ 3.38 หน้าต่าง โปรแกรม MATLAB 2009a

4. ทำการจัดเก็บข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางเก็บไว้ใน Workspace โดยคลิก File > Import Data ดังรูป 3.39



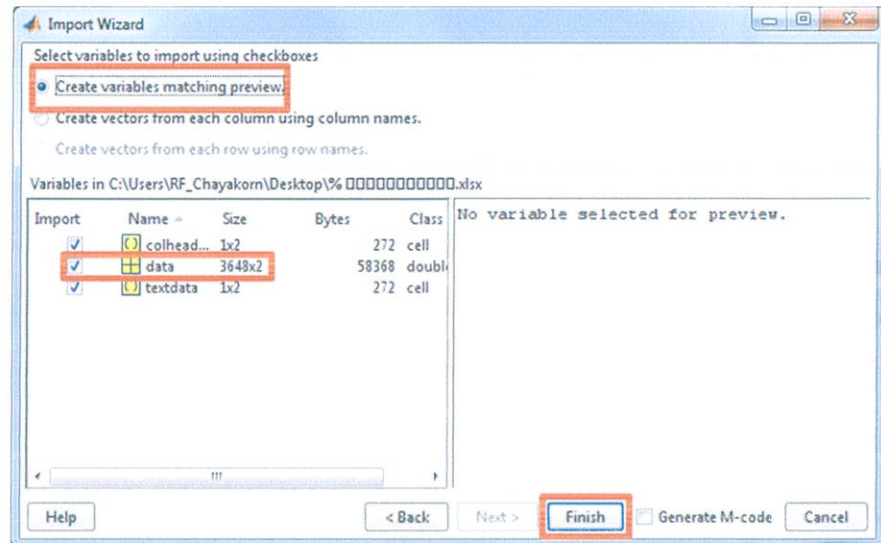
รูปที่ 3.39 ขั้นตอนการ Import Data

5. เมื่อคลิก Import Data โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาดังรูป ให้ทำการเลือกไฟล์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านที่ได้ทำการเก็บข้อมูลและบันทึกในไฟล์ Excel



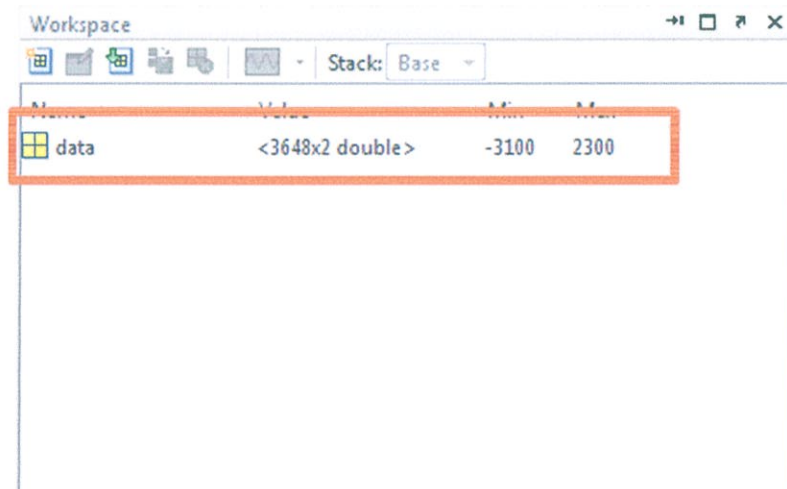
รูปที่ 3.40 หน้าต่างโปรแกรม Import Data

6. เมื่อทำการคลิกไฟล์เปอร์เซ็นต์การส่งออกที่จะนำมาวิเคราะห์ โปรแกรม MATLAB จะปรากฏหน้าต่าง Import Wizard ให้คลิกเลือก Create variable matching preview และให้เลือก Data เพียงอย่างเดียวเท่านั้น กด Finish



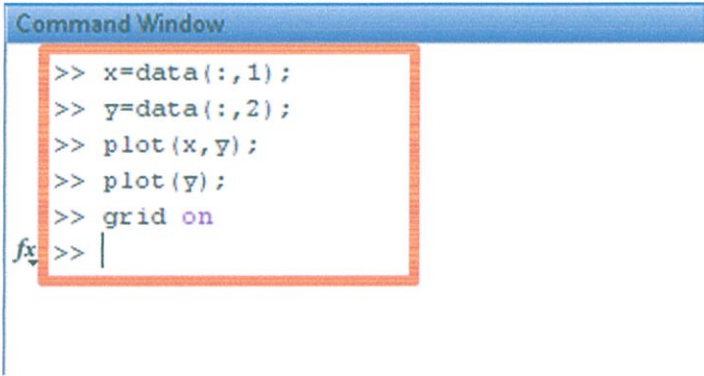
รูปที่ 3.41 หน้าต่าง โปรแกรม Import Wizard

7. ที่ Workspace จะมี Data หรือเปอร์เซ็นต์การส่งออกปรากฏอยู่ ดังรูป



รูปที่ 3.42 หน้าต่าง Workspace โปรแกรม MATLAB

8. กำหนดตัวแปร x และ y โดยที่ x คือค่าความยาวคลื่นแสง ค่า y คือเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านและค่าความยาวคลื่นแสง โดยพิมพ์คำสั่งที่หน้าต่าง Command window ดังรูป 3.43



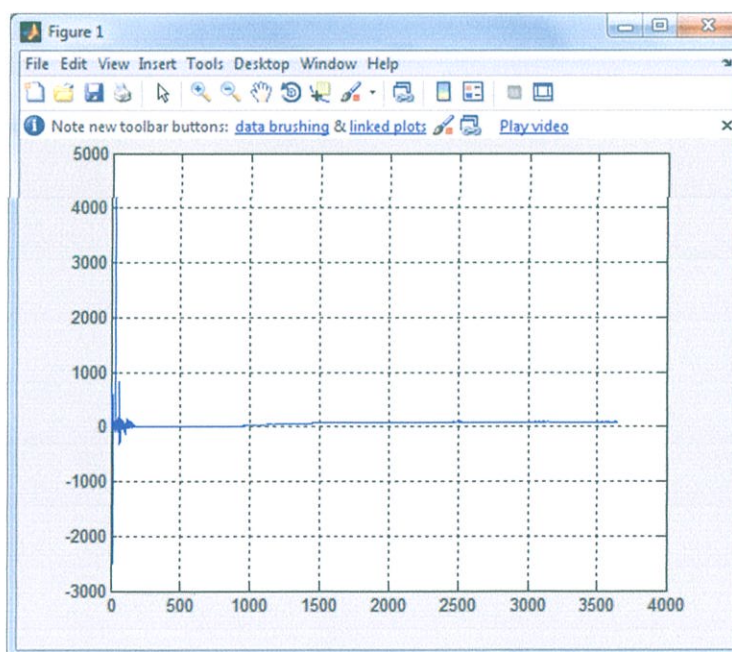
```

Command Window
>> x=data(:,1);
>> y=data(:,2);
>> plot(x,y);
>> plot(y);
>> grid on
fx >> |

```

รูปที่ 3.43 คำสั่งที่หน้าต่าง Command window

9. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Figure 1 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและค่าความยาวคลื่น



รูปที่ 3.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางและค่าความยาวคลื่น

10. จากกราฟทำการหาช่วงของการดูคลื่นให้ทำการเลือกช่วงของกราฟ ในการเลือกช่วงกราฟนั้น เราจะเลือกช่วงที่สเปกตรัมการส่องผ่านมีรีวิการแทรกสอดโดยเขียนคำสั่งที่หน้าต่าง Command Window ดังนี้

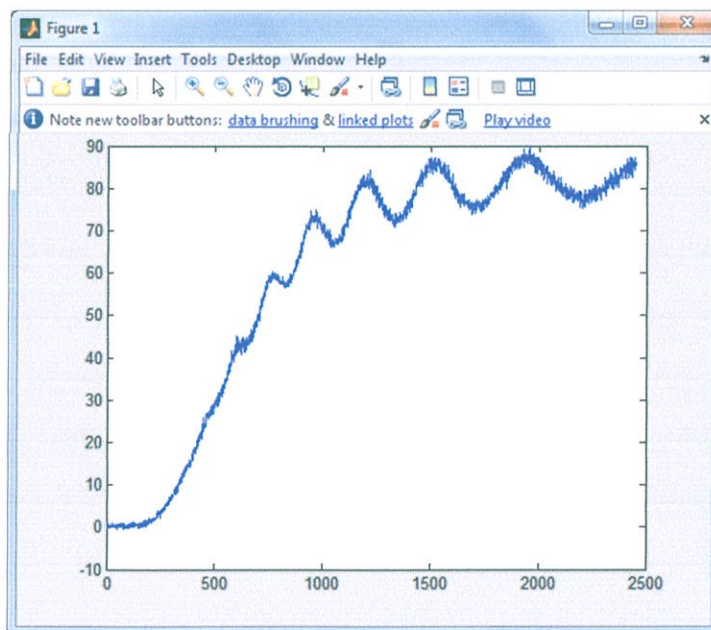
```

Command Window
>> x=data(:,1);
>> y=data(:,2);
>> plot(x,y);
>> plot(y);
>> grid on
>> A=x(550:3000);
>> B=y(550:3000);
>> plot(B)
fx >> |

```

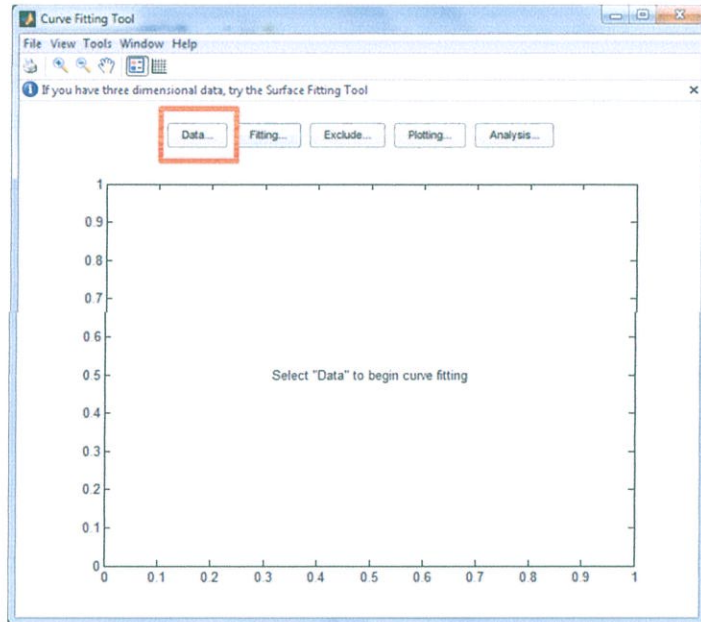
รูปที่ 3.45 คำสั่งที่หน้าต่าง Command window

11. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Figure 1 คือสเปกตรัมการส่องผ่านในช่วงที่มีรีวิการแทรกสอดเกิดขึ้น



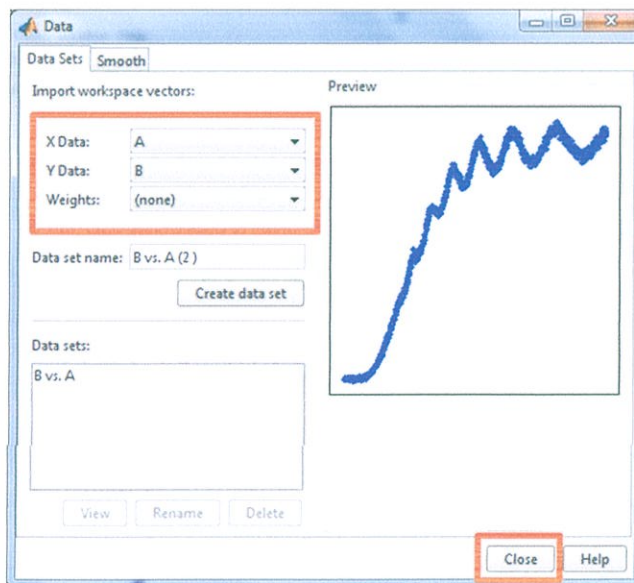
รูปที่ 3.46 สเปกตรัมการส่องผ่านในช่วงที่มีรีวิการแทรกสอด

12. พิมพ์ cftool ที่หน้าต่าง command window จะปรากฏหน้าต่าง Curve Fitting Tool ดังรูป คลิก Data เพื่อเลือกข้อมูลในการ Smooth graph



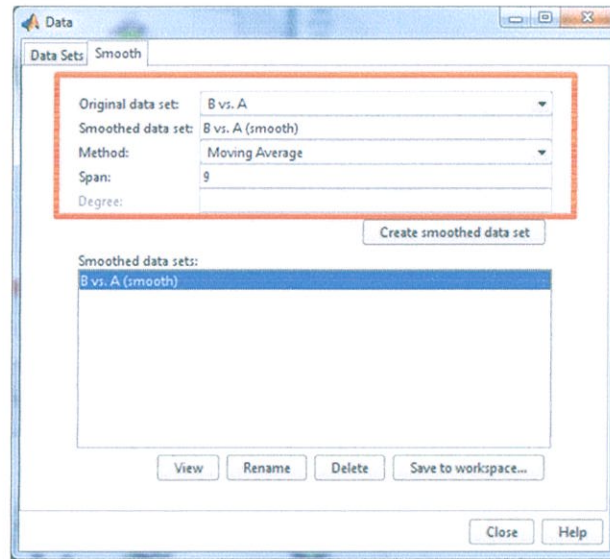
รูปที่ 3.47 หน้าต่าง Curve Fitting Tool ของโปรแกรม MATLAB

13. เมื่อคลิก Data จะมีหน้าต่าง Data ให้ทำการเลือกข้อมูลโดย X Data คือ A และ Y Data คือ B ดังรูป 3.48 คลิก Create data set



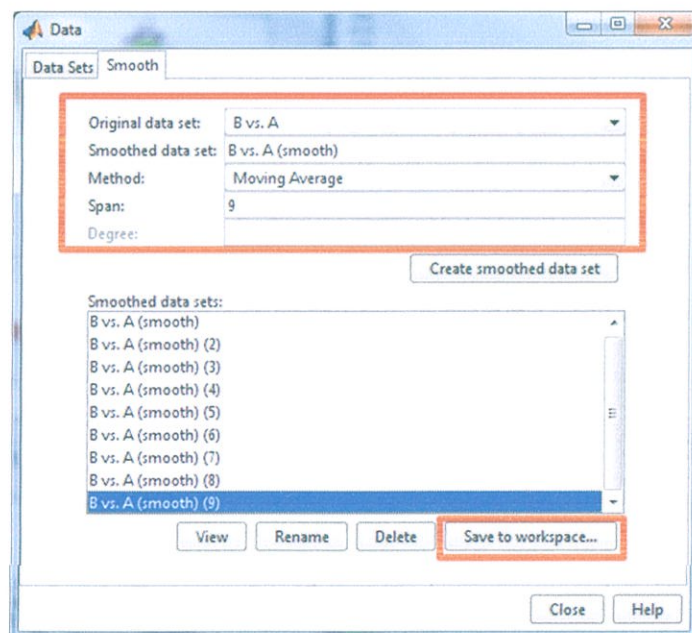
รูปที่ 3.48 หน้าต่าง DATA ของโปรแกรม MATLAB

14. กดเลือก Smooth บริเวณแถบด้านบน จะปรากฏหน้าต่างและให้ทำการตั้งค่าดังรูป

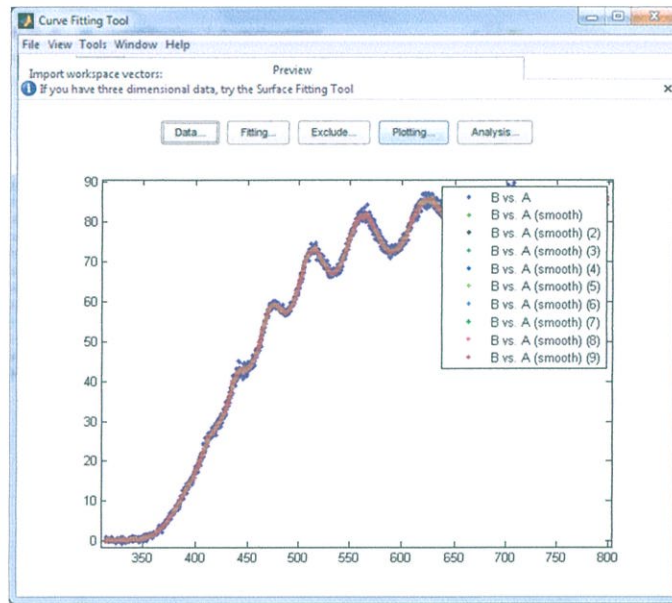


รูปที่ 3.49 หน้าต่างการ Smooth Graph

15. กด Create smoothed data set จำนวน 9 ครั้ง สังเกตที่บริเวณ Smoothed data set ที่ท้ายข้อมูลจะมีเลขวงเล็บอยู่ คลิก save to workspace ดังรูป และโปรแกรมจะแสดงกราฟที่ Smoothed ดังรูป 3.51

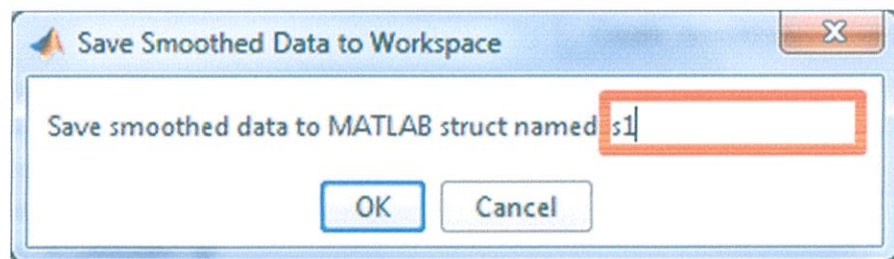


รูปที่ 3.50 หน้าต่างการ Smooth Graph



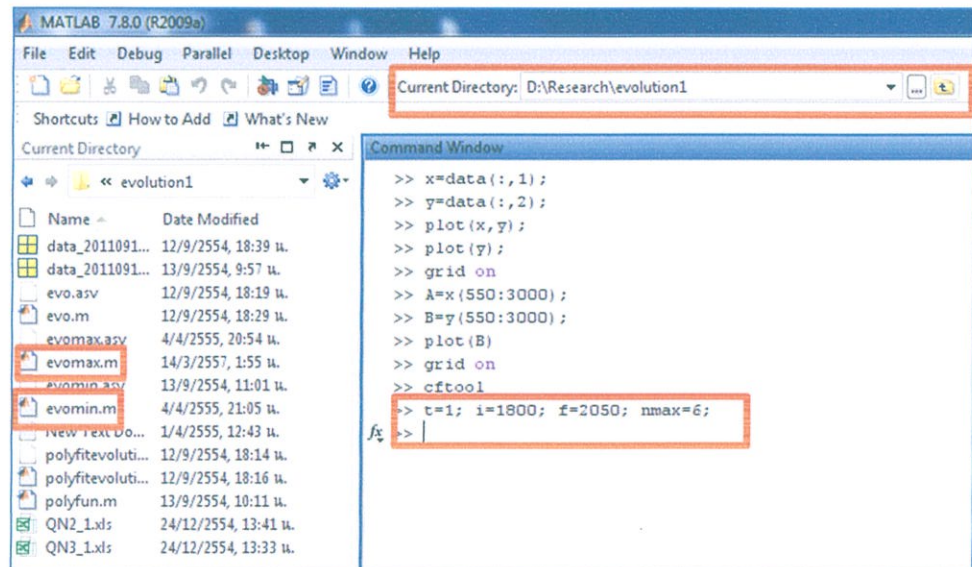
รูปที่ 3.51สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่นำมา Smooth Graph

16. เมื่อทำคลิกที่ `save to workspace` จะปรากฏหน้าต่าง `Save Smoothed Data to workspace s1` คลิก `OK` และให้ทำการบันทึกค่าใน `s1` โดยกำหนดให้ค่า `x` คือ `lamda` และ `y` คือ `T100`



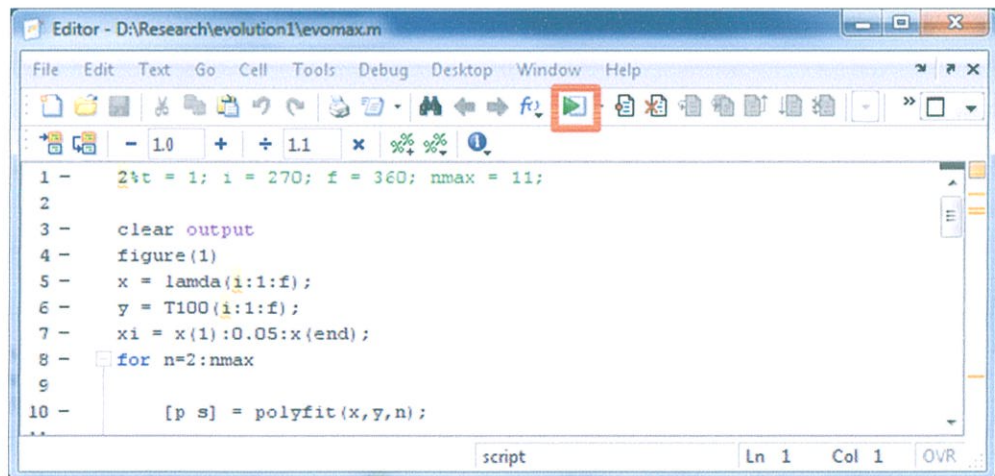
รูปที่ 3.52หน้าต่าง `Save Smoothed Data to workspace` ของโปรแกรม MATLAB

17. หาจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอด โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เขียนคำสั่งที่บริเวณ `Command window` ดังรูป โดยที่ `t` คือ ลำดับรีวการแทรกสอดคือ ตำแหน่งเริ่มต้นของจุดสูงสุดรีวการแทรกสอด `f` คือตำแหน่งสุดท้ายของจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอด `nmax` คือ `degree of polynomial` และเลือก `Current Directory` เปิดไฟล์ `evomax.m`

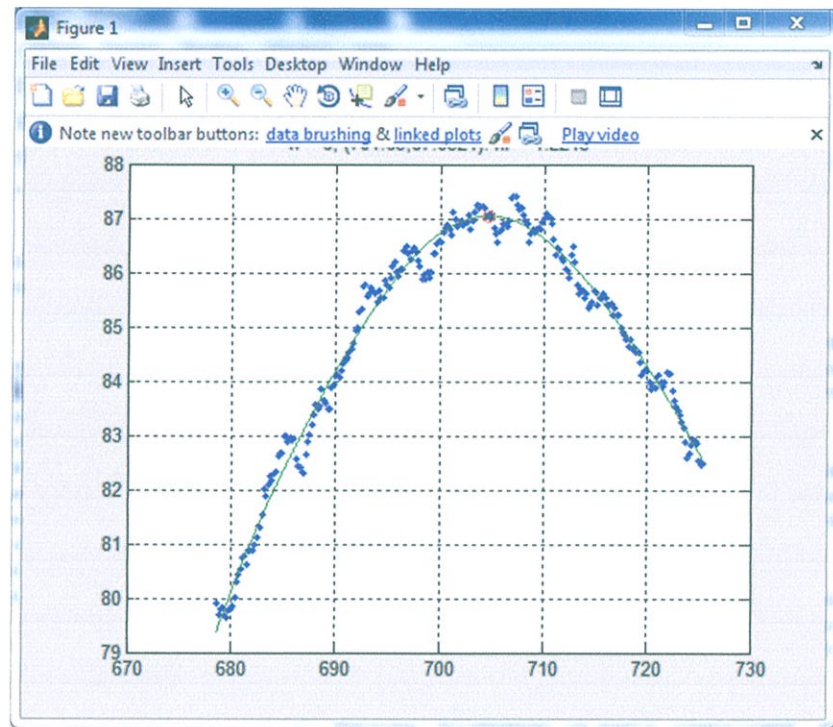


รูปที่ 3.53 การกำหนดค่าตัวแปร และการเปิดไฟล์ evomax.m

18. เมื่อเปิดไฟล์ evomax.m โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Editor ดังรูป คลิก play โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง ดังรูป 3.54



รูปที่ 3.54 หน้าต่าง Editor ไฟล์ evomax.m



รูปที่ 3.55 การหาจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอด

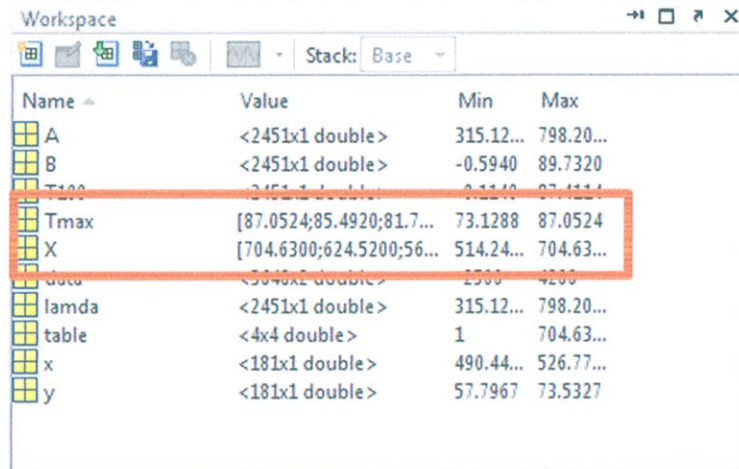
หมายเหตุทำตามขั้นตอนนี้ โดยเปลี่ยน t , i , และ f ไปจนครบจำนวนที่มีจุดสูงของรีวการแทรกสอด ซึ่งในกรณีของการหาจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอดก็ทำเช่นเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนจากการเปิดไฟล์ `evomax.m` เป็น `evomin.m`

19. เมื่อทำการรัน โปรแกรมจนครบรีวการแทรกสอดสูงสุดแล้ว ได้สังเกตว่ามีค่าตัวแปร `table` เกิดขึ้นที่ workspace

Name	Value	Min	Max
n	6	6	6
nmax	6	6	6
output	<1x1 struct>		
p	[-5.0019e-08, 1.5462e-...	-9.271...	1.0829...
s	<1x1 struct>		
s1	<1x1 struct>		
table	<4x4 double>	1	704.63...
xi	<1x727 double>	490.44...	526.74...
y	<181x1 double>	57.7967	73.5327
yi	<1x727 double>	58.0747	73.1288

รูปที่ 3.56 ตัวแปร `table` ที่หน้าต่าง Workspace

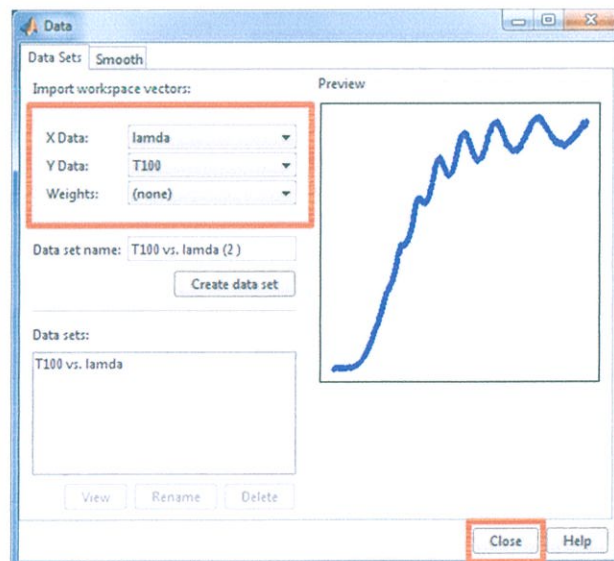
20. บันทึกค่า wavelength และ T_{\max} โดยที่ wavelength คือค่าคอลัมน์ที่ 3 และ T_{\max} คือค่าคอลัมน์ที่ 4 ของตัวแปร table จะสังเกตได้ว่าบริเวณ workspace จะมีตัวแปรเพิ่มขึ้น นั่นคือ wavelength ที่บันทึกชื่อเป็น X และ T_{\max}



Name	Value	Min	Max
A	<2451x1 double>	315.12...	798.20...
B	<2451x1 double>	-0.5940	89.7320
T100	<2451x1 double>	0.1510	0.1151
Tmax	[87.0524;85.4920;81.7...	73.1288	87.0524
X	[704.6300;624.5200;56...	514.24...	704.63...
lamda	<2451x1 double>	315.12...	798.20...
table	<4x4 double>	1	704.63...
x	<181x1 double>	490.44...	526.77...
y	<181x1 double>	57.7967	73.5327

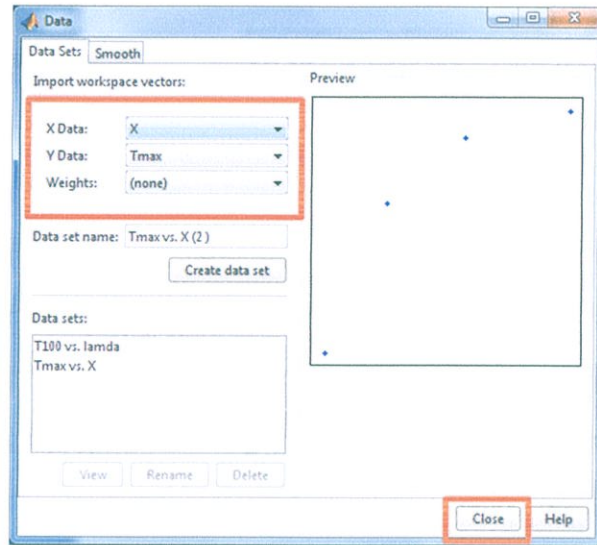
รูปที่ 3.57 ตัวแปรที่แสดงบนหน้าต่าง Workspace

21. พิมพ์ cftool ที่หน้าต่าง command window เพื่อทำการ Curve fitting graph เพื่อหาค่า T_{\max} ที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยกำหนดข้อมูล X Data คือ lamda และ Y Data คือ T100 กด Create data set



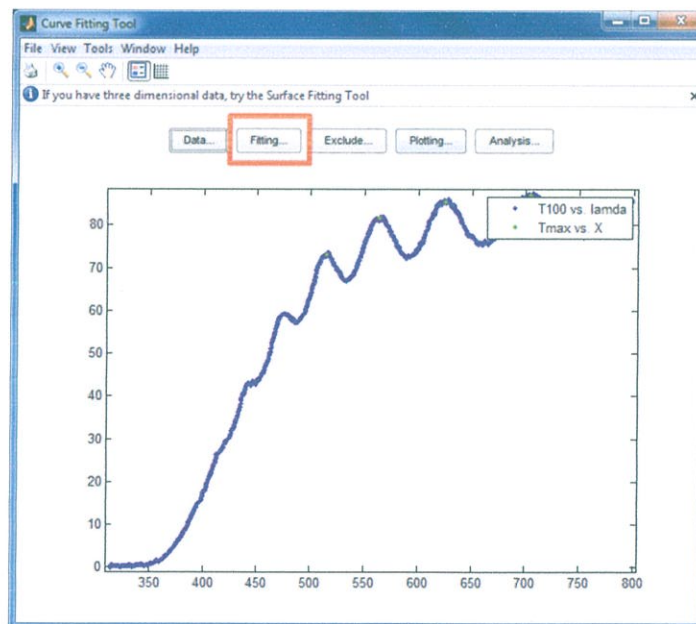
รูปที่ 3.58 การกำหนดค่า DATA เพื่อทำการ Fitting Graph

22. ทำการเลือกข้อมูล โดยที่ X Data คือ X และ Y data คือ T_{max} ดังรูป 3.59



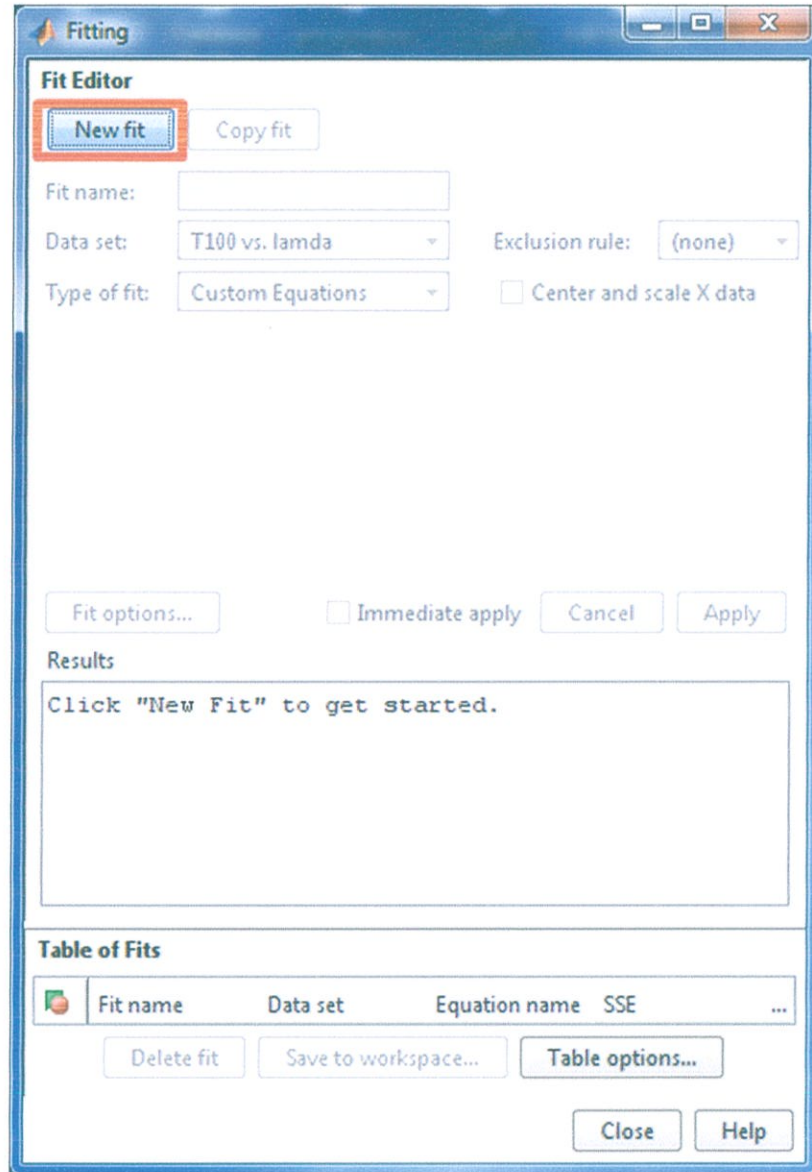
รูปที่ 3.59 การเลือกข้อมูลในหน้าต่าง DATA

23. จะปรากฏกราฟดังรูป 3.60 กค Fitting



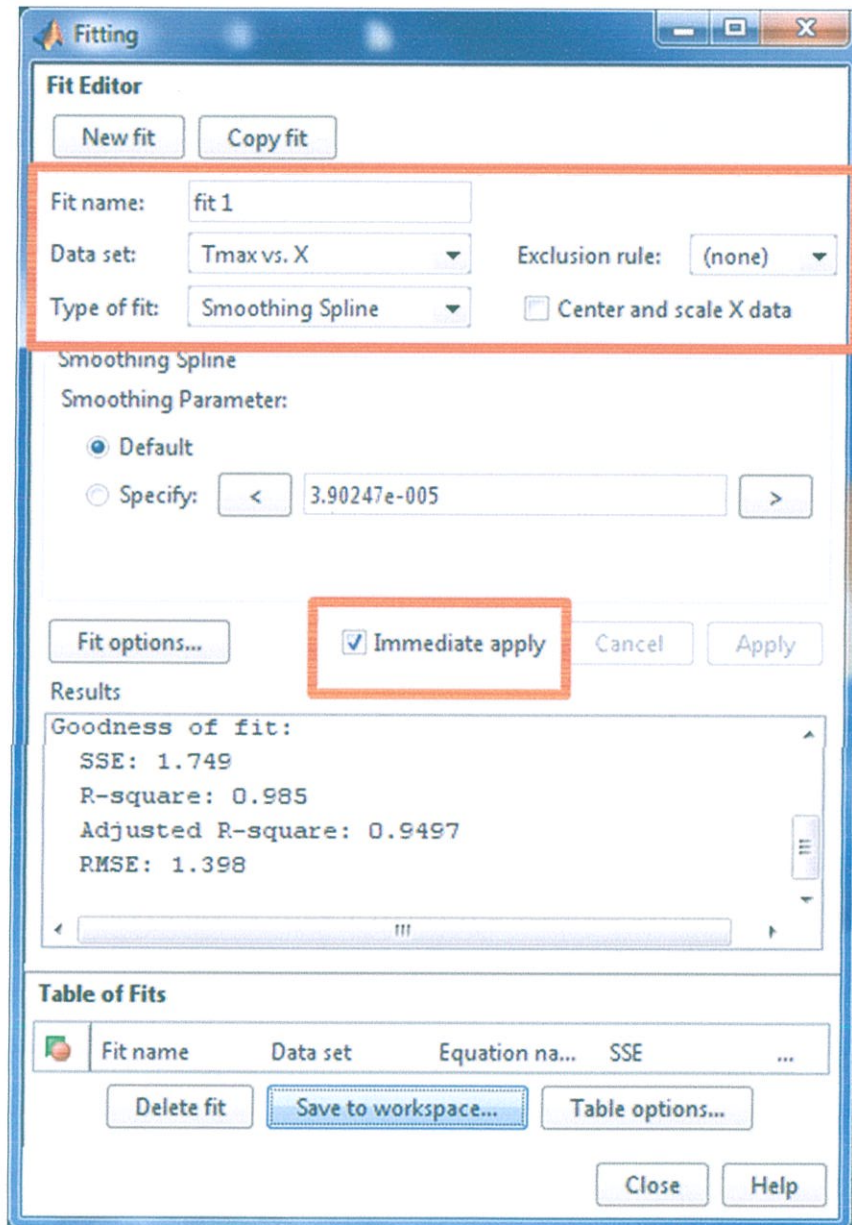
รูปที่ 3.60 กราฟ T_{max} และ T100 เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ

24. เมื่อกด Fitting โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Fitting ดังรูป 3.61



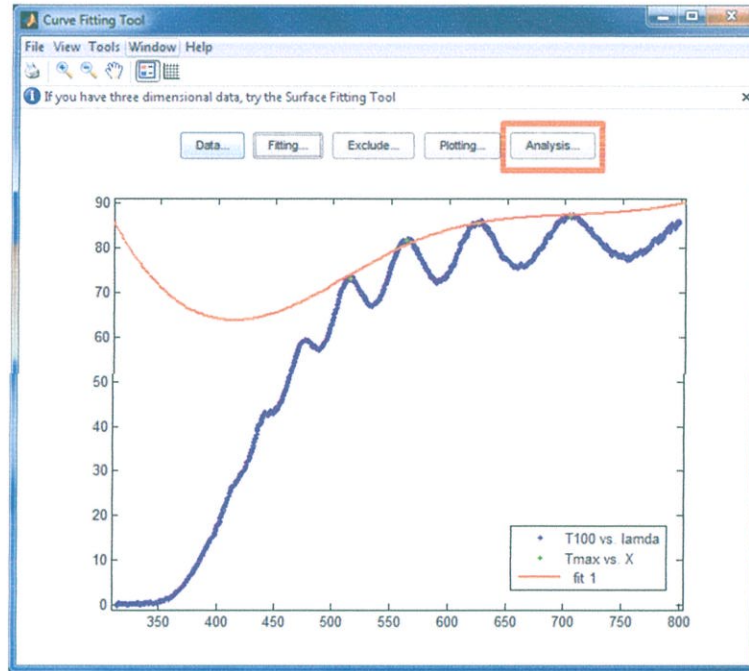
รูปที่ 3.61 หน้าต่าง Fitting ของโปรแกรม MATLAB

25. และทำการกำหนดค่าดังนี้เลือก Data set เป็น Tmax vs. X เลือก Type of fit เป็น Smoothing Splineแล้วคลิกเลือก Immediate apply



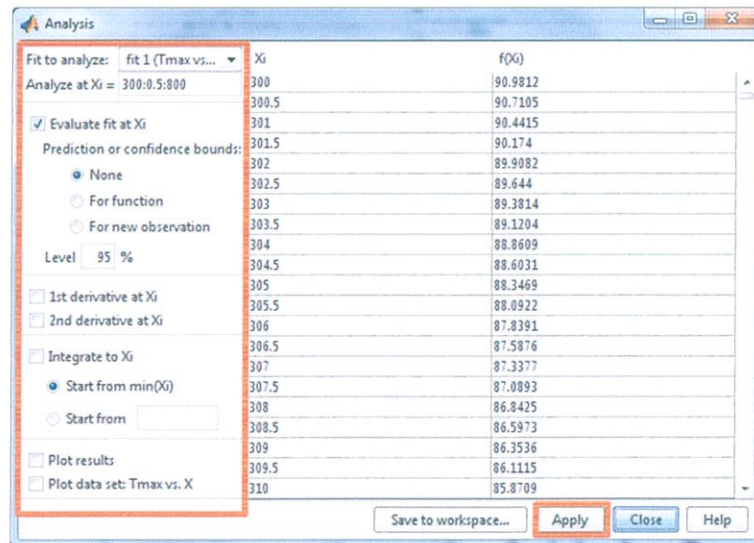
รูปที่ 3.62 การกำหนดค่าในการ Fitting Graph

26. หน้าจอจะปรากฏกราฟที่เราได้ทำการ Fitting ดังรูปที่ 3.XX กด Analysis



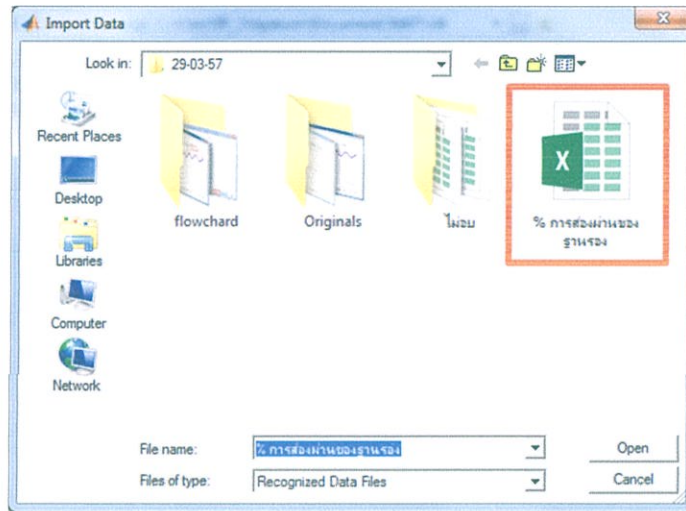
รูปที่ 3.63 กราฟ T_{\max} และ T100 เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ เมื่อทำการ Fitting Graph

27. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Analysis เลือกช่วงที่ต้องการ Analysis โดยแต่ละข้อมูลห่างกัน 0.5 คลิกเลือก Evaluate fit at Xi ตั้งค่าต่างๆดังรูป 3.XX และกด apply



รูปที่ 3.64 หน้าต่าง Analysis ของโปรแกรม MATLAB

28. Import Data เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฐานรองที่ได้ทำการบันทึกไว้



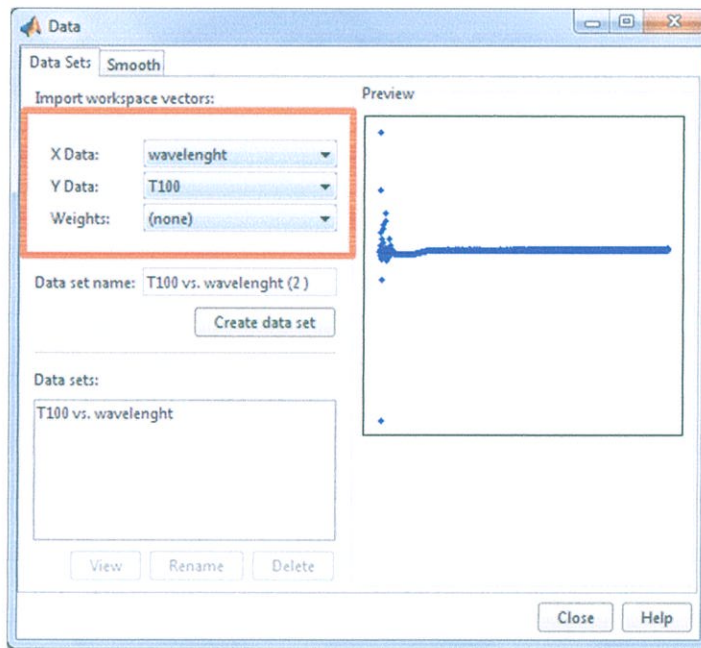
รูปที่ 3.65 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง

29. กำหนดตัวแปร Wavelength คือ ความยาวคลื่นแสงและ T100 คือ เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรองคังรูป

```
Command Window
>> wavelength=data(:,1);
>> T100=data(:,2);
>> |
```

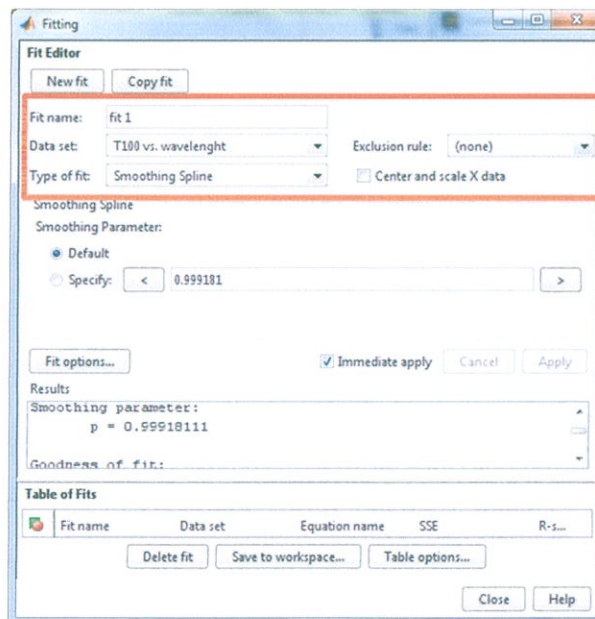
รูปที่ 3.66 การสร้างตัวแปร Wavelength และ T100 ในโปรแกรม MATLAB

30. พิมพ์คำสั่ง cftool โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Curve Fitting Tool คลิก DATA และทำการกำหนดค่า Data คังรูป 3.67 และกด Close

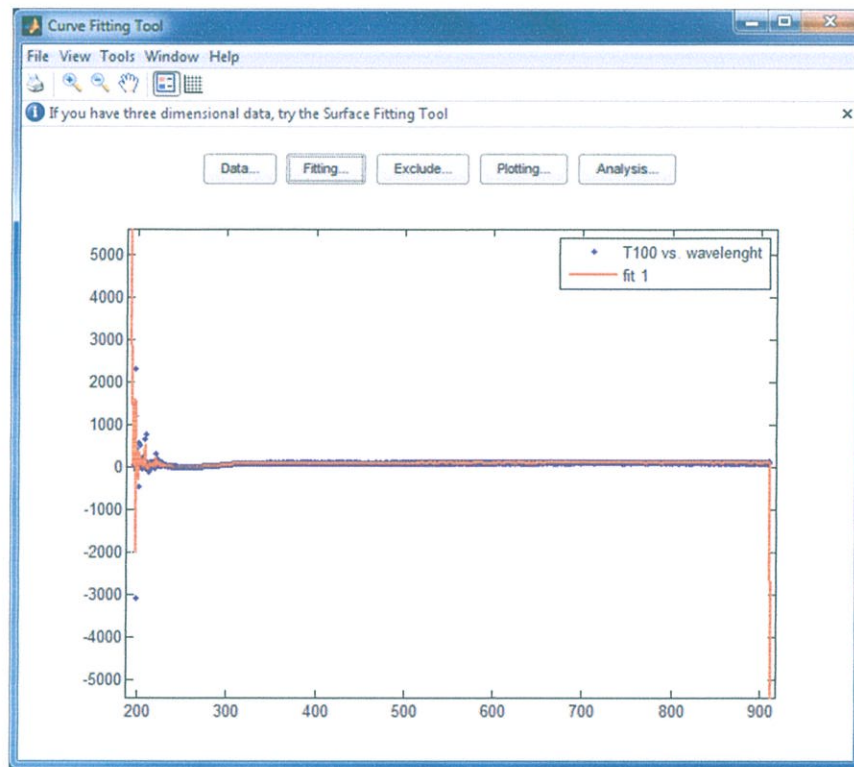


รูปที่ 3.67 การกำหนดค่า DATA ในหน้าต่าง DATA ของโปรแกรม MATLAB

31. กด Fitting เลือก New fit กำหนด Data sets เป็น T100 vs. Wavelength เลือก Type of fit เป็น Smoothing Spline กด Immediate apply



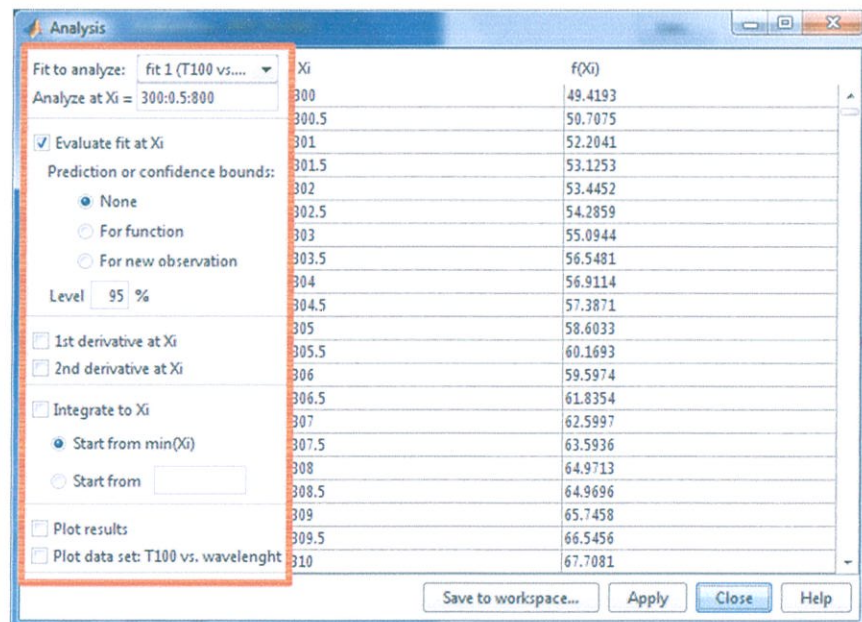
รูปที่ 3.68 การตั้งค่าต่างๆ ในการ Fitting graph



รูปที่ 3.69 กราฟที่ทำการ Fitting

32. กด Analysis ให้เลือกช่วงที่จะทำการ Analysis โดยให้แต่ละข้อมูลห่าง 0.5 กดเลือก

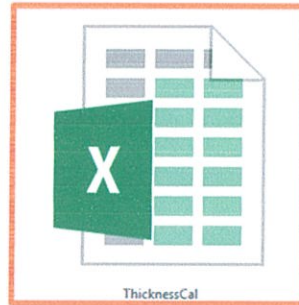
Evaluate at Xi แล้วกด apply



รูปที่ 3.70 หน้าต่าง Analysis ของโปรแกรม MATLAB

33. ทำการบันทึกข้อมูล ซึ่ง X_i คือ ค่าความยาวคลื่น และ $f(X_i)$ คือ เปอร์เซ็นต์ การส่องผ่าน แสงของแผ่นฐานรอง

34. เมื่อกำหนดใน โปรแกรม Thicknesscal แล้ว จะได้ คำนี หักของแผ่นฐานรองที่ความ ยาวคลื่นต่างๆ



รูปที่ 3.71 โปรแกรม Thicknesscal

	A	B	C	D	E	F	G
	wavelength	%T	Ts	1/Ts	$(1/Ts)^{1/2} - 1$	$((1/Ts)^{1/2} - 1)^{1/2}$	s
1	300	49.4193	0.507075	1.972095	2.889158	1.699752	3.671847
2	300.5	50.7075	0.522041	1.915558	2.669364	1.633819	3.549377
3	301	52.2041	0.531253	1.882342	2.543213	1.594745	3.477088
4	301.5	53.1253	0.534452	1.871075	2.500923	1.581431	3.452506
5	302	53.4452	0.542859	1.842099	2.393329	1.547039	3.389138
6	302.5	54.2859	0.550944	1.815067	2.294466	1.514750	3.329816
7	303	55.0944	0.565481	1.768406	2.127260	1.458513	3.226919
8	303.5	56.5481	0.569114	1.757117	2.087461	1.444805	3.201922
9	304	56.9114	0.573871	1.742552	2.036487	1.427055	3.169607
10	304.5	57.3871	0.586033	1.706389	1.911762	1.382665	3.089053
11	305	58.6033	0.601693	1.661977	1.762168	1.327467	2.989444
12	305.5	60.1693	0.595974	1.677926	1.815434	1.347380	3.025306
13	306	59.5974	0.618354	1.617197	1.615325	1.270954	2.888151
14	306.5	61.8354	0.625997	1.597452	1.551852	1.245734	2.843185
15	307	62.5997	0.635936	1.572485	1.472710	1.213553	2.786038
16	307.5	63.5936	0.649713	1.539141	1.368955	1.170024	2.709165
17	308	64.9713	0.649696	1.539181	1.369079	1.170077	2.709258
18	308.5	64.9696	0.657458	1.521010	1.313471	1.146067	2.667077
19	309	65.7458	0.665456	1.502729	1.258194	1.121693	2.624422
20	309.5	66.5456	0.677081	1.476928	1.181317	1.086884	2.563812
21	310	67.7081	0.673312	1.485196	1.205806	1.098092	2.583287
22	310.5	67.3312	0.674226	1.483182	1.199829	1.095367	2.578549
23	311	67.4226	0.695354	1.438116	1.068179	1.033527	2.471644
24	311.5	69.5354	0.699331	1.429938	1.044723	1.022117	2.452055
25	312	69.9331	0.704557	1.419332	1.014502	1.007225	2.426557
26	312.5	70.4557	0.696537	1.435674	1.061160	1.030126	2.465800
27	313	69.6537	0.717341	1.394037	0.943340	0.971257	2.365294

รูปที่ 3.72 ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนีหักเหของแผ่นฐานรองที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ

โดยใช้โปรแกรม Thicknesscal

35. นำชุดข้อมูลความยาวคลื่น, Tmin และ Tmax ที่ได้จากรูป 3.XX มาเรียงลำดับจากชุดข้อมูลที่มีความยาวคลื่นสูงไปต่ำ ดังรูป

	A	B	C	D	E
1	Xmax	Tmax		Xmin	Tmin
2	704.63	87.052444		660.09	75.730484
3	624.52	85.491961		589.84	72.604051
4	562.67	81.725828		533.24	67.156921
5	514.24	73.128779		486.73	57.318372

รูปที่ 3.73 ข้อมูล Tmin และ Tmax ที่ได้จากตัวแปร table

λ (nm)	Tmax	Tmin
704.63	87.052444	
660.09		75.730484
624.52	85.491961	
589.84		72.604051
562.67	81.725828	
533.24		67.156921
514.24	73.128779	
486.73		57.318372

รูปที่ 3.74 ข้อมูล Tmin และ Tmax ที่ได้จากตัวแปร table ที่ถูกจัดเรียงจากสูงไปต่ำ

36. เติมข้อมูลค่า T_{max} T_{min} ในตารางจากรูปที่ 3.75 โดยใช้ ค่า X_i และ $f(X_i)$ ของ T_{max} และ T_{min} ที่ได้ทำการบันทึกไว้ ใส่ ค่า $s(\text{Index})$ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ลงในตาราง

$l(\text{nm})$	T_{max}	T_{min}	$s(\text{Index})$
704.63	87.052444	77.9295	1.516996
660.09	86.6416	75.730484	1.543681
624.52	85.491961	74.5746	1.580804
589.84	83.3572	72.604051	1.567102
562.67	81.725828	70.023	1.567893
533.24	76.7213	67.156921	1.568557
514.24	73.128779	63.0735	1.568791
486.73	69.7982	57.318372	1.580260

รูปที่ 3.75 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง

37. สามารถคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางได้ตามสมการที่ 2.6 โดยทำการคำนวณหาค่า N , n_1 , d_1 และ m_0 ตามสมการที่ (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ แล้วนำ ค่าความยาวคลื่น, m_0 , และ d_1 มาคำนวณกลับหาค่าความหนาของฟิล์มที่ถูกต้องได้ตามสมการที่ (2.6) และสามารถนำค่าความหนาของฟิล์มมาคำนวณหาดัชนีหักเหของฟิล์มได้

3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสภาพไฟฟ้าแบบ 4 จุด

1. จัดอุปกรณ์ดังรูป 3.76



รูปที่ 3.76 อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิควัด Four point probe

2. เปิดเครื่อง Constant Current Source และเครื่อง Multimeter (ควรเปิดทิ้งไว้ก่อนอย่างน้อย 30 นาที)

3. ตั้งค่าเครื่อง Constant Current Source โดยเริ่มต้นจากตั้งค่า V-Limit ก่อนจากนั้นกดปุ่ม Source เพื่อตั้งค่ากระแสตามที่ต้องการจะป้อนให้กับชิ้นงาน ชิ้นงานแต่ละชิ้นงานแต่ละชิ้น จะมีการป้อนกระแสต่างกัน

4. วางชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบลงบนแท่นที่เตรียมไว้โดยแท่นที่วางจะต้องมีแผ่นฉนวนวางกั้นระหว่างชิ้นงานกับแท่น และการที่จะนำชิ้นงานมาวางบนแท่นต้องมีความระมัดระวังมาก โดยให้จับที่ขอบของแผ่นและหลีกเลี่ยงการสัมผัสบนผิวหน้าทั้งสองด้านของชิ้นงานเพราะจะทำให้ผิวด้านของชิ้นงานเป็นรอยซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงานวัดค่าไม่ดีหรือวัดไม่ได้เลย



รูปที่ 3.77 การวางชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแท่น



รูปที่ 3.78 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด

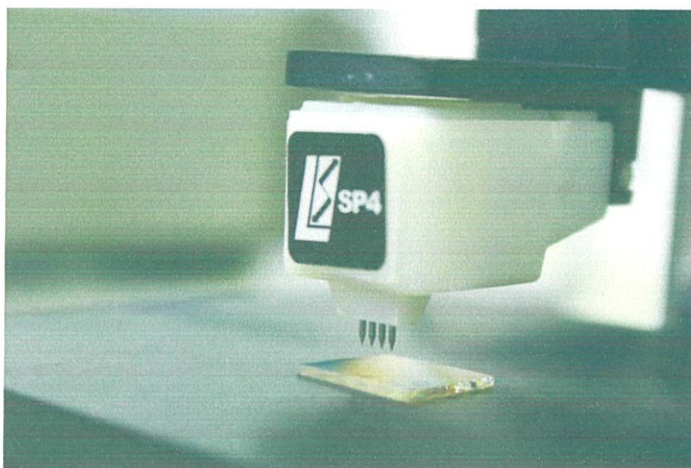
5. หมุน 4-point probe ลง โดยให้ปลายเข็มทั้ง 4 และที่ผิวหน้าของชิ้นงานพอดี
6. กดปุ่ม Output ที่เครื่อง Constant Current Source เพื่อจ่ายกระแสไปยังขั้ว 1 และขั้ว 4 ของ 4-point probe
7. บันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Multimeter และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า Resistivity (ρ)



รูปที่ 3.79 การบันทึกผลจากเครื่อง Multimeter

8. เพิ่มกระแสขึ้นตามความเหมาะสมของชิ้นงาน และชิ้นงานแต่ละชิ้นควรจะวัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อความแม่นยำ

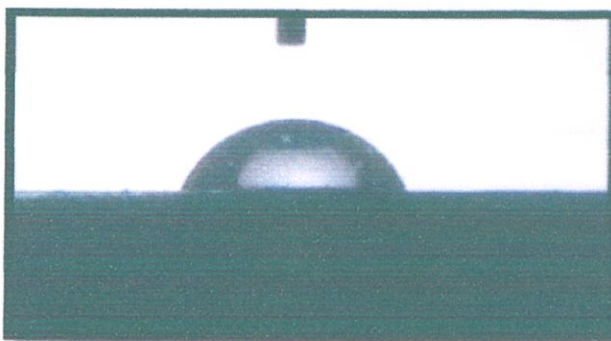
9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4-ข้อ 8 แต่เปลี่ยนชิ้นงานเป็น กรณีสชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศา(c°) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง










รูปที่ 3.80 การวัดชิ้นงานฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศา(c°) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

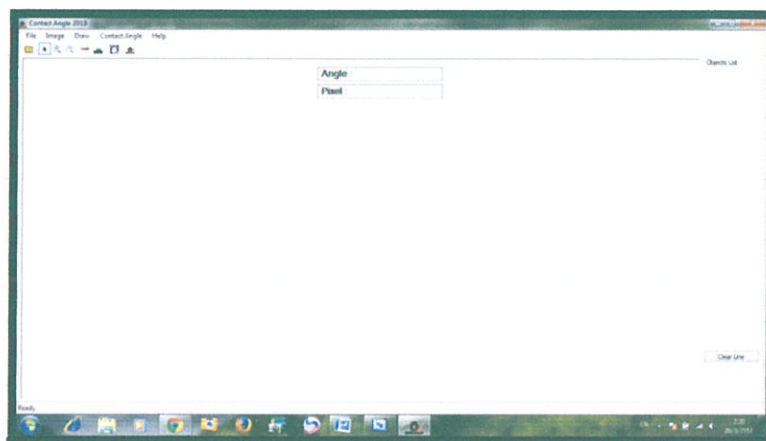
3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส(Contact Angle)

1. ทำการรันโปรแกรม
2. ทำการดาวน์โหลดไฟล์รูปภาพที่ต้องการวัดมุมสัมผัสโดยกดที่เมนู File > Open Image หรือ กดที่ไอคอน  หรือกด Ctrl+P จะได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 3.82

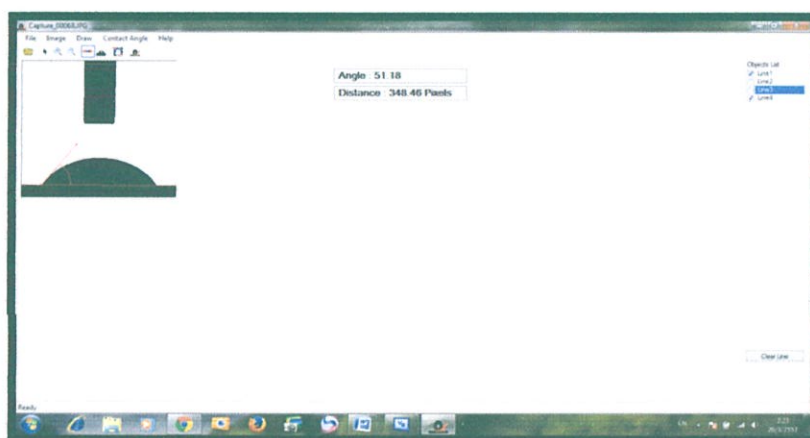


รูปที่ 3.81 ภาพถ่ายที่นำไปตัดเพื่อที่จะเห็นบริเวณรอยต่อ

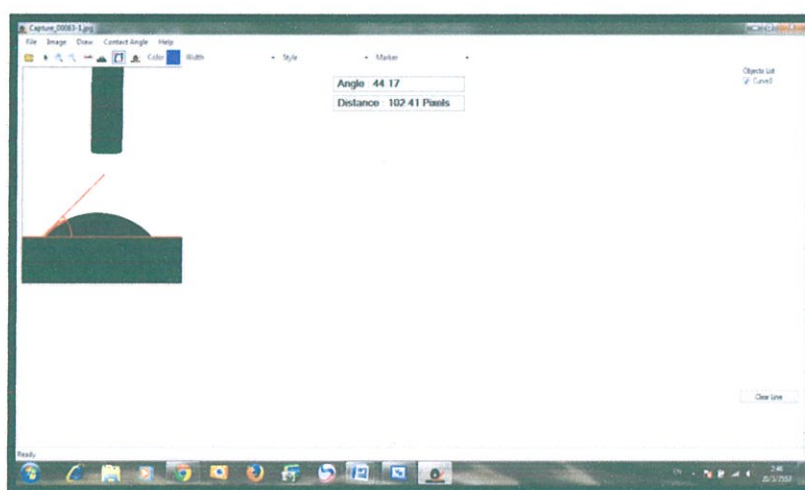
3. ก่อนการวัดมุมสัมผัสจะต้องทำการ Threshold ภาพก่อนทุกครั้ง และจะต้องป้อนค่า Threshold ให้เหมาะสมกับภาพ ซึ่งค่าที่ป้อนนั้นต้องอยู่ในช่วง 1-256 โดยเลือกที่เมนู Image > Threshold หรือกด Ctrl+T แล้วทำการป้อนค่า Threshold ลงไปใน Textbox
4. ทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำสามารถทำได้ 2 วิธี คือ
 - เลือกที่จะวัดมุมสัมผัสโดยการระบุตำแหน่ง (Manual Measurement) และทำการวัดระยะระหว่างขอบของหยดน้ำโดยเลือกที่เมนู Draw > Manually 2 points line หรือกดที่ไอคอน  หรือกด Ctrl+M แล้วทำการลากเส้นฐานของหยดน้ำ และเส้นสัมผัสของหยดน้ำ จากนั้นทำการการเลือกที่เมนู Contact Angle > Calculate Manual หรือกดที่ไอคอน  หรือกด Alt+M
 - เลือกที่จะวัดมุมสัมผัสและวัดระยะระหว่างขอบของหยดน้ำโดยให้โปรแกรมหาขอบของหยดน้ำให้ (Auto Detect) โดยเลือกที่เมนู Draw > Auto Detect Ellipse หรือกดที่ไอคอน  หรือกด Ctrl+A แล้วทำการลากกรอบให้ครอบคลุมด้านที่ต้องการวัด จากนั้นจะมีหน้าต่าง SideSelection ขึ้นมาให้เลือกว่าต้องการวัดขอบของหยดน้ำในด้านใด จากนั้นทำการการเลือกที่เมนู Contact Angle > Calculate Auto หรือกดที่ไอคอน  หรือกด Alt+A
5. ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะแสดงค่าใน
6. ค่าระยะระหว่างขอบของหยดน้ำจะแสดงค่าใน
7. หากต้องการลบฟังก์ชันการทำงานที่กระทำบนภาพอยู่ ให้ไปที่เมนู File > Clear Line หรือกดปุ่ม Clear Line หรือกด F3
8. หากต้องการให้ภาพกลับไปเป็นดังภาพเริ่มต้นที่ทำการดาวน์โหลดมา ให้เลือกเมนู Image > Original Image หรือกด Ctrl+O
9. ถ้าต้องการออกจากโปรแกรม เลือกที่เมนู File > Exit Program หรือกดปุ่ม  หรือกด F5
10. หากต้องการขยายรูปภาพให้ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงจากภาพดั้งเดิมทำได้โดย
 - ไปที่เมนู Image > Zoom In หรือกดที่ไอคอน  หรือกด F10
 - ไปที่เมนู Image > Zoom Out หรือกดที่ไอคอน  หรือกด F11
11. หากต้องการรู้ถึงการใช้งานของโปรแกรมไปที่เมนู Help > About Program หรือกด Shift+Del



รูปที่ 3.82 หน้าจอการแสดงผลของโปรแกรม

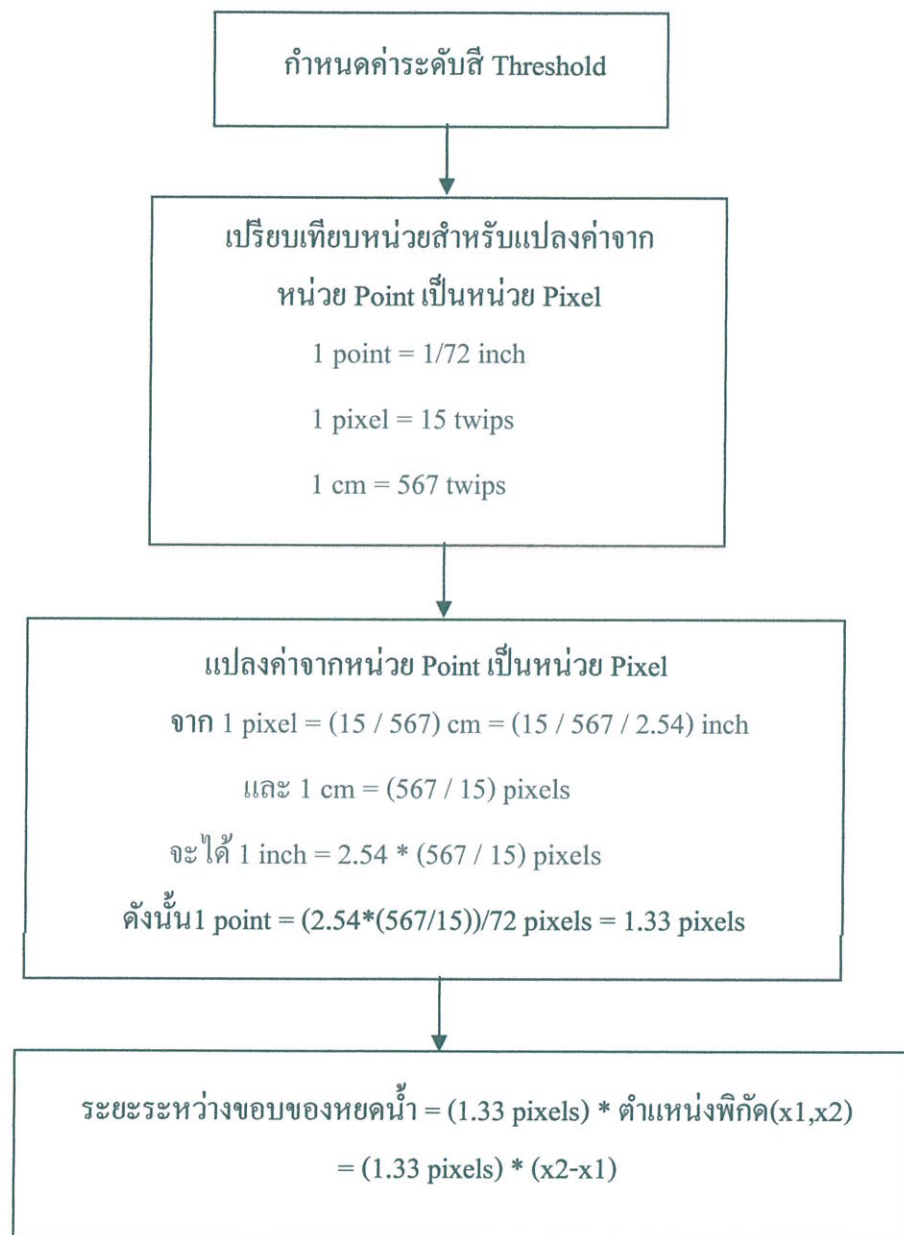


รูปที่ 3.83 การหาค่ามุมสัมผัสและระยะระหว่างขอบของหยดน้ำโดยใช้ระบบ Manual



รูปที่ 3.84 การหาค่ามุมสัมผัสและระยะระหว่างขอบของหยดน้ำโดยใช้ระบบ Auto

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าระยะระหว่างขอบของหยดน้ำในหน่วยของ pixel



รูปที่ 3.85 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าระยะระหว่างขอบของหยดน้ำในหน่วยของ Pixel

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นฐานรองแผ่นแก้ว

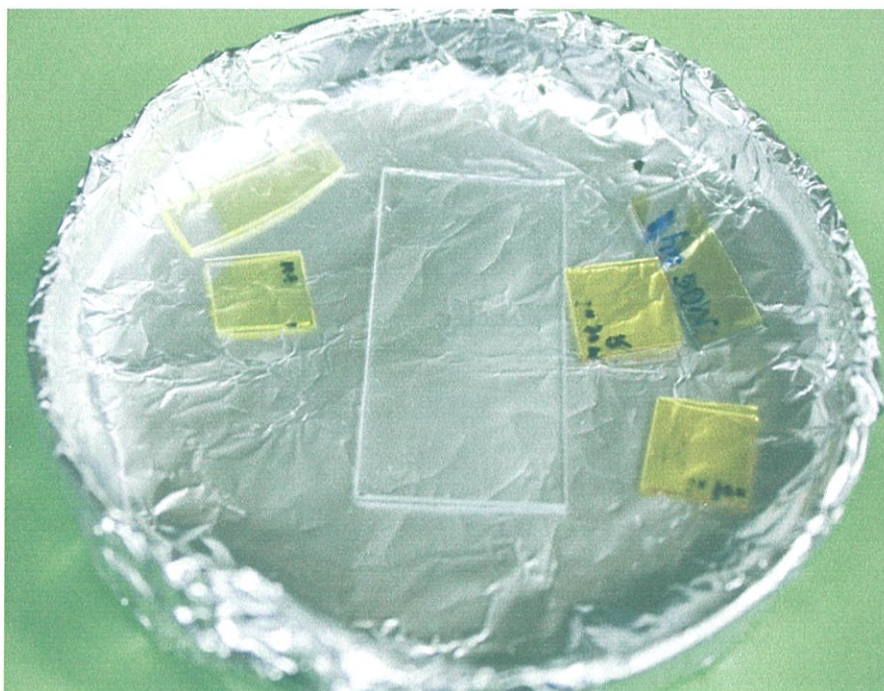
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนแผ่นฐานรองแผ่นแก้วเพื่อทำการศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบฟิล์มบางและหลังการอบส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์อย่างไร โดยมีเงื่อนไขต่างๆในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นฐานรองแก้วสไลด์

เป้าสารเคลือบ	อินเดียมออกไซด์-ทินออกไซด์ 90/10 ขนาด 3 นิ้ว
แผ่นฐานรอง	แผ่นแก้วเยอรมัน
ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง	75mm.
ความดันก่อนทำการปลูกฟิล์ม	5×10^{-6} mbar.
ความดันขณะเปิดพลาสมา	2.7×10^{-3} mbar.
กำลังคลื่นความถี่วิทยุ	50 วัตต์
ปริมาณก๊าซอาร์กอน	20 sccm
ระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม	1 ชั่วโมง
เงื่อนไขการอบ	400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ในการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูป 4.1

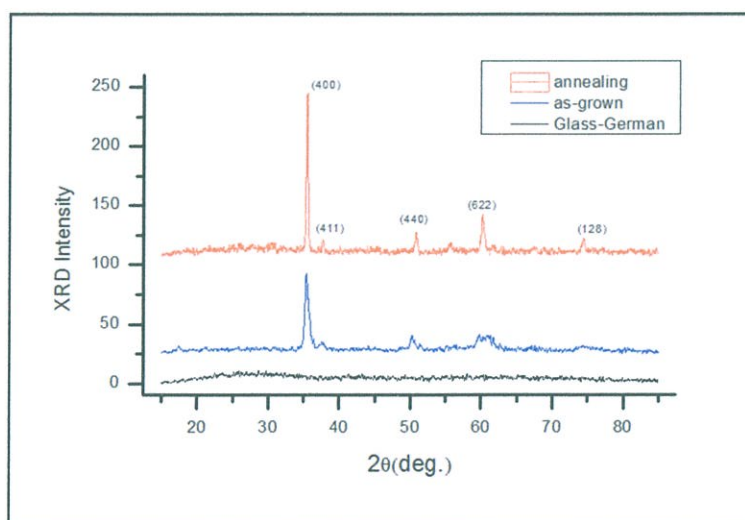


รูปที่ 4.1 แผ่นแก้ว ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

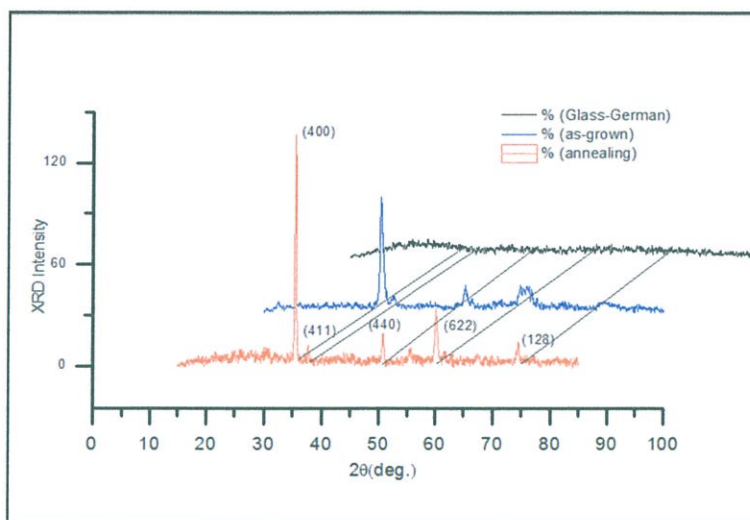
4.2 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ

4.2.1 เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction :XRD)

ในการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยเทคนิควัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ได้ผลตรวจสอบ ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ และหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่ง $2\theta = 35.467$ 37.686 60.678 และ 74.268 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระนาบ (400) (411) (622) และ (128) จากผลการวิเคราะห์สามารถคำนวณหาค่าขนาดผลึก (Crystallite size) และระยะห่างของระนาบ (d-spacing) และ Micro stain ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิควัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

Sample	FWHM(Radian)	Crystallite size	d-spacing(\AA)	Lattice Constant	Micro stain
As_Grown	0.01207	13.123 nm.	2.530	10.14	0.002876
Annealing	0.0488	32.467 nm.	2.526	10.10	0.001162

4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ในการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ได้ทำการตรวจสอบทั้งหมด 3 โหมดด้วยกันได้แก่

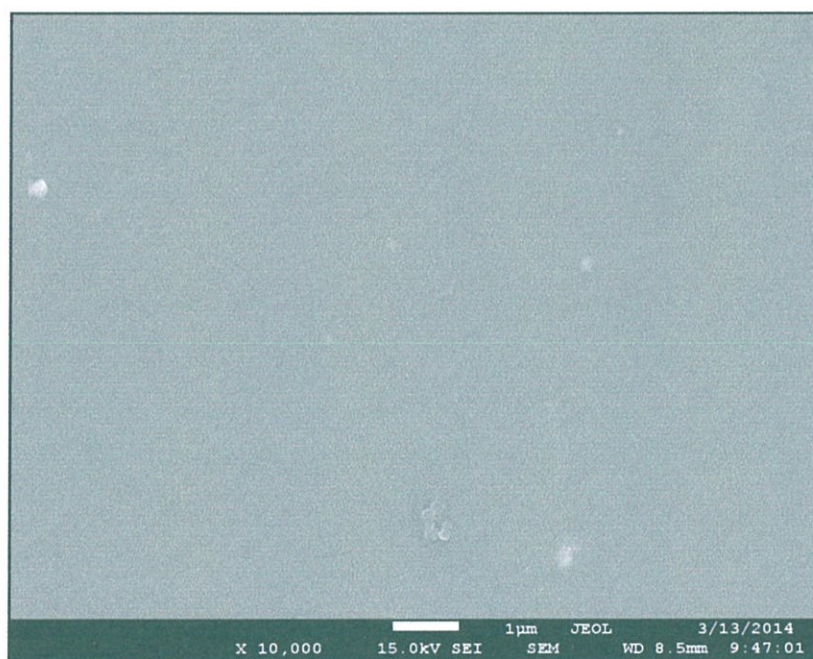
- 1.Scanning Electron Microscope Mode (SEM Mode)
- 2.Cross-Section Mode
- 3.Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDS Mode)

ได้ผลการตรวจสอบดังนี้

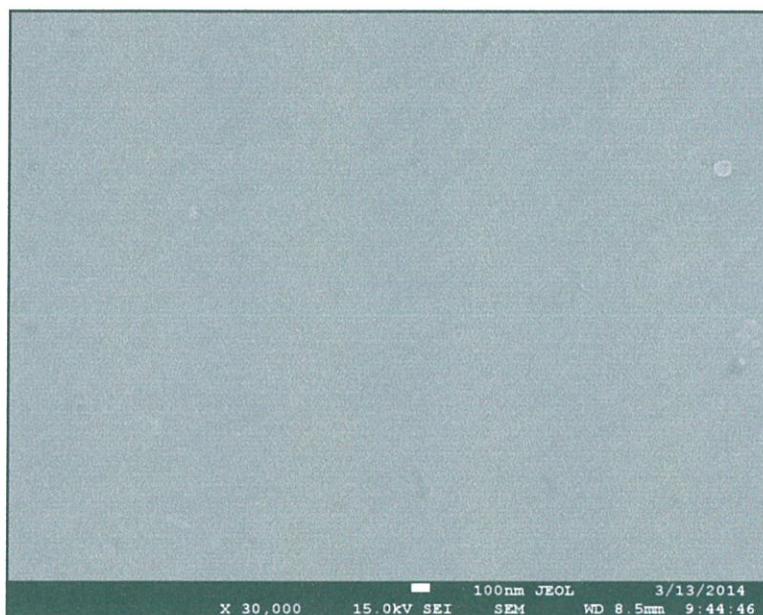
4.2.2.1 Scanning Electron Microscope Mode (SEM Mode)

เป็นโหมดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ในการตรวจสอบนั้น ได้ทำการวัดค่ากำลังขยาย 3 ค่า คือ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า 30,000 เท่า และ 50,000 เท่าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

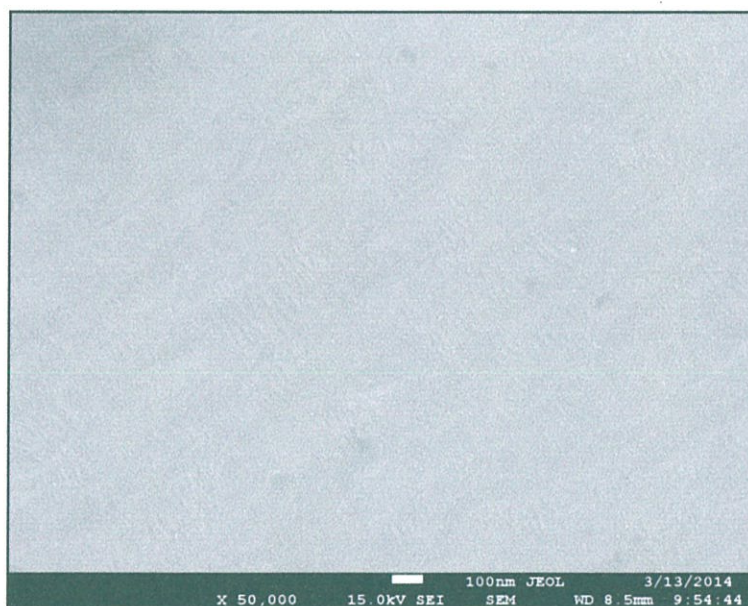
1. ผลการตรวจสอบอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบ



รูปที่ 4.3 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า

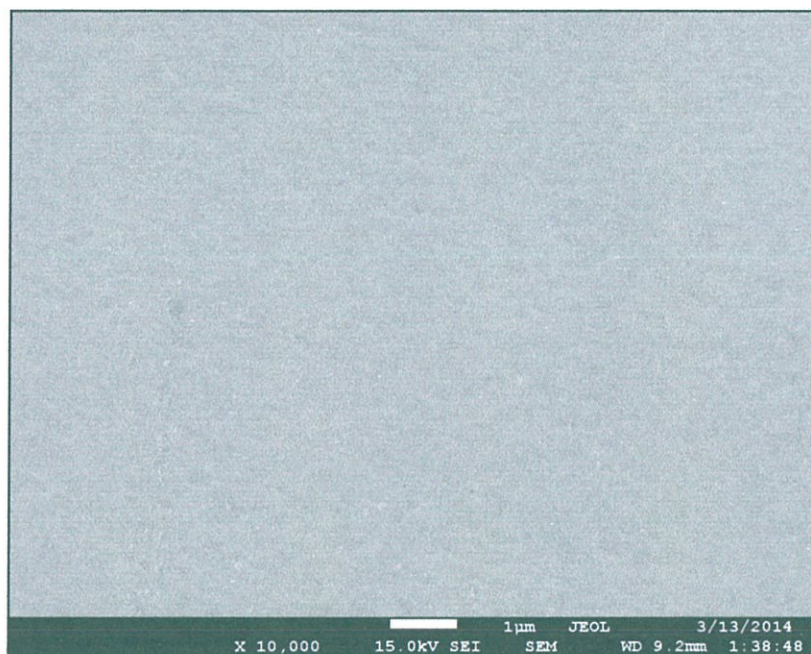


รูปที่ 4.4 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดกำลังขยาย 30,000 เท่า

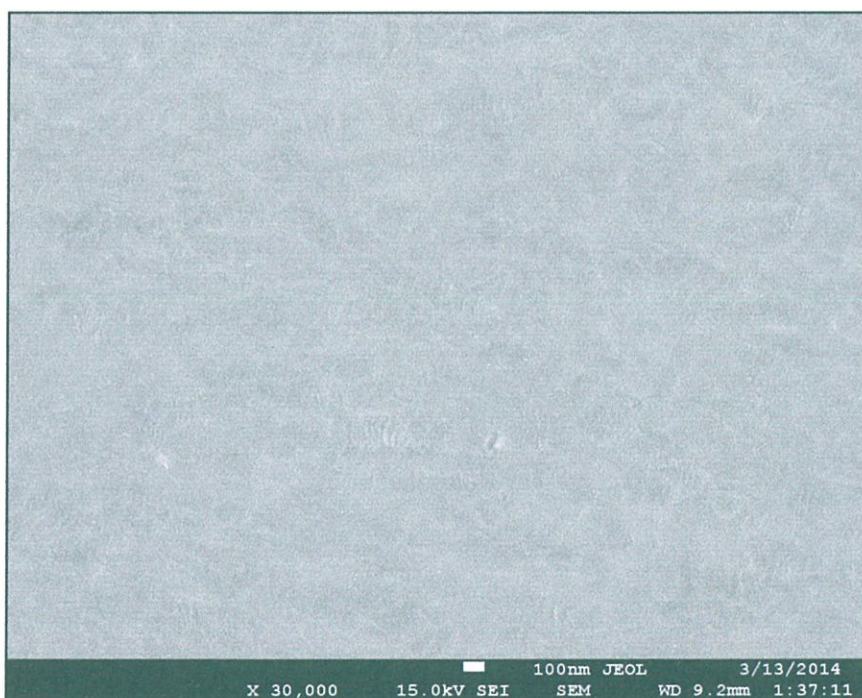


รูปที่ 4.5 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดกำลังขยาย 50,000 เท่า

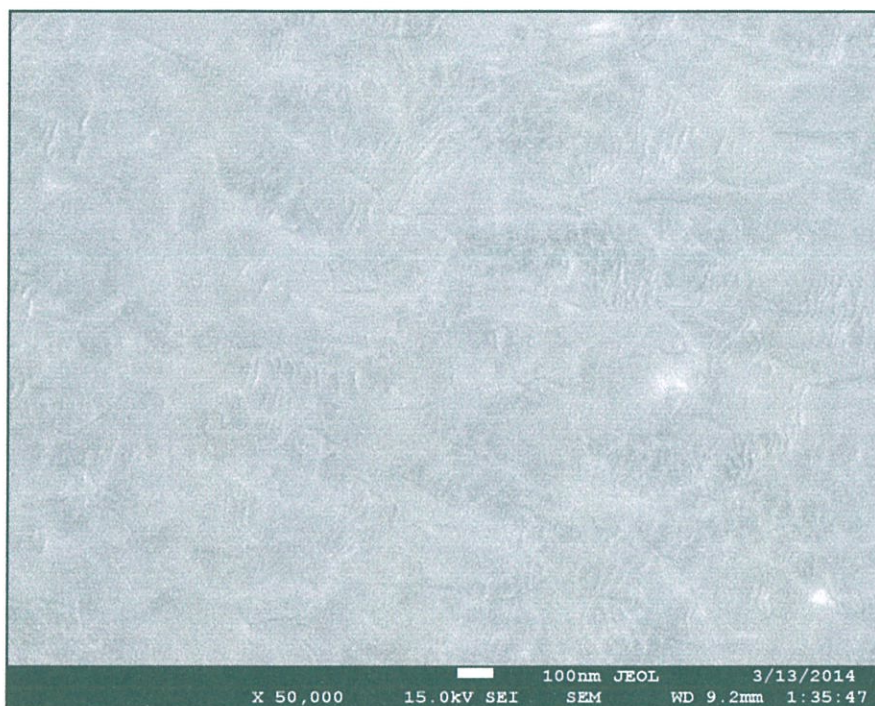
2.ผลการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.7 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดกำลังขยาย 30,000 เท่า



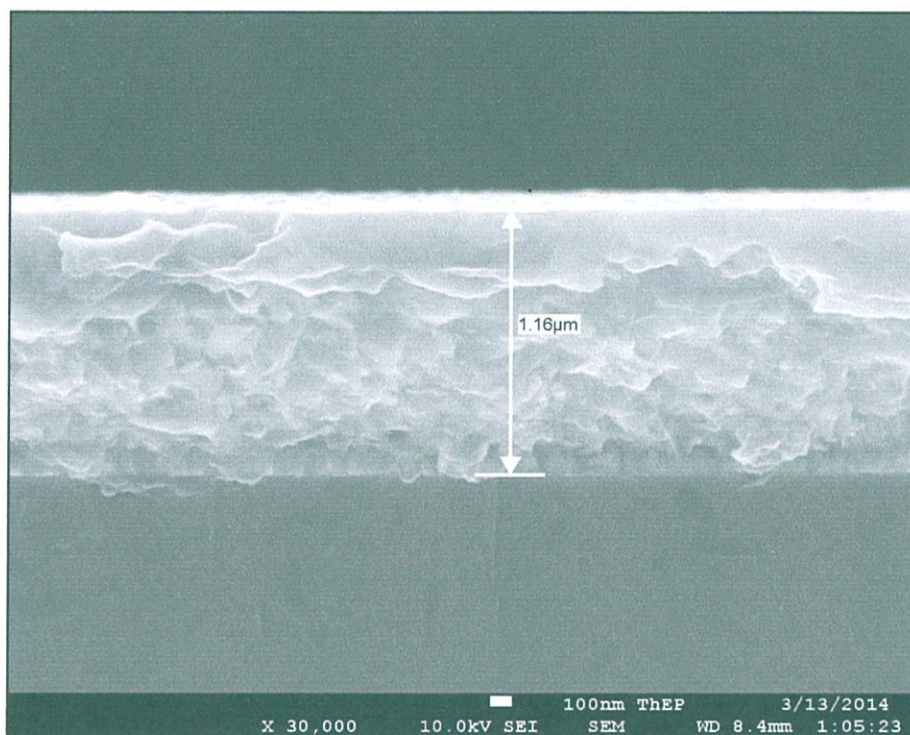
รูปที่ 4.8 ผลการวัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเถื่อนกราดกำลังขยาย50,000เท่า

การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเถื่อนกราดของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าที่ 50,000เท่า 30,000 เท่า และ 10,000 เท่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวเป็นไปทางเดียวกัน เงื่อนไขหลังการอบมีความสม่ำเสมอของพื้นผิวน้อยกว่า

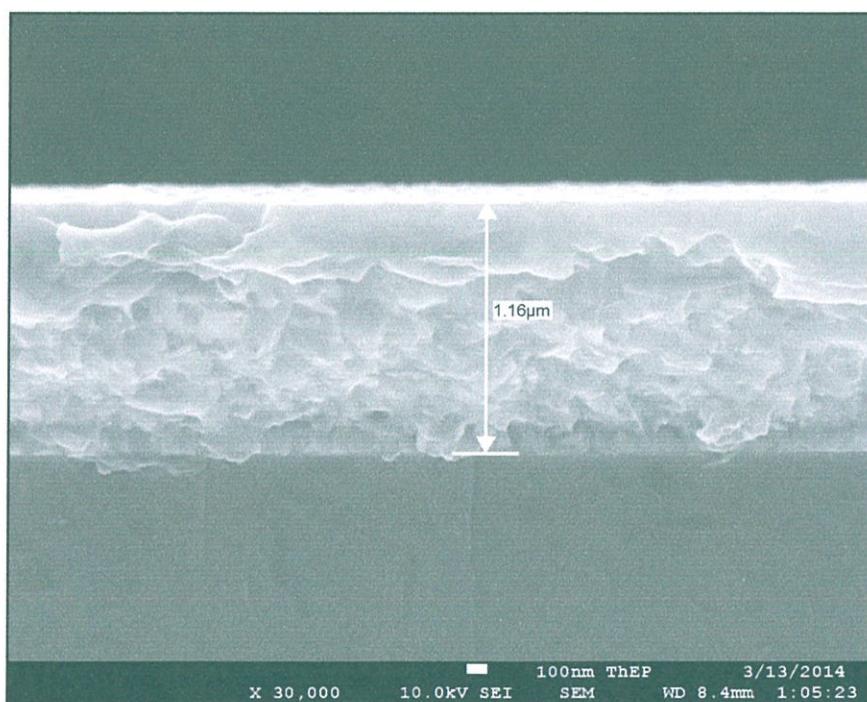
4.2.2.2 Cross section Mode

เทคนิคการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเถื่อนกราด เพื่อวัดหาค่าความหนาของฟิล์มบางโดยทำการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบทั้งหมด 3 จุด เพื่อตรวจสอบความแม่นยำค่าความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ได้ผลการตรวจสอบดังนี้

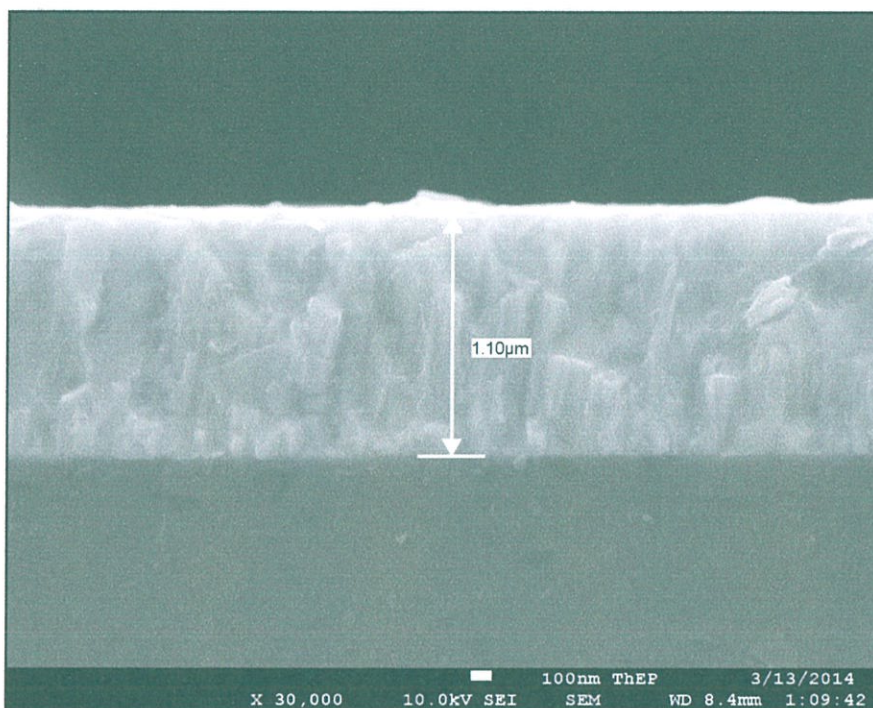
1. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบ



รูปที่ 4.9 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 1

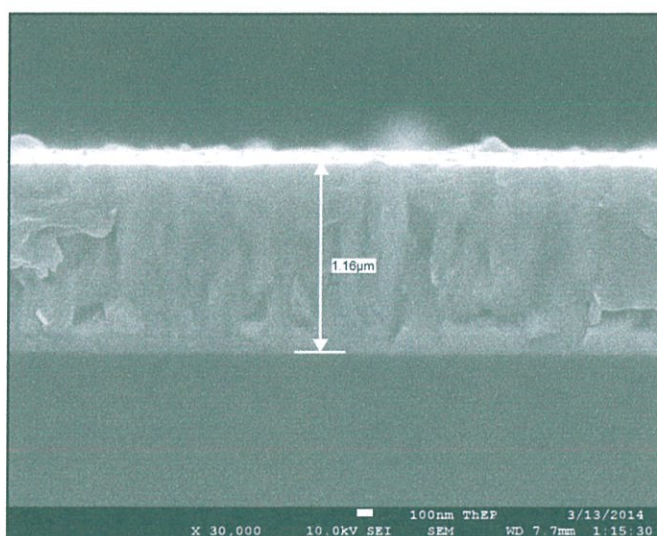


รูปที่ 4.10 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 2

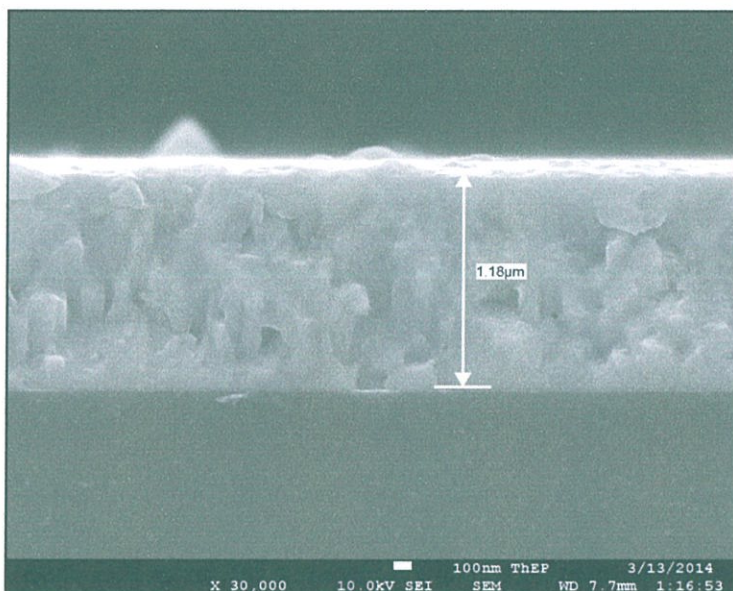


รูปที่ 4.11 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ จุดที่ 3

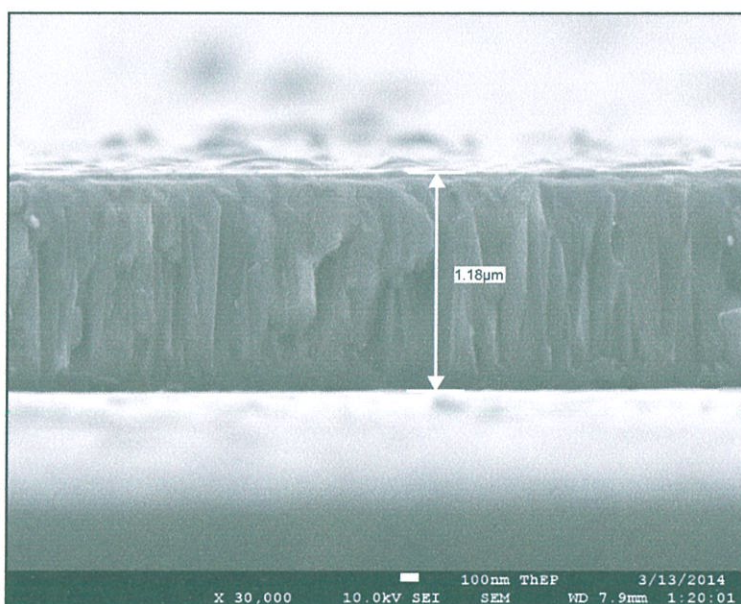
2. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด โหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จุดที่ 1



รูปที่ 4.13 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงจุดที่ 2



รูปที่ 4.14 ผลการวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด Cross-section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงจุดที่ 3

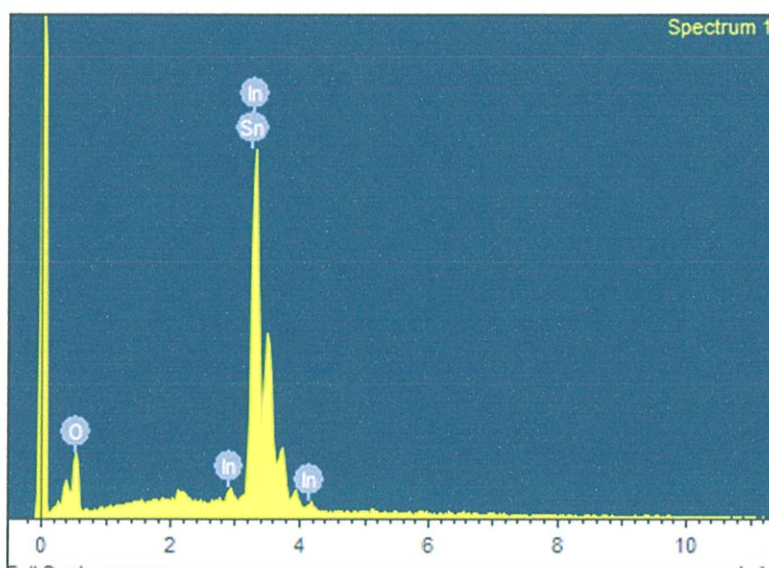
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด Cross section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความหนา

ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบมีค่า 1.16 ไมโครเมตร 1.16 ไมโครเมตร และ 1.10 ไมโครเมตร ทั้ง 3 จุด ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีค่า 1.16 ไมโครเมตร 1.18 ไมโครเมตร 1.18 ไมโครเมตร ทั้ง 3 จุด ตามลำดับ

3. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS Mode)

เป็นโหมดของเทคนิคการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.1 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ

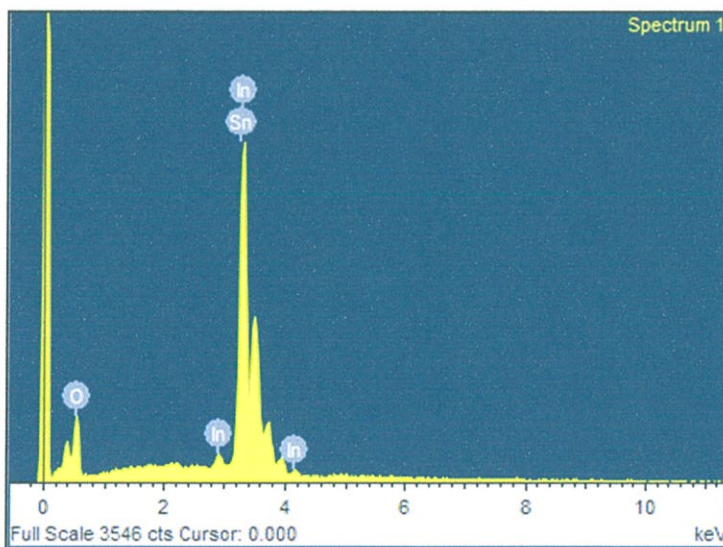


รูปที่ 4.15 ผลที่ได้จากการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ

Element	Weight%	Atomic%
OK	23.68	69.02
InL	75.02	30.47
SnL	1.30	0.51
Totals	100.00	

รูปที่ 4.16 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ก่อนการอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเล็อนกราดโหมด EDS

3.2 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 ผลที่ได้จากการวัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเล็อนกราดของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ หลังทำการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

Element	Weight%	Atomic%
OK	23.09	68.36
InL	70.35	29.02
SnL	6.56	2.62
Totals	100.00	

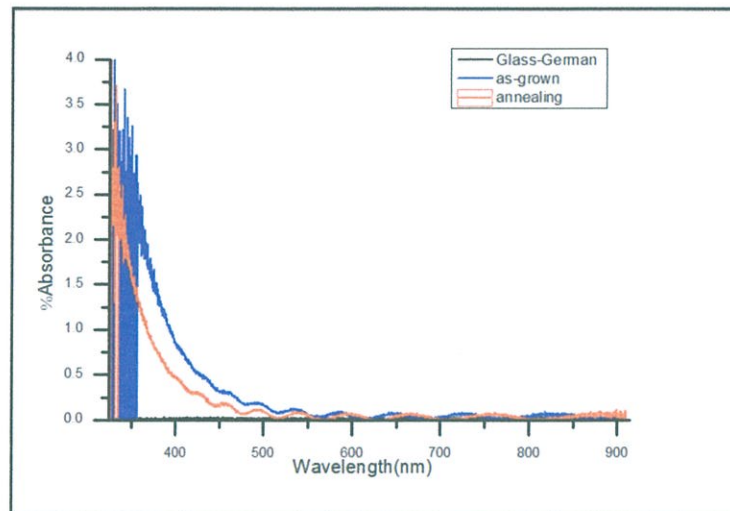
รูปที่ 4.18 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเล็กราคาโหมด EDS

การวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเล็กราคาโหมด EDS ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเงื่อนไขก่อนการอบมี %weight 1.30 และมี %Atomic 0.51 และเงื่อนไขหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจะมี %weight 6.56 และมี %Atomic 2.62 ซึ่งค่า %weight และ %Atomic ที่สูงขึ้นนั้นจะบอถึงการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นด้วย

4.2.3 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrometer)

สมบัติทางแสงที่ทำการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการตรวจสอบด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ได้ผลการตรวจสอบดังนี้

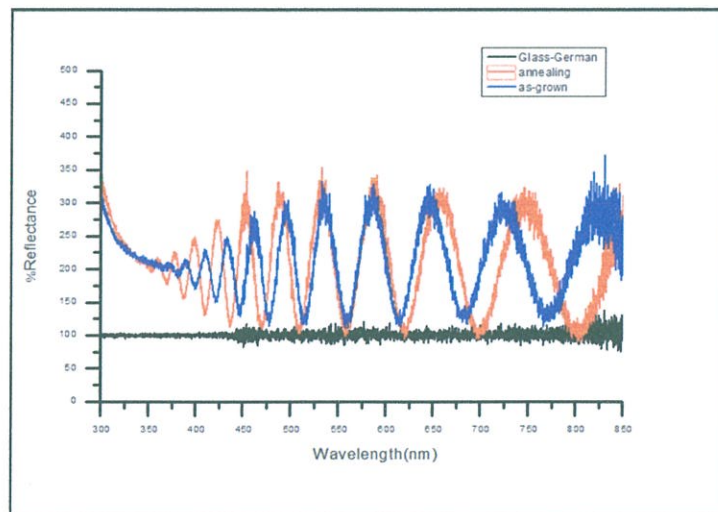
1. การดูดกลืนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการดูดกลืนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การวิเคราะห์การดูดกลืนเป็นไปตามแนวโน้มเนื่องจากการสะท้อนมากกว่าส่งผลให้มีการดูดกลืนมีน้อยกว่า

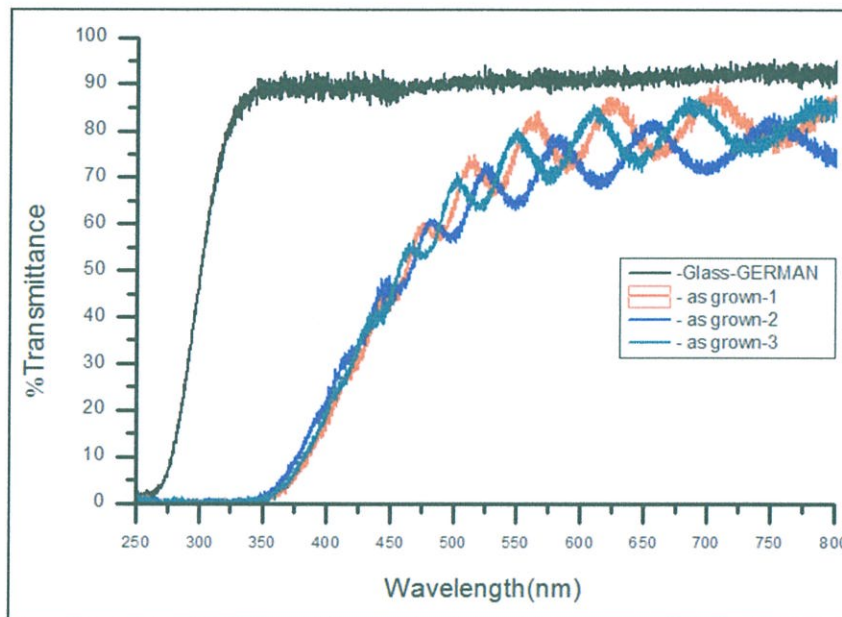
2. การสะท้อนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการสะท้อนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การวิเคราะห์การสะท้อน พบว่า เงื่อนไขการอบมีค่า % การสะท้อนที่สูงขึ้น

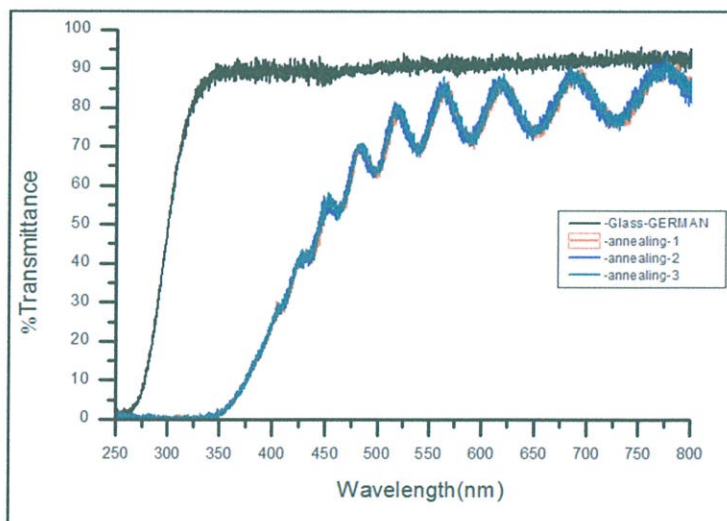
3. การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ก่อนการอบ เมื่อทำการวัด 3 ตำแหน่ง

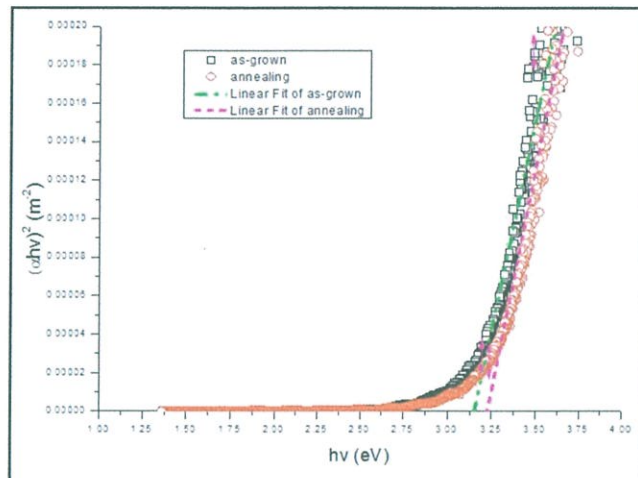
การส่องผ่านของแสงเงื่อนไขก่อนการอบพบว่า การส่องผ่านของแสงในฟิล์มบางนั้นมีค่าไม่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่น



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเมื่อทำการวัด 3 ตำแหน่ง

การวิเคราะห์การส่องผ่านของเงื่อนไขการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากภาพบอกถึงความเป็นผลึกที่เท่ากันทั้งแผ่น โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน 90% ทั้ง 3 จุด



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

นอกจากนี้ยังสามารถนำสเปกตรัมการส่องผ่านไปคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามได้โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ดังรูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบจะมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 3.155 eV และเงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 3.235 eV

4.2.4. ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองฮอลล์เอฟเฟกต์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ

Field [G]	Resistivity [ohm cm]	Hall Coefficient [cm ³ /C]	Type	Carrier Density [1/cm ³]	Hall Mobility [cm ² /(VS)]	Conductivity (S/cm)
1.00E+03	1.11E-05	-3.04E-04	n	2.05E+22	2.75E+01	9.03E+04

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองฮอลล์เอฟเฟกต์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์
หลังการอบ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Field [G]	Resistivity [ohm cm]	Hall Coefficient [cm ³ /C]	Type	Carrier Density [1/cm ³]	Hall Mobility [cm ² /(VS)]	Conductivity (S/cm)
1.00E+03	2.74E-05	-2.05E-04	n	3.05E+22	7.47E+00	3.65E+04

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีฮอลล์เอฟเฟกต์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าภายใต้เงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยลงก่อนการอบ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ส่งผลให้พาหะของฮอลล์ เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น ขอบของเกรนลดลงส่งผลให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะนั้นเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

4.2.5 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด (4 point probe)

ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ สภาพการนำไฟฟ้า สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพต้านทานแผ่น โดยทำการวัดด้วยเทคนิค 4-point probe ได้ผลการตรวจสอบดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ

Sheet resistance(Ω/\square)	resistivity($\Omega\cdot\text{cm}$)	As_grown (σ :conductivity)($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)
63.79	7.40×10^{-3}	135.15

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า

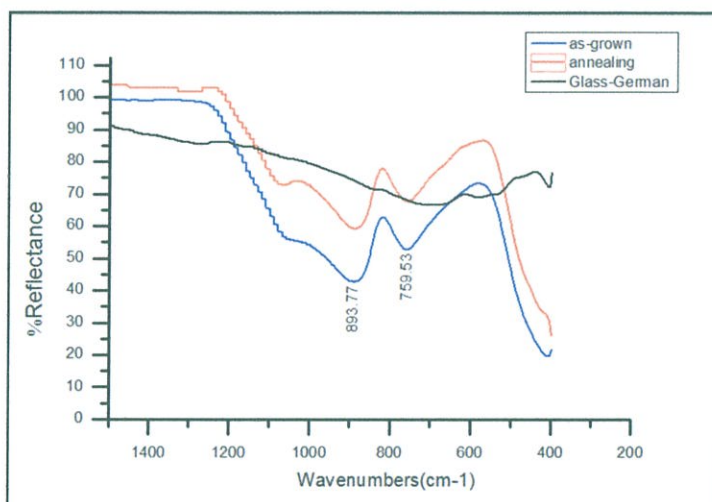
ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่หลังการอบ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Sheet resistance(Ω/\square)	resistivity($\Omega\cdot\text{cm}$)	annealing (σ :conductivity)($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)
14.27	1.66×10^{-3}	610.52

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าภายใต้เงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยลงก่อนการอบ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

4.2.6. Fourier Transform Infrared Spectrometer :FTIR

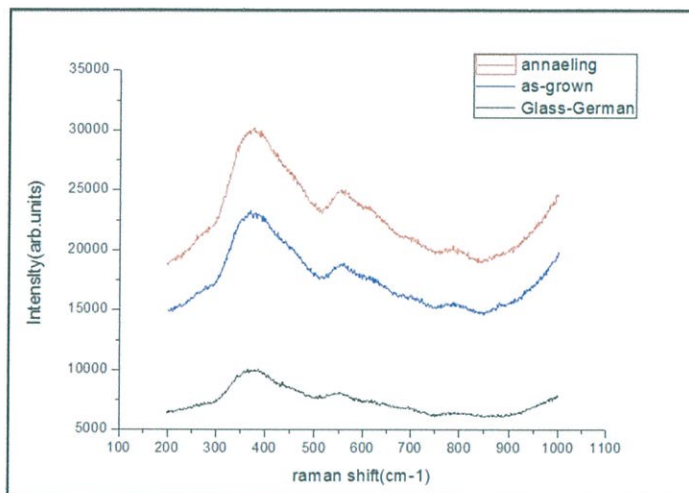
ในการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer เพื่อตรวจสอบการสะท้อนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลการตรวจสอบดังนี้



รูปที่ 4.24สเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การวิเคราะห์การสะท้อนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบ พบพิกที่ 893.77 และ 759.53 (cm^{-1})

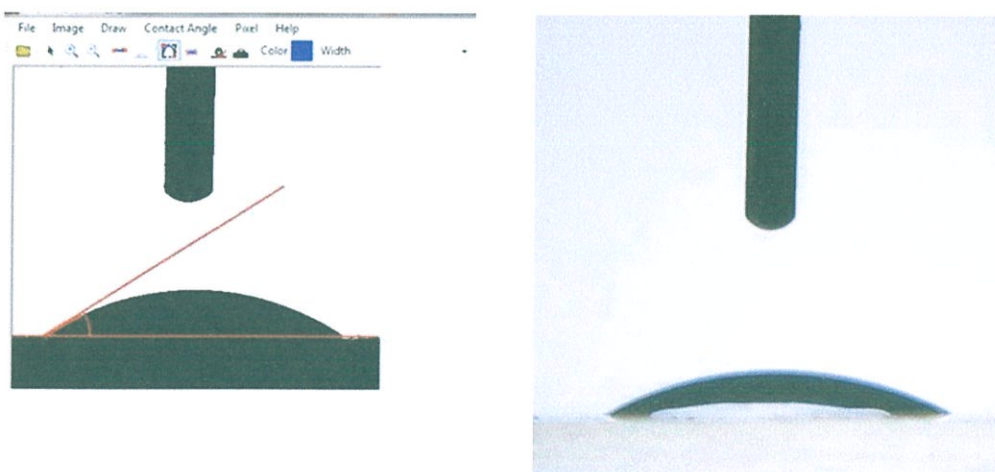
4.2.7 Raman Spectroscopy



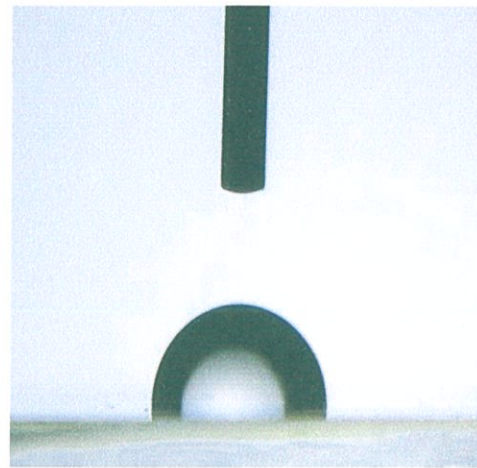
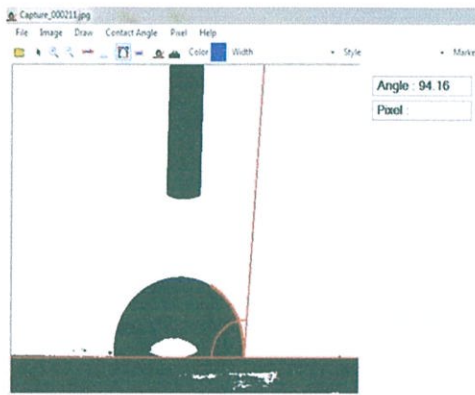
รูปที่ 4.25 ผลการวัดด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปีภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบ พบว่า ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบนั้นจะมีค่าความเข้มแสงมากกว่าฟิล์มก่อนการอบซึ่งพบพีคที่ค่ารามานชิฟ $371.11 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

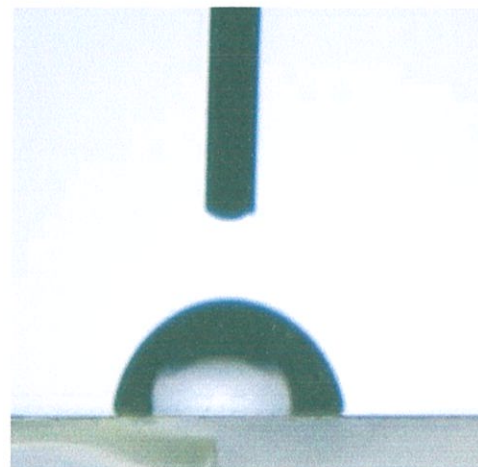
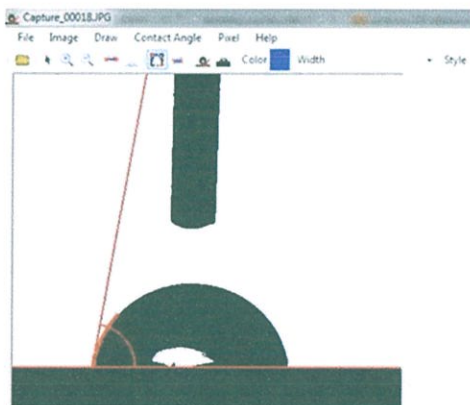
4.2.8 Contact Angle



รูปที่ 4.26 การวัดมุมสัมผัสแผ่นแก้ว



รูปที่ 4.27 การวัดมุมสัมผัสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบ



รูปที่ 4.28 การวัดมุมสัมผัสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบ

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณมุมสัมผัสของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ชิ้นงาน	as-grown	annealing	Glass-German
วัดครั้งที่1	95.13	79.67	32.72
วัดครั้งที่2	94.16	80.43	34.13
วัดครั้งที่3	95.55	80.68	34.69
ค่าเฉลี่ย	94.94	80.26	33.84

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบได้ขนาดของมุมเท่ากับ 94.94 องศา และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีขนาดของมุมเท่ากับ 80.26

หมายความว่า ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบเป็นวัสดุสถานการณ์กระจายตัวไม่ดี (Hydrophobic) และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบเป็นวัสดุ hydrophilic พื้นผิวขรุขระจะมีมุมสัมผัสสูงกว่าทำให้ไม่สามารถกระจายน้ำไม่ได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบนั้นเป็นวัสดุกระจายตัวไม่ดี และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีผิวเรียบขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ค่า $2\theta = 35.467$ 37.686 60.678 และ 74.268 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระนาบ (400) (411) (622) และ (128) จากผลการวิเคราะห์สามารถคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size) และระยะห่างของระนาบ (d-spacing) และ Micro stain

2. การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าที่ 50,000 เท่า 30,000 เท่า และ 10,000 เท่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวเป็นไปทางเดียวกัน เงื่อนไขหลังการอบมีความสม่ำเสมอของพื้นผิวน้อยกว่า

3. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด Cross section ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบมีค่า 1.16 ไมโครเมตร 1.16 ไมโครเมตร และ 1.10 ไมโครเมตร ทั้ง 3 จุด ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีค่า 1.16 ไมโครเมตร 1.18 ไมโครเมตร 1.18 ไมโครเมตร ทั้ง 3 จุด ตามลำดับ

4. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด EDS ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเงื่อนไขก่อนการอบมี %weight 1.30 และมี %Atomic 0.51 และเงื่อนไขหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจะมี %weight 6.56 และมี %Atomic 2.62 ซึ่งค่า %weight และ %Atomic ที่สูงขึ้นนั้นจะบอกถึงการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นด้วย

5. การวิเคราะห์การดูกลืนเป็นไปตามแนวโน้มเนื่องจากการสะท้อนมากกว่าส่งผลให้มีการดูกลืนมีน้อยกว่า

6. การวิเคราะห์การสะท้อน พบว่า เงื่อนไขการอบมีค่า % การสะท้อนที่สูงขึ้น

7. การส่องผ่านของแสงเงื่อนไขก่อนการอบพบว่า การส่องผ่านของแสงในฟิล์มบางนั้นมีค่าไม่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่น

8. การวิเคราะห์การส่องผ่านของเงื่อนไขการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากภาพบอกถึงความเป็นผลึกที่เท่ากันทั้งแผ่น โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน 90% ทั้ง 3 จุด

9. สเปกตรัมการส่องผ่านไปคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามได้โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ดังรูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนการอบจะมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 3.155 eV และเงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 3.235 eV

10. การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีฮอลล์เอฟเฟกต์ ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าภายใต้เงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยเงื่อนไขก่อนการอบ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ส่งผลให้พาหะของฮอลล์ เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น ขอบของเกรนลดลงส่งผลให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะนั้นเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

11. การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ 4 จุด ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าภายใต้เงื่อนไขหลังการอบจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยเงื่อนไขก่อนการอบ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

12. การวิเคราะห์การสั่นของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบ พบพีคที่ 893.77 และ 759.53 (cm^{-1})

13. การวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงระหว่างก่อนการอบและหลังการอบ พบว่า ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบนั้นจะมีค่าความเข้มแสงมากกว่าฟิล์มก่อนการอบซึ่งพบพีคที่ค่ารามานชิฟ 371.11 (cm^{-1})

14. ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบได้ขนาดของมูมเท่ากับ 94.94 องศา และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีขนาดของมูมเท่ากับ 80.26 หมายความว่า ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนการอบเป็นวัสดุสถานการณกระจายตัวไม่ดี (Hydrophobic) และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบเป็นวัสดุ hydrophilic พื้นผิวขรุขระจะมีมุมสัมผัสสูงกว่าทำให้ไม่สามารถกระจายน้ำไม่ได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนทำการอบนั้นเป็นวัสดุกระจายตัวไม่ดี และฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังการอบมีผิวเรียบขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรมีการตรวจเช็คการใช้งานของอุปกรณ์ภายในระบบสุญญากาศก่อนการปลุกฟิล์ม
- 2.ในการทำความสะอาดระบบการปลุกฟิล์มนั้น ควรปฏิบัติตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง
- 3.ควรมีการตรวจเช็คขั้นตอนการเปิดปิดระบบการปลุกฟิล์มก่อนทำการปลุกทุกครั้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ(Principles and Techniques of Instrumental Analysis Spectroscopy). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, มิถุนายน 2554
- [2] รศ.แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ(Principles and Techniques of Instrumental Analysis PART II Chromatography and other). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, มกราคม 2555
- [3] ร.อ.พัฒนา เทพชโลธร. การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ(DEPOSITION OF ALUMINIUM OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING). วิทยานิพนธ์ปริญญา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2548
- [4] นางสาว อริษาสมพงษ์. การวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (PIEZOELECTRIC PROPERTIES MEASUREMENT OF ALUMINUM NITRIDE THIN FILMS). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [5] Katsuhiko Satio. 118 ชาติเคมี ฉบับการ์ตูน. แปลโดย รศ.ดร.ศักดิ์ดา คาควง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2556
- [6] ชัยวิทย์ ศิวาวัชชาโนย. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ (VACUUM PHYSICS AND TECHNOLOGY). สงขลา : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่, 2525
- [7] ไชยวัฒน์ ไชยวัฒน์วิกุล. การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จุ่มเคลือบและสปินเคลือบสำหรับฟิล์มบาง ITO ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [8] ชนะ ประพทธีรวงศ์ และคณะ. การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางอินเดียม-ทินออกไซด์โดยวิธีโซลเจล. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548

ภาคผนวก ก

Meter O-Rings: VITON
Serial Number: 130022

Valve Seat material: VITON
Test Date: 1/14/2010

----- Test Equipment -----

Cal Bench Asset No.: 0126
%RH Meter Asset No.: 0736
DVM(s) Asset No.: 0054

Barometer Asset No.: 0698
Thermometer Asset No.: 0736

----- Comments -----

0-5 VDC OUTPUT/COMMAND SIGNAL
24 VDC INPUT POWER

Calibration Technician: Don Bishop
DON BISHOP

Date: JAN 14, 2010

Verified By: Alisa L. Bishop

Date: Jan 15, 2010

This Cal=Bench was calibrated with NIST-traceable equipment and in conformance with the provisions of ANSI/NCSL Z540 and ISO/IEC Guide 25. Applicable NIST traceable numbers are available upon request.

The accuracy of this equipment is 0.2% of reading.

Suggested recalibration due dates for the following critical items are:

The Cal=Bench System: 12/31/2011 D/A and A/D converters: 12/31/2010

Glass Tube Diameters: 12/31/2011 System Clock: 12/31/2010

Sierra Instruments, Inc.
 5 Harris Court, Bldg. L
 Monterey, CA 93940

File Name : c:\records\RC130022\130022 ✓

Test Date: 1/14/2010

Print Date: 1/14/2010

Due Date: 1/14/2011

Device Under Test

Ambient Conditions

Customer Code: 113308
 Model#: 810C-NR-2-V1-S1
 Serial No.: 130022
 Accuracy: 1.5% FS
 Bypass: LFE
 Orifice: .010

Gas Temperature: 21.3 Degrees C
 Room Temperature: 21.7 Degrees C
 Ambient Pressure: 762.16 mm Hg
 Back Pressure: 1.083 In H2O
 Relative Humidity: 46.18 Percent

Master

STP

Serial Number: None
 Full Scale Flow: 100 SCCM

Temperature: 21.1 Degrees C
 Pressure: 760.00 mm Hg

----- GAS DATA -----

%	Density	N	Cp
100.00	1.782	1.040	0.124

Name

 Argon, Ar

Test Gas: Argon, Ar
 Calculated K Factor is: 1.000

----- DATA -----

Full Scale Flow: 100 SCCM

Voltage VDC	Indicated Flow SCCM	Actual Flow SCCM	Error % Full Scale	Error % Reading
0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
1.259	25.171	25.006	0.2	0.7
2.512	50.244	50.084	0.2	0.3
3.764	75.283	75.105	0.2	0.2
5.017	100.334	100.119	0.2	0.2

----- Device Information -----

Vacuum Test: N/A x 10⁻⁹ Atm cc/sec (He)

Fittings: 1/4" COMP

Inlet Pressure: 1 BAR G

Outlet Pressure: -30" HG G

	Pa N/m ²	bar	mbar	µbar dyn/cm ²	Torr mm Hg	micron µ, mTorr	atm	at	mm WS	psi lbf/inch ²	psf lbf/ft ²
Pa	1	1 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻²	10	7.5 · 10 ⁻⁴	7.5	9.87 · 10 ⁻⁶	1.02 · 10 ³	0.102	1.45 · 10 ⁻⁴	2.09 · 10 ¹
bar	1 · 10 ⁵	1	1 · 10 ²	1 · 10 ⁴	750	7.5 · 10 ¹	0.987	1.02	1.02 · 10 ⁴	14.5	2.09 · 10 ⁵
mbar	100	1 · 10 ⁻²	1	1000	0.75	750	9.87 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ³	10.2	1.45 · 10 ⁻²	2.09
µbar	0.1	1 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ⁻¹	1	7.5 · 10 ⁻⁴	0.75	9.87 · 10 ⁻⁷	1.02 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻²	1.45 · 10 ⁻⁵	2.09 · 10 ⁻²
Torr	1.33 · 10 ³	1.33 · 10 ⁻²	1.33	1330	1	1000	1.32 · 10 ⁻³	1.36 · 10 ³	13.6	1.93 · 10 ⁻²	2.78
micron	0.133	1.33 · 10 ⁻⁴	1.33 · 10 ⁻¹	1.33	1 · 10 ⁻²	1	1.32 · 10 ⁻⁵	1.36 · 10 ⁴	1.36 · 10 ²	1.93 · 10 ⁻⁴	2.78 · 10 ¹
atm	1.01 · 10 ⁵	1.013	1013	1.01 · 10 ⁶	760	7.6 · 10 ²	1	1.03	1.03 · 10 ⁴	14.7	2.12 · 10 ⁵
at	9.81 · 10 ⁴	0.981	981	9.81 · 10 ⁵	735.6	7.36 · 10 ²	0.968	1	1 · 10 ⁴	14.2	2.04 · 10 ⁵
mm WS	9.81	9.81 · 10 ⁻⁵	9.81 · 10 ⁻²	98.1	7.36 · 10 ²	73.6	9.68 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ⁴	1	1.42 · 10 ⁻²	0.204
psi	6.89 · 10 ³	6.89 · 10 ⁻²	68.9	6.89 · 10 ⁴	51.71	5.17 · 10 ¹	5.8 · 10 ⁻²	7.02 · 10 ²	702	1	144
psf	47.8	4.78 · 10 ⁻⁴	0.478	478	0.359	359	4.72 · 10 ⁻⁴	4.87 · 10 ⁴	4.87	6.94 · 10 ⁻³	1

	Pa m ³ /s W	mbar l/s	Torr l/s	atm cm ³ /s	lusec	sccm	slm	Mol/s
Pa m³/s	1	10	7.5	9.87	7.5 · 10 ³	592	0.592	4.41 · 10 ⁻⁴
mbar l/s	0.1	1	0.75	0.987	750	59.2	5.92 · 10 ⁻²	4.41 · 10 ⁻³
Torr l/s	0.133	1.33	1	1.32	1000	78.9	7.89 · 10 ⁻²	5.85 · 10 ⁻³
atm cm³/s	0.101	1.01	0.76	1	760	59.8	5.98 · 10 ⁻²	4.45 · 10 ⁻³
lusec	1.33 · 10 ⁻⁴	1.33 · 10 ⁻³	10 ⁻²	1.32 · 10 ⁻³	1	7.89 · 10 ⁻²	7.89 · 10 ⁻⁴	5.86 · 10 ⁻³
sccm	1.69 · 10 ⁻²	1.69 · 10 ⁻²	1.27 · 10 ⁻²	1.67 · 10 ⁻²	12.7	1	10 ⁻²	7.45 · 10 ⁻²
slm	1.69	16.9	12.7	16.7	1.27 · 10 ¹	1000	1	7.45 · 10 ⁻⁴
Mol/s	2.27 · 10 ²	2.27 · 10 ¹	1.7 · 10 ¹	2.24 · 10 ²	1.7 · 10 ¹	1.34 · 10 ²	1.34 · 10 ²	1

	cm	inch	ft	K	°C	°F
cm	1	0.394	0.033	K	1	X-273.15
inch	2.54	1	0.083	°C	°C+273.15	9/5 K-459.67
ft	30.48	12	1	F	5/9 (F-32)	9/5 °C+32

°C	F
100	212
80	176
60	140
40	104
20	68
0	32
-20	-4
-40	-40

ภาคผนวก ข

Instruction Manual

Active Gauge Controller

Description	Item Number
AGC - SINGLE DISP, NO RS232, 3 HEAD	D386-55-000
AGC - SINGLE DISP, NO RS232, 6 HEAD	D386-54-000
AGC - SINGLE DISP, NO R232, CM VER	D386-53-000
AGC - SINGLE DISP, RS232, 3 HEAD	D386-52-000*
AGC - SINGLE DISP, RS232, 6 HEAD	D386-51-000*
AGC - SINGLE DISP, RS232, CM VER	D386-50-000*
AGC - TRIPLE DISP, RS232, 3 HEAD	D386-62-000*
AGC - TRIPLE DISP, RS232, 6 HEAD	D386-61-000*
AGC - TRIPLE DISP, RS232, CM VER	D386-60-000*

*Supplementary Manual**

Active Gauge Controller RS232 Option	D386-52-880
--------------------------------------	-------------



Edwards High Vacuum International
Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 2LW, UK
Telephone: (01293) 526844 Fax: (01293) 533453
<http://www.edwards.boc.com>

Active Inverted Magnetron Gauge
Aktiv-Penning-Meßröhren
Jauge active Magnétron inverse

<i>Description</i>	<i>Item Number</i>
<i>Beschreibung</i>	<i>Bestellnummer</i>
<i>Decsription</i>	<i>Numéro de Référence</i>
AIM-S-NW25	D146-41-000
AIM-SL-NW25	D146-44-000
AIM-X-NW25	D146-42-000
AIM-XL-NW25	D146-45-000



Edwards High Vacuum International

Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 2LW, UK

Telephone: (01293) 528844 Fax: (01293) 533453 Telex: 87123 Edlivac G

D021-71-885

Issue D

Active Pirani Gauge
Aktiv-Pirani-Meßröhren
Jauge active Pirani

<i>Description</i> <i>Beschreibung</i> <i>Description</i>	<i>Item Number</i> <i>Bestellnummer</i> <i>Numéro de Référence</i>
APG-M-NW16 AL	D021-71-000
APG-M-NW25 ST/ST	D021-72-000
APG-L-NW16 AL	D021-73-000
APG-L-NW25 ST/ST	D021-74-000
APG-M-NW16 ST/ST	D021-75-000
APG-M-150D ST/ST	D021-76-000
APG-L-NW16 ST/ST	D021-77-000
APG-L-150D ST/ST	D021-78-000
APG-MP-NW25 ST/ST	D021-82-000
APG-MP-NW16 ST/ST	D021-85-000
APG-MP-150D ST/ST	D021-86-000



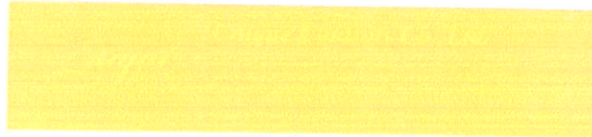
Edwards High Vacuum International

Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 2LW, UK

Telephone: +44 (0) 1293 528844 Fax: +44 (0) 1293 533453

<http://www.edwards.boc.com>

Sierra 810 Series
Mass-Trak[®]
Mass Flow Instruments



Instruction Manual

Part Number: IM-81

Revision D.2 07/07



CORPORATE HEADQUARTERS

5 Harris Court, Building L Monterey, CA 93940
Phone (831) 373-0200 (800) 866-0200 Fax (831) 373-4402
www.sierrainstruments.com

EUROPE HEADQUARTERS

Bijlmansweid 2 1934RE Egmond aan den Hoef
The Netherlands
Phone +31 72 5071400 Fax +31 72 5071401

ASIA HEADQUARTERS

Rm. 618, Tomson Centre, Bldg A, 188 Zhang Yang Road
Pu Dong New District, Shanghai, P.R.China
Phone: + 8621 5879 8521 Fax: +8621 5879 8586

Quick-Installation Instructions for 810 Controllers

1. If equipped with a black nylon flow body, **DO NOT OVERTIGHTEN** your fittings or pipes when installing into the hexed-portions of the flow body. Use two wraps of Teflon tape on each of your fittings, hold the plastic hexagonal nuts with a wrench, and tighten your fittings no more than one (1) turn past hand tight.
2. **NEVER TEST FOR LEAKS WITH LIQUID LEAK DETECTOR.** If liquid seeps into the electronics or the sensor compartment below, the instrument may be damaged. Use a pressure-decay test instead.
3. **Install an appropriate in-line filter upstream** if the gas contains any particulate matter or condensed moisture. (A 15-micron particulate filter for full-scale flows up to 30 liters/minute is recommended, 30 micron for flows above 30).
4. **Mount with a horizontal gas-flow.** This orientation is preferable unless the factory calibration was specifically performed for a vertical flow. Consult the "Comment" section of your calibration certificate. (Horizontal flow is assumed unless vertical flow upward or downward is specified).
5. **DO NOT APPLY POWER TO THE OUTPUT LOOP** on units equipped and calibrated for a 4-20 mA output signal. This is NOT a loop-powered device. Damage will occur.
6. **Confirm that the DIPswitch settings** are in the correct position for your chosen setpoint source by removing the front access panel. (The DIPswitches are located in the left of the opening – see the back of this card or Chapter 3 of the Operator's Manual for a diagram).
7. **Wire the instrument** per the diagram on the back of this card, or the Operator's Manual, Chapter 2. Connect the Setpoint signal wire if an external source is to be used to control flow. (Note: In External Source mode, if no wire is connected to the Setpoint pin, the valve may float open).
8. **Apply the gas** to the inlet at the recommended inlet pressure as listed on the label and the calibration certificate. On a controller, confirm that there is no gas flowing through it with a zero setpoint and under the operating pressure. (If there is a flow, consult the valve adjustment procedure found in the Operator's Manual, Chapter 4).
9. **Apply power and verify or adjust the zero setting** after allowing a 15-minute warm-up period. The zero adjustment potentiometer is accessed through the upper-right hole in the front panel. Adjust until the reading on the display is within 0.5% of the full-scale value. **For instruments without a display**, monitor the output signal and adjust **DOWNWARD** from a positive output, stopping at 4 mA (a V4 instruments) or 15 mV (V1 instruments). (See the Operator's Manual, Chapter 3).
10. **DO NOT LEAVE A SETPOINT APPLIED TO A CONTROLLER WHEN NO GAS IS AVAILABLE TO THE INLET FITTING.** The control circuit will apply the maximum voltage to the valve coil resulting in eventual overheating. Damage may occur. (Instead, consult the Operator's Manual, Chapter 3, for use of the "Valve Override" feature).
11. An **ANNUAL factory evaluation and calibration** is recommended.

Email Technical Support: Service@sierrainstruments.com

Website Self Service: www.sierrainstruments.com (Click "Sales & Service" Button)

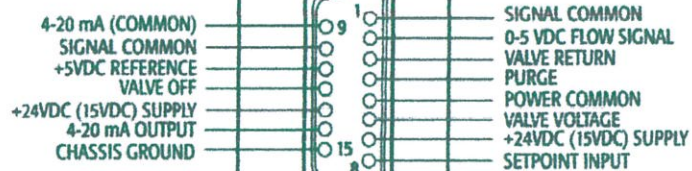
Phone Technical Support:

SIERRA FACTORY: 800-866-0200 OR 831-373-0200

SIERRA EUROPE: + 31 72 5071 400

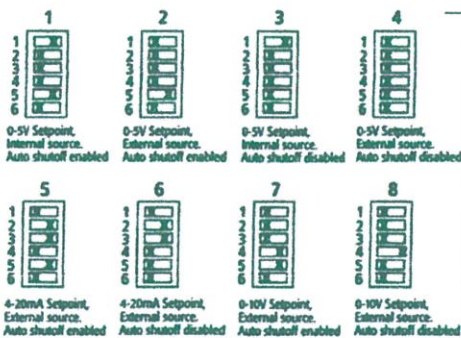
CABLE COLORS

4-20 mA output	0-5 VDC output	PIN #	FUNCTION
Green	Green	1	Signal Common
--	White	2	0-5 VDC Flow Signal* 0-10 VDC Optional
Violet	Violet	3	Valve Return
Gray	Gray	4	Purge
Orange	Orange	5	Power Common
--	--	6	Valve Monitor
Red	Red	7	+24VDC (15VDC) Supply
Brown	Brown	8	Setpoint Input
Blue	--	9	4-20mA (Common)
--	Black	10	Signal Common
--	--	11	+5VDC Reference
Yellow	Yellow	12	Valve Off
--	--	13	+24VDC (15VDC) Supply
White	--	14	4-20mA Output
Shield	Shield	15	Chassis Ground

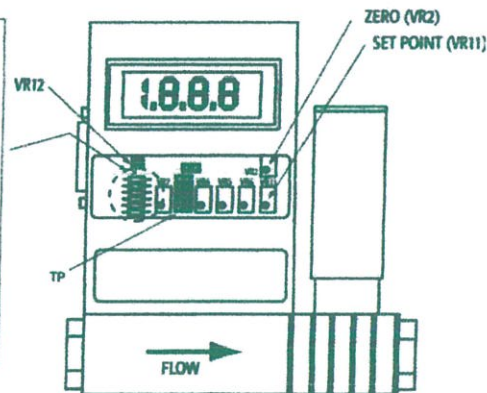


Note: Pins 1, 3, 5, 9 and 10 are all tied together internally. However it is highly recommended that at least one "signal common", one "power common" and the "valve return" pins be connected to the power supply common via separate wires, so that no ground loops are introduced, (especially on cables longer than ten feet)

DIP Switch Settings



Note: DIP Switch 6 has no function at this time



BE625P (BE1113)
Integrated Plasma Driver

Operation Manual





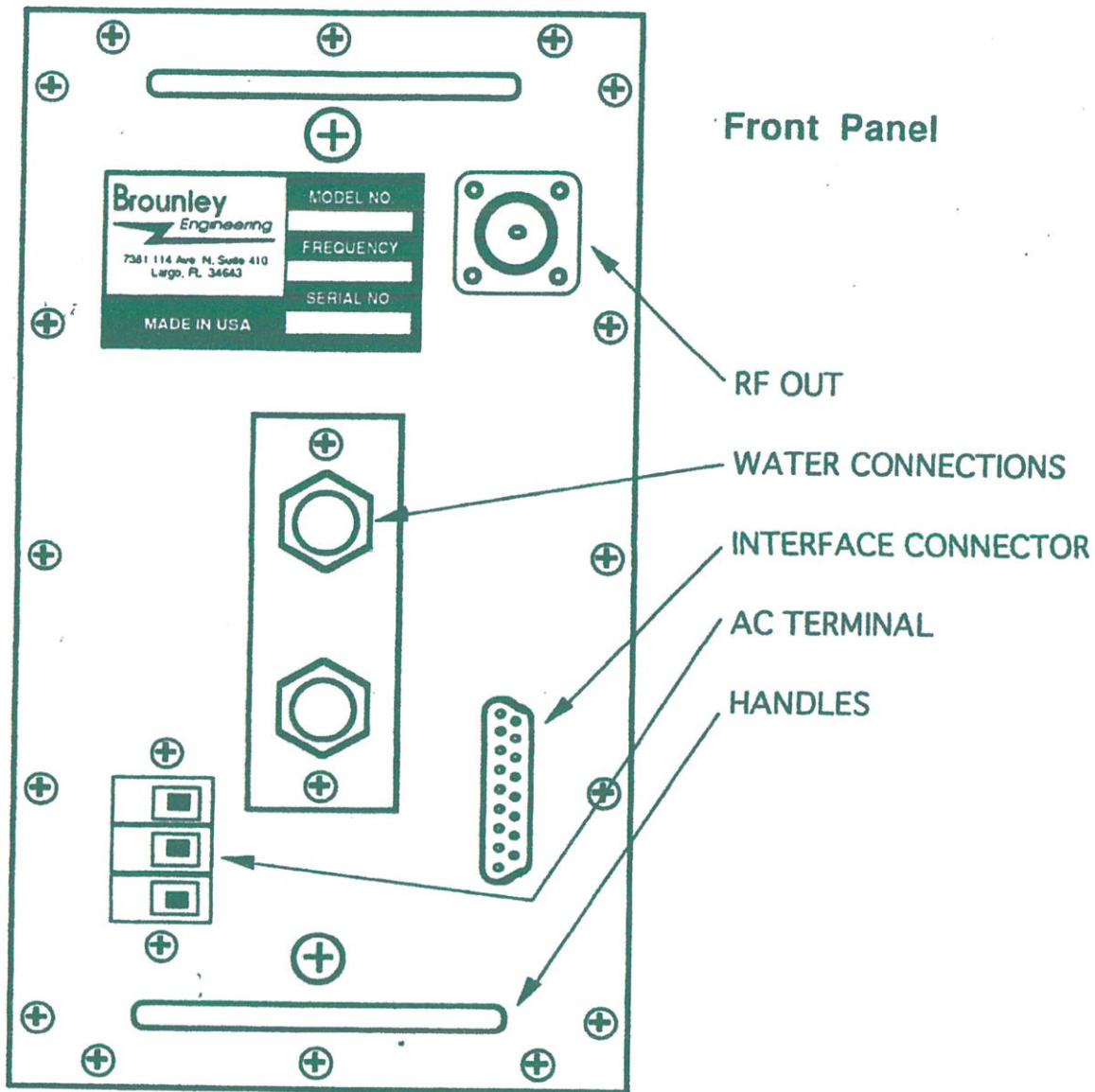
BE625P (BE1113) Integrated Plasma Driver Operation Manual

Introduction

The BE625P Power Generator is a solid state, fully integrated power source designed to handle a wide variety of plasma etching applications. It will provide a maximum power output of 625W into a 50 ohm impedance. The model you have selected has been customized to your frequency and interface requirements.

Specifications

Rated Power Output	625W into 50 ohms
Mismatched Protection	Protected for VSWR > 2:1 by folding back the forward power when the reflected power exceeds 100W.
Frequency/Stability	13.56MHz \pm .005%
Harmonics	> 40dBc
Spurious Level	> 50dBc into any condition of mismatch.
Power Control Input	0-5VDC into 10K Ω Internally limited to 625W
Power Setpoint Stability & Repeatability	\pm 5% over 12.5W-625W power control range
Power Control Range	17dB (12.5W-625W)
AC Power	110 - 220VAC \pm 10% single phase at 11A max. Power factor corrected to .98
Cooling	Water flow rate of 1.5gpm at inlet temperature of 30°C max. Max. ambient temperature of 35°C
Size and Weight	5" X 9" X 12", approx. 18 lbs. (8 kg)
Overcurrent Protection	Hic-cup current limiting for current exceeding the normal maximum current by 25%. Will not activate under any normal operating conditions including mismatched loads. Indicates a need for service.



25 pin submin. D connector Function

- | | |
|----|--|
| 1 | +15V - limited to 25mA max. RL = 600W min. |
| 2 | REFL. PWR. Voltage level depends on VSWR: $V_r + 1/1 - \frac{V_r}{V_f}$ Load Impedance = 10KΩ min. |
| 3 | FWD. PWR. 0-5V Load Impedance = 10KΩ min. |
| 4 | D.C.P.S. ENABLE +5V "on", 0V "off" into 10KΩ |
| 5 | POWER CONTROL 0-5V RL = 10KΩ |
| 6 | GROUND |
| 7 | SPARE |
| 8 | SPARE |
| 9 | SPARE |
| 10 | SPARE |
| 11 | SPARE |
| 12 | GROUND |

Safety

The BE625P should never be operated in a manner inconsistent with the procedures and specifications documented in this manual. Improper operation may cause personal injury or damage to the unit and will void the warranty. Brounley Associates assumes no responsibility for any unit operated improperly or repaired/modified by personnel not authorized by Brounley to service the BE625P.

The unit is designed to be laid on any side or rack mounted. If the unit must be mounted or operated with the front panel facing upwards, special care should be used to ensure a proper water connection is made with no leakage. Failure to do so may result in damage to the unit.

Installation

Initial Inspection

If damage to the shipping carton is evident, request the carrier's agent be present when the unit is unpacked. Check the unit visually for damage. Retain the shipping carton and packing material should a return become necessary.

NOTE: If the unit shows signs of damage or fails to meet any of the specifications found in this manual, please contact Brounley Associates immediately. If you are returning a unit to us, use the original shipping carton and packing materials if possible.

Placement

Lay the unit on one of its sides or place it in a rack mounting cabinet (rack-mount models only).

Connecting the Water Chiller

The BE625P requires two 1/4" NPT male water connections. The chiller must be set to 30°C at a flow rate of 1.5 gpm. Secure fittings to the generator using Teflon pipe tape or pipe dope and check for leaks before proceeding.

Distilled water should be used to eliminate possible build-up of corrosion or scale inside the heatsink tubing, thereby restricting water flow. If tap water with a high mineral content must be used, it may be necessary to periodically flush the unit by pumping a commercial lime or scale removing agent through the unit.

Connecting the Interface

Connect your system interface to the BE625P interface using a standard 25 pin Sub D connector cable (male/female). The individual pin functions can be found in the "Specifications" section at the beginning of this manual as well as in the RF Control schematic. A remote control unit is available from Brounley Associates if you wish to operate the unit outside of your system.

Connecting the RF Output

Connect the unit to your load. The BE625P generator requires a type "N" male 50 ohm coaxial cable connector for connection to the load. Use a Teflon RG393A/U cable or equivalent.

Connecting the AC Line

The 110/220V AC line is connected to the three feedthru terminal blocks on the front panel of the BE625P generator. The center terminal block is connected to ground. The other two terminals are interchangeable. Be sure no bare wire is exposed and connections are secure and use only a well insulated cable rated for use at 110/220V, 15A.

Operating the Generator

Turn on Procedure

- 1) Turn on the water. Ensure that proper flow has been established before proceeding.
- 2) Plug in AC line power cable.
- 3) Turn on the +5V to enable the DC Power Supply.
- 4) Adjust the output power to the desired level by applying the correct voltage to the Power Control input. Use the Power output vs. DC Control voltage data provided in this manual.

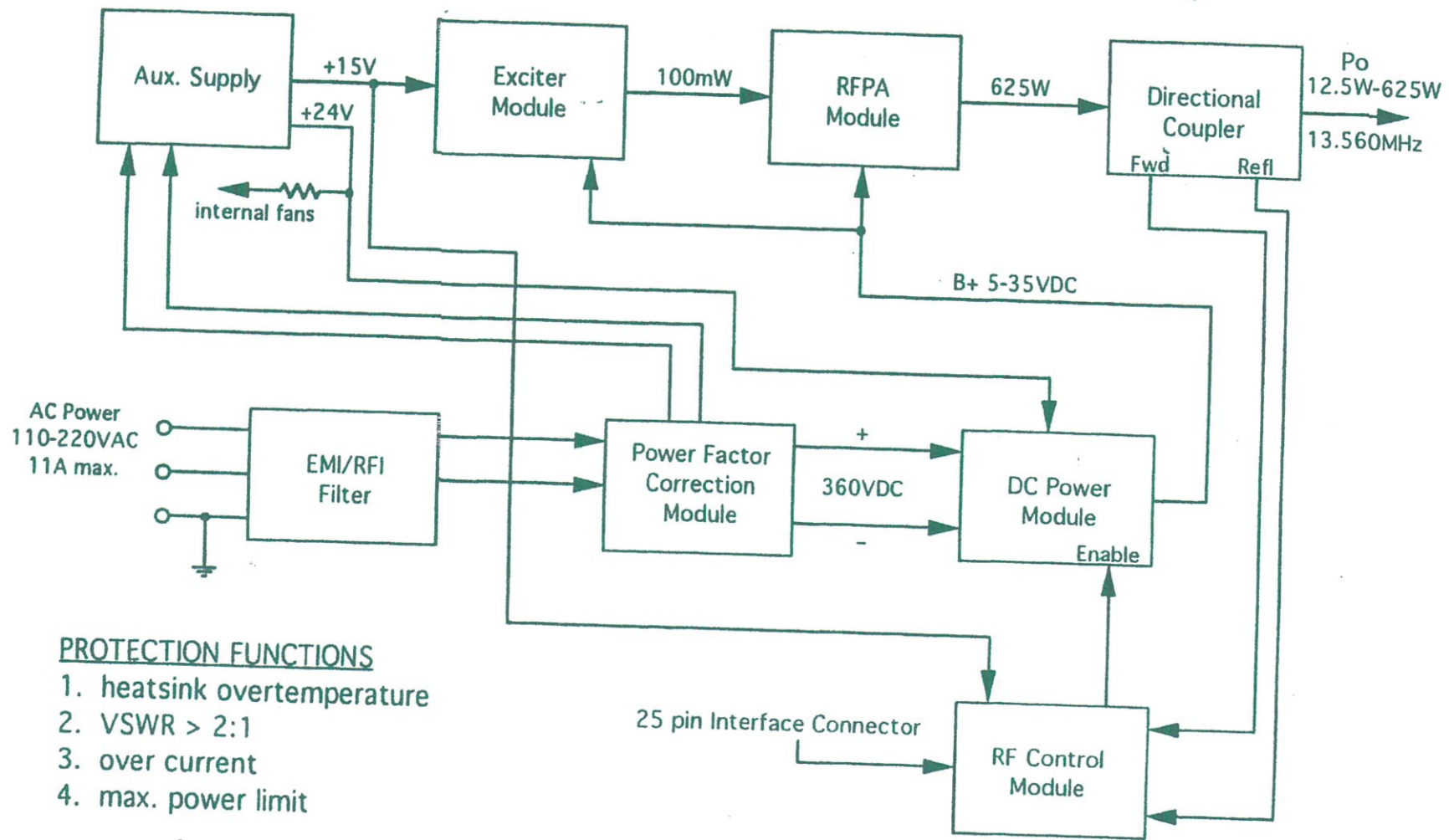
The Forward Power Monitor voltage (V_f) gives the same voltage reading as the DC Control voltage and can therefore be used to monitor the power output of the unit. It will vary into a VSWR however as dictated by the foldback protection when the VSWR exceeds 2:1.

Shut Down Procedure

- 1) Turn off the unit by returning the DC Power Supply enable to 0V.
- 2) Disconnect the AC line if the unit is to be left off for an extended period of time.
- 3) Turn off the water.

NOTE: Do not leave the water on for extended periods of time with the RF disabled. This can cause a build up of condensation inside the unit housing.

BE625 Block Diagram

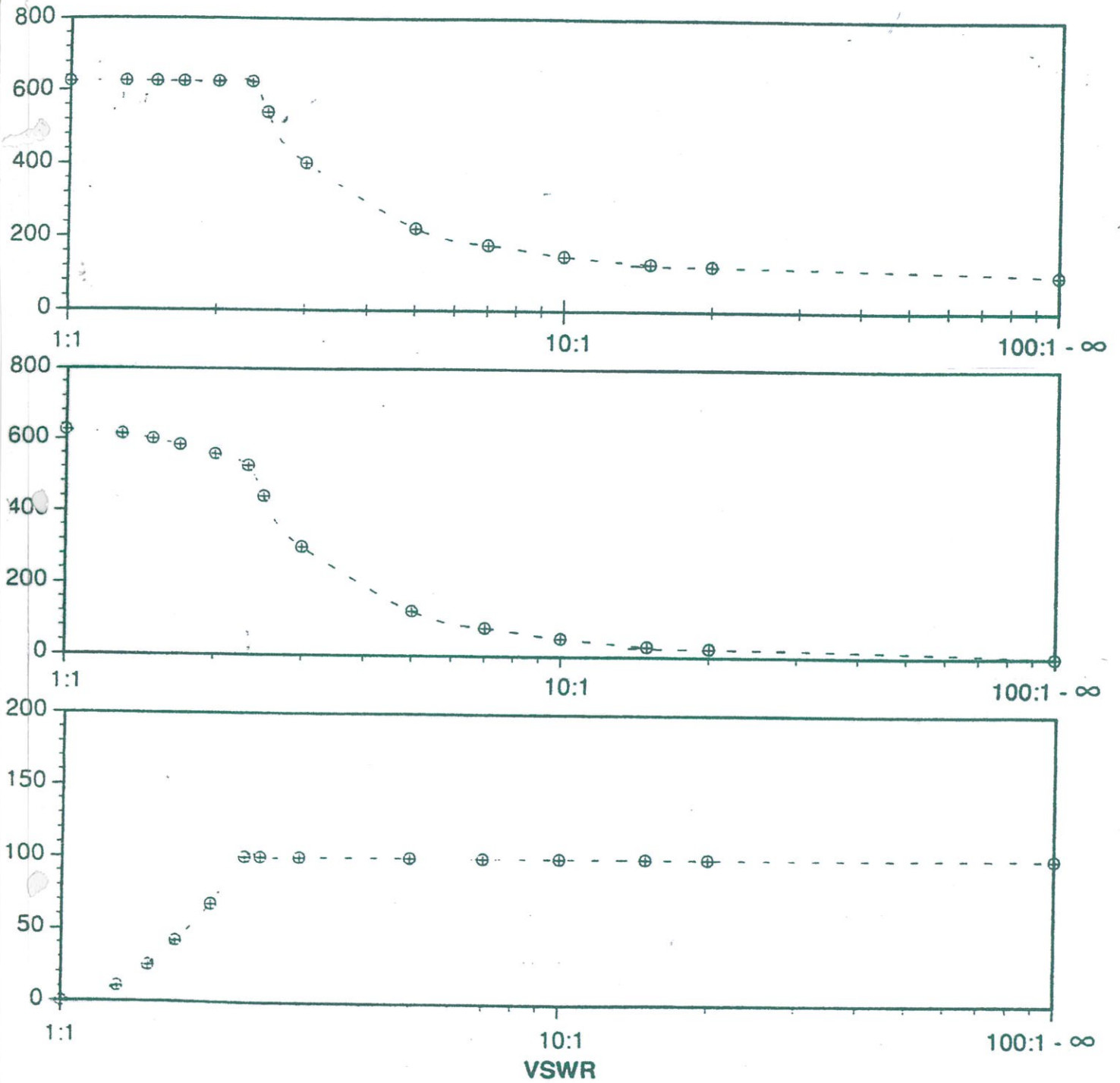


PROTECTION FUNCTIONS

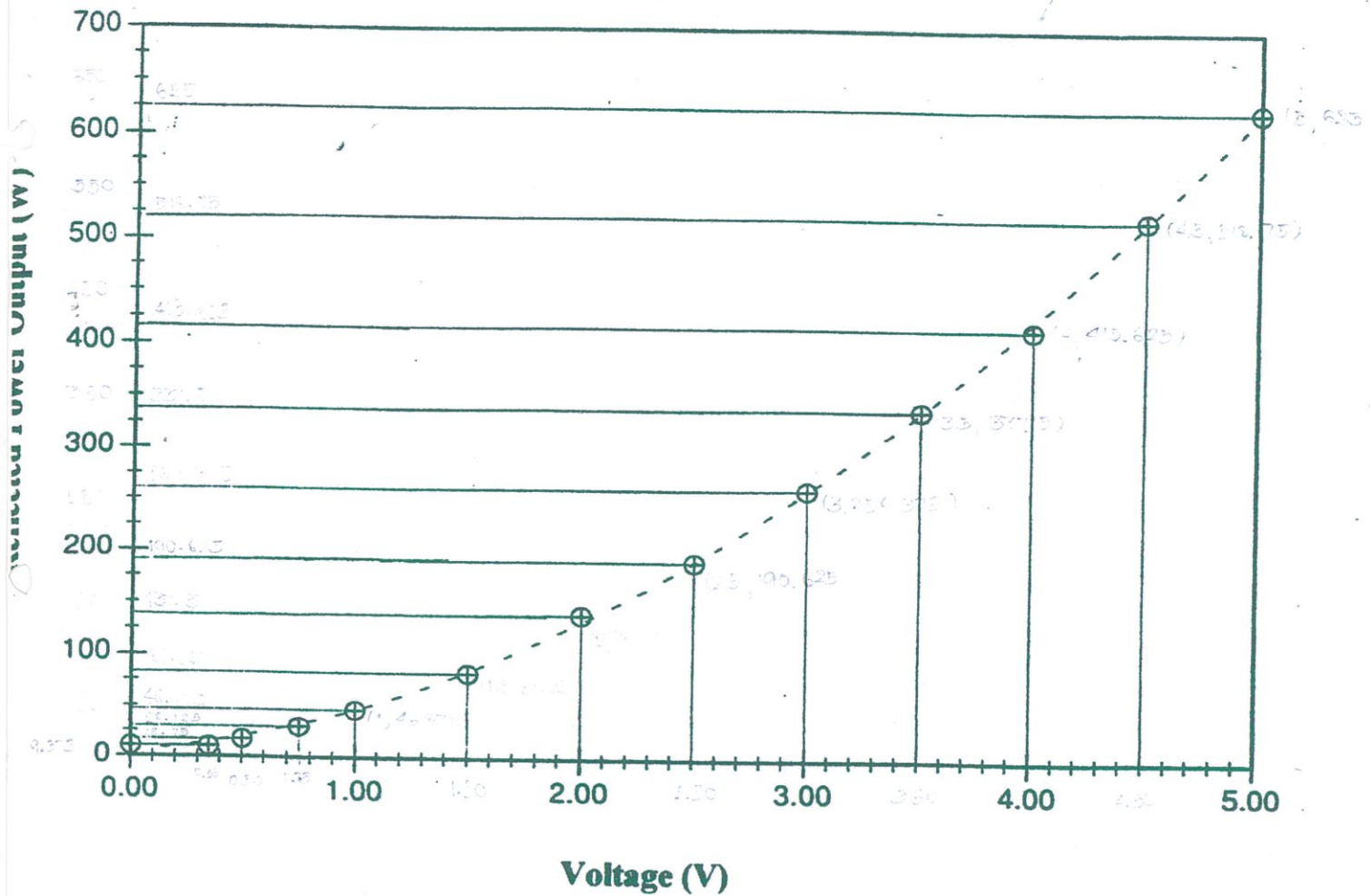
1. heatsink overtemperature
2. VSWR > 2:1
3. over current
4. max. power limit

BE625 Forward, Load & Reflected Power Vs. VSWR

Power Max. = 100W



REFLECTED POWER VS. VOLTAGE OUTPUT



Power Output Vs. Control Voltage

