

การพัฒนาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์
บนโพลีไดเมทิลไซลอกเซน ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
เพื่อใช้งานด้านเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น

FABRICATION OF TaO FILM ON
POLYDIMETHYLSILOXANE SUBSTRATE USING
DC MAGNETRON SPUTTERING TOWARD A FLEXIBLE
OPTICAL SENSOR



สหกิจศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์
บนโพลีไดเมทิลซิลอกเซน ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
เพื่อใช้งานด้านเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น
FABRICATION OF TaO FILM ON
POLYDIMETHYLSILOXANE SUBSTRATE USING
DC MAGNETRON SPUTTERING TOWARD A FLEXIBLE
OPTICAL SENSOR



T149484

ศศิภรณ์ บุญวิจิตร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149484
วันเดือนปี... 8 ส.ค. 2561

b. 12984911
i.

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิลิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิลิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2559 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF TaO FILM ON
POLYDIMETHYLSILOXANE SUBSTRATE USING
DC MAGNETRON SPUTTERING TOWARD A FLEXIBLE
OPTICAL SENSOR



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

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา การพัฒนาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์บนโพลีไดเมทิลไซลอกเซนด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริงเพื่อใช้งานด้านเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น

Fabrication of Tao Film on Polydimethylsiloxane Substrate Using DC Magnetron Sputtering Toward a Flexible Optical Sensor

ชื่อนักศึกษา นางสาวศศิภรณ์ บุญวิจิตร รหัสนักศึกษา 56051217

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.มติ ห่อประทุม
ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง

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

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	
ดร.มติ ห่อประทุม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การพัฒนาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์บนโพลีไคเมทิลไซลอกเซนด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงเพื่อใช้งานด้านเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศศิภรณ์ บุญวิจิตร รหัสนักศึกษา 56051217
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.มติ ห่อประทุม ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง

บทคัดย่อ

ผู้วิจัยทำการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ลงบนโพลีไคเมทิลไซลอกเซนที่มีเกรตติง 1 มิติ (GMR) โพลีไคเมทิลไซลอกเซนที่ไม่มีเกรตติง แผ่นซิลิกอนและแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอร์ริง โดยปรับความดันในการเคลือบฟิล์มบางที่ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr เพื่อดูคุณสมบัติทางแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรสโคปีอิลิปโซมิเตอร์เพื่อดูค่าความหนา ค่าดัชนีหักเหทางแสงของฟิล์มบาง และศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากนั้นนำมาวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านทางแสงในกรณีที่แตกต่างกัน จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบคุณสมบัติโกลด์โหมตเรโซแนนซ์ โดยการจัตุอุปกรณ์ทดลองเพื่อทำการหมุนและโค้งงอชิ้นงาน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเรโซแนนซ์เมื่อชิ้นงานมีการหมุนและโค้งงอไป

คำสำคัญ : โกลด์โหมตเรโซแนนซ์ โพลีไคเมทิลไซลอกเซน ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

Title	Fabrication of TaO Film on Polydimethylsiloxane Substrate Using DC Magnetron Sputtering Toward a Flexible Optical Sensor
Students	Miss.Sasiporn Boonwijit Student ID 56051217
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst. Prof. Dr. Nathaporn Promros
Co-advisor	Dr. Mati Horpratum Dr. Sakunkan Bungrung

Abstract

This project aims to develop a flexible optical sensor that can be wearable or integrated with other system easily. The sensing scheme is by detection of changes in resonance signal, called Guided Mode Resonance (GMR), respect to the changes in shape of the sensor. This can be applied in many applications such as pressure sensor, bending sensor or shape sensor, for instance. The GMR device comprises of a low refractive index subwavelength grating coated with a high refractive index film. Due to high flexibility, heat resistance, non-toxic and biocompatibility, polydimethylsiloxane (PDMS) is utilized in this work for fabrication of a grating substrate. Then, tantalum Oxide (TaO) film having high refractive index of 2.1 and low absorption in visible spectrum is presented for fabrication of high refractive index film using pulsed dc reactive magnetron sputtering. As tantalum Oxide (TaO) film has lower surface tension than PDMS, it is challenging to optimize a TaO film deposition in order to ensure the film quality with minimum crack and the resonance signal is detectable. To demonstrate the sensor functionality, the optical measurement is also performed using an in-house optical setup to measure the resonance spectrum of the fabricated GMR flexible sensor under bent with different shape.

Keywords : Guided Mode Resonance, polydimethylsiloxane, tantalum Oxide film

กิตติกรรมประกาศ

สหกิจศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายๆ ท่าน ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้แนวความคิด รวมทั้งคำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ทั้งในด้านการเรียนและงานวิจัย ตลอดจนช่วยเหลือและแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ในการเขียนเล่มสหกิจศึกษา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม และ ดร.วิฑูร ยินดีสุข ภาควิชา ฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆ เรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนักวิจัยห้องปฏิบัติการโฟโตนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ ได้แก่ ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นอาจารย์ร่วมที่ปรึกษา จัดหาอุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงาน รวมถึงให้ข้อเสนอแนะ ชี้จุดสำคัญๆ และให้คำปรึกษา ก่อให้เกิดแนวคิดและความเข้าใจในงานวิจัยครั้งนี้มากขึ้น อีกทั้งยังแก้ไขและปรับปรุงเล่มสหกิจ ศึกษาให้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ดร.มติ ท่อประชุมและคณะวิจัย ห้องปฏิบัติการฟิล์มบางทางแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาในการสอนเทคนิค และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางโดยเครื่องสเปคโตรริงและการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วย เทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีและเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รวมถึงคอยชี้แนะและให้ คำแนะนำ แก้ไขในเรื่องงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการ ดำเนินงานวิจัยและเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การ สนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในงานวิจัย ประโยชน์อันใดที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่าน จึงใคร่ขอกล่าว ขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ศศิภรณ์ บุญวิจิตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สมบัติของธาตุและสารประกอบ	4
2.1.1 ยางซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes: PDMS)	4
2.1.2 แทนทาลัมออกไซด์ (Tantalum Oxide)	4
2.2 ทฤษฎีของแสง	5
2.2.1 โพลาริเซชันของแสง (Polarized of light)	5
2.2.2 การหักเหของแสง (Refraction of light)	6
2.2.3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmittance) การดูดกลืน (Absorption) และการสะท้อนของแสง (Reflectance)	6
2.2.4 เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating)	7
2.2.5 ท่อนำคลื่น (Waveguides)	8
2.2.6 Guide Mode Resonance (GMR)	9
2.3 เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบาง	11
2.3.1 การเคลือบด้วยไอเคมี	12
2.3.2 การเคลือบด้วยไอทางกายภาพ	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง	13
2.4.1 หลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของสปีดเตอริง	13
2.4.2 โกล์วติสซาร์จ	15
2.4.3 ค่าyieldสปีดเตอริง	17
2.4.4 ลักษณะของอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ได้จากสปีดเตอริง	21
2.4.5 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	21
2.4.6 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการติสซาร์จ	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็น เกรตติ้ง 1 มิติบน PDMS	27
3.1.1 สารเคมี	27
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.2 สารเคมีและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (TaO) โดยวิธีสปีดเตอริง	27
3.2.1 สารเคมี	27
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.3 ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับที่มีเกรตติ้ง 1 มิติบน PDMS	29
3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (TaO) โดยวิธีการสปีดเตอริง	32
3.5 การวัดสมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	38
3.5.1 วัดค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วย เครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์	38
3.5.2 กล้องจุลทรรศน์	38
3.5.3 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	39
3.6 ทดสอบคุณสมบัติโกดโหมเตรโซแนนซ์	40
3.6.1 ทดสอบโดยการหมุน (Rotation)	40
3.6.2 ทดสอบโดยการโค้งงอ (Bending)	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการปรับค่าความดันในการเคลือบฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์	43
4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	53
4.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลค่าการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง	56
4.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติโกลด์โหมดเรโซแนนซ์ทางแสง	57
4.5.1 ทดสอบโดยการหมุน	57
4.5.2 ทดสอบโดยการโค้งงอ	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	3
2.1 แสดงค่าyield สปีดเตอริงของโครงสร้างผลึกของธาตุชนิดต่างๆ	19
2.2 ระนาบของผลึก	20
3.1 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 3 mTorr	35
3.2 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 5 mTorr	35
3.3 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 7 mTorr	36
3.4 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 10 mTorr	36
3.5 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 15 mTorr	37
3.6 फिल्मบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 30 mTorr	37
4.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอน โดยใช้แบบจำลองจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ที่มีค่าความดันในการเคลือบต่างกัน	51
4.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยใช้แบบจำลองจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ที่มีค่าความดันในการเคลือบต่างกัน	51
4.3 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบาง TaO ที่เคลือบลงบน PDMS ที่มีเกรตติง 1 มิติ ความดันในการเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ โดยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 5 เท่า	53
4.4 แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏโดยการหมุน	57
4.5 แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏโดยการโค้งงอ	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้าง Flexible GMR	1
2.1 ยางซิลิโคนหรือโพลีไคเมทิลไซลอกเซน	4
2.2 โครงสร้างผลึกของธาตุแทนทาลัมออกไซด์	4
2.3 กรณีส่องโพลาริซ์แบบต่างๆ	5
2.4 ก) เป็นการเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางชนิดแรกที่เป็นอากาศไปยังตัวกลางชนิดที่สองคือแก้ว และ ข) เป็นการเคลื่อนที่ของแสงจากตัวกลางชนิดแรกคือแก้วไปยังตัวกลางชนิดที่สองคืออากาศ	6
2.5 แสดงภาพเมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุ	6
2.6 การเลี้ยวเบนเนื่องจากเกรตติง	8
2.7 แสดงตกกระทบระหว่างรอยต่อสองชนิดที่มีดัชนีหักเห n_2 และ n_1 เมื่อ $n_2 < n_1$	9
2.8 แสดงแสงหักเหเบนเข้าหาเส้นปกติ	9
2.9 เวบไกต์	10
2.10 การเลี้ยวเบนของเกรตติง 1 มิติ	10
2.11 โครงสร้างของ GMR	11
2.12 แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ทางแสง	11
2.13 แสดงแผนผังอย่างง่ายของระบบ CVD ซึ่งอาศัยความร้อน	12
2.14 แผนภาพกระบวนการการสร้างฟิล์มบางด้วยไอทางกายภาพ	13
2.15 รูปการเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า	13
2.16 ผลของการชนระหว่างไอออนพลังงานสูงกับผิวเป้าสารเคลือบ	14
2.17 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบ PVD แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	15
2.18 โครงสร้างของการโกลด์ดิซซาร์จ	16
2.19 ค่ายึดกับพลังงานจลน์ของไอออนในการสปัตเตอร์ริงธาตุต่างๆ	18
2.20 อัตราส่วนค่ายึดสปัตเตอร์ริงของธาตุต่างๆ แปรตามมุมตกกระทบ θ ของไอออน	20
2.21 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	23
2.22 ความต่างศักย์ของการดิซซาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในหัวอิเล็กโทรดโคแอคเซียทรงกระบอก	24
3.1 ไตอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	26
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	28
3.3 ก) สารเคมีและอุปกรณ์ในการเตรียมสาร ข) ชั่งสารในปริมาตรที่ต้องการ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 เครื่องดูดฟองอากาศ	29
3.5 กระจกสไลด์ที่มีรูปแบบของเกรตติง 1 มิติในงานแก้ว	30
3.6 ตู้ดูดฟองอากาศ	30
3.7 (ก) นำงานแก้วที่มีสารเข้าตู้อบ (ข) ปรับอุณหภูมิของตู้อบและตั้งเวลา	31
3.8 ชั้นงานที่ตัดออกจากแม่แบบ	31
3.9 เครื่องสปัตเตอร์	32
3.10 แผ่นรองรับที่เป็นเกรตติง 1 มิติบน PDMS แผ่นซิลิกอน กระจกสไลด์และ PDMS ที่ไม่มีเกรตติง 1 มิติ บนที่วางแผ่นรองรับ	33
3.11 ภาพขณะสุญญากาศและภาพขณะวางแผ่นรองรับ	33
3.12 เครื่องสเปกโตรสโคปีอีลิปโซมิเตอร์	38
3.13 กล้องจุลทรรศน์ชนิดพื้นหลังสว่าง	39
3.14 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	40
3.15 เซตอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติโกลด์โหนดเรโซแนนซ์โดยการหมุน	40
3.16 เซตอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติโกลด์โหนดเรโซแนนซ์โดยการโค้งงอ	41
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับ เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง (นาที)	43
4.2 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 3 mTorr	45
4.3 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 5 mTorr	45
4.4 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 7 mTorr	46
4.5 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 10 mTorr	46
4.6 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 15 mTorr	47
4.7 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 30 mTorr	47
4.8 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 3 mTorr	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 5 mTorr	48
4.10 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 7 mTorr	49
4.11 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 10 mTorr	49
4.12 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 15 mTorr	50
4.13 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 30 mTorr	50
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับค่าดัชนีหักเหทางแสง (n)	52
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับระยะห่างระหว่างรอยแตกกว้างของฟิล์มบางเฉลี่ย (mTorr)	55
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกับความดันในการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นกระจกสไลด์และPDMS ที่ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ที่ความยาวคลื่น 550 nm	56
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 0 องศา	59
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 2 องศา	60
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 4 องศา	60
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 6 องศา	61
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 8 องศา	61
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 10 องศา	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงตกกระทบชิ้นงาน(เฉลี่ยลำแสงทั้ง 3 ลำ) กับจำนวนของพิเซลที่เปลี่ยนแปลงไป	63
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 0 องศา	66
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 10 และ 10 องศา ตามลำดับ	67
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 20 และ 10 องศา ตามลำดับ	67
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 20 และ 12 องศา ตามลำดับ	68
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 140 และ 16 องศา ตามลำดับ	68
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 142 และ 6 องศา ตามลำดับ	69

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PDMS	Polydimethylsiloxanes
GMR	Guided mode resonance
Sccm	Standard cubic centimeters per minute
SE	Spectroscopic ellipsometry



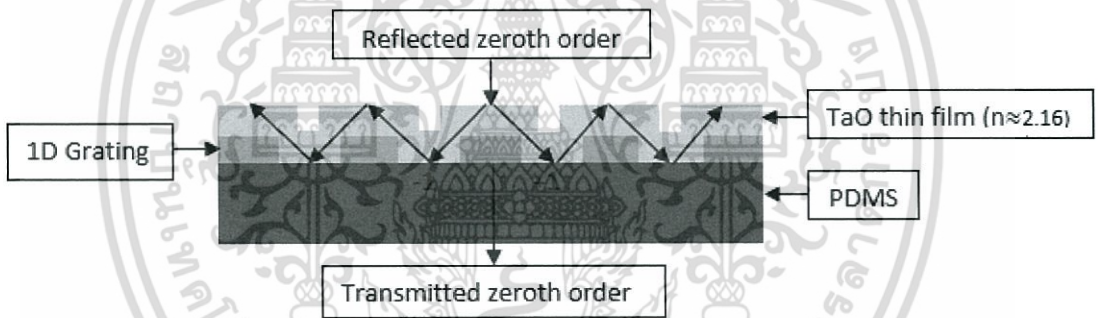
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีฟิล์มบางเริ่มมีบทบาทกับมนุษย์เป็นอย่างมาก จะเห็นได้จากการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ในการใช้งานด้านต่างๆ เช่น การเคลือบฟิล์มบางแสงในเส้นใยนำแสงสำหรับงานด้านอุปกรณ์โทรคมนาคม การนำฟิล์มบางแสงไปประยุกต์ใช้ทางด้านพลังงาน เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ การเคลือบฟิล์มบนกระจกรถยนต์เพื่อป้องกันหมอกฝ้าขณะฝนตกทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้เทคโนโลยีฟิล์มบางแสงยังสามารถพัฒนาไปเป็นเซนเซอร์ต่างๆ ได้ไม่ว่าจะเป็น Bio-Sensor Pressure Sensor เป็นต้น ซึ่งจะต้องอาศัยหลักการทางแสงและการออกแบบฟิล์มบางแสงโดยต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง ค่าดัชนีหักเหและความหนาของชั้นฟิล์ม เป็นต้น



รูปที่ 1.1 โครงสร้าง Flexible GMR

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติทางแสงเพื่อพัฒนาไปเป็นเซนเซอร์ที่ยืดหยุ่น (flexible), โค้งงอ (Bending) และสวมใส่ได้ (wearable) โดยอาศัยหลักการไกด์เต็ดโหมดเรโซแนนซ์ (Guided Mode Resonance: GMR) ในโครงสร้างฟิล์มบางหลายชั้นประกอบด้วย เกรตติงขนาดเล็ก (subwavelength grating) และฟิล์มนำแสง (slab waveguide) ในที่นี้จะเลือกใช้ซิลิคอนชนิดโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes: PDMS) เป็นฐานรองรับ เนื่องจาก PDMS มีคุณสมบัติสามารถยืดหยุ่นสูงและสามารถโค้งงอได้ โดยแผ่นฐานรองรับ PDMS นี้ จะสร้างโดยการหล่อแม่พิมพ์จากแม่พิมพ์เกรตติง 1 มิติ จากนั้นจึงนำแผ่นฐานรองรับ PDMS ที่ประกอบด้วยลายเกรตติง 1 มิติ นี้ ไปเคลือบฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหทางแสงสูงมากกว่าค่าดัชนีหักเห (n) ของแผ่นฐานรองรับ PDMS ดังกล่าวคือ $n > 1.4-1.5$ และค่าดูดกลืนทางแสงในช่วงสเปกตรัมที่ตามองเห็นต่ำ

เอกสารชิ้นฟิล์มนี้จะทำหน้าที่เป็นฟิล์มนำแสง งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฟิล์มบางชนิดแทนทาลัมออกไซด์ (Tantalum Oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสม มีค่าดัชนีหักเหทางแสงสูงประมาณ 2.1 และอาศัยวิธีการเคลือบผิวด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC magnetron sputtering) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานต่ำเหมาะสมกับการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุที่ทนความร้อนได้ต่ำ เช่น พลาสติก เป็นต้น

เนื่องจาก ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีความเปราะสูง ไม่มีความยืดหยุ่นเหมือนวัสดุ PDMS ในที่นี้ จึงได้ดำเนินการศึกษาและปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานด้านเซนเซอร์แบบยืดหยุ่น กล่าวคือ ฟิล์มบางมีค่าดัชนีหักเหสูง มีการโปร่งใส และเรียบ เป็นต้น โดยทำการปรับความดันในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์เป็น 3 5 7 10 15 และ 20 mTorr จากนั้นได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ด้วยกล้องไมโครสโคป (optical microscope) และตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrometer) และเครื่องสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซมิเตอร์ (Spectroscopic ellipsometry) และได้เลือกชิ้นงานที่มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อนำชิ้นงานมาทำการทดสอบคุณสมบัติ Guided Mode Resonance ด้วยระบบเชิงแสงแบบวัดสเปกตรัมเรโซแนนซ์การส่งผ่าน (Resonance Transmission Spectrum) ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถวัดสเปกตรัมเรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทำการหมุนหรือโค้งงอชิ้นงาน ในที่นี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมเรโซแนนซ์ เมื่อทำการโค้งงอชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น และหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการโค้งงอกับการเลื่อนของความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ จากนั้นวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบผลต่างๆ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยซอฟต์แวร์แมทแลป (MATLAB)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สร้างเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น ด้วยเทคนิคการหล่อแม่พิมพ์ PDMS จากแม่พิมพ์เกรดตั้ง 1 มิติ และการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 2) ศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยวิธีการสปัตเตอริง
- 3) กำหนดและปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์เพื่อให้ได้อุปกรณ์ทางแสงที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด
- 4) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ว่าส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงหรือไม่
- 5) ศึกษาคุณสมบัติ Guided Mode Resonance (GMR) ทำการทดสอบอุปกรณ์โดยการหมุนและการโค้งงอชิ้นงาน เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงตกกระทบชิ้นงานกับการเลื่อนของความยาวคลื่นเรโซแนนซ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการพิมพ์เกรตติ้ง 1 มิติลงบน PDMS นำไปเคลือบฟิล์มบางโดยเทคนิคสปีดเทอริง
- 2) กำหนดและปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์
- 3) ตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิว ความหนา และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบน PDMS
- 4) วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของชิ้นงานเมื่อหมุนและโค้งงอชิ้นงาน เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานและวิเคราะห์หาเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา						
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
การศึกษาทฤษฎีและองค์ความรู้ทางด้านแสงของอุปกรณ์และกระบวนการเตรียมวัสดุต่างๆ	←→						
เตรียมฐานรองรับ PDMS ที่มีเกรตติ้ง 1 มิติอยู่ด้านบนและนำไปเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์			←→				
วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและคุณสมบัติทางแสงของชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัดต่างๆ				←→			
ทดสอบโครงสร้างพื้นผิวและคุณสมบัติทางแสงของชิ้นงานโดยการหมุน ยืดและงอชิ้นงาน						←→	
วิเคราะห์และตรวจสอบเงื่อนไขที่ทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงสุด							←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ก่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจในหลักการทางแสง
- 2) มีความเข้าใจและความชำนาญในการใช้งานเครื่องมือในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง คือ เครื่องสปีดเทอริง
- 3) สามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยเครื่องมือต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์
- 4) สามารถสร้างชิ้นงานได้ตามวัตถุประสงค์และมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาเอกสารนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติของธาตุและสารประกอบ

2.1.1 ยางซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลซิลอกเซน

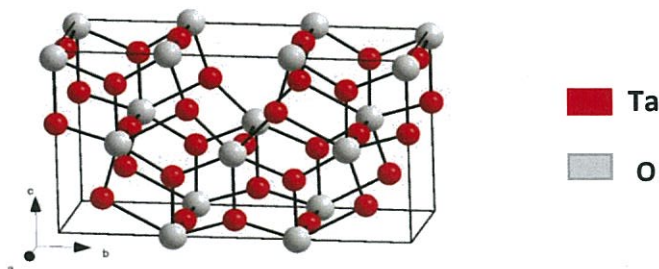
ยางซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes: PDMS) จัดเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่ง คือ เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วย ซิลิคอนกับออกซิเจน คุณสมบัติ คือ เป็นสารที่สลายตัวยาก ทนทานต่อความร้อนสูง ยึดติดกับวัตถุได้ดี ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อร่างกายของมนุษย์ [1-2]



รูปที่ 2.1 ยางซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลซิลอกเซน [3]

2.1.2 แทนทาลัมออกไซด์

มีสัญลักษณ์คือ TaO เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุแทนทาลัมกับออกซิเจน คุณสมบัติ คือ มีค่าดัชนีหักเหของแสง (n) สูงและมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำ มีจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถฝังในร่างกายมนุษย์ได้เพราะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับกระแสเลือดในร่างกายมนุษย์ [5-6]



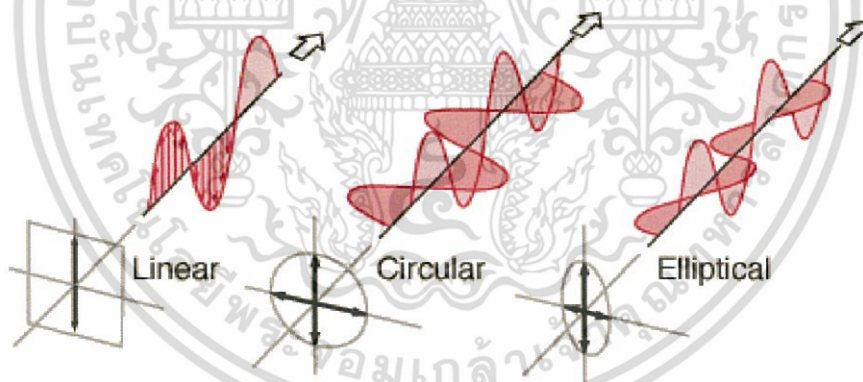
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของธาตุแทนทาลัมออกไซด์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีทางแสง

2.2.1 โพลาริเซชันของแสง (Polarized of light)

สนามไฟฟ้าของคลื่นแสง ซึ่งเกิดจากการสั่นของอะตอมหรือโมเลกุลของแหล่งกำเนิดแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางต่างๆ ซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่นแสงในลักษณะที่รู้จักกันในนามแสงไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized light) แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าดังกล่าวนั้นอยู่ในแนวหนึ่ง ย่อมแสดงว่าคลื่นแสงขณะนั้นเป็นแสงโพลาไรซ์ (polarized light) หรือบางที่อาจจะเรียกว่าแสงโพลาไรซ์ระนาบ (Plane-polarized light) แสดงดังรูปที่ 2.3 สำหรับกรณีที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแสงมีขนาดคงตัว แต่หมุนไปรอบทิศทางแผ่ของคลื่น เรียกว่า แสงโพลาไรซ์วงกลม (Circularly polarized light) โดยเกิดขึ้นจากผลรวมเชิงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าใน 2 แกนที่ตั้งฉากกัน เช่น แกน x กับแกน y ที่ต่างก็มีขนาดเท่ากัน กล่าวคือ E_x และ E_y หรือกล่าวได้ว่าเกิดขึ้นจากแสงโพลาไรซ์ระนาบ 2 ชุด ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดเท่ากัน แต่มีวัฏภาคต่างกัน แสงโพลาไรซ์วงกลมอาจจะวนขวาหรือวนซ้าย ซึ่งสอดคล้องตามผลต่างวัฏภาคและลักษณะการหมุนของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กเทียบกับทิศทางการแผ่ของคลื่นแสง แต่ถ้าขนาดส่วนประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) ในแกน 2 แกนที่ตั้งฉากกันไม่เท่ากัน จะเป็นกรณีแสงโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptically polarized light) [8] แสดงดังรูปที่ 2.3

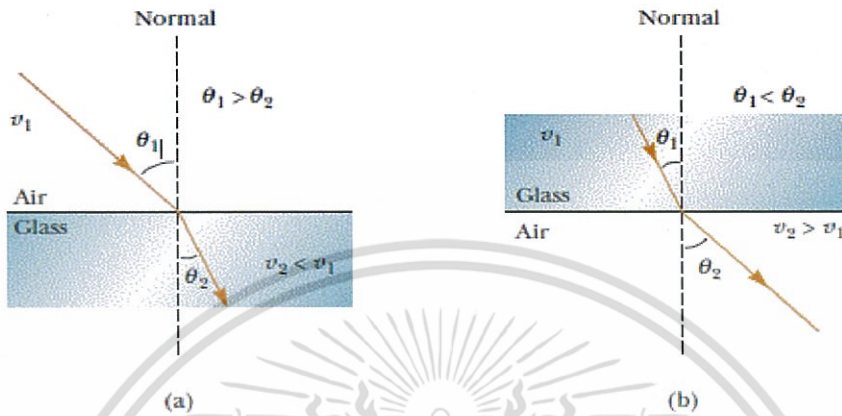


รูปที่ 2.3 กรณีแสงโพลาไรซ์แบบต่างๆ

เมื่อ p เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนวขนานกับระนาบตกกระทบและ s เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ

2.2.2 การหักเหของแสง (Refraction of light)

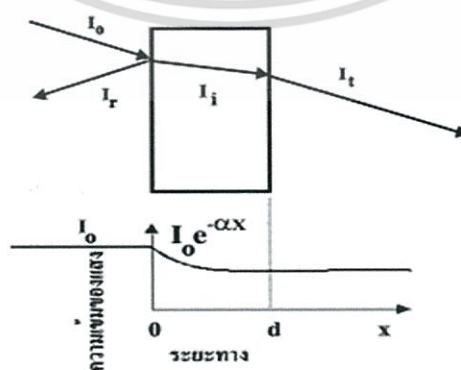
การหักเหของแสงเกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆ กันด้วย [9] แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ก) เป็นการเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางชนิดแรกที่เป็นอากาศไปยังตัวกลางชนิดที่สองคือแก้ว และ ข) เป็นการเคลื่อนที่ของแสงจากตัวกลางชนิดแรกคือแก้วไปยังตัวกลางชนิดที่สองคืออากาศ [8]

2.2.3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmittance) การดูดกลืน (Absorption) และการสะท้อนของแสง (reflectance)

เมื่อแสงเดินทางไปที่กระทบวัตถุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับและบางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในวัตถุและถูกดูดกลืน เมื่อแสงตกกระทบด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แสดงภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T)

$$T = \frac{i_i}{i_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.1)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (R)

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.2)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (A) และ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (R)

$$T+A+R = 1 \quad (2.3)$$

เมื่อ	I_0	คือ ความเข้มแสงตกกระทบวัตถุ
	I_r	คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากวัตถุ
	I_t	คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากวัตถุ
	I_i	คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่วัตถุ
	R	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	T	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
	α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	d	คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในวัตถุหรือความหนาของวัตถุ

2.2.4 เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating)

เกรตติงเป็นแผ่นใสมีเส้นตรงที่บ่งแสงขนานกันอย่างสม่ำเสมอจำนวนมาก แผ่นเกรตติงจึงเป็นแผ่นที่มีช่องแคบจำนวนมาก แสงความยาวคลื่น λ เมื่อผ่านเกรตติงจะมีการเลี้ยวเบนและแทรกสอด ทำนองเดียวกับเมื่อผ่านช่องแคบคู่ โดยปกติขนาดความกว้างของช่องแคบ (b) ของแผ่นเกรตติงจะมีค่าน้อยและน้อยกว่าระยะระหว่างช่องแคบ (a) มาก ผลจากการแทรกสอดของแสงจึงปรากฏชัดเจน ดังนั้นถ้าเริ่มสังเกตริ้วที่ได้ โดยใช้ช่องแคบที่มีขนาดของช่องค่อยๆ เล็กลงและมีจำนวนช่องค่อยๆ เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าแถบสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบนจะค่อยๆ กว้างขึ้น และจะมีแถบสว่างที่เนื่องจากการแทรกสอดคมชัดมากและอยู่ห่างกันเท่าๆ กัน ยิ่งจำนวนช่องแคบใน 1 หน่วยความยาวของเกรตติงมากขึ้น แถบสว่างกลางของริ้วของการเลี้ยวเบนยิ่งกว้างออก และแถบมืด แถบสว่างของ

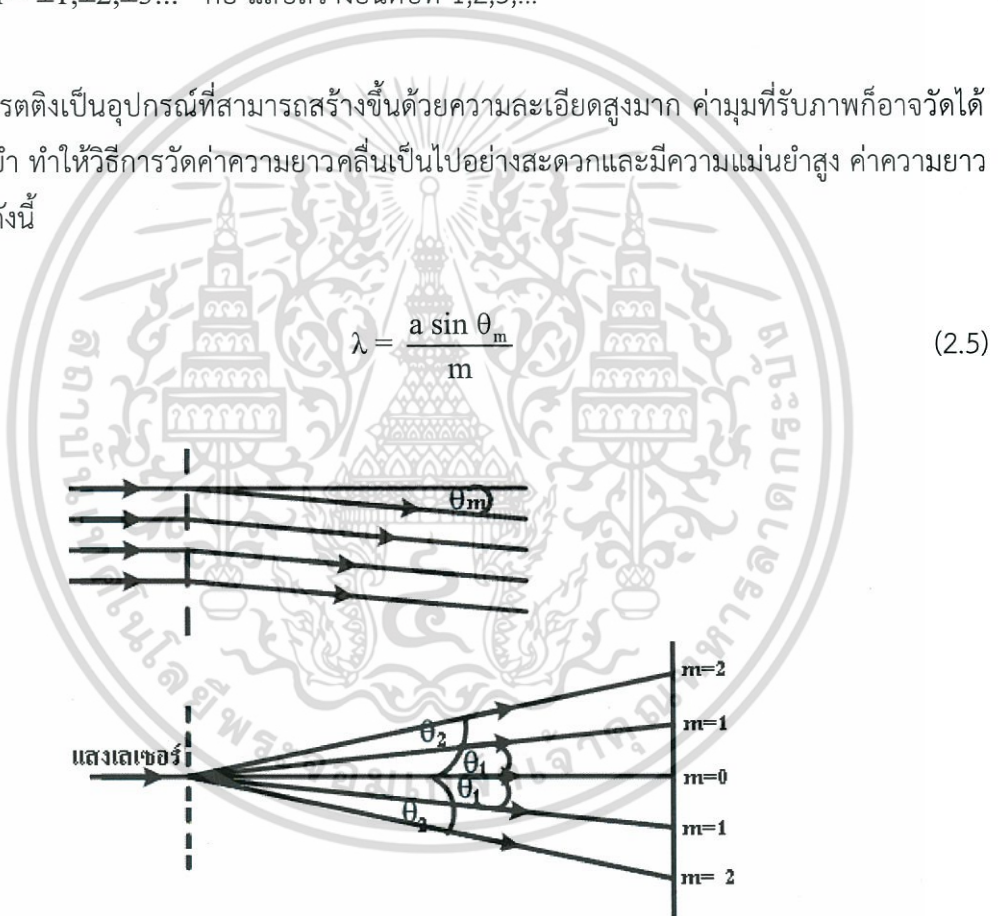
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดที่ปรากฏในแถบสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบน ก็ยิ่งแยกห่างจากกันมากขึ้น [10] ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.6 ตำแหน่งของแถบสว่างเหล่านี้จะหาได้จากสมการ (2.4) คือ

$$m\lambda = a \sin \theta_m \quad (2.4)$$

- เมื่อ a คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบ 2 ช่องที่ติดกัน
 λ คือ ความยาวคลื่น
 m คือ อันดับของแถบสว่าง
 $m = 0$ คือ แถบสว่างที่อยู่กลางฉากอยู่ในแนวของแสงตก เรียบกว่า แถบสว่างอันดับที่ศูนย์
 $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ คือ แถบสว่างอันดับที่ 1, 2, 3, ...

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างขึ้นด้วยความละเอียดสูงมาก ค่ามุมที่รับภาพก็อาจวัดได้อย่างแม่นยำ ทำให้วิธีการวัดค่าความยาวคลื่นเป็นไปอย่างสะดวกและมีความแม่นยำสูง ค่าความยาวคลื่นหาได้ดังนี้



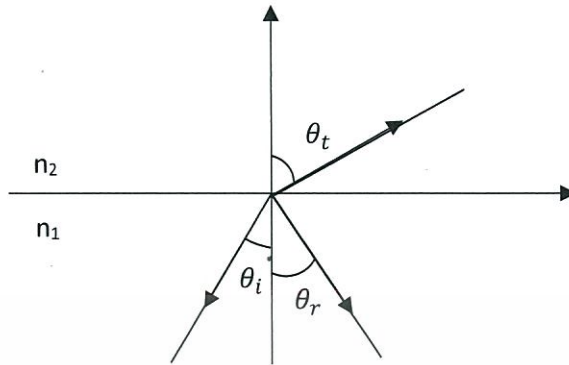
รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนเนื่องจากเกรตติง [9]

2.2.5 ท่อนำคลื่น (Waveguides)

อาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดภายในที่รอยต่อตัวกลางสองชนิด เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนรอยต่อระหว่างสองตัวกลางที่มีดัชนีหักเห (n_1) และ (n_2) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ส่วนหนึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง อีกส่วนหนึ่งจะเดินทางผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สอง เมื่อคลื่นทำมุม θ_i กับเส้นปกติ เกิดการสะท้อนและหักเหเป็นมุม θ_r และ θ_t ตามลำดับ

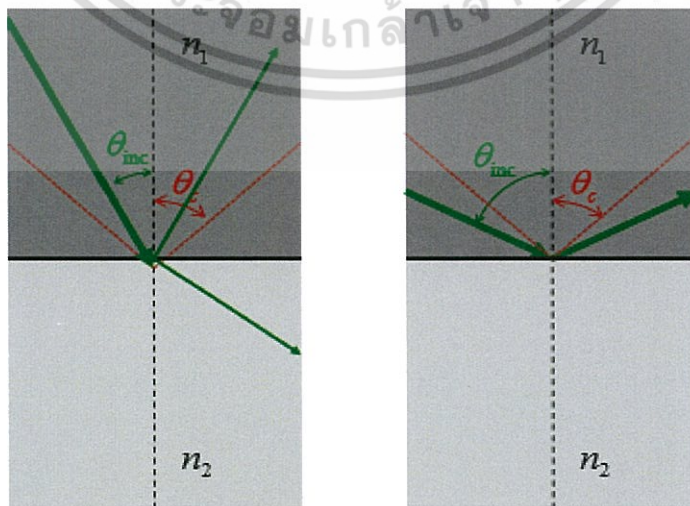


รูปที่ 2.7 แสดงตกกระทบระหว่างรอยต่อสองชนิดที่มีดัชนีหักเห n_2 และ n_1 เมื่อ $n_2 < n_1$

2.2.6 Guide Mode Resonance (GMR)

โครงสร้างของ GMR ประกอบด้วยท่อนำคลื่น (Waveguides) และการเลี้ยวเบนของเกรตติง (Diffraction Grating) เมื่อแสงที่เดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 ไปสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 ถ้าให้แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติจะทำให้เกิดมุมหักเหของแสงเบนออกจากเส้นปกติ ถ้าให้แสงตกกระทบจนทำให้มุมหักเหมีค่าเท่ากับ มุมตกกระทบนี้จะเรียกว่า มุมวิกฤต (Critical Angle) และถ้ามุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต จะเกิดการสะท้อนเพียงอย่างเดียวเราเรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection) [10]

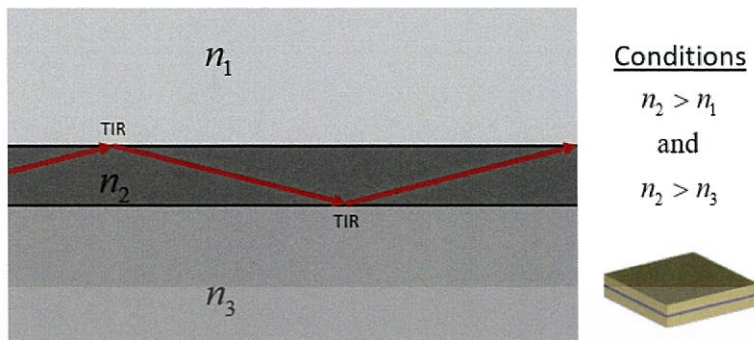
$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.8 แสดงแสงหักเหเบนเข้าหาเส้นปกติ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

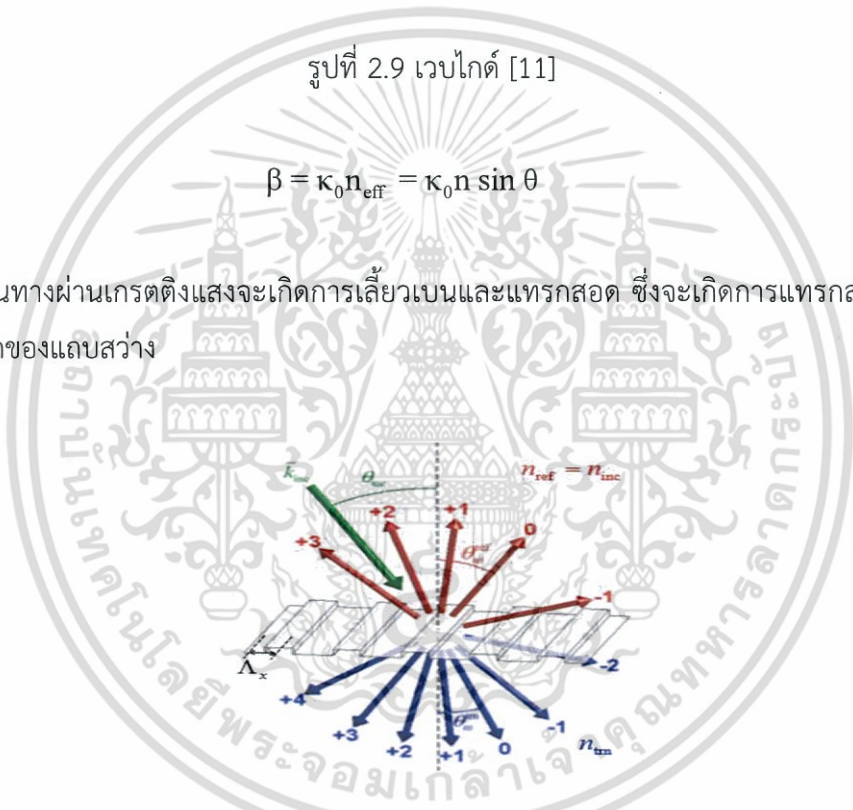
เมื่อนำตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันมาวางต่อกันเป็นชั้น โดยค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง $n_1 < n_2 > n_3$ แสงที่มีมุม 2π จะเดินทางสะท้อนกลับไปกลับมาภายในตัวกลาง (n_2) หรือในเวบไกด์ [11]



รูปที่ 2.9 เวบไกด์ [11]

$$\beta = \kappa_0 n_{\text{eff}} = \kappa_0 n \sin \theta \tag{2.7}$$

เมื่อแสงเดินทางผ่านเกรตติงแสงจะเกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอด ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดเกิดเป็นลำดับโหมดของแถบสว่าง



รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของเกรตติง 1 มิติ [11]

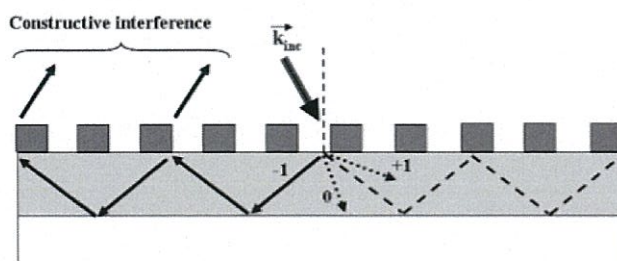
สมการการสะท้อน

$$n_{\text{ref}} \sin \theta(m) = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \tag{2.8}$$

สมการการส่งผ่าน

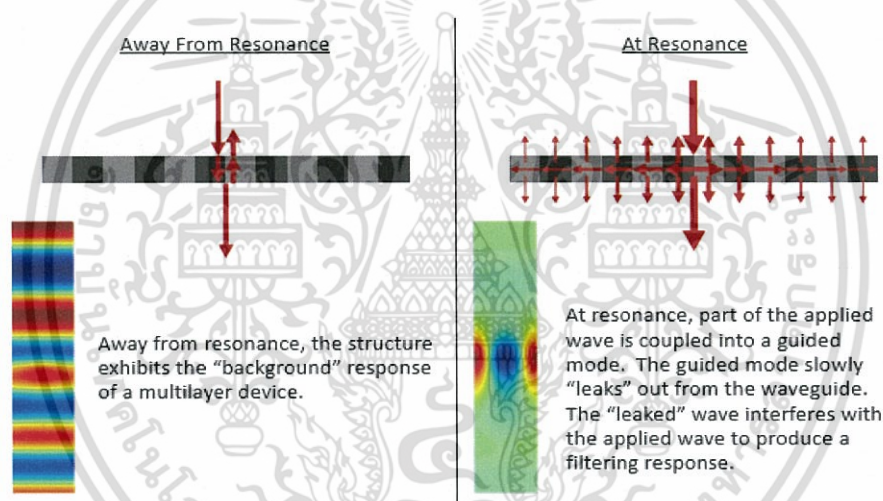
$$n_{\text{tm}} \sin \theta(m) = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ GMR [12]

เมื่อโหมดการเลี้ยวเบนของเกรตติงตรงกับโหมดของเวบไกด์จะเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ทางแสงเกิดขึ้น แสงจะเดินทางสะท้อนกลับไปกลับมาภายในเวบไกด์ในขณะเดียวกันแสงก็จะค่อยๆ เล็ดลอดออกจากเวบไกด์เรื่อยๆ [13-14]



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ทางแสง [11]

2.3 เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบาง

เทคโนโลยีในการเคลือบฟิล์มบางแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ กระบวนการเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) และกระบวนการเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition: PVD) เป็นเทคนิคการสร้างฟิล์มบางที่ไม่ถูกจำกัดด้วยแผนภาพเฟส (Phase diagram) กล่าวคือ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ ทำให้ฐานรองรับ (Substrate) สามารถใช้งานได้หลากหลายตามชนิดของผิวเคลือบ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การเคลือบด้วยไอเคมี

CVD เป็นเทคนิคการเคลือบซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารเคลือบที่อยู่ในสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะไอ ทั้งนี้สารเคลือบที่ได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไอเคมีตั้งต้นกับพื้นผิวที่ต้องการเคลือบโดยตรง หรืออาจเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไอเคมีมากกว่าหนึ่งชนิดที่อยู่เหนือพื้นผิวแล้วเกิดเป็นสารเคลือบบนพื้นผิวที่ต้องการก็ได้

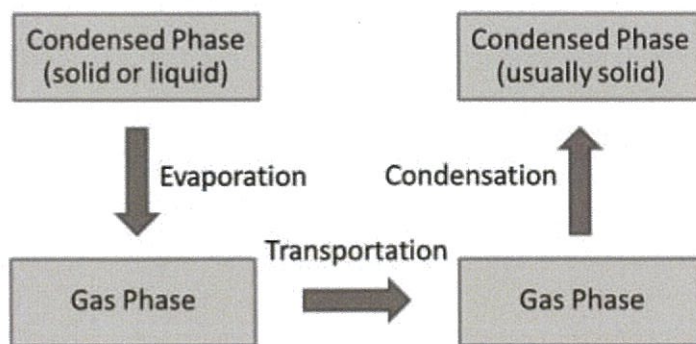
โดยทั่วไปกระบวนการเคลือบ CVD เริ่มต้นจากการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบใส่เข้าไปในตู้เคลือบที่เป็นระบบปิดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอเคมี และลดการปนเปื้อนจากอากาศภายนอก จากนั้นจึงปั๊มอากาศในตู้ออก แล้วจ่ายไอเคมีเข้าสู่ตู้เคลือบจนถึงความดันที่ต้องการ ในขณะเดียวกันก็ให้ความร้อนภายในตู้เคลือบในระดับที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีการสังเคราะห์สารเคลือบได้ของเสียที่เกิดจากระบวนการจะถูกดูดออก แสดงดังภาพที่ 2.13 แสดงแผนผังอย่างง่ายของระบบ CVD ซึ่งอาศัยความร้อน เนื่องจากไอเคมีตั้งต้นที่ใช้จะแพร่กระจายและเติมเต็มช่องว่างที่อยู่ในตู้เคลือบ ส่งผลให้การเคลือบผิวเกิดได้อย่างทั่วถึงและมีความสม่ำเสมอสูง การเคลือบ CVD มีไอเคมีที่มักจะมีอันตรายและเป็นพิษ สารเคลือบที่ได้อาจมีสารตั้งต้นเจือปนอยู่ และปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนค่อนข้างสูง (700-1100 °C) [14]



รูปที่ 2.13 แสดงแผนผังอย่างง่ายของระบบ CVD ซึ่งอาศัยความร้อน [14]

2.3.2 การเคลือบด้วยไอทางกายภาพ

PVD เป็นเทคนิคการสร้างฟิล์มบางที่ใช้กลไกทางกายภาพ เช่น สเปตเตอริง (Sputtering) และการระเหย (Evaporation) เพื่อทำให้สารตั้งต้นกลายเป็นไอ จากนั้นไอ (ซึ่งเป็นได้ทั้งอะตอมหรือไอออน) ที่เกิดขึ้นจะเคลือบบนฐานรองรับหรือชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพกระบวนการการสร้างฟิล์มบางด้วยไอทางกายภาพ [14]

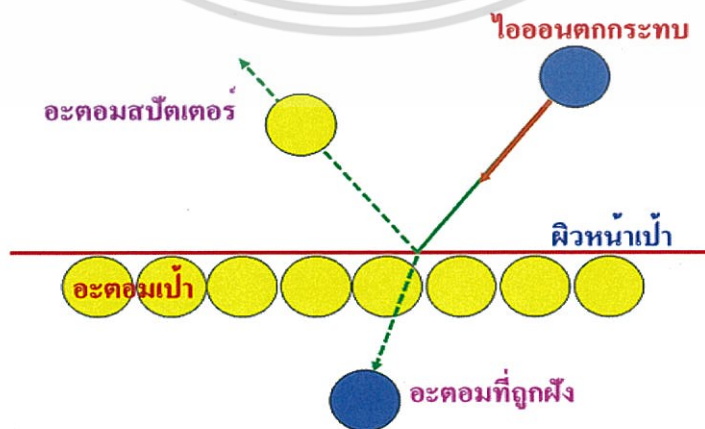
2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

ในปี ค.ศ. 1852 โกรฟ (Sir W. Grove) พบการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศในขณะที่เกิดโกลว์ดิซชาร์จ (glow discharge) ทอมสัน (Sir W. Thomson) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าสปัตเตอริง (sputtering) เป็นการอุปมาหยาตของเหลวที่กระเด็นออกจากผิวของเหลวเมื่อมีหยดแรกตกกระทบผิวของเหลว นั้น ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงได้มีการพัฒนาใช้กันอย่างกว้างขวางมาก

2.4.1. หลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของสปัตเตอริง

เมื่อใช้อนุภาคหนัก (ไอออน) กระทบยังพื้นผิวของวัสดุ จะเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมให้อะตอมหรือโมเลกุลแล้วมีอนุภาคโมเลกุลหลุดออกจากผิวของวัสดุ นั้น โดยเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) การกระจายเชิงมุมของอนุภาคที่หลุดออกมาขึ้นกับทิศทางของอนุภาคที่พุ่งเข้าชน
- 2) อนุภาคที่หลุดออกมาจากผิวของผลึกเดี่ยวจะแสดงทิศทางที่แน่นอน
- 3) สปัตเตอริง ยิลด์ (sputtering yield) ขึ้นกับพลังงาน
- 4) อนุภาคที่หลุดออกมาจากสปัตเตอริงจะมีความเร็วเฉลี่ยมากกว่าจากการระเหยสาร

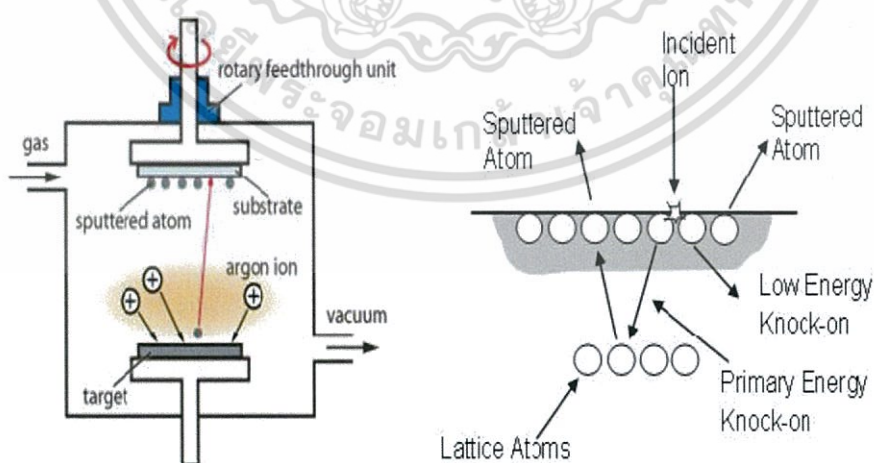


รูปที่ 2.15 รูปการเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

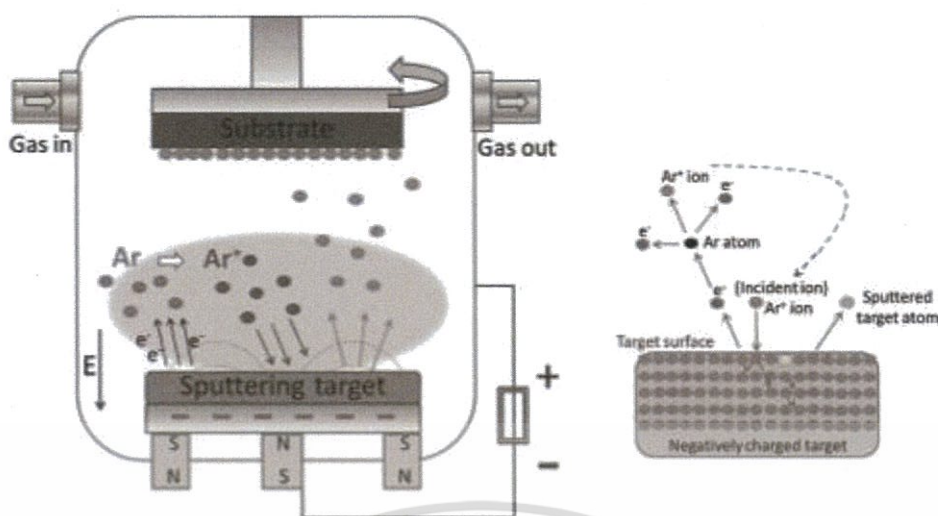
อนุภาคที่วิ่งเข้าชนเป้าซึ่งเป็นสารเคลือบอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าเช่นนิวตรอนหรือมีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนหรือไอออนก็ได้ แต่ต้องมีพลังงานสูง การทำให้อนุภาคประจุไฟฟ้ามีพลังงานสูงนั้นง่ายกว่าอนุภาคที่เป็นกลางไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็มีมวลน้อยเกินไปจึงไม่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทโมเมนตัม ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้ไอออนเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงตามที่ต้องการ ซึ่งการชนของไอออนกับอะตอมของสารเคลือบคิดตามหลักการคงที่ของโมเมนตัม อนุภาคประจุไฟฟ้าพลังงานสูงต้องผลิตอย่างต่อเนื่องขณะเคลือบฟิล์มบางเพื่อให้การเคลือบฟิล์มบางเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและมีความหนาตามต้องการ อนุภาคดังกล่าวอาจมาจากปืนไอออน (ion gun) แต่มีราคาค่อนข้างสูง หรือจากขบวนการโกลว์ ดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนเป้าสารเคลือบ จะเกิดปรากฏการณ์หลายอย่าง เช่น

- 1) ไอออนบางส่วนสะท้อนกลับและส่วนมากจะเป็นกลางทางไฟฟ้าเพราะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวของเป้า
- 2) ไอออนบางส่วนฝังตัวเข้าไปในสารเคลือบ (ion implantation) ความลึกในการการฝังตัวแปรตามพลังงานไอออน เช่น ก๊าซอาร์กอนไอออนจะฝังตัวในแผ่นทองแดงได้ประมาณ 10 \AA ต่อพลังงาน 1 keV
- 3) เป้าสารเคลือบจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) ถ้าไอออนมีพลังงานสูง
- 4) เกิดการเรียงตัวใหม่ของอะตอมที่ผิวของเป้าสารเคลือบ (altered surface layers) และเกิดความพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect)
- 5) เกิดการชนต่อเนื่องกันไปของอะตอมเป้าสารเคลือบแล้วปลดปล่อยอะตอมเป้าสารเคลือบนั้น เรียกว่า สปีตเตอริง (sputtering)



รูปที่ 2.16 ผลของการชนระหว่างไอออนพลังงานสูงกับผิวเป้าสารเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบ PVD แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง [14]

การเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริงเป็นขบวนการเคลือบฟิล์มบางทางฟิสิกส์อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้แรงยึดเกาะสูงและการเคลือบต้องอยู่ในสถานะสุญญากาศ (ความดันในช่วง $10^{-3} - 10^{-1}$ ทอร์ ซึ่ง 1 ทอร์ เท่ากับ 1 มิลลิเมตรปรอท) สามารถเคลือบผิวโลหะและอโลหะได้และสารเคลือบจะเป็นโลหะหรือ อโลหะก็ได้ ข้อเด่นของสปัตเตอร์ริงอาจสรุปได้ดังนี้

- 1) ให้เนื้อฟิล์มมีความสม่ำเสมอแม้ว่าผิววัสดุรองรับจะมีขนาดใหญ่
- 2) ฟิล์มบางเรียบสม่ำเสมอและสามารถควบคุมความหนาได้
- 3) ฟิล์มบางมีสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงมากกับสารเคลือบและมีเสถียรภาพสูง
- 4) เคลือบฟิล์มบางได้อย่างเนกประสงค์ไม่ว่าสารเคลือบจะอยู่ในสถานะก๊าซ ของเหลวหรือของแข็ง
- 5) ให้ฟิล์มบางที่มีแรงยึดเกาะสูง ทำให้ฟิล์มบางมีความคงทน
- 6) มีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง

3.4.2 โกลว์ดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน [16,17,18] ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน [17] โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุด

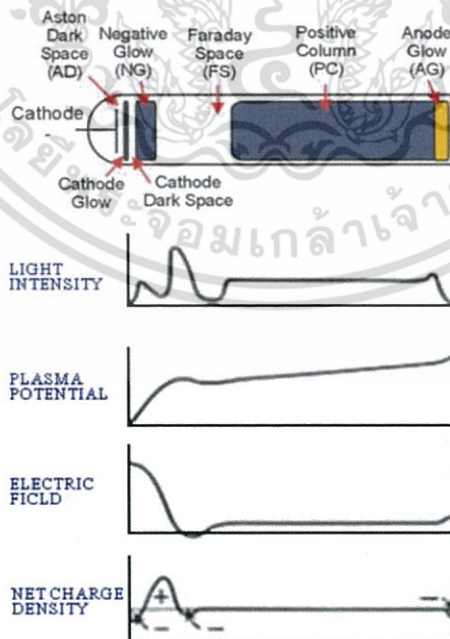
ออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน [17]

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอนและทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอนโดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.10)$$

เมื่อ W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิซซาร์จ คือ การเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ดิซซาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของการโกลว์ดิซซาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า [19-21] ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า [22] อาณาเขตของชีทจะผลักริเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน [19-21] อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ [19-21] ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของโกลว์ดิสชาร์จและให้เห็นในรูปที่ 2.18 (การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า) การเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลว์ดิสชาร์จสามารถรักษาได้ก็จะเป็นปรากฏการณ์การเรืองแสงและบริเวณมือในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.4.3 ค่ายิลด์สปัตเตอร์ริง

ค่ายิลด์สปัตเตอร์ริง (sputtering yields) คือ จำนวนอะตอมเฉลี่ยของเป้าสารเคลือบที่หลุดออกมาต่อหนึ่งอะตอมของไอออนที่เข้าชนเป้าสารเคลือบนั้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

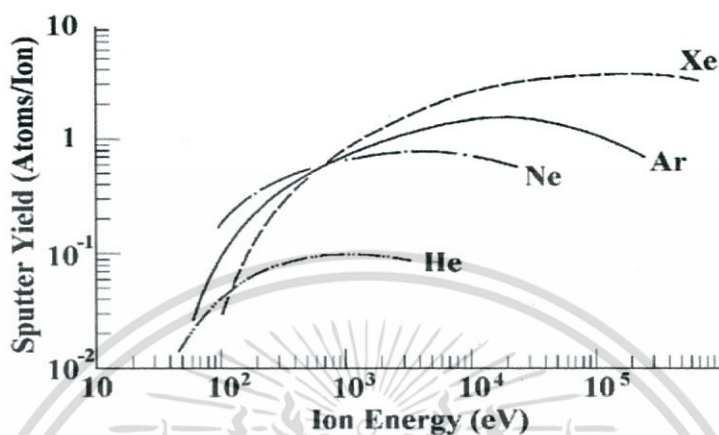
$$S = \frac{\langle n_s \rangle}{\langle n^+ \rangle} = \frac{m^+ m_s}{m^+ + m_s} \cdot \frac{E_{kin}}{\Delta H} \tag{2.11}$$

- เมื่อ n_s คือ จำนวนอนุภาคที่ได้จากการสปัตเตอร์
- n^+ คือ อนุภาคไอออนบวกที่เข้าชนเป้าสารเคลือบ
- m_s คือ มวลของจำนวนอนุภาคที่ได้จากการสปัตเตอร์
- m^+ คือ มวลของอนุภาคไอออนบวกที่เข้าชนเป้าสารเคลือบ
- E_{kin} คือ พลังงานจลน์ของไอออนบวกที่เข้าชนเป้าสารเคลือบ
- ΔH คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอมของเป้าสารเคลือบ

ถ้าไอออนมีพลังงานจลน์น้อยมากจะให้ค่ายิลด์เป็นศูนย์ เพราะไอออนมีพลังงานไม่พอทำลายพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ เมื่อถึงพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งพลังงานของไอออนมากกว่า $4 \Delta H$ ไอออนจะชนเป้าอย่างต่อเนื่องและเริ่มปลดปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของสารเคลือบ ค่าอิเล็กต์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กโปเนเชียล เมื่อไอออนมีพลังงานสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มเพราะไอออนถ่ายเทพลังงานให้อะตอมของเป้าสารเคลือบได้จำนวนมากขึ้น และจากนั้นจะได้กราฟเชิงเส้นของค่าอิเล็กต์เรียกว่าเกิดการอิ่มตัวเพราะจำนวนไอออนที่ทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกไปมีจำนวนเกือบคงที่ค่าหนึ่งและไอออนพลังงานสูงบางอนุภาคฝังตัวบนผิวของเป้า



รูปที่ 2.19 ค่าอิเล็กต์กับพลังงานจลน์ของไอออนในการสปีดเตอริงธาตุต่างๆ

ค่าอิเล็กต์สปีดเตอริง นอกจากจะขึ้นกับพลังงานของไอออนตกกระทบแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของเป้าสารเคลือบ ขึ้นกับมุมตกกระทบไอออน และขึ้นกับโครงสร้างผลึกของเป้าสารเคลือบหรือขึ้นกับระนาบผลึกของเป้าสารเคลือบที่ไอออนเข้าตกกระทบ (ถ้าระนาบนั้นมีจำนวนอะตอมอยู่อย่างหนาแน่นก็จะให้ค่าอิเล็กต์สูง) ค่าอิเล็กต์สปีดเตอริงสามารถวัดได้ด้วยวิธีต่างๆ

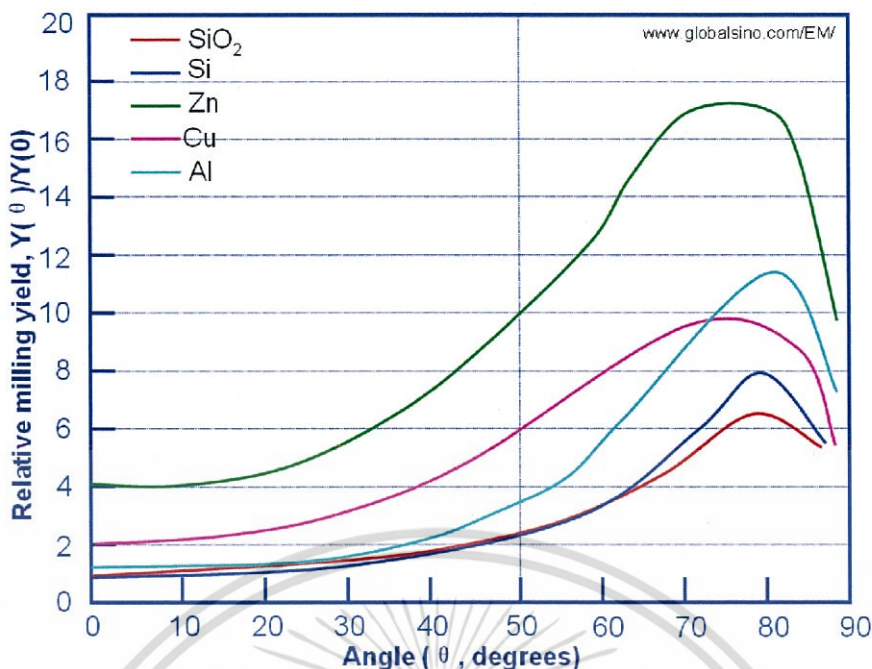
เมื่อไอออนมีพลังงานต่ำๆ สามารถเกิดสปีดเตอริงได้เมื่อพลังงานไอออนต้องไม่น้อยกว่าพลังงานขีดเริ่มและค่าอิเล็กต์ของสปีดเตอริงจะมากที่สุดในช่วงที่ไอออนมีพลังงานสูงๆ ในปี ค.ศ. 1923 ฮัลล์ (Hull) เป็นคนแรกที่สังเกตพลังงานขีดเริ่มจากการ ระดมยิงไอออนเข้าชน Th-W ซึ่งเป็นเป้าสารเคลือบ พบว่าพลังงานขีดเริ่มของไอออนจะอยู่ระหว่าง 20 eV ถึง 30 eV ต่อมาได้มีการหาค่าพลังงานขีดเริ่มเป็นเรื่องยากเนื่องจากจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกไปต่ออะตอมไอออนค่อนข้างน้อยมากในระดับขนาดเฉลี่ย 10^{-4} อะตอมต่อไอออนทำให้การชั่งน้ำหนักที่ลดลงไปของเป้าค่อนข้างยากและขนาดความแม่นยำ พลังงานขีดเริ่มบางค่าจึงใช้ไม่ได้

ในปี ค.ศ. 1962 สแตร์ต และ เวห์เนอร์ (Stuart and Wehner) ได้ใช้วิธีทางสเปกโตรโคปีค (spectroscopic method) ซึ่งความแม่นยำสูงไปทดลองวัดค่าพลังงานขีดเริ่มก็ได้ค่าพลังงานขีดเริ่มใกล้เคียงกับของฮัลล์

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่าyieldของธาตุชนิดต่างๆ [18,23]

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

ค่าyieldสปีดเตอริงขึ้นกับมุมตกกระทบของไอออน ส่วนโลหะบางชนิด เช่น Au Ag Cu และ Pt ซึ่งมีค่าyieldสปีดเตอริงสูงเกือบไม่ขึ้นกับมุมตกกระทบของไอออน แต่ Fe Ta และ Mo มีค่าyieldต่ำ และค่าyieldนี้ขึ้นกับมุมตกกระทบของไอออนอย่างชัดเจนและให้ค่าyieldสูงสุดที่มุมตกกระทบอยู่ระหว่าง 60° และ 80° โดยค่าyieldลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมตกกระทบโตกว่านี้



รูปที่ 2.20 อัตราส่วนค่าyieldสปีดเตอร์ริงของธาตุต่างๆ แปรตามมุมตกกระทบ θ ของไอออน

ค่าyieldสปีดเตอร์ริงนอกจากจะขึ้นกับมุมตกกระทบของไอออนแล้ว ยังขึ้นกับโครงสร้างผลึกของเป้าสารตัวอย่าง ในกรณีที่เป้าสารเคลือบเป็นสารพอลิคริสตัลไลน์ (polycrystalline materials) หรือสารหลายผลึก การกระจายของอะตอมออกจากเป้าเป็นไปตามกฎของโคซายน์ (cosin law) แต่จะไม่เป็นไปตามกฎของโคซายน์เมื่อเป้าสารเคลือบเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) โดยค่าyieldสปีดเตอร์ริงขึ้นกับระนาบที่ไอออนตกกระทบ เช่น Ag มีระบบผลึกเป็น fcc ระนาบ (111) ให้ค่าyieldสปีดเตอร์ริงสูงสุด เพราะมีอะตอมหนาแน่นที่สุดซึ่งระนาบนี้มีทิศทางของฟอร์มเป็น $\langle 110 \rangle$ ธาตุอื่นแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระนาบของผลึก

เป้าสารเคลือบ	ระบบผลึก	ทิศทางของฟอร์ม
Ag	fcc	$\langle 110 \rangle$
W, Mo	bcc	$\langle 111 \rangle$
Ge	diamond	$\langle 111 \rangle$
Zn, Tl, Re	hexagonal	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$, $\langle 20\bar{2}3 \rangle$

2.4.4 ลักษณะของอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ได้จากสปัตเตอริง

โดยทั่วไปถ้าไอออนบวกที่ใช้มีพลังงานไม่สูงมากนักจะได้อะตอมของเป้าสารเคลือบจากสปัตเตอริงจำนวนมากเป็นกลางทางไฟฟ้าและเป็นอะตอมเดี่ยว อาจมีบางอะตอม (เป็นจำนวนน้อย) ที่อยู่ในบริเวณเรืองแสงของระบบสปัตเตอริงเกิดการไอออไนซ์ เมื่อใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar^+) ที่ความต่างศักย์ 100 eV ระดมยิงเป้าสารเคลือบที่เป็นโลหะทองแดง (Cu) และทำการวัดด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) พบว่า มีอะตอมเดี่ยวของ Cu ประมาณ 95% และที่เหลืออีก 5% เป็นโมเลกุลอะตอมคู่ (Cu_2)

ถ้าใช้ไอออนบวกพลังงานสูงเกินไป จะได้กลุ่มก้อนของอะตอมเป้าจากสปัตเตอริง พบว่าเมื่อใช้ Ar^+ พลังงาน 12 keV ระดมยิงเป้าโลหะอะลูมิเนียม (Al) จะได้ก้อน Al_7 และเมื่อใช้ไอออน Xe^+ จะได้ก้อน Al_{13}

สำหรับเป้าที่เป็นสารอัลลอยด์ จะได้อะตอมจากสปัตเตอริงเป็นเช่นเดียวกับเป้าโลหะ กล่าวคือ เมื่อใช้ไอออนพลังงานไม่สูงมากนักจะได้อะตอมเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบของสารที่เป็นเป้าสารเคลือบ และถ้าใช้ไอออนที่มีพลังงานสูงกว่า 10 keV จะได้กลุ่มก้อนของอะตอมเป้าสารเคลือบ

2.4.5 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปัตเตอริง เกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าแรงอเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาหลังจากการชนของของไอออนบวกผิวเป่า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้น และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป่ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปัตเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = BqV \quad (2.12)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีส่วนทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.13)$$

เมื่อ F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก
 F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qV_{\perp}B = \frac{(mV_{\perp}^2)}{r} \quad (2.14)$$

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

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

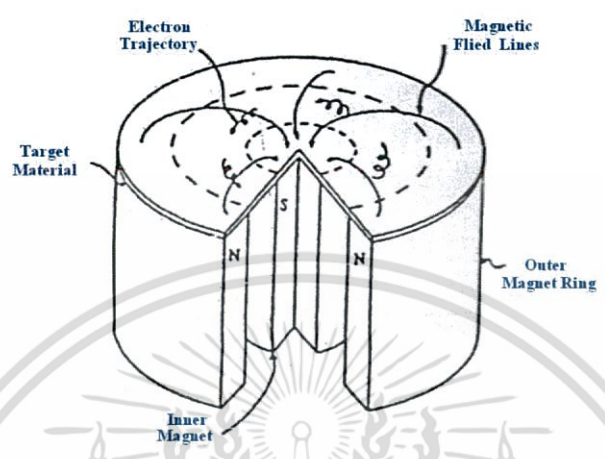
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.16)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 \vec{v} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน
 \vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก
 \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและ มีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุมไปในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศตั้งฉากกันด้วยความเร็ว [23] ถูกแสดงในรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซ และกระบวนการแตกตัวไปเป็นไอออนบวกสูงซึ่งบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งจะผลทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีซีซีไดโอด สปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีซีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.21 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเคลื่อน ลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน [24]

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \tag{2.17}$$

จะได้ว่า

$$v = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{|q|}} \tag{2.18}$$

โดยจะได้ รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

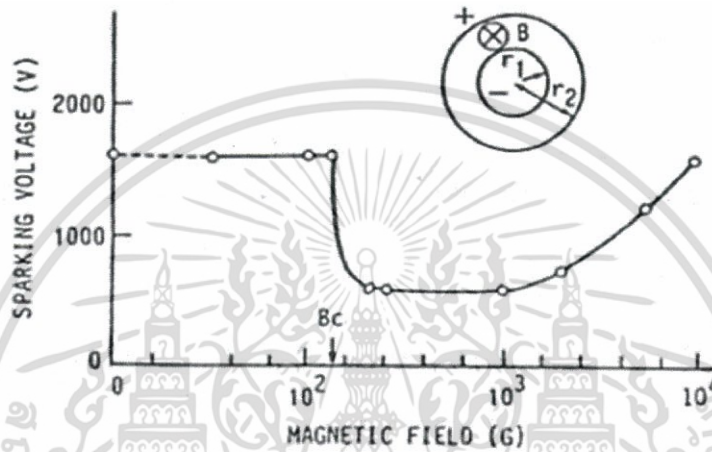
$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \tag{2.19}$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ ตำแหน่งทุติยผล (cut-off magnetic field) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล [23] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.20 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad (2.20)$$

เมื่อ V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
 L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.4.6 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



รูปที่ 2.22 ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก [23]

ในรูปที่ 2.22 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 mm และรัศมีภายนอก 15 mm ที่ความดัน 40 mTorr โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

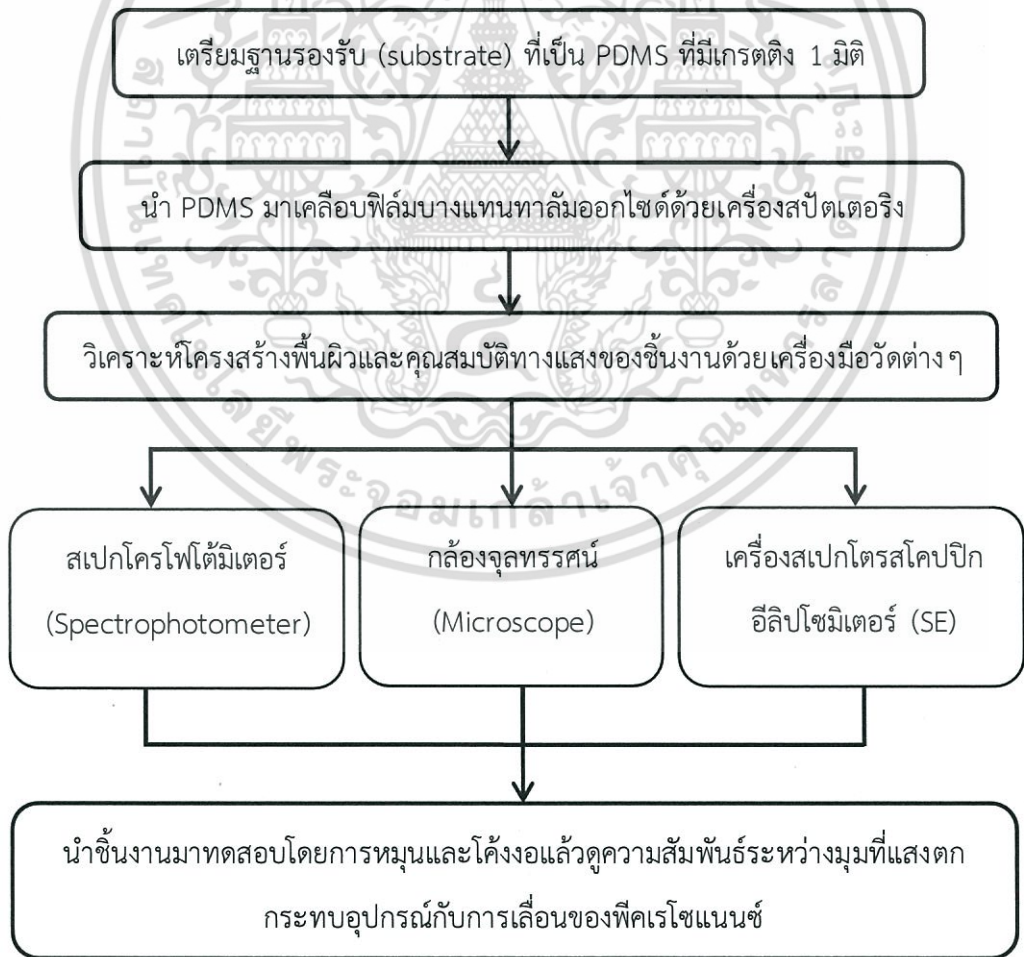
ในปี พ.ศ. 2553 นันทนัช วัฒนสุภิญญา ได้ศึกษาเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และพื้นผิวของฟิล์มบาง AIZO เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้เตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม โดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกในบรรยากาศอาร์กอนบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้เซรามิกซ์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม ในปริมาณ 0.5 wt% ขนาด 3 นิ้วเป็นเป้าศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการสเปตเตอริงได้แก่ ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดันและกำลังไฟฟ้า ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพบว่าระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดันและกำลังไฟฟ้า มีผลต่อการทับถมของฟิล์มบาง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม AIZO [26]

ในปี พ.ศ. 2554 โรสลีนา ยูโซะ ได้ศึกษาการวิเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการวัดทางแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี และเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี โดยวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีอีแอกทีฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริงและวิธีการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน และวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่เคลือบเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงที่เตรียมจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีระเหยสาร จากการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี [27]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและวิเคราะห์สมบัติทางแสงและโครงสร้างพื้นผิวของการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ลงบนพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ที่มีเกรตติง 1 มิติ ซึ่งในส่วนแรกจะกล่าวถึงการเตรียมฐานรองรับ (substrate) ที่เป็นพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ที่มีเกรตติง 1 มิติ โดยเตรียมความหนาของ PDMS เป็น 1.5 mm ส่วนที่สองเป็นการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยวิธีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางให้มีความดันในการเคลือบ (operate pressure) ต่างกันที่ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr โดยที่กำหนดความหนาของฟิล์มบางประมาณ 100 nm ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการศึกษาโครงสร้างพื้นผิว ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์และศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆ



รูปที่ 3.1 โดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 สารเคมีและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นเกรดตั้ง 1 มิติ บน PDMS

3.1.1 สารเคมี

- 1) Silicone Elastomer Base
- 2) Silicone Elastomer Curing Agent
- 3) Isopropyl alcohol (CH_3COCH_3)
- 4) Deionized Water (DI Water)
- 5) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ 99.99%

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) จานเพาะเชื้อ (Petri Dish)
- 2) แม่แบบเกรดตั้ง 1 มิติบนกระจกสไลด์
- 3) แผ่นกระจกสไลด์ 25x25 mm
- 4) ซ้อนคนสาร
- 5) ถ้วยพลาสติกขนาดเล็ก
- 6) คัตเตอร์
- 7) เครื่องชั่งสาร
- 8) ตู้ดูดความชื้น
- 9) กระดาษทิชชูแบบไร้ฝุ่น (Kimwipes)
- 10) ถูมือยาง
- 11) ปากคีบจับชิ้นงาน

3.2 สารเคมีและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (TaO) โดยวิธีสปัตเตอร์ริง

3.2.1 สารเคมี

- 1) ก๊าซอาร์กอน (Ar) ความบริสุทธิ์ 99.99%
- 2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ความบริสุทธิ์ 99.99%
- 3) เป้าสารเคลือบ (target) เป็นเป้าแทนทาลัม (Ta) ความบริสุทธิ์ 99.995%
- 4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ 99.99%

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) แผ่นซิลิกอน
- 2) เทปสุญญากาศ
- 3) แผ่นรับรองชิ้นงาน (Substrate holder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เครื่องสปีดเตอร์



รูปที่ 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับที่มีเกรตติ้ง 1 มิติบน PDMS

1) ทำการผสมสาร Silicone Elastomer Base กับ Silicone Elastomer Curing Agent ในอัตราส่วน 10:1 โดยใช้ช้อนตวงสารลงในถ้วยพลาสติกชั่งด้วยเครื่องชั่งสาร สารทั้งสองอย่างผสมกันและคนในเนื้อสารเข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) สารเคมีและอุปกรณ์ในการเตรียมสาร (ข) ชั่งสารในปริมาตรที่ต้องการ

2) เตรียมภาชนะดูดฟองอากาศ นำสารที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วเข้าภาชนะดูดฟองอากาศ ปิดฝาภาชนะให้สนิท จากนั้นหมุนวาล์วเปิดปั๊มโรตารี เพื่อทำการดูดเอาฟองอากาศที่อยู่ในเนื้อสารออก ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 เครื่องดูดฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทำความสะอาดจานเพาะเชื้อ (Petri Dish) และกระจกสไลด์ด้วย Isopropyl alcohol และ DI Water แล้วเช็ดด้วยกระดาษทิชชูไร้ฝุ่นให้สะอาด จากนั้นนำไปเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อเป่าคราบน้ำและฝุ่นออกให้หมด

4) เตรียมกระจกสไลด์และกระจกสไลด์ที่มีรูปแบบของเกรตติ้ง 1 มิติขนาด 25x25 mm ลงในจานแก้ว นำสารออกจากเครื่องดูดฟองอากาศนำไปชั่งปริมาตรด้วยเครื่องชั่งสาร จากนั้นนำสารมาชั่งให้ได้ปริมาตร 6 ml แล้วมาเทลงจานแก้วเพาะเชื้อที่มีกระจกสไลด์และกระจกสไลด์ที่มีรูปแบบของเกรตติ้ง 1 มิติอยู่ วางทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที



รูปที่ 3.5 กระจกสไลด์ที่มีรูปแบบของเกรตติ้ง 1 มิติในจานแก้ว

5) นำเข้าภาชนะดูดฟองอากาศอีกรอบ เพื่อดูดฟองอากาศออกให้หมดจากเนื้อสารโดยใช้เวลาอีกประมาณ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 ตู้ดูดฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำสารที่ทำการดัดฟองอากาศเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วเข้าตู้อบเพื่อให้ PDMS แข็งตัว โดยใช้ เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) นำงานแก้วที่มีสารเข้าตู้อบ (ข) ปรับอุณหภูมิของตู้อบและตั้งเวลา

- 7) นำ PDMS ที่แข็งตัวแล้วมาตัดเป็นชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด 25x25 mm มีความหนา 1 mm
- 8) ทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้น้ำ D.I. เช็ดผิวหน้าและผิวด้านหลังให้สะอาด
- 9) ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ด้วย Isopropyl alcohol แล้วเช็ดด้วยกระดาษทิชชูไร้ฝุ่น เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับเคลือบด้วยเครื่องสปีดเตอริง



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ตัดออกจากแม่พิมพ์เกรตติ้ง 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง TaO โดยวิธีการสปัตเตอริง

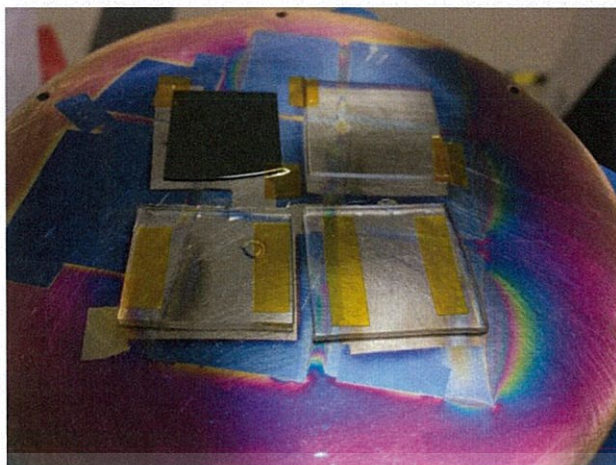
ฟิล์มบางแทนทาลัมเพนออกไซด์เตรียมโดยใช้เครื่องสปัตเตอริงของ บริษัท AJA International, Inc. ATC 2000-F sputtering system ของหน่วยงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์โทรออปติกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) แสดงดังภาพที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องสปัตเตอริง

- 1) วางเป้าแทนทาลัมที่มีความบริสุทธิ์ 99.995% เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ตรงตำแหน่ง Sputtering gun และประกอบส่วนต่างๆ
- 2) สร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันเริ่มต้น 10^{-7} mTorr
- 3) นำแผ่นรองรับที่เป็นแกรตติ้ง 1 มิติบน PDMS แผ่นซิลิกอน กระจกสไลด์และ PDMS ที่ไม่มีแกรตติ้ง 1 มิติ วางลงบนที่วางแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผ่นรองรับที่เป็นเกรตติ้ง 1 มิติบน PDMS แผ่นซิลิกอน กระจกสไลด์และ PDMS ที่ไม่มีเกรตติ้ง 1 มิติ บนที่วางแผ่นรองรับ

4) นำที่วางแผ่นรองรับวางลงในช่องภาชนะวางแผ่นรองรับแล้วสร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะวางแผ่นรองรับให้มีค่าใกล้เคียงกับความดันเริ่มต้นภายในภาชนะสุญญากาศ

5) เมื่อความดันภายในภาชนะวางแผ่นรองรับมีค่าใกล้เคียงกับความดันภาชนะสุญญากาศประมาณ 10^{-6} mTorr แล้ว จึงทำการเลื่อนที่วางแผ่นรองรับสู่ภาชนะสุญญากาศ

6) เกี่ยวที่วางแผ่นรองรับให้อยู่เหนือหัวสปัดเตอร์ตรงตำแหน่งที่ต้องการหลักจากปล่อยที่วางแผ่นรองรับลงให้เหลือแต่ตัวชิ้นงานที่เกี่ยวข้องติดจากนั้นเปิดมอเตอร์เพื่อทำการหมุนที่วางแผ่นรองรับโดยมีเงื่อนไขว่าที่วางแผ่นรองรับต้องหมุนเป็นระนาบเดียวกัน

7) เมื่อวางที่วางแผ่นรองรับไว้ตรงตำแหน่งที่สามารถเคลือบฟิล์มบางได้แล้ว จึงทำการเคลือบฟิล์มบางให้ตรงตามเงื่อนไขที่วางไว้



รูปที่ 3.11 ภาชนะสุญญากาศและภาชนะวางแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) ทำการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ลงบนแผ่นวัสดุที่เป็นซิลิกอน กระจกสไลด์ PDMS ไม่มีเกรตติ้ง 1 มิติและ PDMS ที่มีเกรตติ้ง 1 มิติ ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

8.1) Plasma cleaning O₂ (อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง)

ความดันเริ่มต้น 3×10^{-6} mTorr ความดันขณะทำ Plasma cleaning O₂ โดยป้อนก๊าซออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ด้วยอัตรา 10 sccm ก่อให้เกิดพลาสมาขึ้น ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ด้วยเวลา 5 นาที

8.2) Seeding

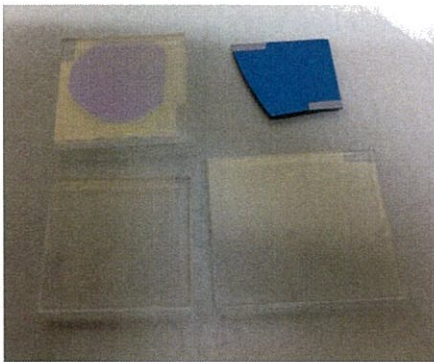
ความดันขณะเคลือบ 20 mTorr โดยป้อนก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ด้วยอัตรา 15 sccm และ 7 sccm ตามลำดับ ก่อให้เกิดพลาสมาขึ้นด้วยกำลังไฟฟ้า 100 W เวลาในการเคลือบ 2 นาที

8.3) Coat Tantalum Oxide

ความดันขณะเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ โดยป้อนก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ด้วยอัตรา 15 sccm และ 7 sccm ตามลำดับ ก่อให้เกิดพลาสมาขึ้นด้วยกำลังไฟฟ้า 100 W

9) โหลดชิ้นงานที่เคลือบเสร็จเรียบร้อยแล้วมายังภาชนะวางแผ่นรองรับรอความดันลดลงจึงนำชิ้นงานออกจากช่องภาชนะวางแผ่นรองรับ

ตารางที่ 3.1 พิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 3 mTorr

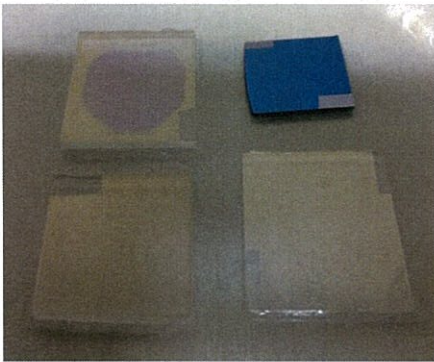
	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	3 mTorr
อัตราการเคลือบ	18.83 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	5.31 min

ตารางที่ 3.2 พิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 5 mTorr

	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	5 mTorr
อัตราการเคลือบ	11.19 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	8.90 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 พิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 7 mTorr

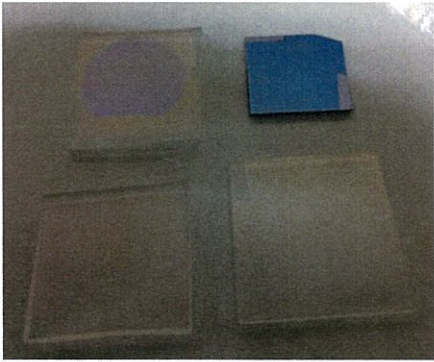
	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	7 mTorr
อัตราการเคลือบ	7.96 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	12.50 min

ตารางที่ 3.4 พิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 10 mTorr

	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	10 mTorr
อัตราการเคลือบ	5.51 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	18.40 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 พิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 15 mTorr

	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	15 mTorr
อัตราการเคลือบ	3.26 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	30.71 min

ตารางที่ 3.6 พิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ความดันในการเคลือบ 30 mTorr

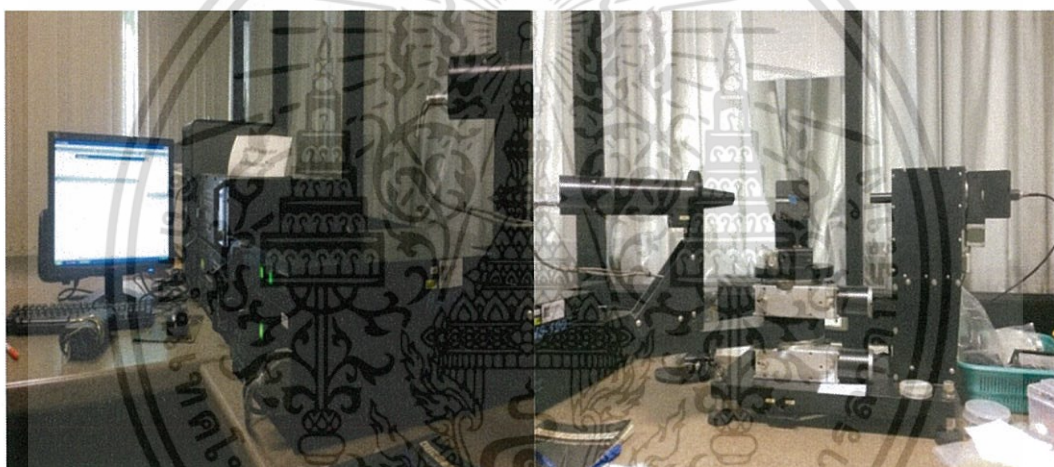
	
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	7 sccm
ความดันการเคลือบ	30 mTorr
อัตราการเคลือบ	1.44 nm/min
กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ	100 W
เวลา	69.57 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวัดสมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

3.5.1 วัดค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์

การศึกษาความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางโดยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์ ใช้หลักการโพลาไรเซชันของแสงสะท้อนกับของแสงหักเหโดยฟิล์มบาง ซึ่งเมื่อให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตกกระทบฟิล์มบางด้วยมุมตกกระทบใด ๆ โดยระนาบการสั่นของแสงตกกระทบทำมุมกับระนาบตกกระทบจะทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์วงรี ถ้าให้ความต่างเฟสของแสงสะท้อนที่มีระนาบการสั่นขนานและตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ สามารถหาค่าดัชนีหักเหและค่าความหนาของฟิล์มบางได้โดยสร้างแบบจำลองจากสมการทาวน์ ลอเรนซ์ [25] เครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์ ๓ ห้องปฏิบัติการฟิล์มบาง หน่วยงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์โทรอปติกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)



รูปที่ 3.12 เครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์

3.5.2 วัดโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องพื้นฐานที่ใช้ในการขยายภาพของวัตถุขนาดเล็กที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ใช้วัดขนาดของวัตถุขนาดเล็ก โดยหลักการขยายภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงประกอบ (compound microscope) ใช้เลนส์ 2 ชุดในการทำงานร่วมกัน เลนส์ชุดแรกเป็นเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ขยายวัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้นปรากฏเป็นภาพจริงหัวกลับที่ด้านหลังเลนส์บริเวณระนาบภาพปฐมภูมิ (primary image plane: PIP) ซึ่งเป็นระยะโฟกัสของเลนส์ชุดที่สองคือเลนส์ใกล้ตา (eyepiece lens) จะทำให้มองเห็นภาพขนาดใหญ่กลับด้าน (invert) กับวัตถุ

กล้องจุลทรรศน์พื้นหลังสว่าง เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ทำให้เกิดภาพโดยการใช้อคอนเดนเซอร์รวมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้รวมกันที่วัตถุหรือตัวอย่างที่ต้องการตรวจดู ทำให้วัตถุเสมือนว่าสามารถเปล่งแสงเองได้ แล้วใช้เลนส์ใกล้วัตถุขยายภาพให้โตขึ้น ณ ที่ตำแหน่งระนาบปฐมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภูมิ หลังจากนั้นใช้เลนส์ใกล้ตาใช้เลนส์ใกล้ตาขยายภาพจากระนาบดังกล่าวให้โตขึ้นอีก โดยออกแบบให้ภาพนั้นตกที่เรตินาของตาพอดี ทำให้มองเห็นพื้นหลังของวัตถุสว่างกว่าวัตถุที่มีความทึบ มีสี หรือ มีดรรชนีหักเหมากกว่า [25] กล้องจุลทรรศน์ชนิดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการฟิล์มบาง หน่วยงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ รอบดิกส์ NECTEC

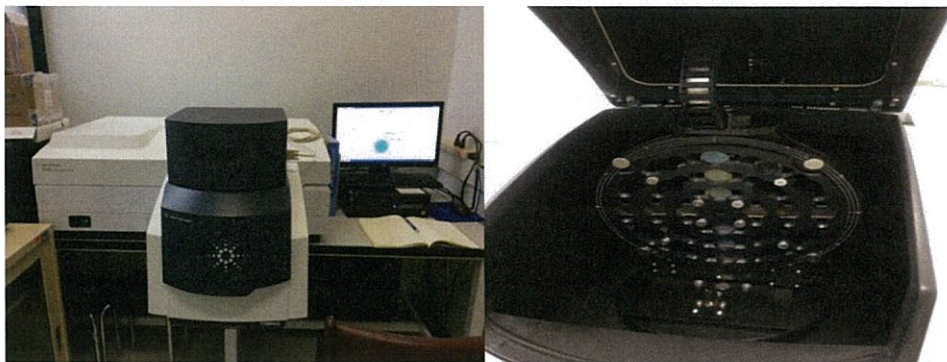


รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์ชนิดพื้นหลังสว่าง

3.5.3 วัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การศึกษาสมบัติทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง โดยทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200–2000 nm [25] ติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการโฟโตนิกส์ หน่วยงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ รอบดิกส์ NECTEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

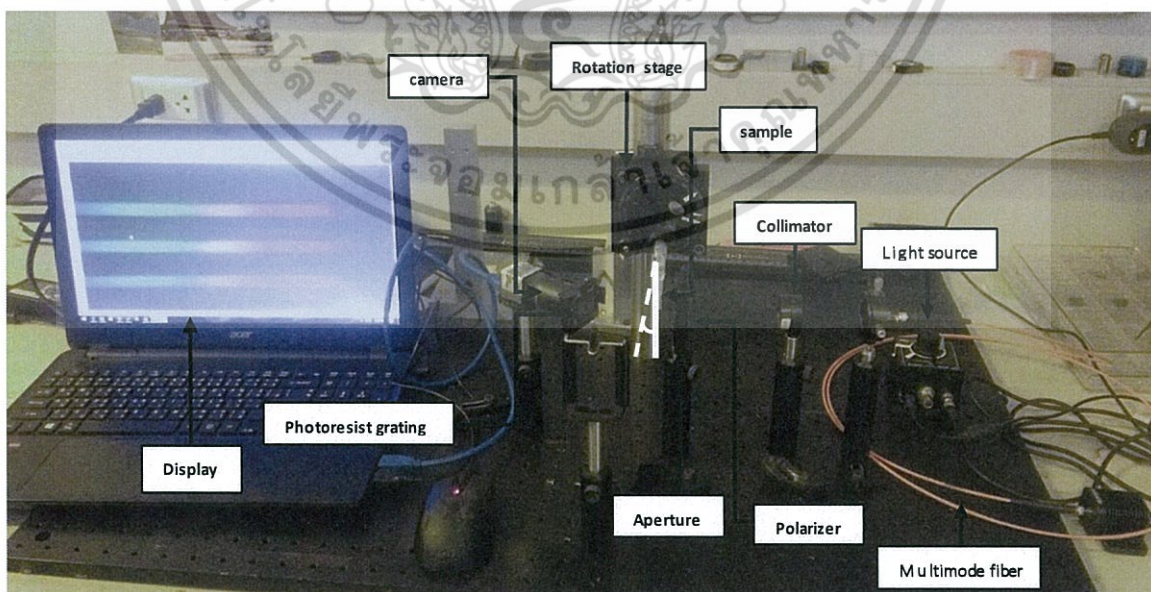


รูปที่ 3.14 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.6 ทดสอบคุณสมบัติไกด์เด็คโตนดเรโซแนนซ์

3.6.1 ทดสอบโดยการหมุน (Rotation)

จัดเซตอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.15 ทำการทดสอบคุณสมบัติไกด์เด็คโตนดเรโซแนนซ์โดยการหมุนชิ้นงานเพื่อดูการเปลี่ยนของเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นบนแถบสเปกตรัม โดยทำการจ่ายแสงสีขาวผ่านเข้าสู่เลนส์ทำหน้าที่รวมแสงเข้าสู่โพลาริเซอร์ จากนั้นผ่านแผ่นที่เจาะรูไว้ 3 รู แสงจะแยกออกเป็น 3 ลำ จากนั้นแสงจะผ่านชิ้นงานที่มีการหมุนเริ่มจากมุม 0 องศา (มุมของชิ้นงาน) ผ่านมายังโฟโตไดโอดซิสเทมตติงทำหน้าที่แยกสเปกตรัมของแสงออกเป็นแถบ 3 สี คือ แถบสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน แสง 3 ลำที่ผ่านเข้ากล้องจะไปปรากฏที่จอแสดงผล จากนั้นบันทึกผลและนำภาพไปประมวลผลในลำดับต่อไป จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติไกด์เด็คโตนดเรโซแนนซ์โดยการหมุนมุมที่แสงตกกระทบชิ้นงานเพิ่มทีละ 2 องศา บันทึกผลและนำภาพไปประมวลผลโปรแกรมแมทแลปเป็นลำดับต่อไป

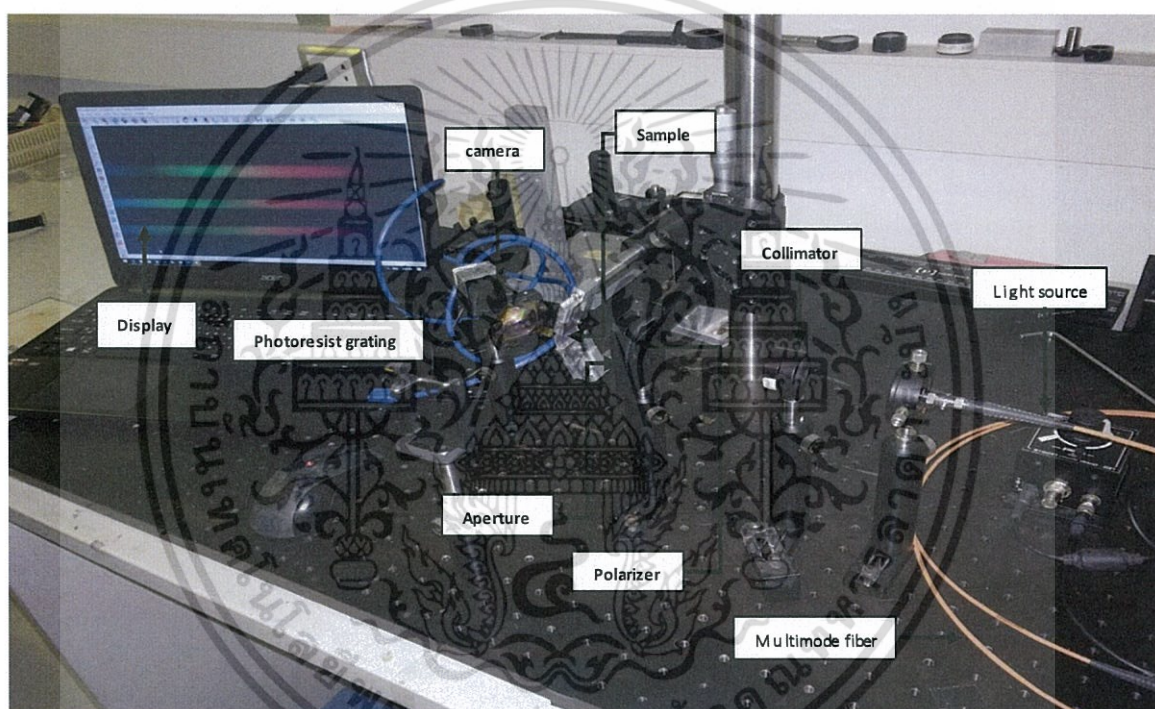


รูปที่ 3.15 เซตอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติไกด์เด็คโตนดเรโซแนนซ์โดยการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ทดสอบโดยการโค้งงอ (Bending)

จัดเซตอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.16 ทำการทดสอบคุณสมบัติโหนดโหนดเรโซแนนซ์โดยการโค้งงอชิ้นงานเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นบนแถบสเปกตรัม โดยทำการจ่ายแสงสีขาวผ่านเลนส์ทำหน้าที่รวมแสงเข้าโพลาไรเซอร์ จากนั้นผ่านแผ่นที่เจาะรูไว้ 3 รู แสงจากแยกออกเป็น 3 ลำ จากนั้นแสงจะผ่านชิ้นงานที่มีการโค้งงอ ผ่านมายังโฟโตเรซิสเกรตติงทำหน้าที่แยกสเปกตรัมของแสงออกเป็นแถบ 3 สี คือ แถบสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน แสง 3 ลำที่ผ่านเข้ากล้องจะไปปรากฏที่จอแสดงผล จากนั้นบันทึกผลและนำภาพไปประมวลผลในลำดับต่อไป จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติโหนดโหนดเรโซแนนซ์โดยการปรับให้ชิ้นงานโค้งงอมากกว่าเดิม สังเกตการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเรโซแนนซ์บันทึกผลและนำภาพไปประมวลผลโดยโปรแกรมแมทแลปเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 3.16 เซตอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติโหนดโหนดเรโซแนนซ์โดยการโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

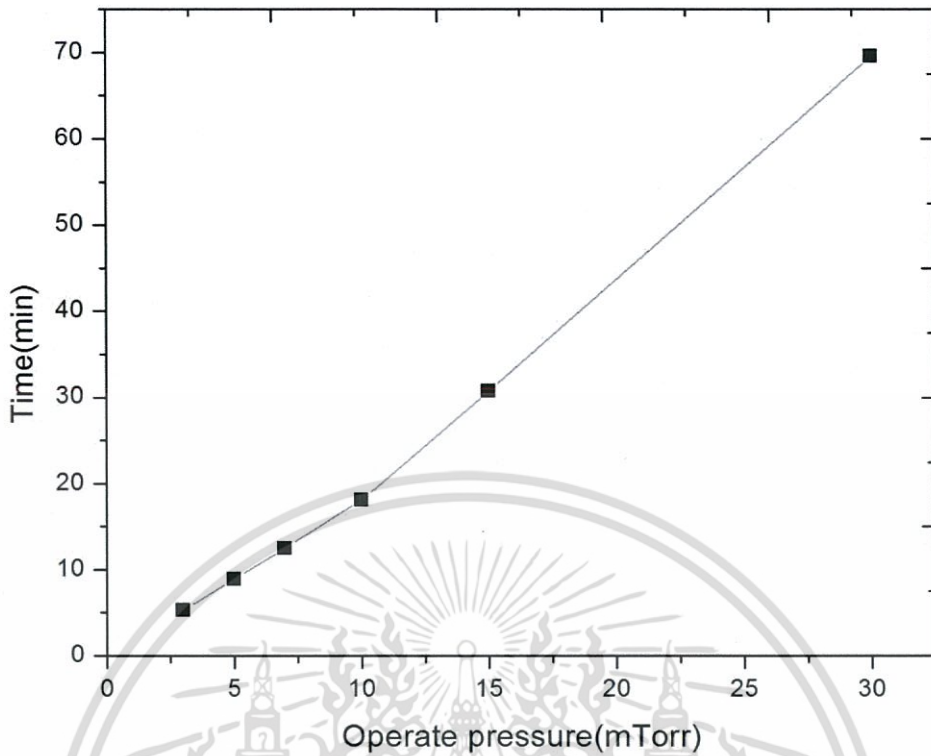
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัม ออกไซด์ลงบน PDMS ที่มีเกรตติง 1 มิติและไม่มีเกรตติง 1 มิติ แผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ผลของการปรับค่าความดันในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง โดยวัดค่าดัชนีหักเหและค่าความหนาของฟิล์มบางโดยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านของแสงในแต่ละกรณี แล้วศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบพื้นหลังสว่าง สุดท้ายคือวิเคราะห์สมบัติทางแสงเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของโค้ดดีดท์โหมมดเรโซแนนซ์ทางแสงโดยทำการจัดเซตอัพเพื่อทำการหมุนและโค้งงอชิ้นงาน สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมแมทแลป

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของการปรับค่าความดันในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

จากการใช้เป่าแทนทาลัมเพื่อเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้น ทำการกำหนดค่าความหนาของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ประมาณ 100 nm โดยการปรับความดันในการเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 20 mTorr ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับเวลา (นาที) พบว่าเมื่อปรับค่าความดันในการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้นเวลาในการเคลือบฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้จาก เมื่อให้กำลังไฟฟ้าแก่ระบบ พลังงานของประจุถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยในภาชนะสุญญากาศทำให้โมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมาก ไอออนบวกจะเข้าไปชนกับเป่า เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมทำให้อะตอมของเป่าหลุดออกมาเคลือบลงบนชิ้นงาน เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้มีไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป่าหลุดออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะตกลงเคลือบลงบนชิ้นงาน ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางลดลงตามลำดับ ยิ่งอัตราการเคลือบฟิล์มบางลดลงมากเท่าใดก็จะทำให้ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นมากเท่านั้นในการเคลือบฟิล์มบางที่มีความหนาใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับ เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง (นาที)

4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์

วัดค่าดัชนีหักเหและค่าความหนาของฟิล์มบางโดยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซมิเตอร์ เนื่องจาก PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและใส ทำให้ไม่สามารถวัดค่าโดยตรงได้ จึงทำการวัดค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ โดยทำการวัดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสของแสง หลังจากนั้นนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้สร้างไว้ให้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดแล้วเปรียบเทียบผล โดยเมื่อผลของการเปรียบเทียบมีความถูกต้อง สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติของฟิล์มบางได้ ซึ่งความถูกต้องของสมบัติของฟิล์มบางที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเท่ากันหรือใกล้เคียงกันระหว่างแบบจำลองกับค่าที่วัดได้ ถ้าใกล้เคียงมากคุณสมบัติของฟิล์มบางที่วิเคราะห์ได้ก็จะมีมีความถูกต้องมาก โดยที่ความถูกต้องหรือความใกล้เคียงนั้นสามารถพิจารณาจากค่า Mean squared error (MSE) ดังสมการ 4.1

$$MSE^2 = \frac{1}{(2N-M)} \sum_{i=0}^n \left[\left(\frac{\psi_i^{\text{mod}} - \sigma_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\psi,i}^{\text{exp}}} \right)^2 - \left(\frac{\Delta_i^{\text{mod}} - \Delta_i^{\text{mod}}}{\sigma_{\Delta,i}^{\text{exp}}} \right)^2 \right] = \frac{1}{(2N-M)} \chi^2 \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

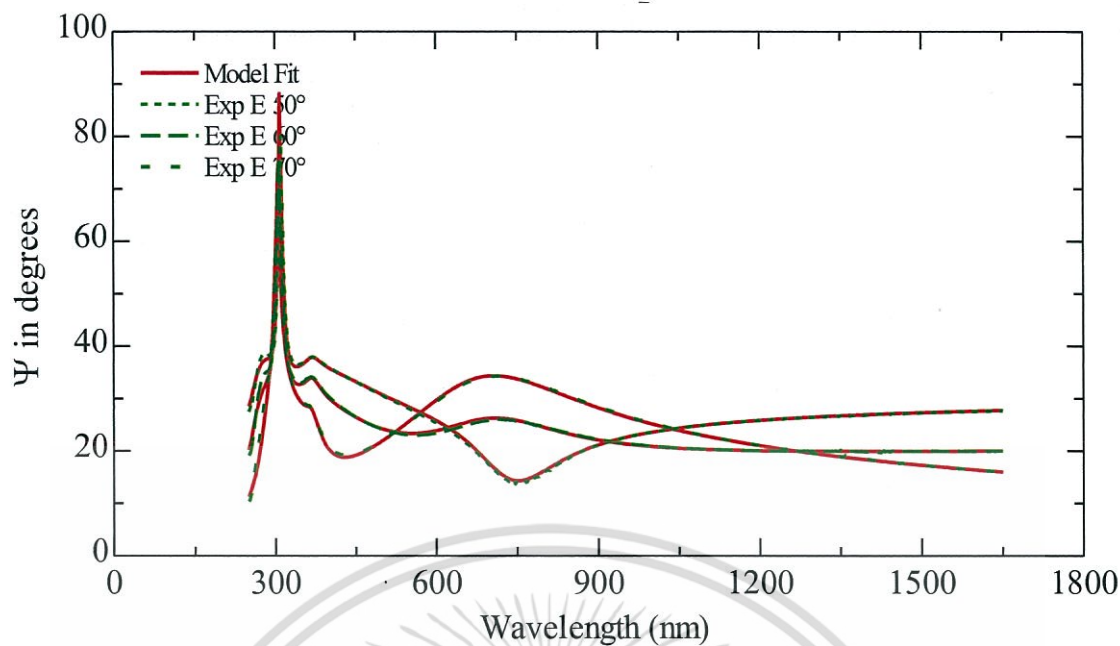
- เมื่อ N คือ จำนวนคู่ของซายด์ (ψ) และเดลต้า (Δ)
 M คือ จำนวนตัวแปรที่ปรับในแบบจำลอง
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลที่ได้จากการวัด

โดยค่า MSE นี้แสดงถึงความผิดพลาดหรือความไม่เท่ากันของแบบจำลองและฟิล์มบางที่วัดตั้งนั้นในการกำหนดแบบจำลองให้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางได้อย่างแม่นยำจะต้องกำหนดแบบจำลองให้มีค่า MSE น้อยที่สุด โดยในวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของฟิล์มบางจากสมการของทาวส์ ลอเรนซ์ ออสซิลเลเตอร์ (Tauc Lorentz Oscillator: TL)

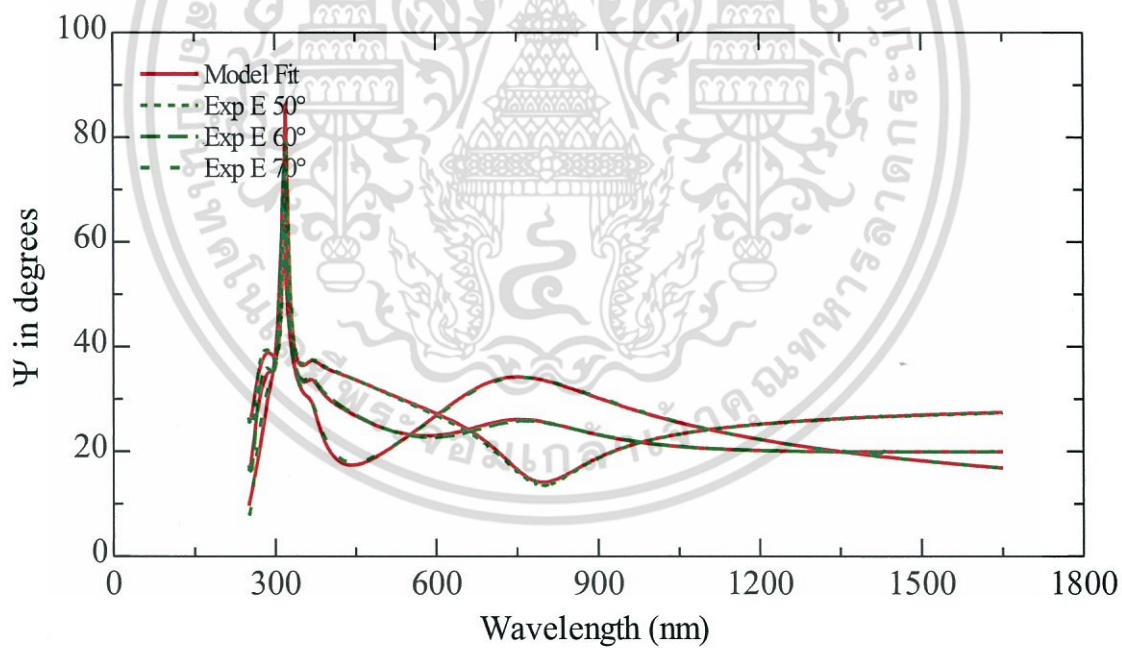
$$\varepsilon_2(E) = \frac{AE_0 C(E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2) + C^2 E^2} \cdot \frac{1}{E}, E > E_g \quad (4.2)$$

- เมื่อ A คือ แอมพลิจูด
 E_0 คือ พลังงานเริ่มต้น
 C คือ ค่าคงที่ของ Broadening
 E_g คือ ช่องว่างพลังงาน

โดยรูปที่ 4.2-4.13 เป็นรูปแสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนและแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ

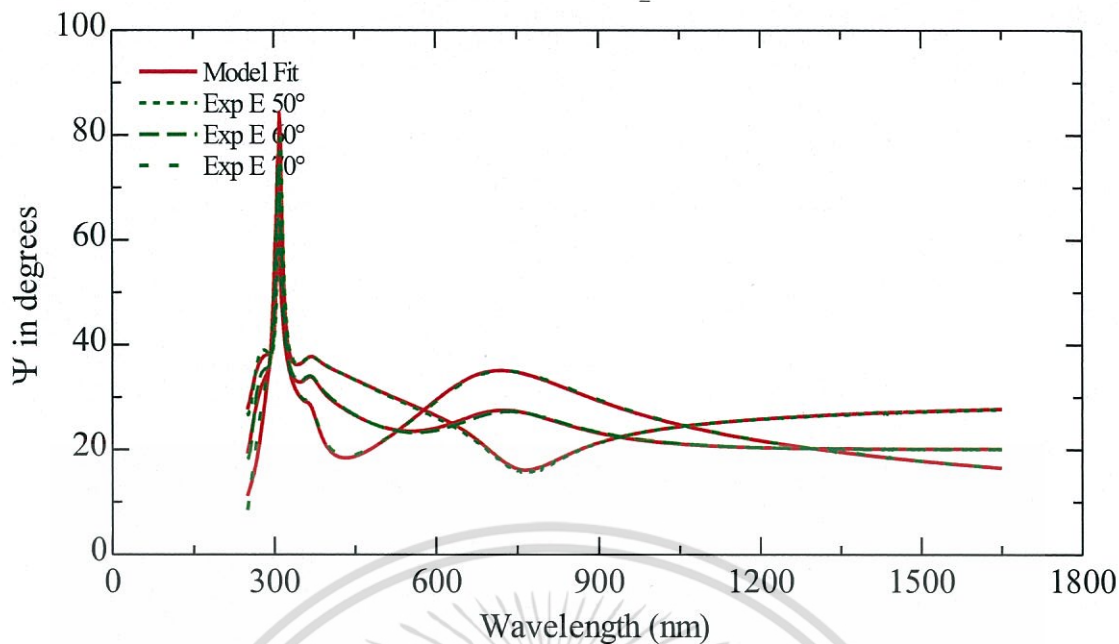


รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 3 mTorr

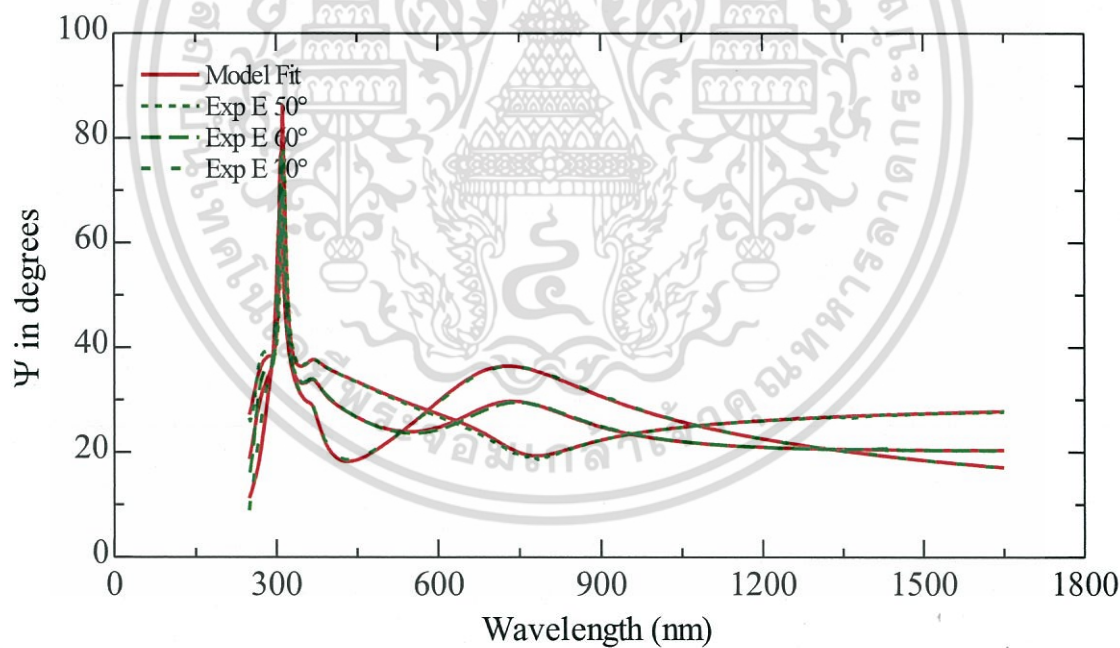


รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 5 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

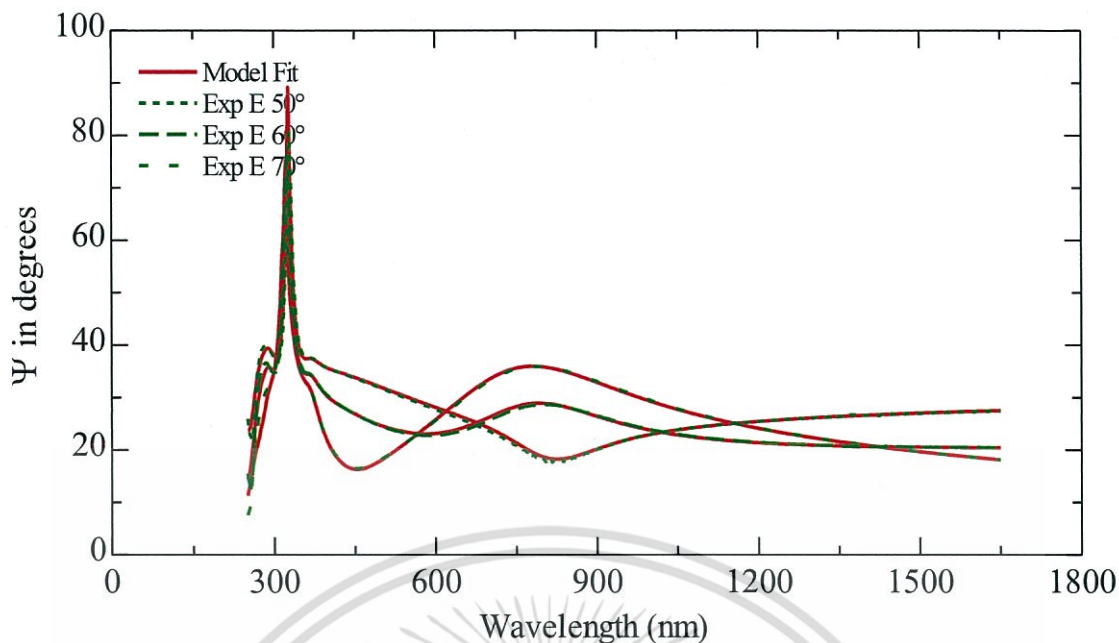


รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 7 mTorr

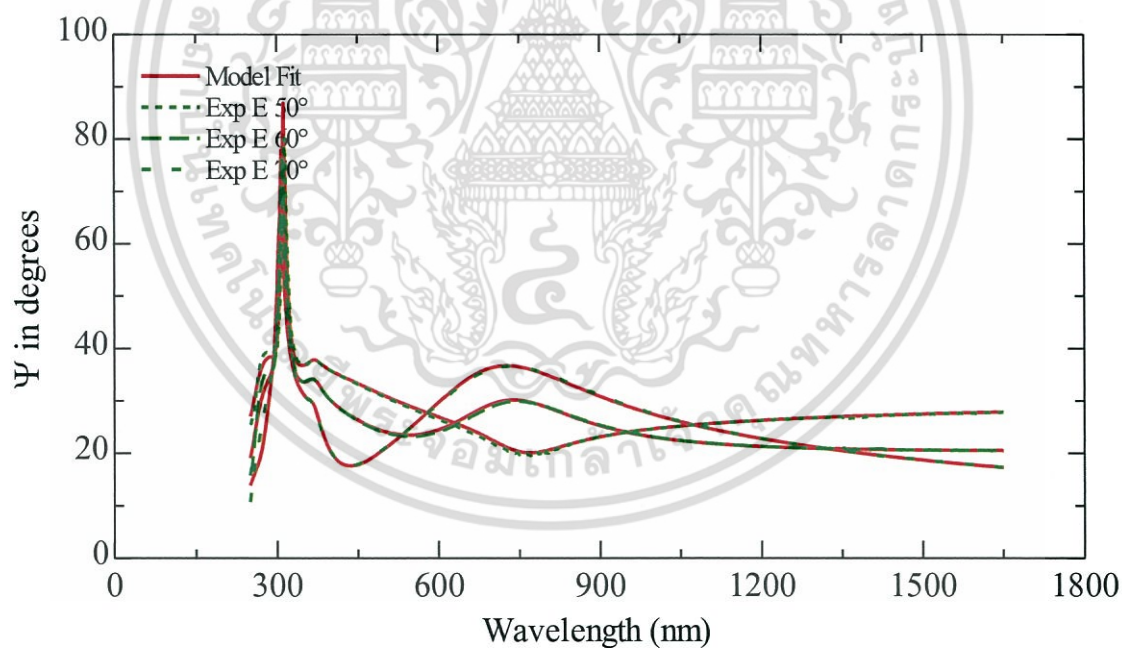


รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 10 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

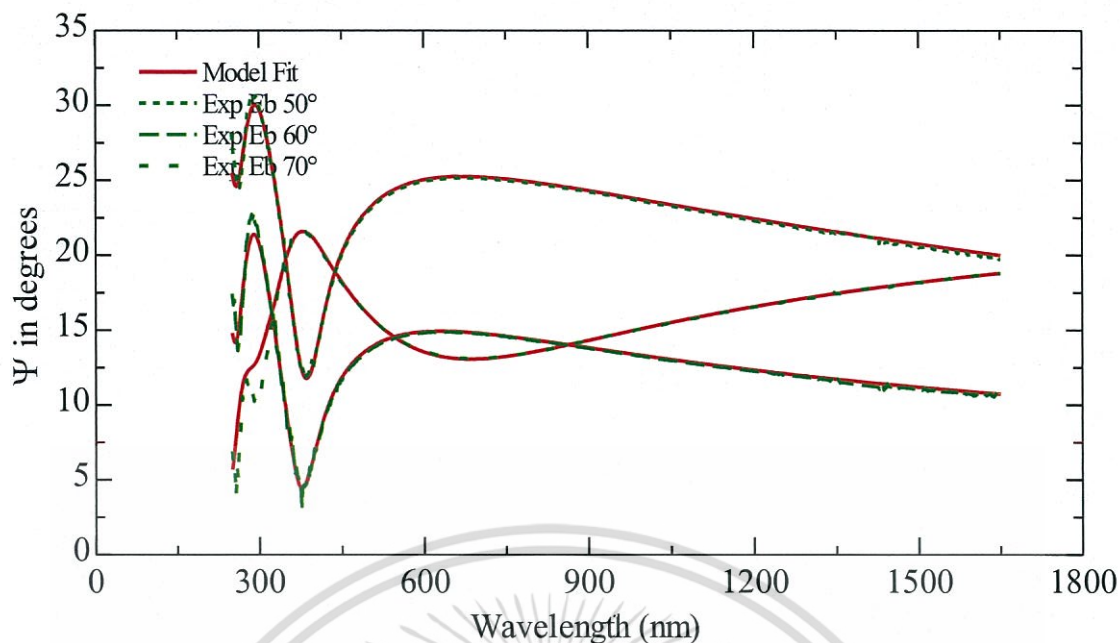


รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 15 mTorr

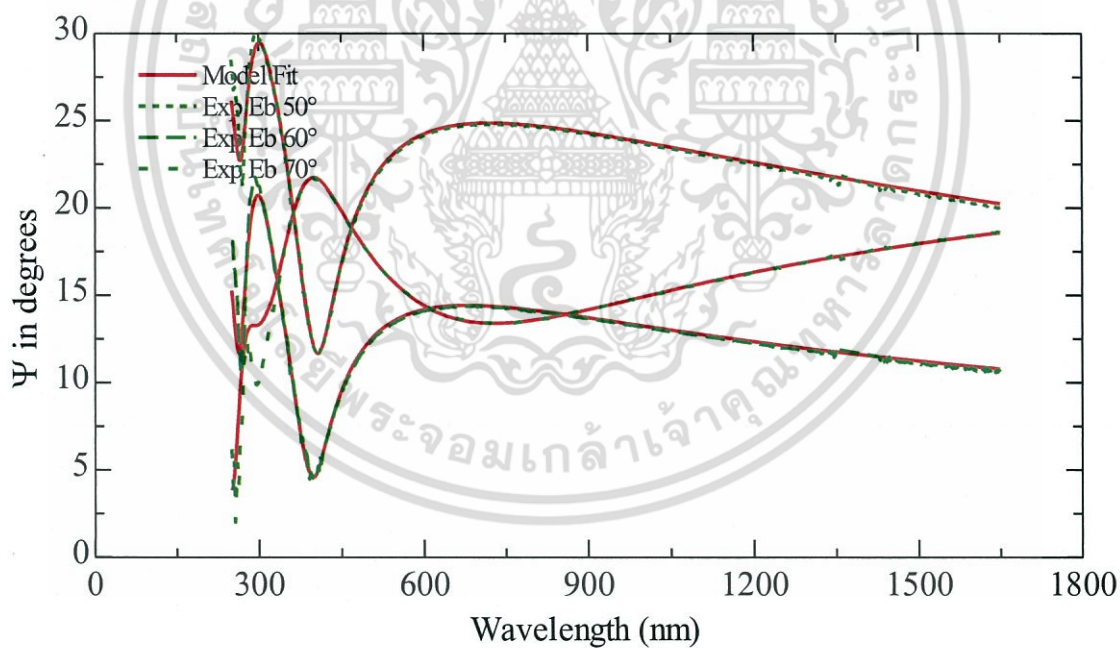


รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ค่าความดันในการเคลือบ 30 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

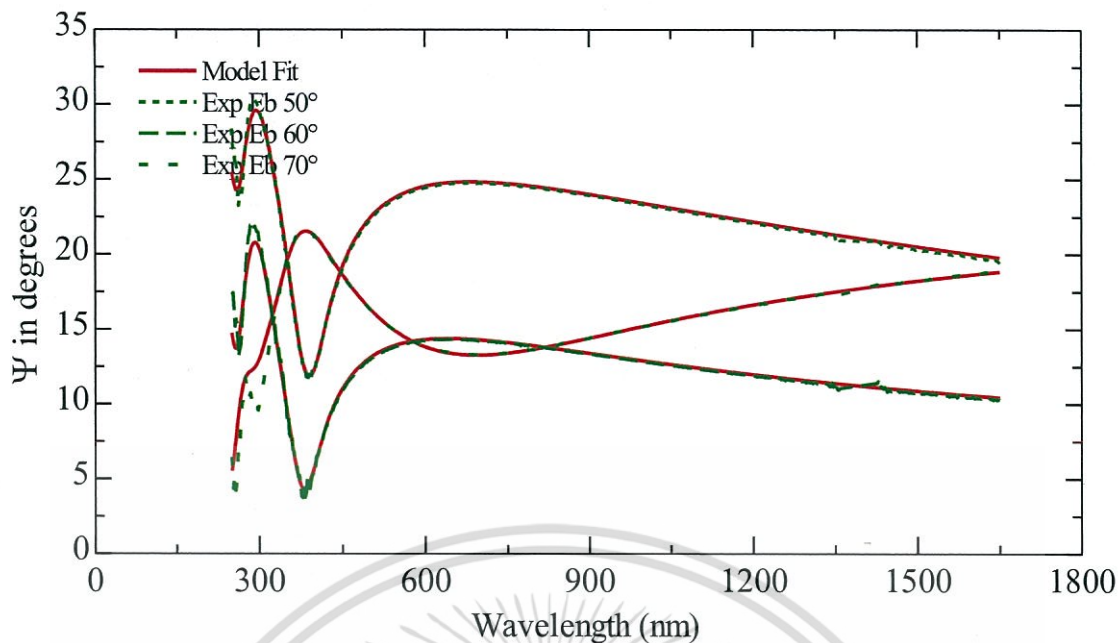


รูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 3 mTorr

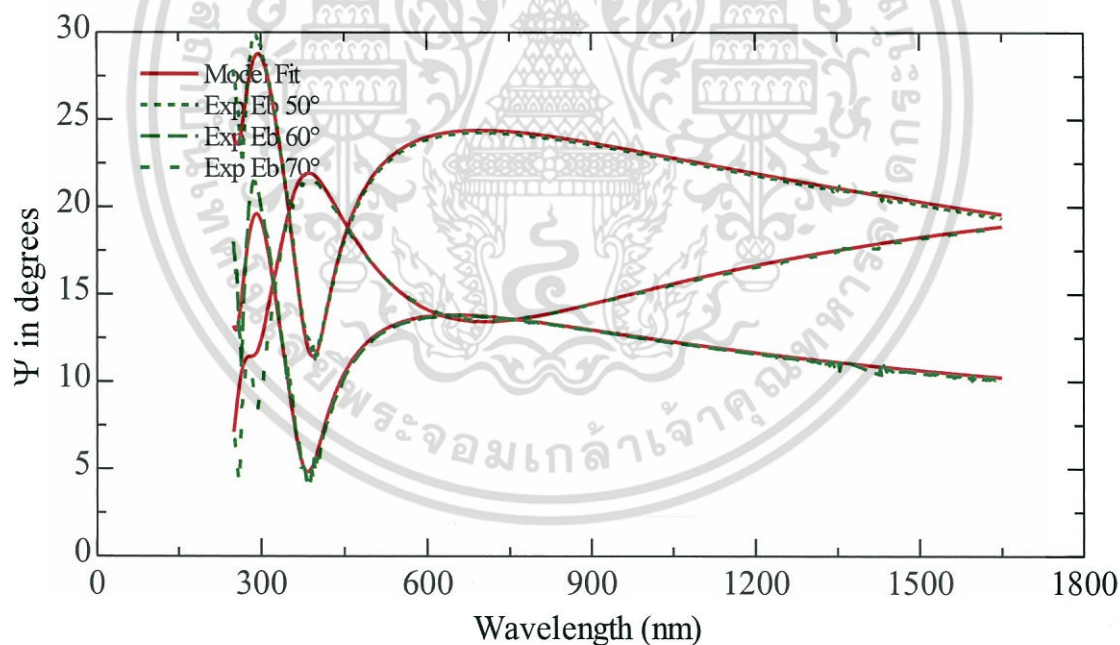


รูปที่ 4.9 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 5 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

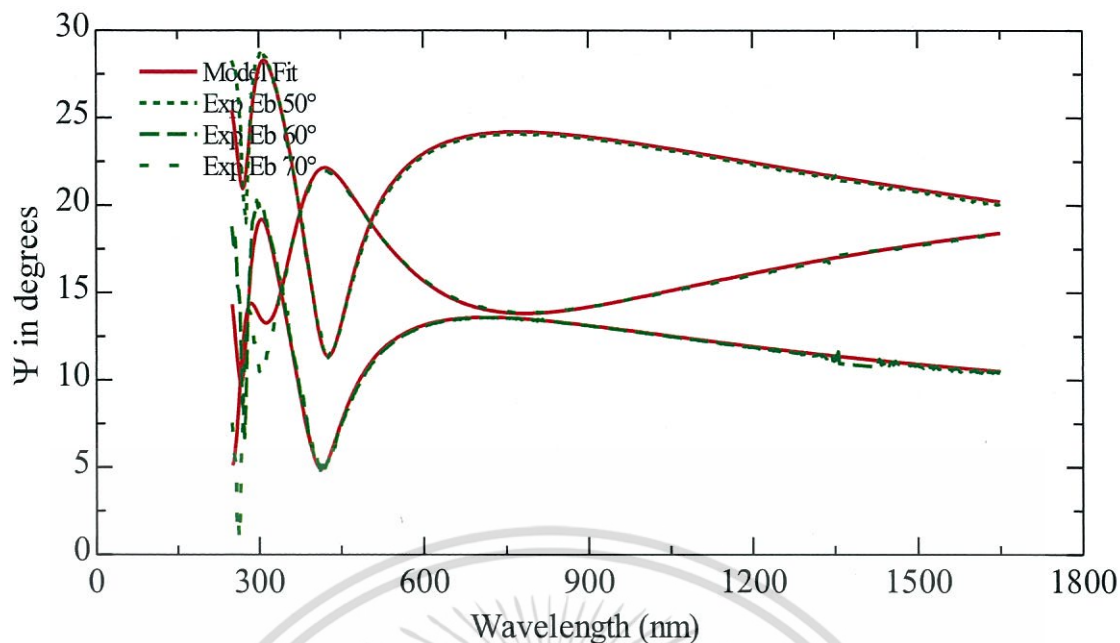


รูปที่ 4.10 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 7 mTorr

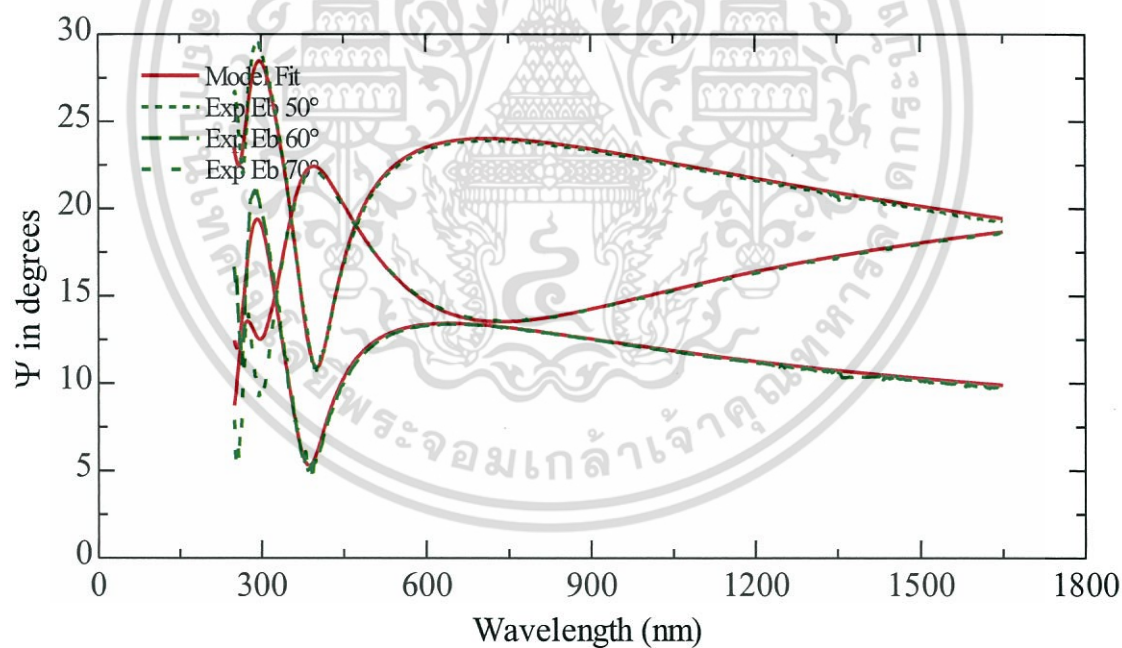


รูปที่ 4.11 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 10 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 15 mTorr



รูปที่ 4.13 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ค่าความดันในการเคลือบ 30 mTorr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอน โดยใช้แบบจำลองจากสมการทาว์นลอเรนซ์ที่มีค่าความดันในการเคลือบต่างกัน

ความดันในการเคลือบ (mTorr)	ความหนาของฟิล์มแทนทาล์มออกไซด์ (nm)	ค่าดัชนีหักเห (n) ที่ความยาวคลื่น 550 nm	ค่า MSE
3	91.335	2.1663	8.281
5	97.888	2.1602	8.625
7	93.873	2.1473	8.885
10	96.721	2.1177	9.731
15	102.944	2.1199	9.986
30	95.129	2.1146	9.033

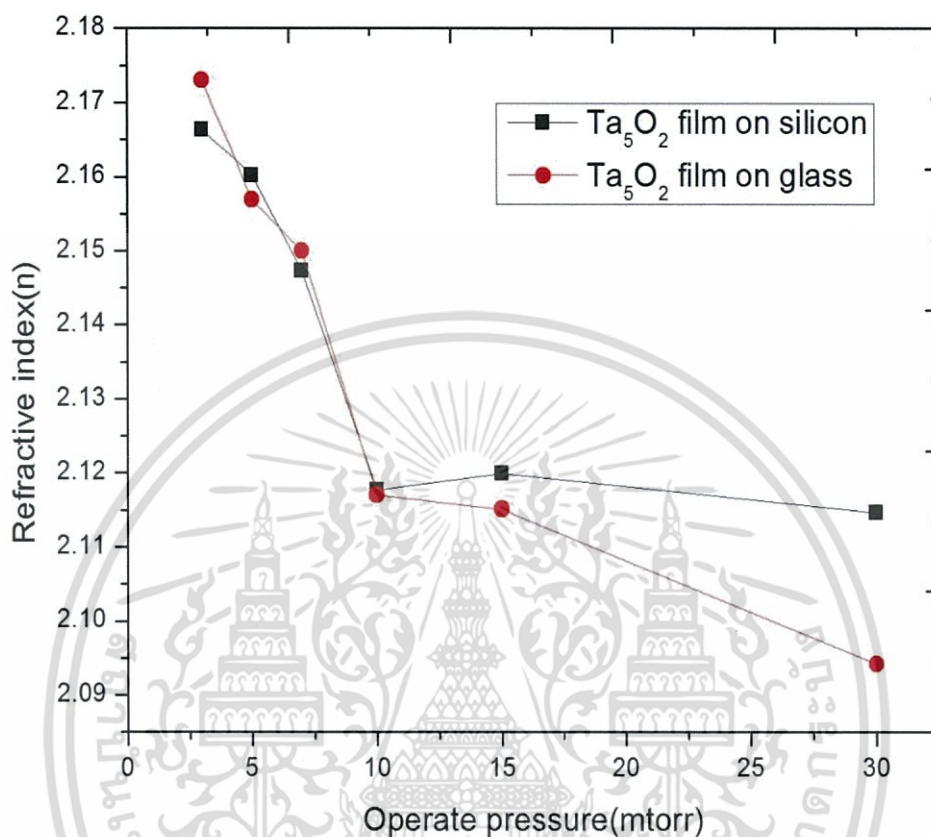
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยใช้แบบจำลองจากสมการทาว์นลอเรนซ์ที่มีค่าความดันในการเคลือบต่างกัน

ความดันในการเคลือบ (mTorr)	ความหนาของฟิล์มแทนทาล์มออกไซด์ (nm)	ค่าดัชนีหักเห (n) ที่ความยาวคลื่น 550 nm	ค่า MSE
3	88.522	2.1730	4.300
5	95.650	2.1569	4.385
7	91.108	2.1500	4.084
10	94.187	2.1170	5.134
15	103.46	2.1151	4.798
30	97.323	2.0942	4.850

จากการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ โดยสามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและค่าความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนและแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อนำค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยความดันในการเคลือบต่างกันมาเปรียบเทียบ พบว่า ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันในการเคลือบฟิล์มเพิ่มมากขึ้นทั้งกรณีของการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ เนื่องจาก เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบเท่ากัน ที่ความดันในการเคลือบฟิล์มบางต่ำไอออนจะเคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูง เมื่อเกิดการการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่งผลให้อะตอมผิวหน้าเป้ามียพลังงานการเคลื่อนที่ที่สูงขณะตกลงเคลือบบนชิ้นงานจึงทำให้อะตอมของฟิล์มบางมีพลังงานมากพอที่จะจัดเรียงตัวใกล้ชิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


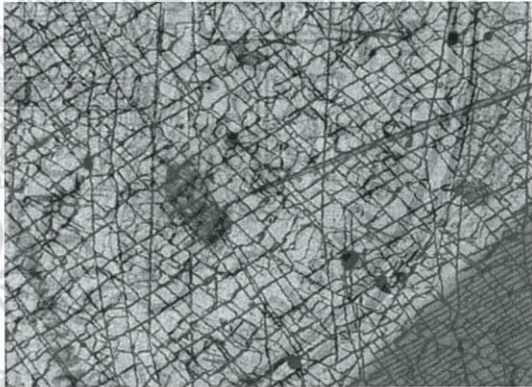
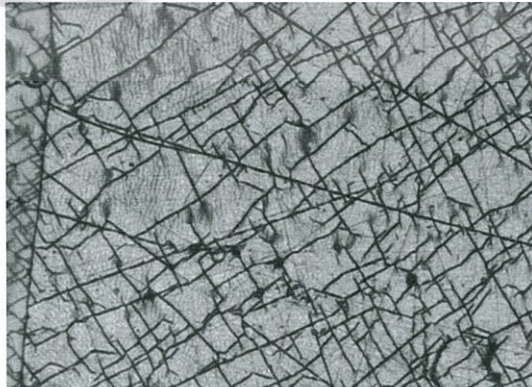
(Packing density) มากขึ้น เมื่อการจัดเรียงตัวของอะตอมมีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับ ค่าดัชนีหักเหทางแสง (n)

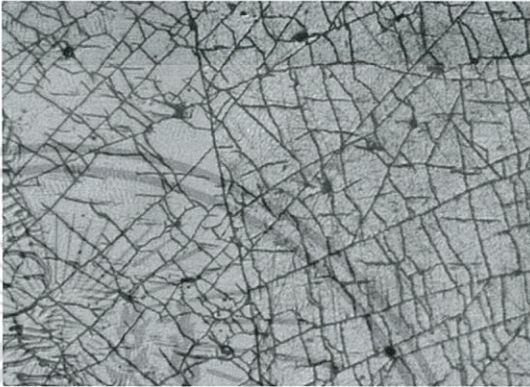
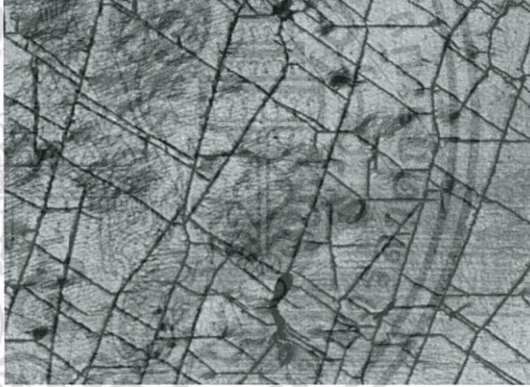
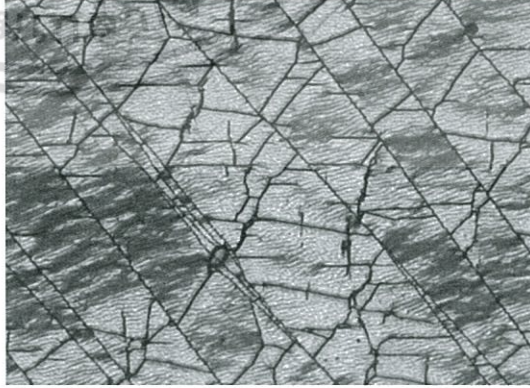
4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

ตารางที่ 4.3 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบาง TaO ที่เคลือบลงบน PDMS ที่มีเกรตติง 1 มิติ ความดันในการเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ โดยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 5 เท่า

ความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr)	รูปภาพ
3	
5	
7	

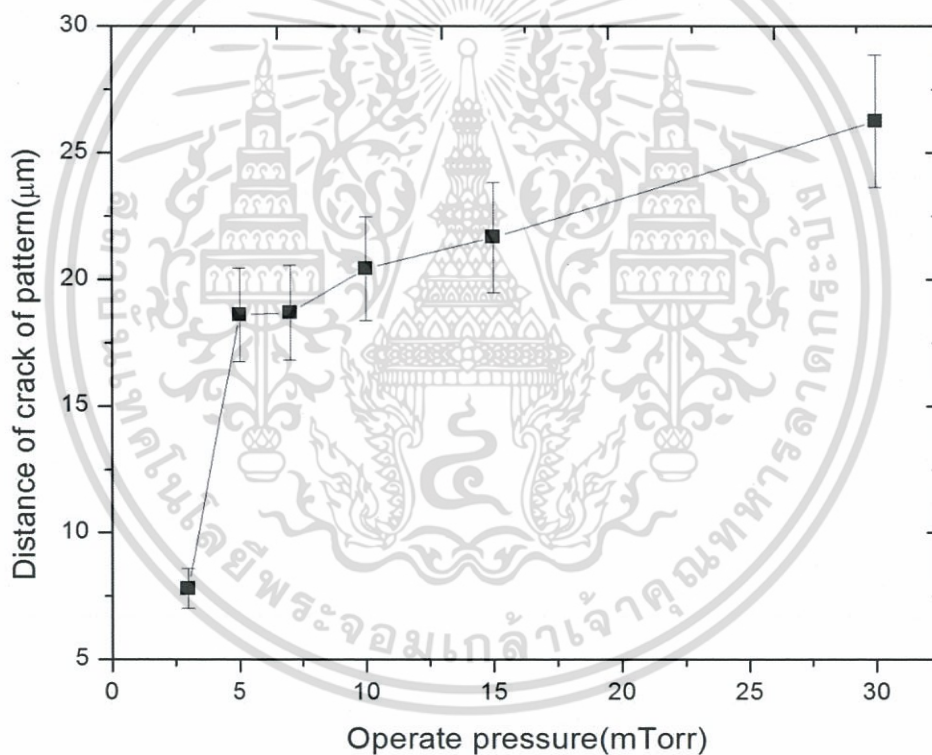
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบาง TaO ที่เคลือบลงบน PDMS ที่มีเกรตติง 1 มิติ ความดันในการเคลือบ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ โดยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 5 เท่า

ความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr)	รูปภาพ
10	
15	
30	

โดยจะศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบพื้นหลังสว่างตารางที่ 4.3 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบน PDMS ความดันในการเคลือบ 3 5 7 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

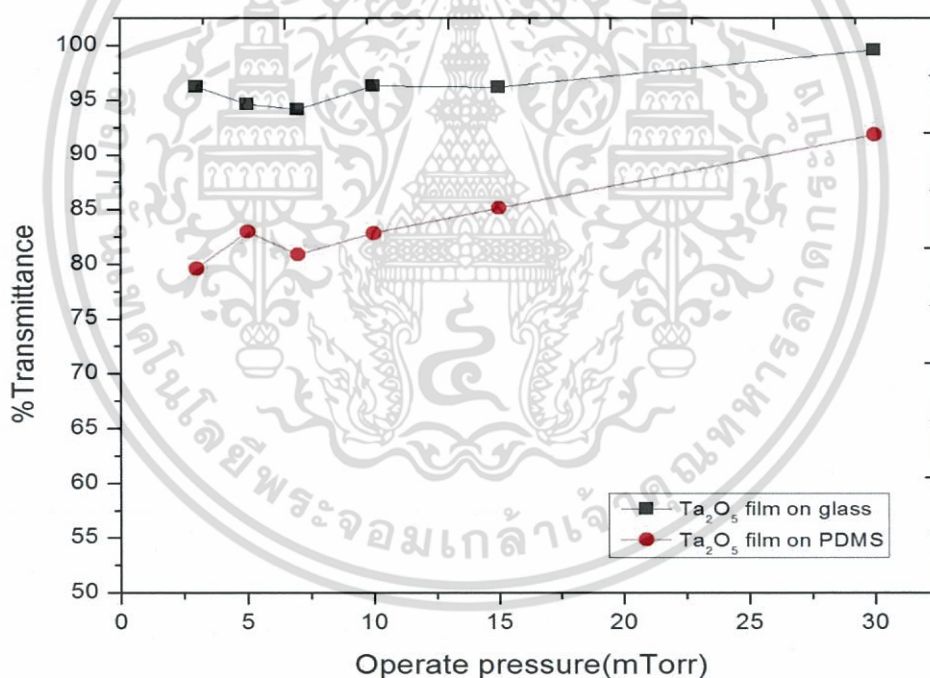
10 15 และ 30 mTorr ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ 5 เท่า โดยวัดระยะห่างของรอยแตกริ้ว ทำการสุ่มวัดประมาณ 100 จุด พบว่ามีลักษณะรอยแตกริ้วของฟิล์มบางเกิดขึ้นที่พื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PDMS เนื่องจาก PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบน PDMS เกิดรอยแตกริ้ว ซึ่งจากรูป 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างรอยแตกริ้วของฟิล์มบางเฉลี่ย (μm) กับความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) พบว่า เมื่อความดันในการเคลือบมากขึ้นทำให้ระยะห่างของรอยแตกริ้วมากขึ้นหรือรอยแตกริ้วของฟิล์มบางลดลงนั่นเอง เนื่องจาก ที่ความดันในการเคลือบฟิล์มบางต่ำนั้นอะตอมมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นกว่าที่ความดันในการเคลือบฟิล์มสูง เมื่อเกิดความเค้นและความเครียดทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยความดันในการเคลือบต่ำที่กำลังไฟฟ้าเท่ากันเกิดรอยแตกริ้วมากกว่าที่เคลือบด้วยความดันในการเคลือบที่สูง



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการเคลือบฟิล์มบาง (mTorr) กับ ระยะห่างระหว่างรอยแตกริ้วของฟิล์มบางเฉลี่ย (μm)

4.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลค่าการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง

เมื่อวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน (%Transmittance) กับความดันในการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นกระจกสไลด์และ PDMS ที่ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ที่ความยาวคลื่น 550 nm พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นกระจกสไลด์และ PDMS เนื่องจากที่ความดันในการเคลือบฟิล์มบางต่ำมีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าที่ความดันในการเคลือบสูง ทำให้แสงที่ส่งผ่านขึ้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่น้อยกว่า และเมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบลงบนแผ่นกระจกสไลด์และ PDMS พบว่า ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PDMS อยู่ประมาณ 10–15% เนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PDMS มีรอยแตกร้าวอาจจะเกิดการกระเจิงของแสงบนฟิล์มบางและเกิดการดูดกลืนแสงของเนื้อสารทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านน้อยกว่าฟิล์มบางที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์





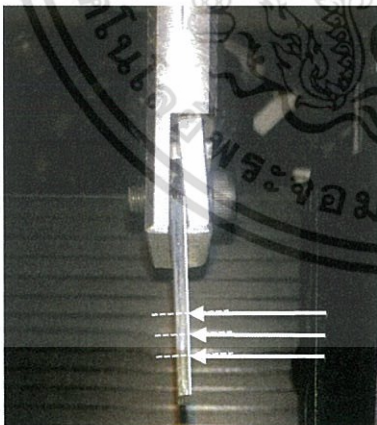

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกับความดันในการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นกระจกสไลด์และ PDMS ที่ 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ที่ความยาวคลื่น 550 nm

4.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติโกลด์โหมดเรโซแนนซ์ทางแสง

4.5.1 ทดสอบโดยการหมุน

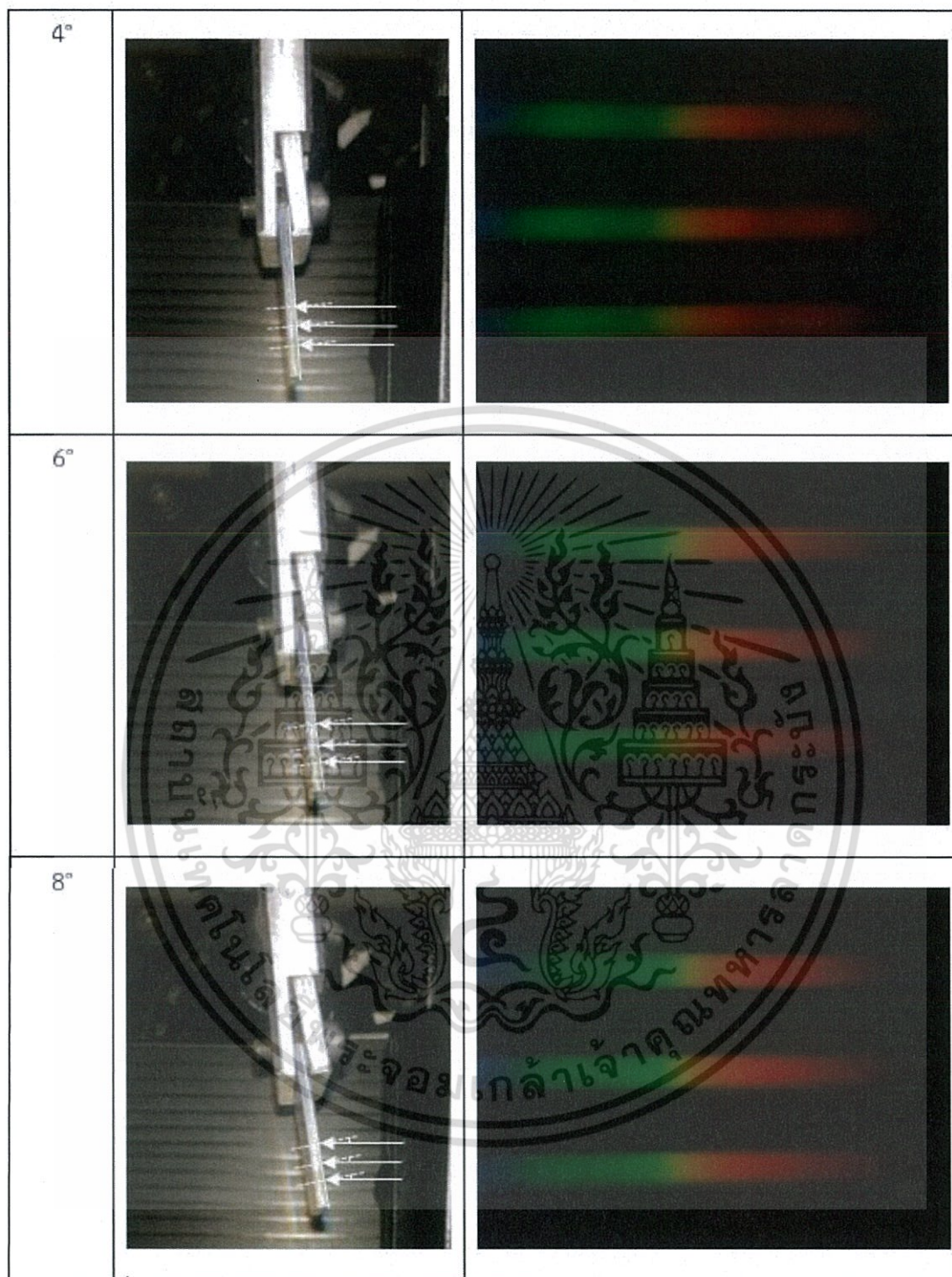
จากการทดสอบชิ้นงานโดยการจัดเซตอัพที่ทำการหมุนให้มุมตกกระทบของแสงที่ผิวชิ้นงานนั้นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทีละ 2 องศา ทำการบันทึกภาพแถบสเปกตรัมที่ปรากฏบนจอแสดงผล จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแมทแล็บแสดงผลดังตารางที่ 4.4 แสดงรูปภาพทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

ตารางที่ 4.4 แสดงรูปภาพทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

มุม (องศา)	รูปภาพ	แถบสเปกตรัมที่ปรากฏ
0°		
2°		

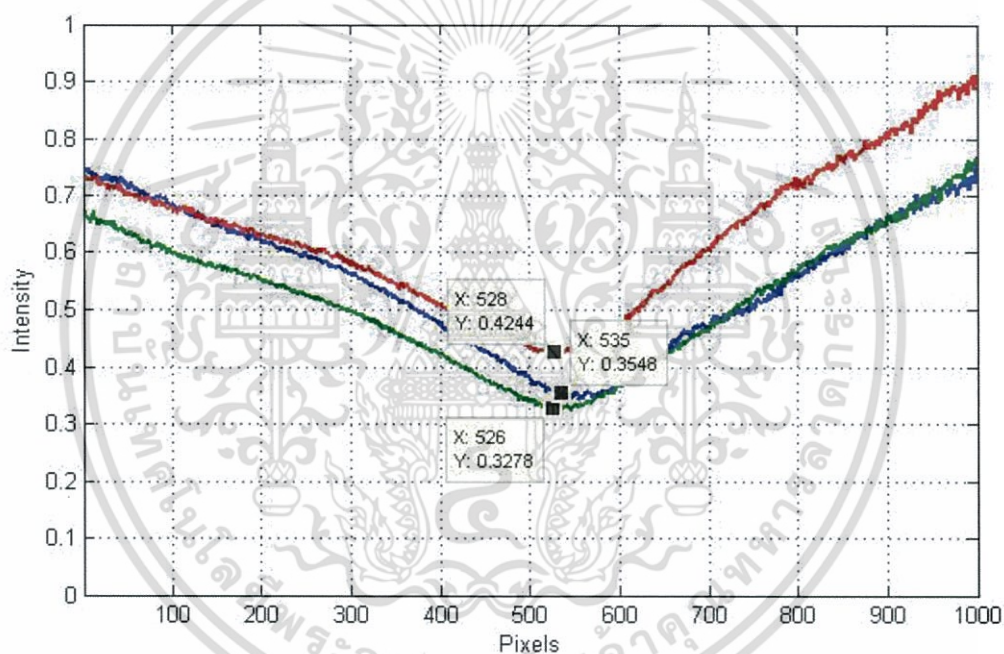
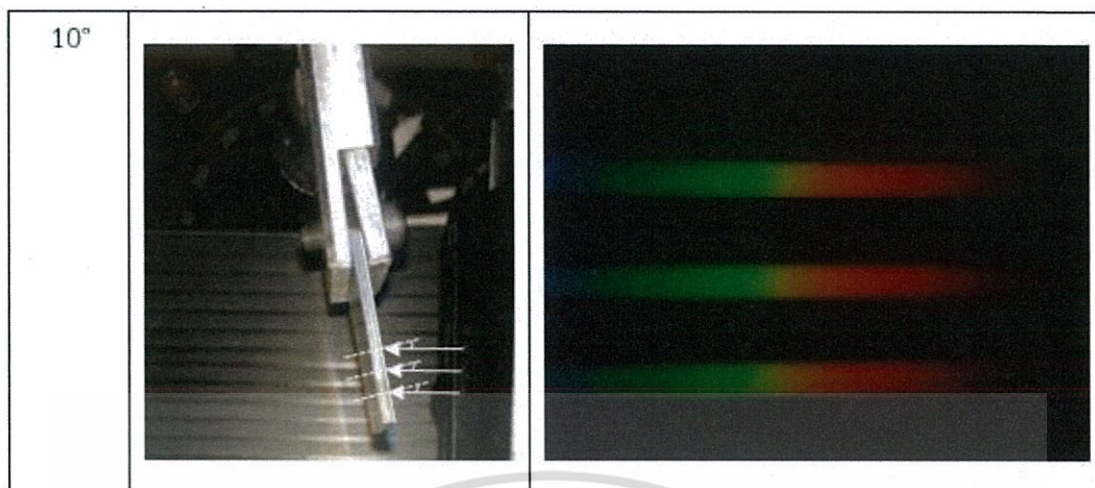
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ



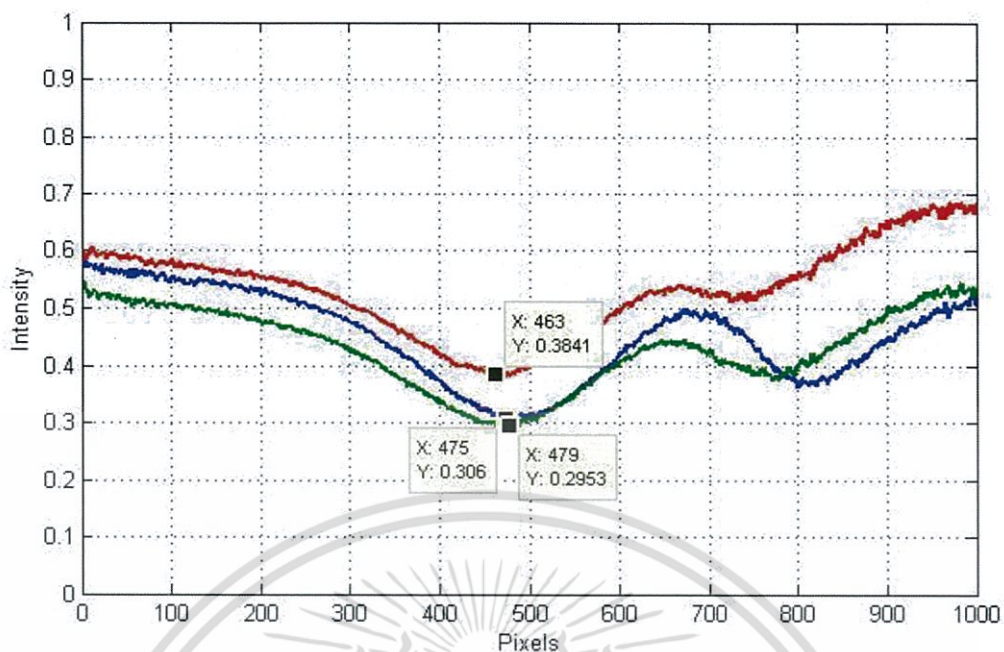
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

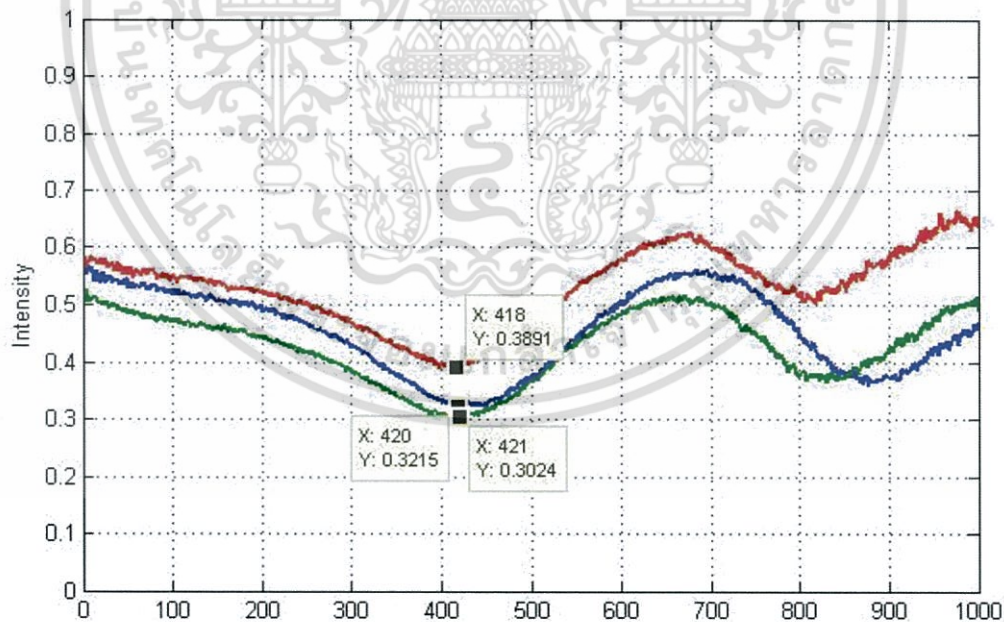


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดโรเซนเนสซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ขึ้นงาน) 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

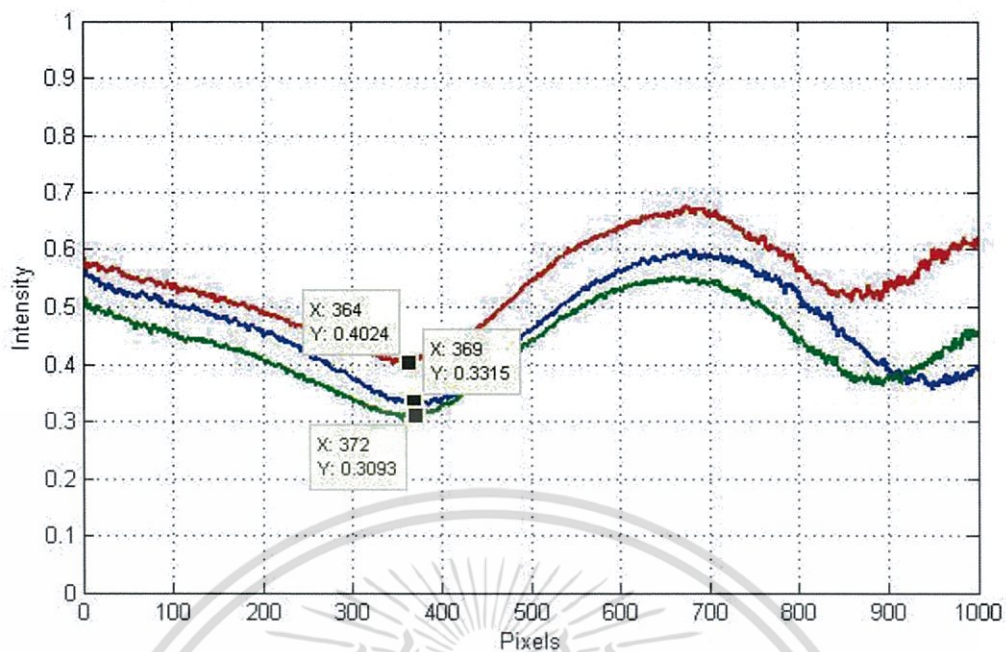


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ชั้นงาน) 2 องศา

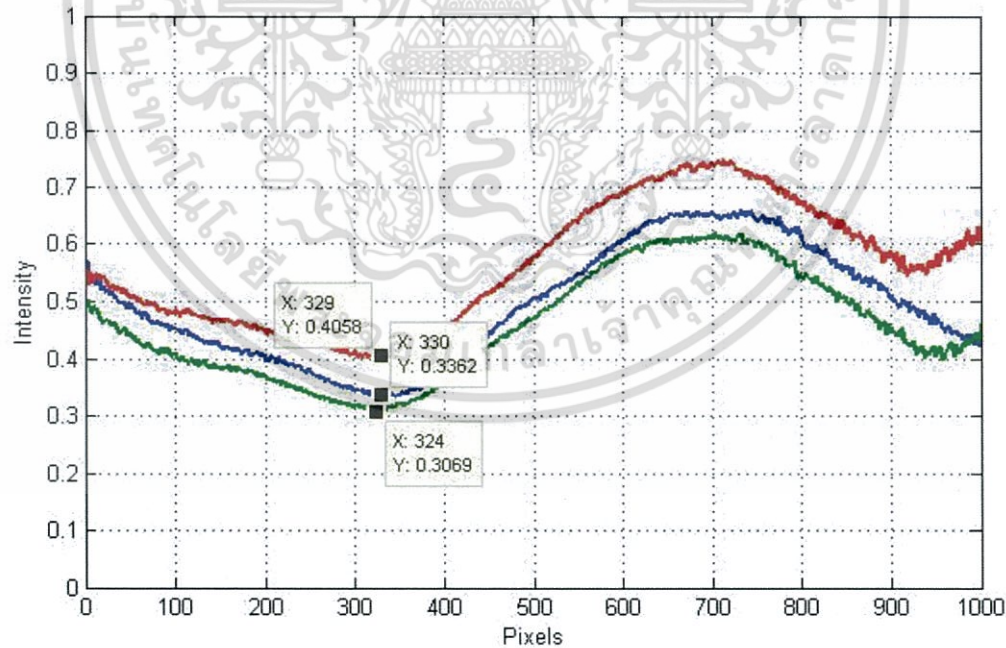


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ชั้นงาน) 4 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

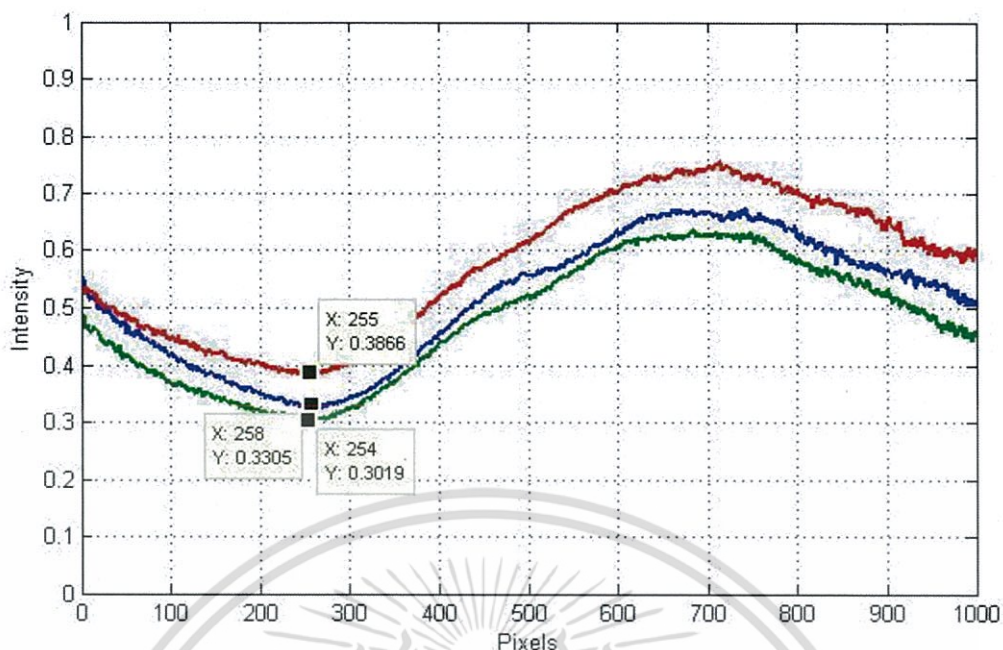


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ชิ้นงาน) 6 องศา



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ชิ้นงาน) 8 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

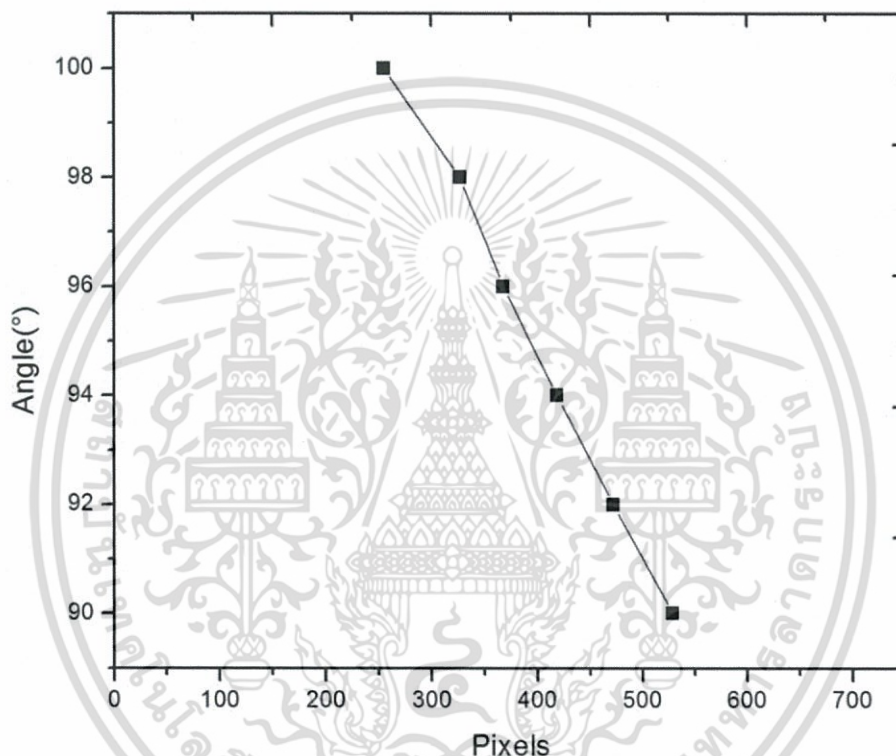


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่มุม (ชั้นงาน) 10 องศา

เมื่อจัดเซตอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบชั้นงานโดยทำการหมุนชั้นงานเพื่อให้ลำแสงทั้ง 3 ลำทำมุมตกกระทบกับชั้นงานเพิ่มขึ้นทีละ 2 องศา จากนั้นบันทึกรูปภาพชั้นงานและรูปภาพแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ ซึ่งแถบสเปกตรัมที่ปรากฏจะเห็นเป็นลำแสง 3 ลำและแยกออกเป็นแถบสี คือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน เมื่อทำการทดลองโดยการหมุนชั้นงานให้ลำแสงทั้ง 3 ลำทำมุมตกกระทบกับชั้นงานเพิ่มขึ้นทีละ 2 องศา แถบสเปกตรัมจะปรากฏแถบมืด เมื่อมุมที่แสงตกกระทบเพิ่มมากขึ้นแถบมืดที่ปรากฏจะแยกออกจากกันไปเรื่อยๆ และตำแหน่งแถบมืดของลำแสงทั้ง 3 ลำมีตำแหน่งใกล้เคียง เมื่อทำการเพิ่มมุมที่แสงตกกระทบชั้นงาน เนื่องจากมุมที่แสงตกกระทบชั้นงานเป็นมุมเดียวกันทำให้ตำแหน่งของแถบมืด แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะนำแถบสเปกตรัมที่ปรากฏมาทำการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมแมทแลปเพื่อให้แถบมืดที่ปรากฏดูง่ายและชัดเจนมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลจากแมทแลปพบว่า เมื่อทำการหมุนโดยให้แสงตกกระทบกับชั้นงานเพิ่มขึ้นทีละ 2 องศา ตำแหน่งความยาวคลื่นเรโซแนนซ์มีการเลื่อนและแยกออกจากกันทั้ง 3 ลำแสง เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางผ่านอากาศมายังชั้นฟิล์มบาง จะเกิดการสะท้อนและการหักเหขึ้นเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของอากาศและชั้นฟิล์มบางแตกต่างกัน แสงที่สะท้อนกลับผ่านเกรตติ้งทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นอีก ณ ความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ เมื่อแสงตกกระทบด้วยมุมฉาก แสงจะเลี้ยวเบนในชั้นฟิล์มบางนำแสงและมีค่าเฟสแสงตรงกับเฟสของเวฟไกด์โหมด ส่งผลให้แสงเดินทางสะท้อนกลับไปในชั้นฟิล์มบาง และค่อยๆ รั่วไหลออกจากชั้นฟิล์มบาง เนื่องจากการเลี้ยวเบนแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเกรตติง เนื่องจากแสงที่รั่วไหลออกมาทางที่แสงเดินทางตกกระทบบนฟิล์มบางมีค่าเฟสเสริมกัน ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้แสงสะท้อนกลับหมด ดังนั้น เมื่อมุมของแสงที่ตกกระทบบนชั้นงานเปลี่ยนแปลงไป ค่าเฟสของแสงเลี้ยวเบนจะแยกเป็นสองค่า ส่งผลให้เรโซแนนซ์เกิดขึ้น ณ สองความยาวคลื่นโดยค่าความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ทั้งสองตำแหน่งนี้ จะแปรผันตามมุมแสงตกกระทบบนชั้นงาน ซึ่งพบว่า เมื่อทำการปรับมุมที่แสงตกกระทบบนชั้นงานเพิ่มขึ้นทีละ 2 องศา ความยาวคลื่น เรโซแนนซ์มีการเลื่อนไปประมาณ 50-70 ตำแหน่งพิเซล ของชุดรับสัญญาณสเปกตรัมแสง เมื่อเทียบกับชั้นงานตอนที่ยังไม่ทำการหมุน

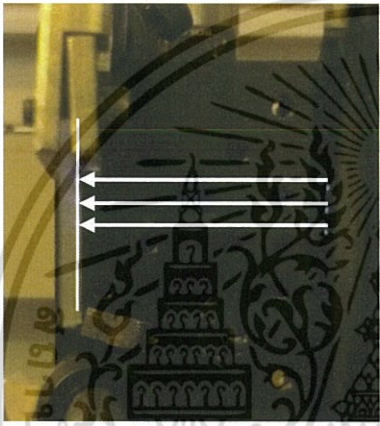

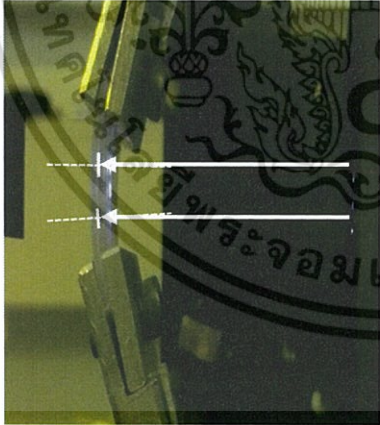



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงตกกระทบบนชั้นงาน (เฉลี่ยลำแสงทั้ง 3 ลำ) กับจำนวนของพิเซลที่เปลี่ยนแปลงไป

4.5.1 ทดสอบโดยการโค้งงอ

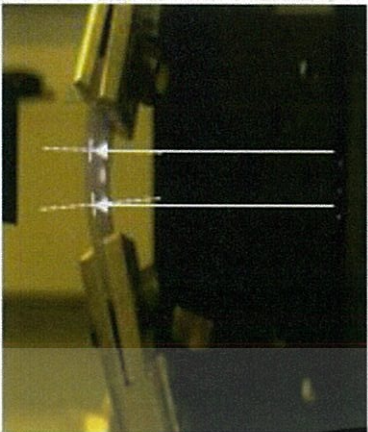
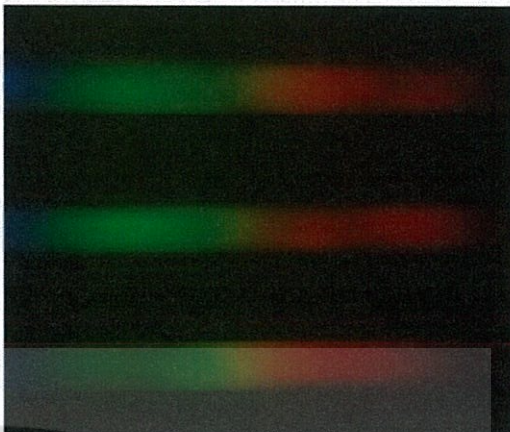
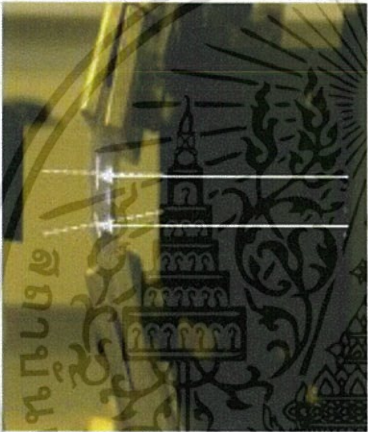

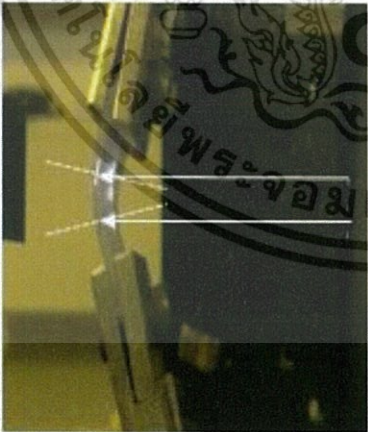
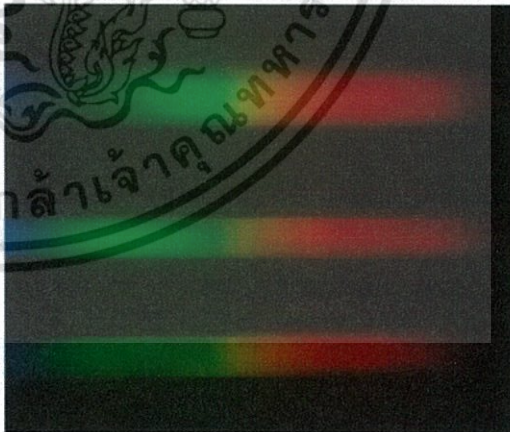
จากการทดสอบชิ้นงานโดยการจัดเซตอัพที่ทำการโค้งงอชิ้นงานโดยทำการโค้งงอชิ้นงานให้มุมที่แสงตกกระทบกับชิ้นงานนั้นลดลง ทำการบันทึกรูปภาพขนาดโค้งงอชิ้นงานจากนั้นนำรูปภาพมาทำการวัดมุมที่แสงทั้ง 3 ลำตกกระทบกับผิวชิ้นงาน ทำการบันทึกภาพแถบสีที่ปรากฏบนจอแสดงผล จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บแสดงผลดังตารางที่ 4.4 แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

ตารางที่ 4.5 แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

มุม	รูปภาพ	แถบสเปกตรัมที่ปรากฏ
1. $\approx 0^\circ$ 2. $\approx 0^\circ$ 3. $\approx 0^\circ$		
1. $\approx 1^\circ$ 2. $\approx 0^\circ$ 3. $\approx 10^\circ$		

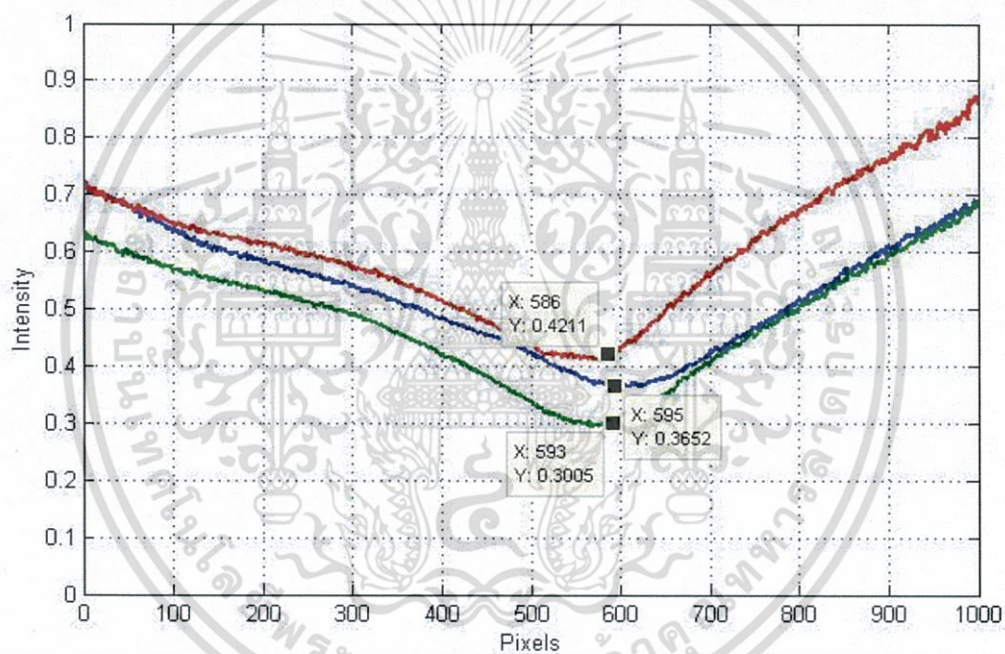
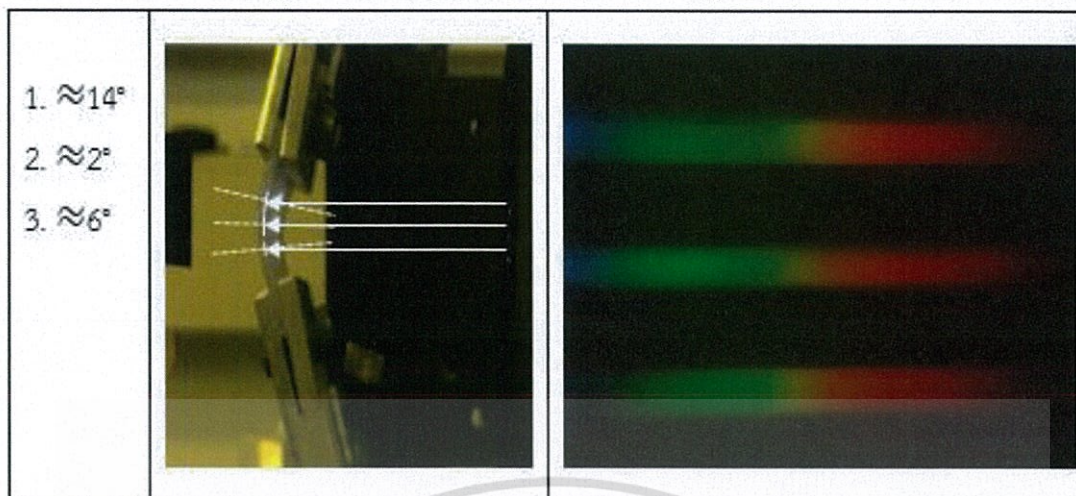
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

<ol style="list-style-type: none"> 1. $\approx 2^\circ$ 2. $\approx 0^\circ$ 3. $\approx 10^\circ$ 		
<ol style="list-style-type: none"> 1. $\approx 2^\circ$ 2. $\approx 0^\circ$ 3. $\approx 12^\circ$ 		
<ol style="list-style-type: none"> 1. $\approx 14^\circ$ 2. $\approx 0^\circ$ 3. $\approx 16^\circ$ 		

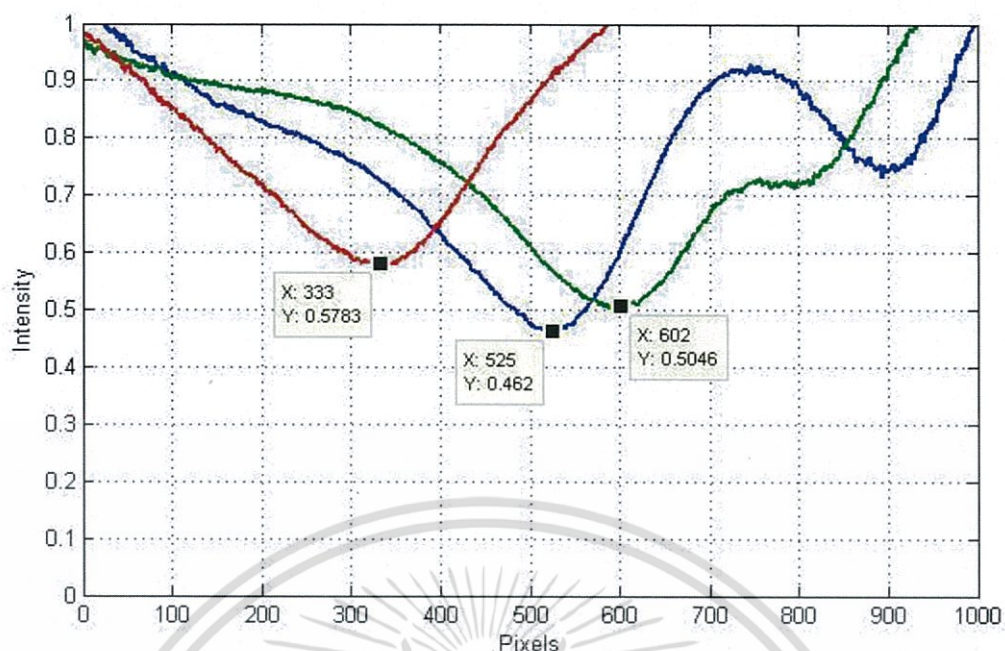
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) แสดงรูปการทดลองและแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ

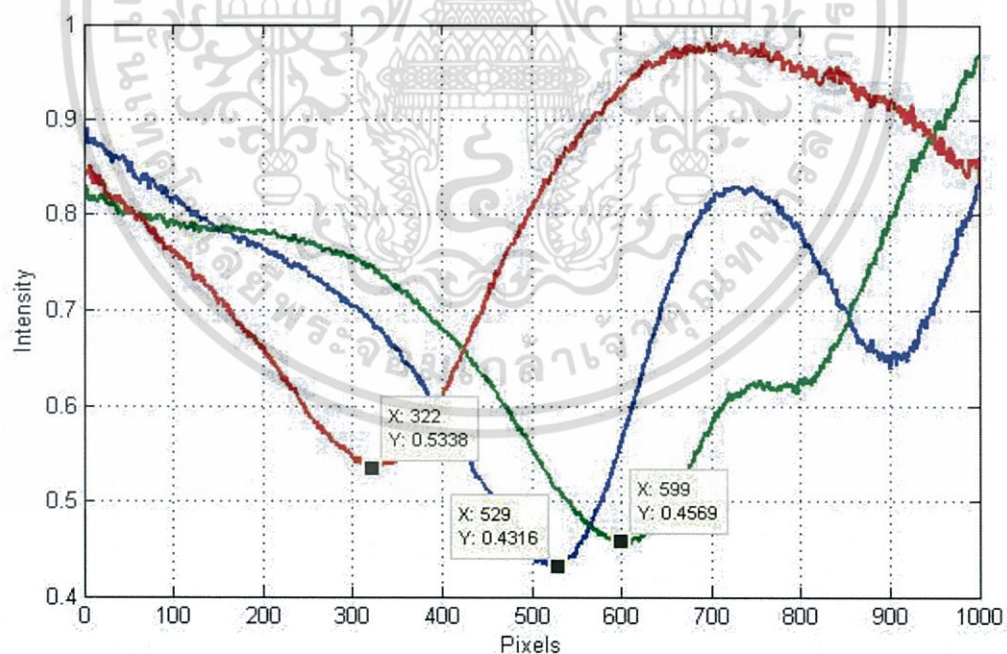


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

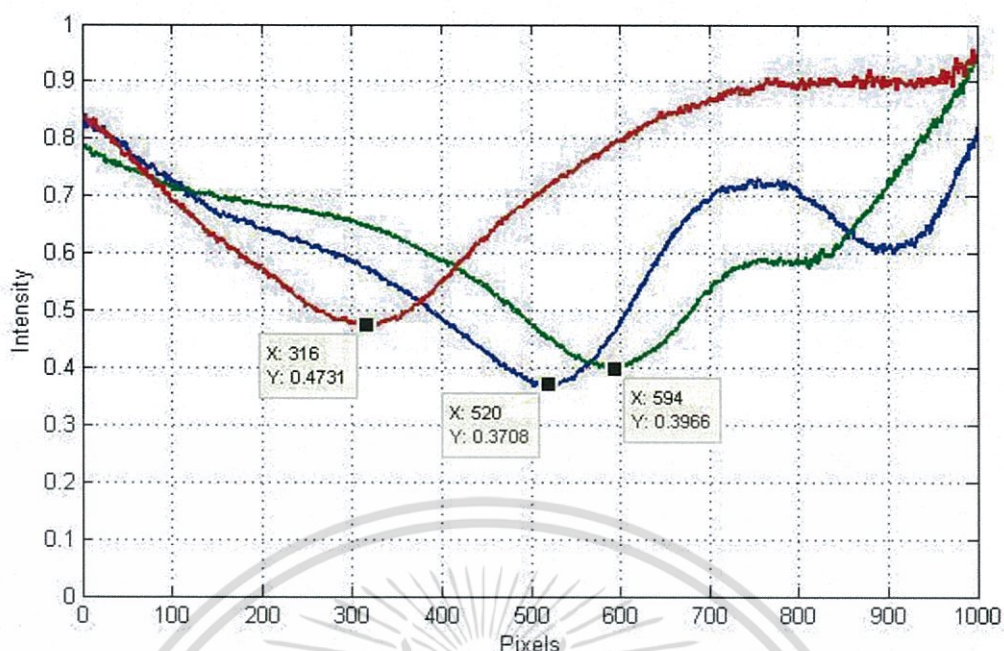


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 10 องศา ตามลำดับ

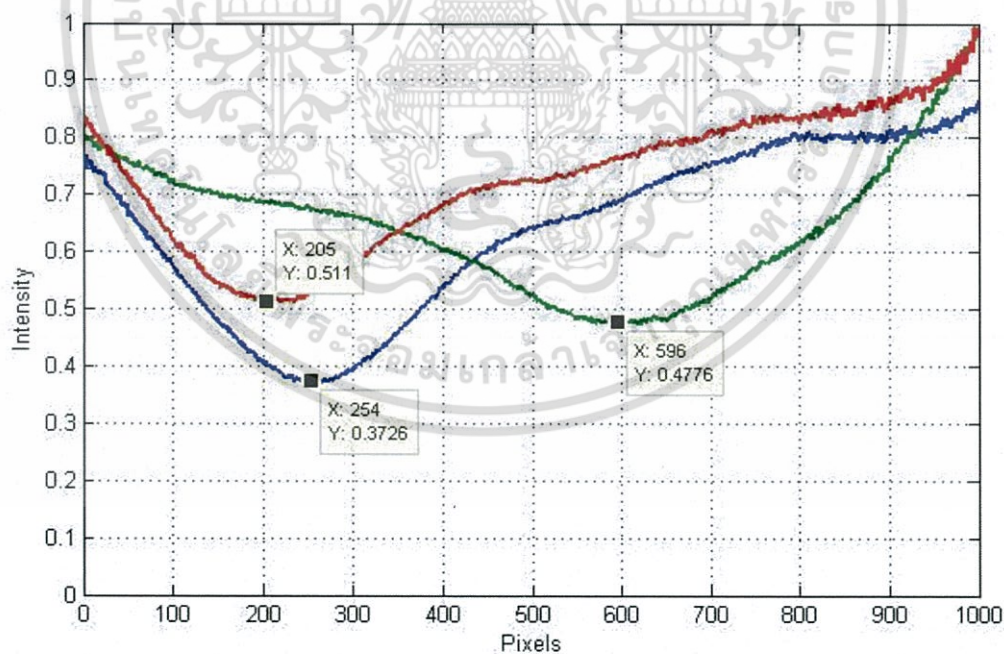


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 20 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

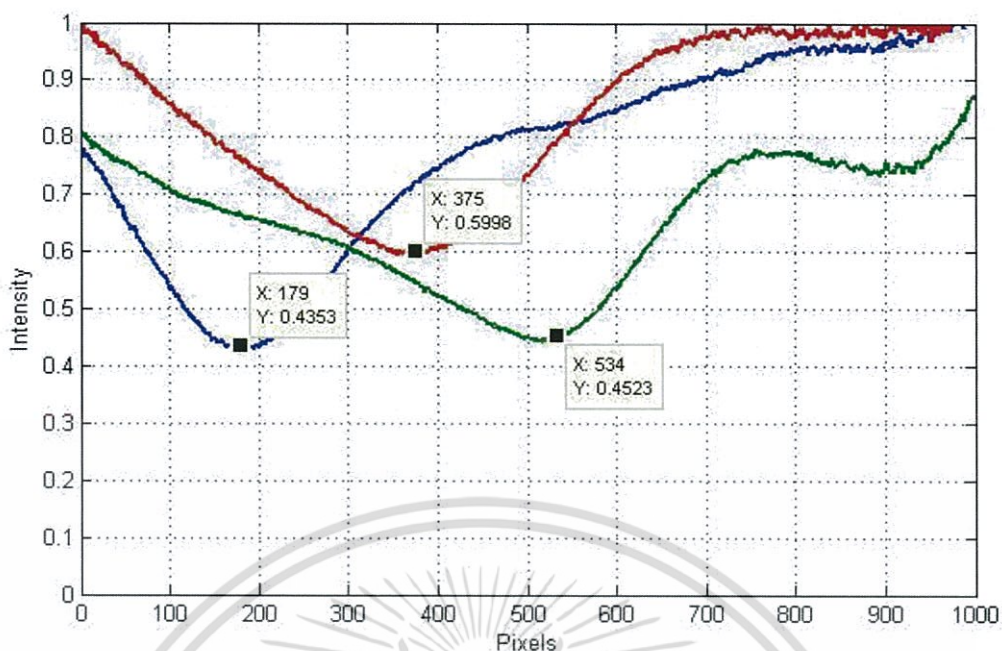


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ขึ้นงาน) ที่มุม 2 0 และ 12 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ขึ้นงาน) ที่มุม 14 0 และ 16 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการเกิดเรโซแนนซ์ที่แถบสเปกตรัมของลำแสงทั้ง 3 รูที่โค้งงอ (ชิ้นงาน) ที่มุม 14.2° และ 6 องศา ตามลำดับ

เมื่อจัดเซตอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบชิ้นงานโดยทำการโค้งงอชิ้นงาน จากนั้นบันทึกรูปภาพชิ้นงานและรูปภาพแถบสเปกตรัมที่ปรากฏ ซึ่งแถบสเปกตรัมที่ปรากฏจะเห็นเป็นลำแสง 3 ลำ และแยกออกเป็นแถบสี คือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน เมื่อทำการทดลองโดยการโค้งงอชิ้นงานโดยที่ลำแสงทั้ง 3 ลำมีมุมตกกระทบกับชิ้นงานที่แตกต่างกัน แถบสเปกตรัมจะปรากฏแถบมืด เมื่อมุมที่แสงตกกระทบเพิ่มมากขึ้นแถบมืดที่ปรากฏจะแยกออกจากกันไปเรื่อยๆ และตำแหน่งแถบมืดของลำแสงทั้ง 3 ลำมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน เนื่องจากมุมที่แสงตกกระทบชิ้นงานนั้นแตกต่างกัน ทำให้ตำแหน่งของแถบมืดที่ปรากฏก็แตกต่างกัน โดยจะนำแถบสเปกตรัมที่ปรากฏมาทำการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อให้แถบมืดที่ปรากฏดูง่ายและชัดเจนมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลจากแมทแล็บพบว่า เมื่อทำการโค้งงอชิ้นงานโดยให้ลำแสงทั้ง 3 ลำตกกระทบกับชิ้นงานนั้นมุมที่แตกต่างกัน พิกัดมีการเลื่อนและแยกออกจากกันทั้ง 3 ลำแสง เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางผ่านอากาศมายังชั้นฟิล์มบาง จะเกิดการสะท้อนและการหักเหขึ้นเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของอากาศและชั้นฟิล์มบางแตกต่างกัน แสงที่สะท้อนกลับผ่านเกรตติงทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นอีก ที่โหมดของแสงลำดับที่ 1 เมื่อมุมหักเหมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตทำให้แสงสะท้อนกลับไปกลับภายในชั้นฟิล์มบางและในขนาดเดียวกันที่แสงเดินทางผ่านชั้นฟิล์มบางก็มีแสงที่รั่วไหลออกไปจากชั้นฟิล์มบาง ดังนั้น เมื่อมุมของแสงที่ตกกระทบกับชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ทำให้โหมดของเวกไกด์และเกรตติงที่ตรงกันนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งพิกัดที่แยกออกจากกันเกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรตติ้งโหมดลำดับที่ -1 และ +1 จึงเกิดการเลื่อนของพีคเรโซแนนซ์ ซึ่งพบว่าเมื่อทำการโค้งงอขึ้นงานมากขึ้น พีคเรโซแนนซ์มีการเลื่อนไป เมื่อเทียบกับข้อมูลของการเลื่อนของพีคเรโซแนนซ์ที่ทำการหมุน พบว่า มีค่าการเลื่อนของพีคเรโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อโค้งงอขึ้นงานเมื่อมุมที่แสงตกกระทบกับขึ้นงาน 2 องศา พีคเรโซแนนซ์จะเลื่อนไปประมาณ 50–70 พิเซล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยการพัฒนาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์บนโพลีไคเมทิลไซลอกเซน ด้วยเทคนิคซีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง เพื่อใช้งานด้านเซนเซอร์เชิงแสงแบบยืดหยุ่น โดยผู้วิจัยได้ทำการกำหนดและปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ลงบน PDMS ที่มีเกรตติ้ง 1 มิติ เพื่อให้ได้อุปกรณ์ทางแสงที่มีคุณสมบัติ Guided Mode Resonance (GMR) และสามารถยืดหยุ่นโค้งงอได้ โดยผู้วิจัยทำการปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ในส่วนของความดันในการเคลือบฟิล์มบาง 3 5 7 10 15 และ 30 mTorr ให้มีความหนา 100 nm โดยทำการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นซิลิกอน กระจกสไลด์ PDMS และ GMR เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีฐานรองรับแตกต่างกัน โดยทำการวัดความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ พบว่า ความหนาและค่าดัชนีของชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าความดันในการเคลือบที่แตกต่างกันส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มบาง จากนั้นนำมาศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PDMS และ GMR เกิดรอยแตกร้าว ที่ความดันในการเคลือบฟิล์มบางต่ำๆ ฟิล์มบางเกิดรอยแตกรอยระดับไมโครเมตร โดยเมื่อความดันในการเคลือบฟิล์มบางสูงขึ้นรอยแตกร้าวในการเคลือบฟิล์มลดลง รอยแตกร้าวของฟิล์มบางเกิดจากความไม่เข้ากันของฐานรองรับที่เป็นพอลิเมอร์และอาจเกิดจากพลังงานในการเคลือบฟิล์มบางสูงทำให้เกิดความร้อนสะสมฟิล์มบางจึงเกิดการแตกร้าวสังเกตได้จากเมื่อความดันในการเคลือบเพิ่มขึ้น (พลังงานต่ำ) รอยแตกร้าวของฟิล์มบางลดลง จากนั้นนำฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PMDS และกระจกสไลด์มาวัดการส่งผ่านทางแสงเพื่อตรวจสอบว่า รอยแตกร้าวของฟิล์มบางเมื่อเทียบฟิล์มบางที่ไม่เกิดรอยแตกร้าวบนกระจกสไลด์ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงอย่างไร พบว่า การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางที่เคลือบลงบน PDMS ที่เกิดรอยแตกร้าวแตกต่างจากฟิล์มบางที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ ประมาณ 15-20%

จากนั้นนำอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงที่สุดมาทำการคุณสมบัติ Guided Mode Resonance (GMR) โดยผู้วิจัยทำการเลือกอุปกรณ์ที่เงื่อนไขความดันในการเคลือบ 30 mTorr เนื่องจากคุณสมบัติทางแสงมีค่าใกล้เคียงกันจึงเลือกอุปกรณ์ที่มีรอยแตกร้าวของฟิล์มบางน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการจัดเซตอัฟในการทดสอบคุณสมบัติ Guided Mode Resonance โดยการหมุนและโค้งงออุปกรณ์ พบว่า เมื่อทำการหมุนอุปกรณ์ให้มุมที่แสงตกกระทบอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น แถบมีดมีการเลื่อนไป 2 องศา ประมาณ 50-70 พิกเซล ตำแหน่งของแถบมีดของลำแสงทั้ง 3 ลำเป็นตำแหน่งเดียวกันแต่เมื่อทำการโค้งงออุปกรณ์ พบว่า ตำแหน่งที่เกิดแถบมีดของแสงทั้ง 3 ลำแตกต่างกัน เกิดจากแสงทำมุมตกกระทบกับอุปกรณ์ทำมุมที่แตกต่างกัน ทำให้ตำแหน่งของแถบมีดไม่ตรงกัน ดังนั้นลักษณะการโค้งงอของเซนเซอร์สามารถตรวจวัดทางอ้อมจากการวัดสเปกตรัมเรโซแนนซ์ ทั้งนี้ จากหลักการตรวจวัดการโค้งงอด้วยเทคนิคนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดอื่นๆ เช่น การวัดความดัน การวัดอัตราการเต้นของหัวใจ หรือการวัดรูปทรงพื้นผิว เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการเคลือบฟิล์มบางควรลองปรับเงื่อนไขอื่น ๆ ในการเคลือบฟิล์มบางเพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวของฟิล์มบาง
- 2) ควรเปรียบเทียบคุณสมบัติ Guided Mode Resonance (GMR) ของทุกอุปกรณ์ที่ทำการปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบาง
- 3) เซตอัฟให้การวัดคุณสมบัติ Guided Mode Resonance (GMR) ควรมีความละเอียดมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dow Corning. “An Overview of Polydimethylsiloxane (PDMS) Fluids in the Environment”. [Online].Available: <https://www.dowcorning.com/content/publishedlit/01-1034A-01.pdf>
- [2] 2017. “Polydimethylsiloxane”. [Online].Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane>
- [3] 2008. “Polydimethylsiloxane”. [Online].Available : http://www.openwetware.org/wiki/Koch_Lab:Protocols/PDMS
- [4] L.B. Freund and S. Suresh. 2003. “Thin film materials”
- [5] 2017. “Tantalum pentoxide”. [Online].Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_pentoxide
- [6] Raymond A. Serway, John W. Jewett. 2014. “Physics for Sciences and Engineers 2”.
- [7] 2017. “Tantalum pentoxide”. [Online].Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_pentoxide
- [8] 2011. “การหักเหของแสง”. [Online].Available : <http://www.physic2u.com/Topic55/Optics/ReflectionVSRefraction.html>
- [9] อรพรรณ ไวแพน. 2007. “การเลี้ยวเบนของเกรตติง”. [Online].Available : <http://www.physic2u.com/Topic55/Optics/ReflectionVSRefraction.html>
- [10] Raymond C.Rumpf. 2015. [Online].Available : <http://emlab.utep.edu/.../Lecture%2011%20--%20Guided%20mode%20resonance>
- [11] 2016. “Guided-mode resonance”. [Online].Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Guided-mode_resonance
- [12] Sakoolkan Boonruang. 2007. “TWO-DIMENSIONAL GUIDED MODE RESONANT STRUCTURES FOR SPECTRAL FILTERING APPLICATIONS”.
- [13] “Sputter”. [Online].Available: <https://www.weizmann.ac.il/materials/igor/sputter>
- [14] อรุณี ลักคำ, วิทวัช วงศ์พิศาล, ดร.สินธุ์ จันทพันธ์. 2557. “วิศวกรรมพื้นผิว ตอนที่ 3 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอเคมีและไอทางกายภาพภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- [15] 2012. “กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film process)”. [Online].Available: http://www.vtsun.com/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=9&lang=th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] ณัฐพร พรหมรส. 2548. “การออกแบบบอละลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.”
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Nasser, E. Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics. USA: John Wiley & Sons, 1971.
- [18] Chapman. B. Glow Discharge Processes Sputtering and Plasma Etching. USA: John Wiley & Sons, 1980.
- [19] Conrads, H., and Schmidt, M. Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Sci. Technology 9 (2000): 441-454.
- [20] Structure of Glow Discharge. [Online]. Available: http://science.education.pppl.gov/SummerInst/SGershman/Structure_of_Glow_Discharge.pdf
- [21] Roth, J. R. Industrial plasma Engineering . Volume1: Principles. IOP Publishing Ltd, 1995.
- [22] Sheridan, T. E., and Goree, J. A. Analytic Expression For the Electric Potential in the Plasma Sheath. IEEE Transactions on Plasma Science 17 (1989): 884-888.
- [23] Wasa, K., and Hayakawa, S. Handbook of Sputter Deposition Technology. Noyes Publications, 1992.
- [24] Rohde, S. L., and Munz, W. D. “Sputtering Deposition” in Advanced Surface Coating: a Handbook of Surface Engineering. Edited Rickerby, D. S., and Matthews, A. New York: Chapman and Hall, 1991.
- [25] ชูชาติ อารีตราวุฒ. 2539. “เครื่องมือวิทยาศาสตร์”.
- [26] นันทน์ช วัฒนสุภิญญา. 2553. “สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมเตรียมโดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง”. ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [27] โรสลีนา ยูโซะ. 2554. “การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มบางโดยใช้วิธีการวัดทางแสง”. ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

