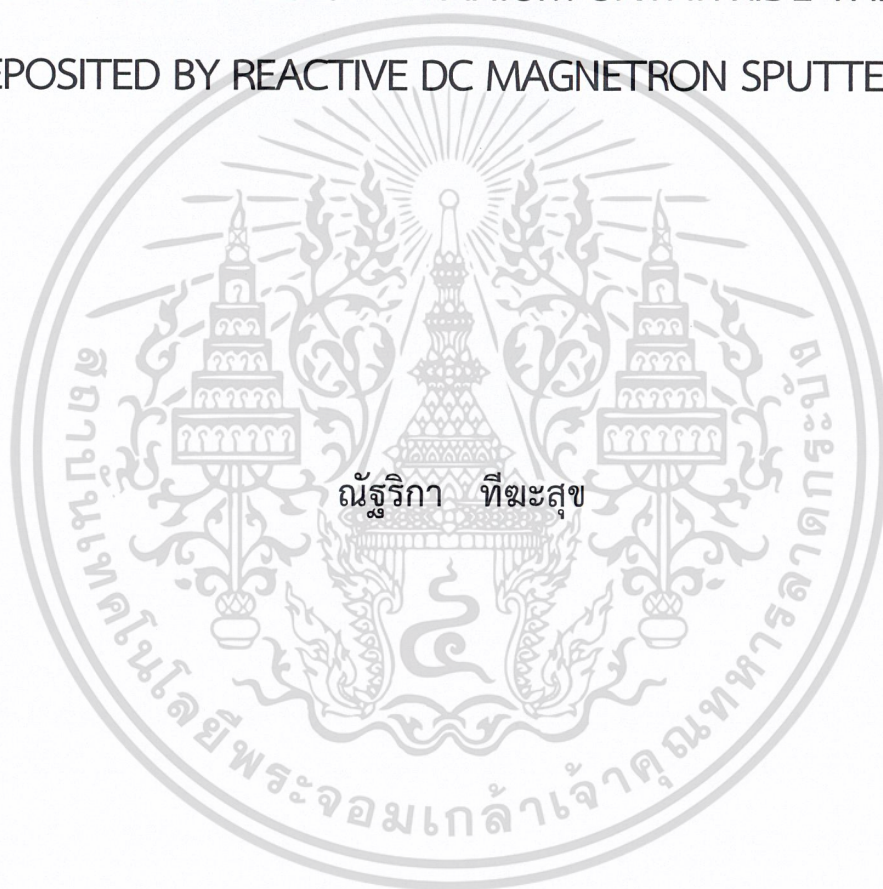


ผลกระทบของความหนาต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของ
ฟิล์มบางไททานเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เคลือบโดย
วิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

EFFECT OF THICKNESS ON STRUCTURAL AND
OPTICAL PROPERTIES OF TITANIUM OXYNITRIDE THIN FILM
DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF THICKNESS ON STRUCTURAL AND
OPTICAL PROPERTIES OF TITANIUM OXYNITRIDE THIN FILM
DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ACADEMIC YEAR 2018
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลกระทบของความหนาต่อโครงสร้าง และสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เคลือบโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Effect of Thickness on Structural and Optical Properties of Titanium Oxynitride Thin Film Deposited by Reactive DC Magnetron Sputtering

ชื่อนักศึกษา นางสาว ณัฐริกา ฑีฆะสุข รหัสนักศึกษา 58051066

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิศาล สุขวิสูตร ประธานกรรมการ	พิศาล สุขวิสูตร
รศ.วิชิต ศิริโชติ กรรมการ	
ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	อ.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ที่สอนและใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ผลกระทบของความหนาต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เคลือบโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐริกา ทีชะสุข รหัสนักศึกษา 58051066
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีที่ดี มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำและความแข็งสูง นอกจากนี้ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ยังมีสีที่สวยงามและมีสีสันทึบลากหลายซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องประดับเช่น เข็มกลัด, ต่างหู, กรอบแว่นตาและสายนาฬิกา ซึ่งในงานวิจัยนี้ฟิล์มไททาเนียมออกซิไนไตรด์ถูกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลส (SS304L) โดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ด้วยเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเคลือบตั้งแต่ 1,2,5,7,10,12 และ 15 นาที การศึกษาผลกระทบของความหนาที่มีผลต่อสี สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกล จากผลการศึกษาพบว่าความหนาของฟิล์มเป็นตัวแปรสำคัญในการปรับเปลี่ยนเฉดสี สุดท้ายนี้ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์จะถูกเคลือบลงบนเครื่องประดับจริงที่ทำจากวัสดุที่มีราคาถูกเช่นสแตนเลส จากผลการวิจัยพบว่ากระบวนการนี้มีความเหมาะสมกับงานในทางด้านการเคลือบตกแต่งผิวเพื่อความสวยงาม

คำสำคัญ : ไททาเนียมออกซิไนไตรด์ , ฟิล์มบาง , รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Effect of thickness on structural and optical properties of titanium oxynitride thin film deposited by reactive DC magnetron sputtering
Students	Miss Nattharika Theekhasuk Student ID 58051066
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr. Aparporn Sakulalavek

Abstract

Titanium oxynitride thin films have a good thermal and chemical stabilities, low-friction coefficient, and high hardness. Moreover, the titanium oxynitride films have beautiful and colorful colors which can be applied for jewelry accessories such as brooch, earring, watch strap, glasses frame. In this work, titanium oxynitride films were deposited on SS304L substrates using reactive DC magnetron sputtering. Deposition time was varied from 1, 2, 5, 7, 10, 12 and 15 minutes. The effects of film thickness on color, structural and mechanical properties were investigated. The results showed film thickness are important parameters for adjusting color shades. Finally, titanium oxynitride films are coated on the real jewelry accessories made from low cost materials like stainless steel. The results show that the process has a potential for decorative coating.

Keywords : Titanium oxynitride , Thin film , Reactive DC magnetron sputtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้และความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า พร้อมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ ดร.ธนกร ชุมทอง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงคำแนะนำเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ทำให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษา จนสามารถทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษเล่มนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งเป็นที่รักและเคารพ

ณัฐริกา ทีฆะสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกไททาเนียม.....	5
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 เทคโนโลยีฟิล์มบาง.....	7
2.2.1 กระบวนการเคลือบผิว (Coating Process).....	8
2.2.2 ชนิดของระบบสเป็คเตอรืง.....	10
2.2.3 การเกิดฟิล์มบาง.....	20
2.2.4 ฟิสิกส์พื้นฐานของการสเป็คเตอรืง.....	22
2.3 หลักการและเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทางของฟิล์มบาง.....	23
2.3.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD).....	23
2.3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	31
2.3.3 การวิเคราะห์ความต้านทานต่อรอยขีดข่วนโดยเทคนิค Scratch Test.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับใช้ในการแข่งขันเพื่อการแข่งขันเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นสแตนเลส (Stainless304) เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับ.....	39
3.1.1 อุปกรณ์ทำความสะอาดวัสดุรองรับ.....	39
3.2.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับ.....	40
3.2 การเตรียมฟิล์มบาง TiO_xN_y โดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง.....	41
3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง.....	41
3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมภาชนะสุญญากาศสำหรับการสเปตเตอริง.....	45
3.2.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดเป้าสารเคลือบ หรือ Pre-Sputtering.....	48
3.2.4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์.....	50
3.2.5 ขั้นตอนการปิดเครื่องสเปตเตอริง.....	52
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์.....	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	55
4.1 การวิเคราะห์สีของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์.....	55
4.2 การวิเคราะห์สีและค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	58
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าด้วยระบบ CIE $L^*a^*b^*$	58
4.2.2 ค่าการสะท้อนแสง (% Reflectance).....	60
4.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD).....	62
4.4 การวิเคราะห์ความต้านทานต่อรอยขีดข่วนโดยเทคนิค Scratch Test.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2.1 แสดงค่าความแข็งของโมส.....	35
3.1 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์.....	44
4.1 เวลาในการเคลือบและความหนาของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์.....	57
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์.....	58
4.3 ค่าการสะท้อนแสงที่เวลาการเคลือบต่างๆ.....	60
4.4 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiN ที่ระนาบ (200).....	64
4.5 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiO ₂ ที่ระนาบ (114).....	64
4.6 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiO ₂ ที่ระนาบ (-305).....	65
4.7 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiO ₂ ที่ระนาบ (413).....	65
4.8 แสดงค่าพื้นที่ได้กราฟ XRD เป็นอัตราส่วนระหว่าง TiN / TiO ₂	66
4.9 เงื่อนไขการทดสอบโดยเทคนิค Scratch Test.....	68
4.10 ค่า Fris crack initiation, L_{c1}	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC.....	5
2.2 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง.....	8
2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....	11
2.4 ระบบ ดีซี สปีดเตอริง.....	12
2.5 ระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอริง.....	13
2.6 Impedance matching network.....	14
2.7 การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากรูป (a) (b) และ (c) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก ส่วนรูป (d) และ (e) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้าร่วมกันในรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน.....	16
2.8 การจัดสนามแม่เหล็กในระบบพลาสมาอาร์แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	18
2.9 ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี รีแอกทีฟ สปีดเตอริง.....	19
2.10 การเกิดฟิล์มบาง.....	21
2.11 หลักการทำงานของ X-ray Diffractometer (XRD).....	24
2.12 หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์.....	24
2.13 กฎของ Bragg.....	26
2.14 เครื่อง X- ray Diffractometer : XRD.....	28
2.15 แสดงการหาค่า Full width at half maximum หรือ FWHM.....	30
2.16 L-a-b Chart ของ CIE Lab scale.....	31
2.17 แสดง CIE Lab color space.....	33
2.18 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสโตนเมื่อทำการทดสอบ.....	37
2.19 ภาพแสดงขณะทำการทดสอบการยืดเกาะ.....	38
2.20 แสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบ	
(a) Constant Load, (b) Progressive Load และ (c) Incremental.....	38
3.1 สารอะซิโตน (Acetone).....	39
3.2 เทสารอะซิโตน (Acetone) ลงในปิกเกอร์.....	40
3.3 ภาพแสดงเครื่องอัลตราโซนิกขณะที่กำลังทำความสะอาดแผ่นสแตนเลสด้วย	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องรีแอกทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง	
(a) ถังขดลวดความร้อน (b) Rotary pump และ (c) เครื่องทำความเย็น.....	41
3.5 ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง.....	42
3.6 ภาพแสดงส่วนประกอบภายในภาชนะสุญญากาศ (a) เป้าสารเคลือบ (Target)	
(b) ชัตเตอร์ และ (c) จานวางวัสดุรองรับ.....	42
3.7 Mass flow controller ของแก๊สอาร์กอน (Ar) , แก๊สไนโตรเจน (N ₂)	
และแก๊สออกซิเจน (O ₂).....	43
3.8 แหล่งจ่ายไฟ.....	43
3.9 เตรียมภาชนะสุญญากาศให้มีอากาศเท่ากับภายนอก.....	45
3.10 การนำอากาศเข้าเพื่อเปิดตัวล๊อคฝา Chamber.....	45
3.11 การเปิดประตู Chamber.....	46
3.12 ทำการดูดอากาศภายใน Chamber ออก.....	46
3.13 อุณหภูมิต่ำสุดของเครื่อง Cooling Diffusion เท่ากับ -3 °C.....	47
3.14 ทำให้ภายใน Chamber มีสภาวะสุญญากาศสูง (High Vacuum).....	47
3.15 แสดงลำดับการเปิดแหล่งจ่ายไฟ.....	48
3.16 ภาพแสดงค่า MODIFY ที่ 084.....	49
3.17 แสดงความดันรวม (Working pressure) ที่ 3.3×10^{-3} mbar.....	50
3.18 แสดงVolume ของกล่องควบคุมความดันแก๊ส O ₂ = 050 และ N ₂ = 060.....	50
3.19 แสดงVolume ของกล่องควบคุมความดันแก๊ส Ar = 093.....	51
3.20 แสดงการหมุนชัตเตอร์ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	51
3.21 แสดงการปิด Diffusion Pump และ ปิด High Vacuum.....	52
3.22 แสดงค่าความดันภายใน Chamber ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1×10^{-2} mbar.....	53
3.23 แสดงการปิดปั๊มดูดอากาศ (Rotary Pump).....	53
3.24 การปิดเครื่องสปีดเตอริง.....	54
4.1 ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO _x N _y) ที่เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส	
(Stainless304) โดยเรียงตามเวลาการเคลือบ (a) 1 นาที (b) 2 นาที	
(c) 5 นาที (d) 7 นาที (e) 10 นาที และ (f) 12 นาที.....	55
4.2 ตารางสีและความหนาของไททาเนียม หรือ Color list of current colored	
titanium.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์.....	57
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* ในรูปแบบ 3 มิติ.....	59
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงและความยาวคลื่น.....	60
4.6 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) ที่เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส (Stainless304) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ 1,2,5,7,10 และ 12 นาที่.....	62
4.7 แสดงฐานข้อมูล JCPDS 96-110-1043 ของ TiN และ JCPDS 96-153-9683 ของ TiO_2	63
4.8 แสดงขณะทำการทดสอบโดยเทคนิค Scratch Test.....	67
4.9 รอยขีดข่วนหลังจากทำการทดสอบโดยเทคนิค Scratch Test.....	67
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและทิศทางการเคลื่อนที่.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การเคลือบผิววัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นชั้นเคลือบบางๆ ที่เรียกว่า ฟิล์มบาง (Thin Film) บนผิววัสดุ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำอีกทั้งยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบใหม่ทดแทน ได้แก่ การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Coating) เนื่องจากการเคลือบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศ และไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเคลือบ การเคลือบในสุญญากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ 1) การเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) โดยอาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิววัสดุ และ 2) การเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition : PVD) โดยอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วพุ่งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ การเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางกายภาพ (PVD) เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีการทำให้เป็นไอโดยความร้อน (Thermal Evaporation) ,วิธีการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc Vapor Deposition) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางกายภาพ (PVD) ด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพราะสามารถควบคุมชั้นตอนหรือวิธีการเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติต่างๆตามที่ต้องการได้ง่าย ปัจจุบันมีอุตสาหกรรมเครื่องประดับหลายแห่งในประเทศไทยได้นำวิธีการเคลือบในสุญญากาศมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเร่งการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนการผลิตไม่สูงมาก และเป็นวิธีที่เคลือบฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอบนวัสดุรองรับที่มีพื้นผิวขนาดใหญ่ได้

ฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ (Titanium Oxynitride) มีคุณสมบัติความเสถียรภาพทางเคมี และมีความแข็งแรงสูงจึงสามารถป้องกันรอยขีดข่วนได้ดี นอกจากนี้ฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ยังมีความสำคัญทางด้านสีที่น่าสนใจ สามารถเปลี่ยนเฉดสีได้จึงเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อนำไปเคลือบชิ้นงานประเภทเครื่องประดับเพื่อความสวยงาม

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติ โครงสร้าง ความหนา และ สีของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ที่เคลือบโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้แก่ เวลาในการเคลือบ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิที่ให้กับวัสดุรองรับ ความดันขณะทำการเคลือบ (Working Pressure) ตลอดจนคุณสมบัติและ องค์ประกอบของฟิล์มที่เคลือบนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาลักษณะของเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์โดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีผลต่อความหนาและสีของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ จึงมีความสำคัญ และความจำเป็นต่อการวิจัยทางด้านฟิล์มบาง และอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะของความหนาที่เปลี่ยนไปของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์
- 2) เพื่อศึกษาและหาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 3) เพื่อทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมลงบนวัสดุรองรับ ใช้ทำเครื่องประดับ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงามและยืดอายุการใช้งานของเครื่องประดับ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ลงบนวัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลส (Stainless 304)
- 2) อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอน 28 sccm , แก๊สไนโตรเจน 12 sccm และแก๊สออกซิเจน 1 sccm โดยมีเวลาที่ใช้ในการเคลือบ 1 ถึง 12 นาที และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17.5 mA/cm²
- 3) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)
- 4) วิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ระบบ CIE L*a*b*
- 5) การทดสอบวัดความสามารถในการยึดเกาะโดยเทคนิค Scratch Test
- 6) ศึกษาผลลักษณะของความหนาที่เปลี่ยนไปของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงผลกระทบของผลกระทบของความหนาที่เปลี่ยนไปของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ว่ามากหรือน้อยเพียงใด
- 2) เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ลงบนพื้นผิวของวัสดุในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
- 3) ทำให้เกิดทักษะกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ

1.5 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

- | | |
|--------------|--|
| ขั้นตอนที่ 1 | ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง |
| ขั้นตอนที่ 2 | ศึกษาขั้นตอนการทำงาน และ กระบวนการเคลือบของเครื่อง รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง |
| ขั้นตอนที่ 3 | ทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม |
| ขั้นตอนที่ 4 | เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสม ทำการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ลงบนวัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลส |
| ขั้นตอนที่ 5 | นำฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติ |
| ขั้นตอนที่ 6 | สรุปผลของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ |
| ขั้นตอนที่ 7 | เขียนเล่มรายงาน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา (2561-2562)								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ขั้นตอนที่ 1									
ขั้นตอนที่ 2									
ขั้นตอนที่ 3									
ขั้นตอนที่ 4									
ขั้นตอนที่ 5									
ขั้นตอนที่ 6									
ขั้นตอนที่ 7									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

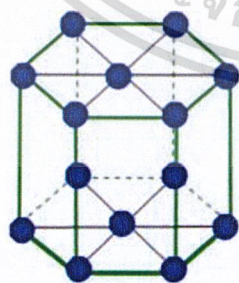
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) คุณสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (2) เทคโนโลยีฟิล์มบาง และ (3) หลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

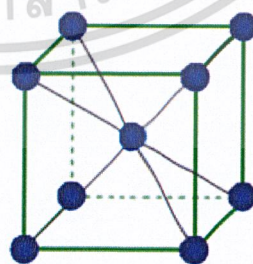
2.1.1 โครงสร้างผลึกไททาเนียม

ไททาเนียมมีโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) หลายแบบเช่นเดียวกับโลหะชนิดอื่น เช่น Ca, Fe, Co, Zr, Sn, Ce, และ Hf ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกแต่ละรูปแบบขึ้นกับช่วงอุณหภูมิเฉพาะที่ทำให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงอัญรูปของไททาเนียมบริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกสองแบบ คือ เฟสแอลฟา เป็นโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้องจนถึง 882 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP (Hexagonal Close Pack Structure) และเฟสบีตาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 882 องศาเซลเซียส ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (Body-centered Cubic) การที่ไททาเนียมมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะส่งผลให้สมบัติแตกต่างกัน นอกจากนี้สมบัติทางกลของโครงสร้างผลึก HCP ยังมีความแตกต่างกันขึ้นกับทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึก



Hexagonal

Ti, Zn, Mg, Cd



Cubic body centered (bcc)

Fe, V, Nb, Cr

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC (Dmitri, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Mu-Hsuan Chan. et al., 2009; P.K. Barhai. et al., 2010; สุรสิงห์ และคณะ, 2544)

ในการวิจัยนี้เราจะศึกษาเกี่ยวกับฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) โดยที่ฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) มีเสถียรภาพทางเคมี และมีสีที่น่าสนใจ ซึ่งได้รับความสำคัญในการใช้งานที่หลากหลายเช่น เครื่องมือตัด, ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และการเคลือบประดับตกแต่ง โดยที่สีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) และสีของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) เป็นที่ดึงดูดต่อความต้องการของลูกค้าในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ฟิล์มเหล่านี้ได้รับการเตรียมโดยเทคนิคการเคลือบ (Deposition) และทางเคมี (Chemical) ที่หลากหลายแต่การผลิตฟิล์มสีจำนวนมากในช่วงระยะเวลาสั้นและเป็นงานที่ทำหายสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ในงานวิจัยระบุไว้ว่าสีของฟิล์มส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความหนาและปริมาณออกซิเจนภายในฟิล์ม โดยในงานวิจัยนี้บอกไว้ว่า ความแข็ง, สี และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ถูกเคลือบโดยวิธี DC magnetron sputtering สามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสพลาสมา

ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริงโดยใช้อากาศเป็นส่วนผสมรีแอคทีฟแก๊สจากการวิเคราะห์พันธะทางเคมีพบว่าฟิล์มที่ปลูกมีพันธะ Ti-O, Ti-N และ Ti-N-O ฟิล์มที่ปลูกด้วยสัดส่วนของอากาศน้อยๆ จะได้ฟิล์มไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) ที่แสดงลักษณะของไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศมากกว่าจะแสดงลักษณะของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบไร้รูปร่าง (Amorphous structure) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจาก ปริมาณสัดส่วนของอากาศมากที่ใส่เข้าไปที่ปริมาณสัดส่วนอากาศน้อยๆ มีปริมาณของออกซิเจนและไนโตรเจนในปริมาณที่เหมาะสมกับปริมาณของไททาเนียมที่หลุดออกมาจากเป้า จึงสามารถพบการฟอร์มตัวเป็นฟิล์มไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) ที่มีลักษณะค่อนข้างไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ส่วนฟิล์มที่ปลูกด้วยปริมาณสัดส่วนของอากาศที่มากขึ้นนั้นมีการฟอร์มตัวของออกซิเจนภายในฟิล์มมากทำให้ไนโตรเจนไม่สามารถจับกับอะตอมของไททาเนียมที่หลุดออกมาได้หมดจึงแสดงลักษณะของไททาเนียมไดออกไซด์ออกมา (TiO_2)

สีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์จะเปลี่ยนไปตามอัตราการใช้ของแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน โดยถ้าหากอัตราการใช้ของแก๊สอาร์กอนน้อยเกินไปจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้ออกมามีสีอยู่ในโทนอ่อนคือ สีเงิน , เหลือง และทอง และหากอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนมากเกินไปจะทำให้ฟิล์มที่มีสีออกในโทนเข้ม คือ สีน้ำตาล , น้ำตาลเข้ม และม่วง ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียม

ไนไตรด์จึงสามารถกำหนดอัตราการใช้ของแก๊สทั้งสองอย่างไว้ได้แต่จะต้องมีความสัมพันธ์กันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแก๊สอาร์กอนที่ทำหน้าที่เป็นสปีดเตอร์แก๊สจะต้องเป็นตัวกำหนดปริมาณของไททาเนียม ส่วนแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นรีแอคทีฟแก๊สจะเป็นตัวกำหนดสีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ซึ่งถ้าหาก ปริมาณมีมากไปก็อาจจะทำให้ได้ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มถึงสีม่วง และเมื่อกำหนดอัตราการไหลของแก๊ส อาร์กอนมีค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเพียงพอที่จะให้เกิดโกลด์ดีสชาร์จ เพื่อที่จะสปีดเตอร์ไททาเนียมได้ และให้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนแปรค่าไปจะพบว่าสีของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์จะเปลี่ยนไปตาม ค่าอัตราค่าการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยถ้าหากอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนน้อยเกินไปฟิล์ม จะมีสีน้ำเงิน และถ้าหากมากเกินไปฟิล์มจะมีสีน้ำตาลทั้งนี้พบว่าช่วงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีสีทองนั้นอยู่ในช่วงแคบๆค่าหนึ่งเท่านั้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า การปลูกฟิล์มด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป เทคนิคสปีดเตอร์ริงสามารถนำมาใช้กับวัสดุใดๆก็ได้รวมทั้งโลหะ อนุวณ และวัสดุสารกึ่ง ตัวนำที่มีจุดหลอมละลายสูง แม้ว่าการควบคุมองค์ประกอบต่างๆที่เป็นสารประกอบจะทำได้ค่อนข้าง ยากลำบาก เนื่องจากอัตราการสปีดเตอร์ริงที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของสาร แต่ข้อเสียของการ สปีดเตอร์ริงคือเมื่อมีรีแอคทีฟแก๊สทำให้การควบคุมการเกิดฟิล์มบางได้ยาก เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาผลกระทบของเวลาที่มีผลต่อ สี ของฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์

2.2 เทคโนโลยีฟิล์มบาง (Micro Magnetism, n.d; Sam, 2017; สุรสิงห์ และคณะ, 2544; วราวุฒิ, 2553)

การเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการ เคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวลงบนวัสดุรองรับหรือ Substrate จน เกิดเป็นฟิล์มบางที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร นอกจากนี้แล้ว ฟิล์มบาง (Thin Film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่รวมกันเป็นชั้นบาง ๆ ซึ่งในปัจจุบันมีประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางใน ด้านต่าง ๆ มากมาย โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) ทั้งนี้สารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊สแต่ถ้าหากเป็นสารเคลือบขณะที่กำลังทำการเคลือบอยู่ในขณะนั้นจะเป็นที่จะต้องมีส่วนอยู่ ในรูปของ ไอ ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ หรือเรียกว่า Transport ในภาวะสุญญากาศนั้น

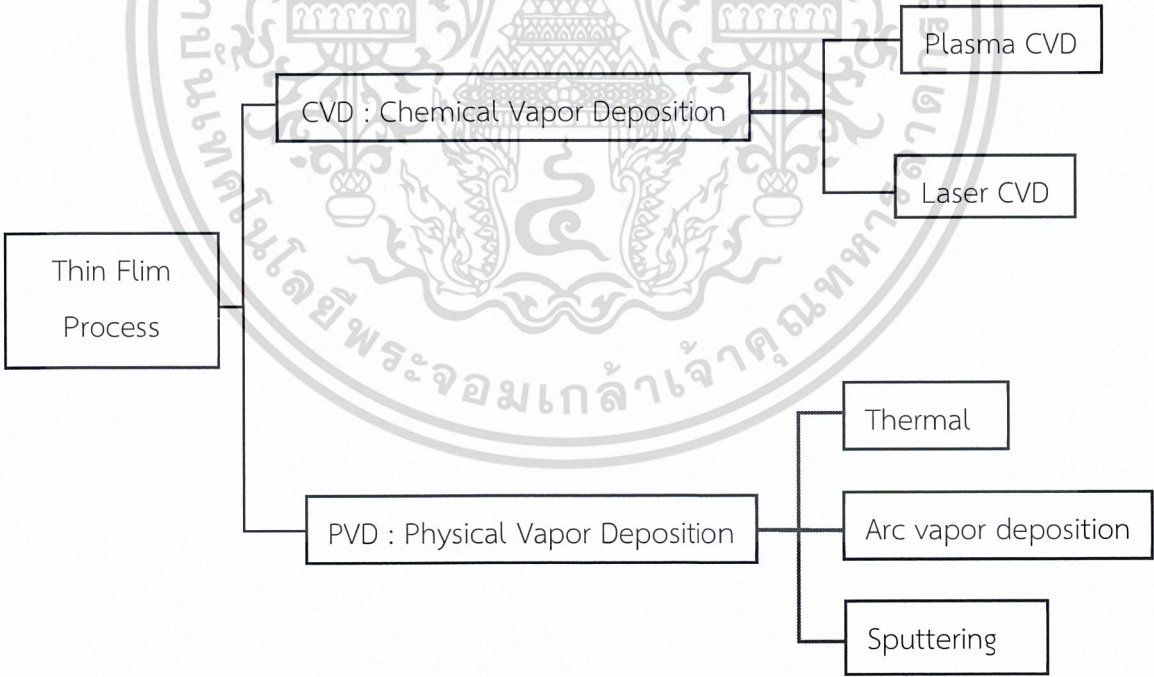
ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงไปยังตัวของวัสดุรองรับ หรืออาจ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเข้าชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การเคลือบ (Deposition) เป็นขั้นตอนการเคลือบของสารเคลือบจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของวัสดุรองรับ (Substrate) หรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับตัววัสดุรองรับ (Substrate)

2.2.1 กระบวนการเคลือบผิว (Coating Process)

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้ธาตุหรือสารประกอบจากเป้าสารเคลือบ (Target) เคลือบลงบนวัสดุรองรับ (Substrate) หรือวัสดุที่ต้องการใช้งาน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานที่ผิวของวัสดุให้ดีขึ้น การเคลือบฟิล์มสามารถกระทำได้หลายวิธีโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักได้แก่ 1.กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี หรือ Chemical Vapor Deposition (CVD) และ 2.กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือ Physical Vapor Deposition (PVD) โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี หรือ Chemical Vapor Deposition (CVD) กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

2. กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือ Physical Vapor Deposition (PVD) กระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางกายภาพเป็นกระบวนการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวเป้าสารเคลือบแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น

โดยการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากบริเวณผิวของสารตั้งต้นหรือเป้าสารเคลือบแล้วฟุ้งกระจายไปยึดติดผิววัสดุรองรับแล้วเคลือบเป็นชั้นของฟิล์มบางในที่สุดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นการเคลือบของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะสุญญากาศทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งกระจายหรือวิ่งไปกระทบกับตัววัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบ และเกิดการเคลือบเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบสามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันและไม่มีความซับซ้อนก็คือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีการทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นอีก เช่น การระเหยแบบวาบแสง (Flash Evaporation) , การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) , การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (Resistive Heating) , การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser Evaporation) , การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Heating) และ การระเหยด้วยการอาร์ค (Arc Evaporation) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) เช่น ออกไซด์ (Oxide) หรือ แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น แว่นตา , เลนส์กล้องถ่ายรูป และกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุลหอยหรือตำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีสปัตเตอริง (Sputtering)

การสปัตเตอริง คือ กระบวนการที่อะตอมของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาจากพื้นผิว เมื่อถูกชนด้วยไอออนหรืออนุภาคที่มีพลังงานสูง อะตอมที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศ เมื่ออนุภาควิ่งเข้าชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ คือ การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน ไอออนจะสะท้อนออกมาจากผิววัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอนที่ผิววัสดุ ไอออนที่วิ่งเข้าชนผิวหน้าของวัสดุอาจฝังตัวลงในเนื้อวัสดุ ความลึกของการฝังตัวแปรผันตรงกับพลังงานของไอออน บางครั้งการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก และการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของผิวหน้าวัสดุทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมของวัสดุ เรียกกระบวนการนี้ว่า “สปัตเตอริง”

2.2.2 ชนิดของระบบสปัตเตอริง

2.2.2.1 ระบบ ดีซี สปัตเตอริง (DC Sputtering)

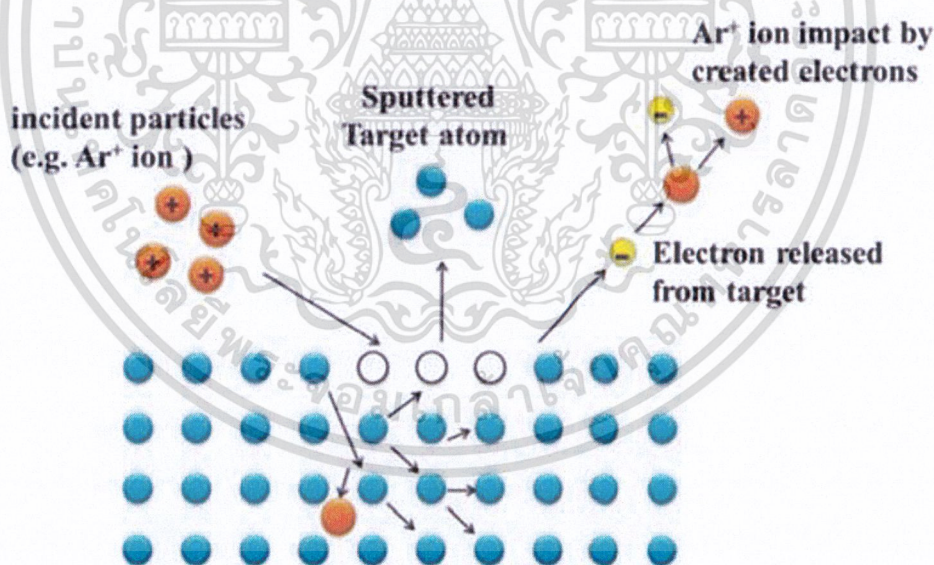
ระบบ ดีซี สปัตเตอริงประกอบด้วยขั้วแอโนด (Anode) และ ขั้วแคโทด (Cathode) ใช้เป็นวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างวัสดุรองรับ (Substrate) และขั้วแคโทด (Cathode) จะอยู่ระหว่าง 4.0-10.0 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกทางด้านข้างหรือบริเวณผนังภาชนะสุญญากาศโดยทั่วไปแล้วระยะดาร์กสเปซ (Dark Space) จะอยู่ระหว่าง 1.0-4.0 เซนติเมตร โดยขั้วแอโนดจะอยู่บริเวณเกาท์โพลาร์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานอยู่จะในช่วงแอนนอร์มอลโกลว์ โดยแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งทำให้ยืดหยุ่น และไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบโดยปกติจะใช้แก๊สอาร์กอน ขณะเกิดโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออไนซ์จะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จได้ทราบเท่าที่ระยะดาร์กสเปซ (Dark Space) ไม่มากกว่าระยะระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น มีผลทำให้ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนสูงขึ้นทำให้ระยะดาร์กสเปซ (Dark Space) ขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาตรน้อย กระแสไฟฟ้าลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์จะมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่มีความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar พบว่าระยะดาร์กสเปซ (Dark Space) จะยาวกว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ จึงทำให้เกิดกระบวนการผลิตไอออนนั้นสิ้นสุดลง และไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอร์อีก

ขณะที่ความดันสูงขึ้นพบว่าระยะดาร์กสเปซ (Dark Space) จะหดสั้นลง บริเวณที่มีการผลิต

ไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น และกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในอัตราสูงตามค่าความดันขณะที่ค่าความดันภายในระบบสูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ระยะปลดการชน ไม่มีการเกิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

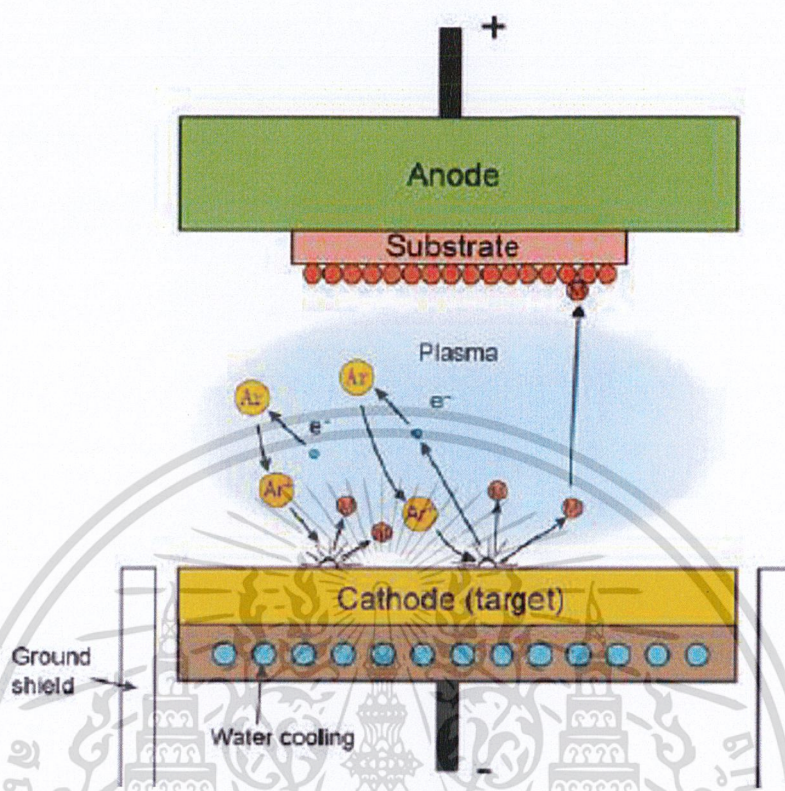
ระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะเคลื่อนที่ไปเคลือบลงบนวัสดุรองรับได้ยากเนื่องจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือเกิดการสูญเสียสູ່ผนังของภาชนะสุญญากาศซึ่งจะทำให้ค่ายึดจากการสปัตเตอร์มีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้นผลรวมระหว่างยึดและกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง

ระบบสปัตเตอร์ทั้งไปจะต่อแอโนด (Anode) ลงกราวด์รวมกับภาชนะสุญญากาศ และให้แคโทด (Cathode) มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ (-) โดยแยกจากขั้วแคโทดและผิวของภาชนะสุญญากาศออกด้วยฉนวน เรียกว่า “กราวด์ชิลด์ (Ground Shield)” โดยที่กราวด์ชิลด์ (Ground Shield) จะมีลักษณะเป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆของแคโทด โดยจะต้องจัดระยะห่างระหว่างแคโทดและกราวด์ชิลด์ (Ground Shield) ให้สั้นกว่าระยะดาร์กสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของกราวด์ชิลด์ (Ground Shield) จะเท่ากับแอโนด การโกลว์ดิสชาร์จและสปัตเตอร์จะไม่สามารถเกิดกับแคโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชิลด์หุ้มอยู่ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปัตเตอร์ได้



รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

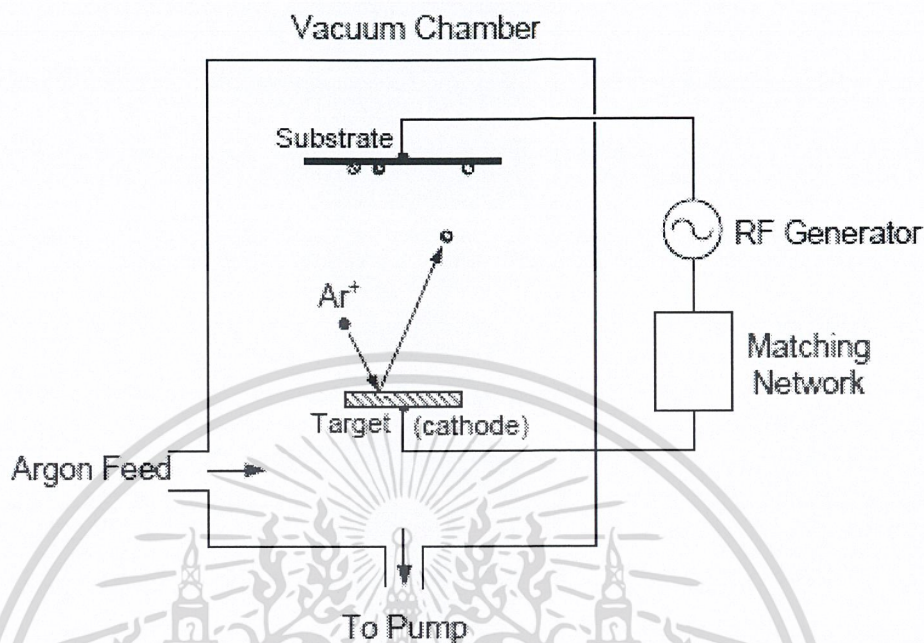
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ระบบ ดีซี สปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

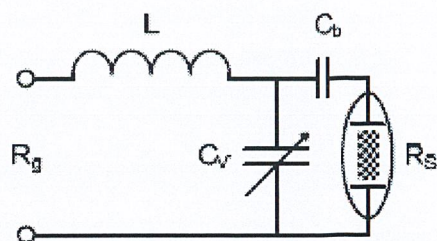
2.2.2.2 ระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอริง (RF Sputtering)



รูปที่ 2.5 ระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอริง

ระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering มีโครงสร้างประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน ได้แก่ Target (cathode) และ Substrate เช่นเดียวกับแบบ DC sputtering แต่ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นความถี่คลื่นวิทยุกำลังสูง (แอมพลิจูดในช่วงระหว่าง 0.5 – 1 kV, ความถี่มากกว่า 0.1 MHz) ปกตินิยมใช้ความถี่ 13.56 MHz การใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงทำให้เพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของก๊าซเพื่อแตกตัวเป็นพลาสมาให้สูงขึ้น ดังนั้นระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering จึงสามารถทำงานได้ที่ความดันต่ำกว่ากรณีของ DC sputtering มาก กล่าวคือสามารถทำงานได้ที่ความดันระดับ 1 mtorr การส่งคลื่นวิทยุความถี่สูงเข้าสู่ระบบ RF sputtering จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์ (impedance-matching network) เนื่องจากโดยทั่วไป RF power supply จะมีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ในขณะที่พลาสมามีอิมพีแดนซ์ระหว่าง 1 – 10 กิโลโอห์ม ระบบปรับอิมพีแดนซ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยวงจร LC ที่มีตัวเหนี่ยวนำค่าคงที่ 1 ตัว ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ 1 ตัว และตัวเก็บประจุค่าคงที่ที่เรียกว่า Blocking capacitor 1 ตัว ต่ออยู่กับ Target ดังแสดงในวงจรดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



R_g : impedance of rf-generator, C_v : variable capacitor
 R_s : impedance of rf-discharge, C_b : blocking capacitor

รูปที่ 2.6 Impedance matching network

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุจะผ่านระบบปรับอิมพีแดนซ์เข้าสู่ Target ซึ่งโดยทั่วไปจะมีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ Substrate และผนังห้องสุญญากาศที่ต่อเป็นกราวด์ ความไม่เท่ากันของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นลบ (Negative dc bias) ขึ้นที่ Target ด้วยขนาดเท่ากับแอมพลิจูดของโวลเตจของ RF power supply ศักย์ไฟฟ้านี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้นที่ Target ถึงแม้ Target จะเป็นฉนวนไฟฟ้าก็ตาม

2.2.2.3 ระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง (DC Megnetron Sputtering)

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นอยู่กัผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนกับเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนบริเวณเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบสปัตเตอริง แบบดีซี สปัตเตอริง นั้นโดยปกติแล้วทำได้เพียงแค่การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดหรือการเพิ่มความดันซึ่งมีขีดจำกัดสูงสุดอยู่ที่ความหนาแน่นกระแส (Current Density) ประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซี สปัตเตอริง โดยทั่วไปแล้วอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์นั้นจะมีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียคือเมื่อใดที่ความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวอยู่ในฟิล์มบางที่ได้มานั้นมีค่าสูงขึ้น

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบ หรือ Target และมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ได้ยาวขึ้น โดยอำนาจจากสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นผลที่จะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสนามแม่เหล็กพบว่า ถ้าหากอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก พบว่าอิทธิพลของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีผลที่ทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม ด้วยรัศมี (r)

$$r = \frac{3.37 (W)^{\frac{1}{2}}}{B} \quad (2.1)$$

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในหน่วย Gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน

$$\nu = 2.8 \times 10^6 \text{ Hz}$$

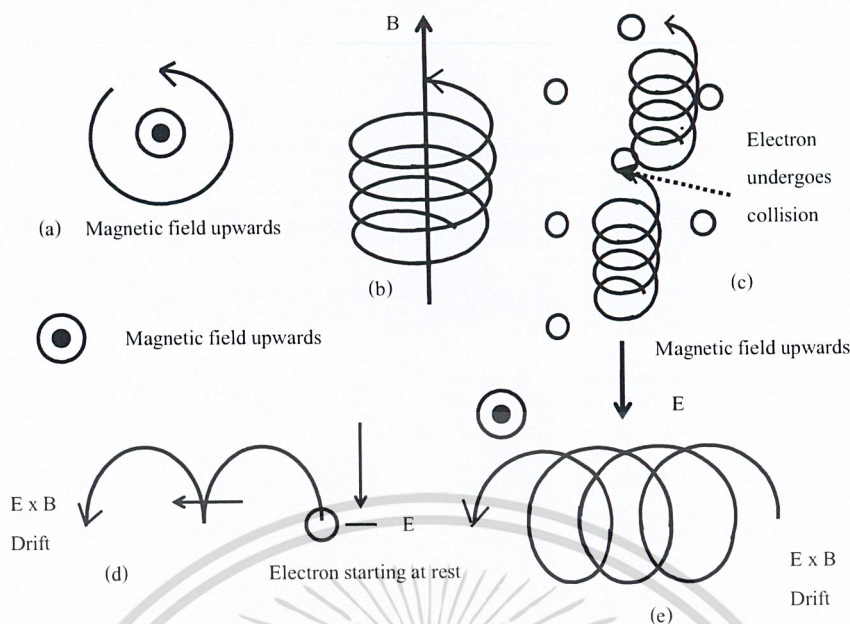
ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 Gauss รัศมีการหมุนเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^8 Hz รูปที่ 2.7(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส รูปที่ 2.7(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion) มีค่าเท่ากับ

$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย Gauss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากรูป (a) (b) และ (c) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก ส่วนรูป (d) และ (e) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ร่วมกันในรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน

กรณีที่สนามไฟฟ้าบริเวณดาร์กสเปซ (Dark Space) มีค่าประมาณ 1,000 V/cm และมีสนามแม่เหล็ก 100 Gauss จะทำให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน หรือ Drift Velocity มีค่าเท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง ในกรณีที่พลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนนั้นมีค่าน้อยเมื่อทำการเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นรูปไซคลอยด์ (Cycloid) ดังรูปที่ 2.7(d) ถ้าหากอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นที่สูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2.7(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมากถึงแม้ว่าจะใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อยโดยค่าสนามแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 50-500 Gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางทางเดินของไอออนอย่างไม่เด่นชัด ซึ่งไอออนมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก

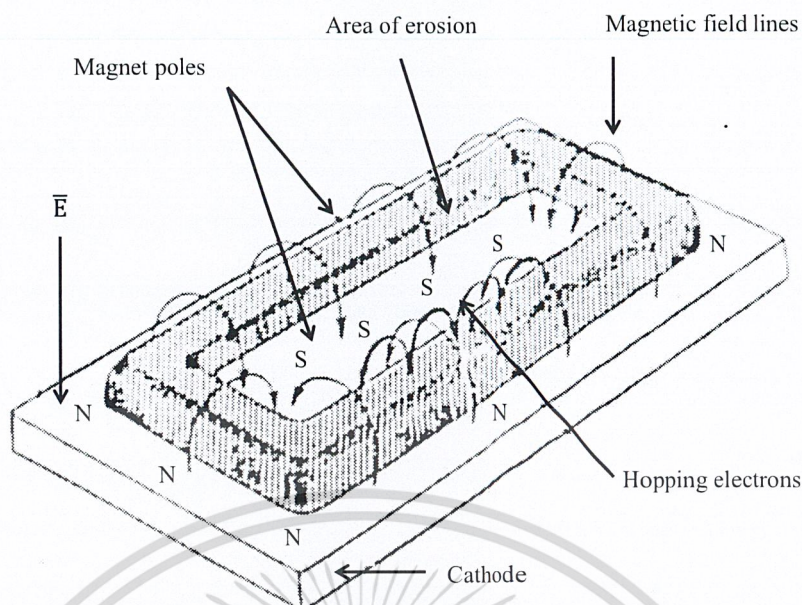
ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าหากสนามแม่เหล็กมีทิศทางที่ขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของไอออนนั้นไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์สซาร์จเปลี่ยนไป และยังคงรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้เป็นอย่างดี ส่วนในกรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอออนเกิดขึ้น

ดังนี้ หลังจากไอออนบวกเข้าชนกับเป้าสารเคลือบ หรือ Target แล้วจะเกิดการปลดปล่อย อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมา อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.7(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้ขั้วแคโทด และเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของขั้วแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสที่จะเข้าชนกับ โมเลกุลของแก๊สบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนบริเวณใกล้ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบมี ปริมาณไอออนสูงมาก

อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ได้ชนกับโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนกับเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตออกมาในปริมาณที่สูงมาก และเกิดใกล้ผิวขั้วแคโทดทำให้เกิดสเปซชาร์จ (Space Charge) จากไอออนบวกสูงที่บริเวณผิวขั้วแคโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนของ ระบบ ดีซี สปีดเตอริงที่ความดันใช้งาน (Working Pressure) มาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณดาร์กสเปซ (Dark Space) ในระบบดีซี สปีดเตอริง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กทำให้ ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ลดลง มีค่าอยู่ประมาณ 300-800 Volt ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอก จะเรียกว่าแมกนีตรอน สปีดเตอริง ทรงกระบอก หรือเรียกว่า Cylindrical Magnetron Sputtering และถ้าหากใช้ สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สปีดเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่าพลาเนียร์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง หรือเรียกว่า Planar Magnetron Sputtering

ในระบบ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ไอออนและพลาสมาที่เกิดขึ้นเข้มข้นมากที่บริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอริงของระบบมีค่าสูง ขณะที่ใช้ความดันต่ำและแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอริง ระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ทรงกระบอก โดยทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอริงสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราการเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่บริเวณผิวแคโทดประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300-800 Volt ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบที่สูงกว่าเดิม 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลให้ใช้กับระบบสปีดเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย ส่วนข้อเสียของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงเพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณภาพของฟิล์ม แต่มีข้อดีตรงที่ระบบนี้สามารถที่จะควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบของสนามแม่เหล็กได้ จึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งสู่ตัวสุรอรอบรับในปริมาณที่น้อย ซึ่งช่วยลดปัญหาความร้อนบนตัวสุรอรอบรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การจัดสนามแม่เหล็กในระบบพลาสมาแม่เหล็ก สเปตเตอริง

2.2.2.4 ระบบ รีแอคทีฟ สเปตเตอริง (Reactive Sputtering)

วิธี รีแอคทีฟ สเปตเตอริง คือ กระบวนการเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา หรือ รีแอคทีฟ แก๊ส เข้าสู่ระบบเพื่อให้แก๊สนั้นทำปฏิกิริยากับสารเคลือบแล้วเกิดเป็นสารประกอบของฟิล์มขึ้นตามที่ต้องการเคลือบลงบนวัสดุรองรับ วิธีการนี้ใช้ระบบและหลักการพื้นฐานเดียวกันกับระบบสเปตเตอริงปกติเพียงแต่มีการเพิ่มรีแอคทีฟแก๊ส ดังนั้นแก๊สที่ใช้ในระบบมี 2 ชนิดดังนี้

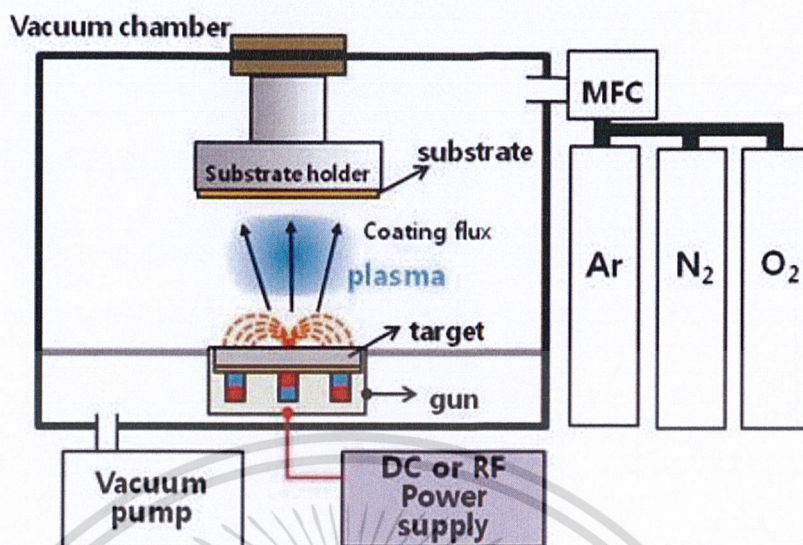
1. สเปตเตอริงแก๊ส (Sputtering Gas)

เป็นแก๊สที่ทำให้เกิดกระบวนการสเปตเตอริงปกติโดยทั่วไปมักเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar)

2. รีแอคทีฟแก๊ส (Reactive Gas)

เป็นแก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบแล้วเกิดเป็นสารประกอบของฟิล์มบางตามที่ต้องการเช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) หรือ แก๊สออกซิเจน (O_2) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แก๊สทั้ง 2 ชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง

การเคลือบฟิล์มของสารประกอบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง สามารถทำได้โดยใช้เป้าสารเคลือบ หรือ Target ที่เป็นโลหะบริสุทธิ์เหมือนในระบบสปีดเตอริง และมีการป้อนรีแอคทีฟแก๊สที่ต้องการเข้าในระบบ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ หรือการป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือ มีเทน (CH_4) อาจจะทำให้เกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ ซึ่งโดยปกติความดันของรีแอคทีฟแก๊สที่ใช้มีค่าค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ แต่อย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนกระตุ้นหรือไอออนในรีแอคทีฟแก๊สให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าภาวะปกติ

สำหรับการเกิดฟิล์มของสารประกอบเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของรีแอคทีฟแก๊ส (Reactive Gas) กับอะตอมของเป้าสารเคลือบนั้นอาจเกิดได้ 3 ลักษณะคือ

1. เกิดที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบ

รีแอคทีฟแก๊ส (Reactive Gas) จะทำปฏิกิริยากับอะตอมสารเคลือบที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบเป็นสารประกอบ จากนั้นจะถูกสปีดเตอริงให้หลุดออกมาแล้วเคลือบลงบนวัสดุรองรับ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สในระบบมีค่าสูง ยกตัวอย่างเช่น การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์พบว่าเมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นรีแอคทีฟแก๊ส ที่มีเพียงพอในการเกิดฟิล์มของไททาเนียมไนไตรด์ที่บริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบที่เรียกว่า Target Poisoning ซึ่งมีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เนื่องจากยี่ห้อของไททาเนียมไนไตรด์มีค่าต่ำกว่ายี่ห้อของไททาเนียม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เกิดบริเวณที่ว่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ

จะมีการทำปฏิกิริยากับอะตอมสารเคลือบที่ถูกสปีเตอร์ระหว่างทางที่วิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วจึงเคลือบลงบนวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดน้อยมาก เนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัม แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดในช่วงนี้

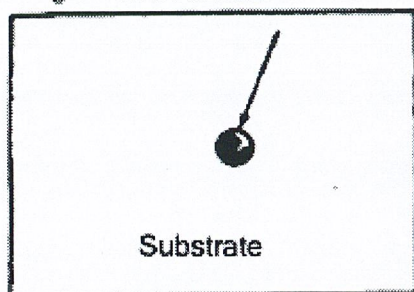
3. เกิดที่ผิวหน้าวัสดุรองรับ

รีแอคทีฟแก๊สจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบบนผิวแผ่นวัสดุรองรับเป็นชั้นของฟิล์มบางของสารประกอบนั้นเคลือบอยู่บนวัสดุรองรับ

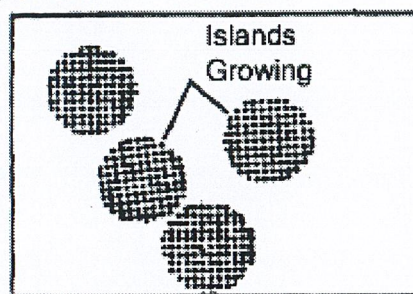
2.2.3 การเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีเตอร์ริง สารเคลือบที่ตกกระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุลพลังงานพันธะ (Bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบผิววัสดุ และเกิดการเกาะติดถ้าหากมีพลังงานที่มากพอ ก็อาจจะสามารถข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป และในเวลาชั่วครู่อะตอมก็จะสะท้อนกลับป้อนรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ เมื่ออะตอมมีการรวมตัวกันอาจจะเกิดอะตอมคู่ ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่รวมอาจรวมตัวกันกับอะตอมเดี่ยวตัวอื่นๆ กลายเป็นสามอะตอมหรือ Triplets, สี่อะตอม หรือ Quadruplets และลักษณะอื่นๆ อีก ซึ่งเราเรียกว่าการเกิดนิวเคลียสของอะตอม หลังจากนั้นกลุ่มอะตอมจะมีการเพิ่มจำนวนจนกระทั่งเกิดการจัดเรียงตัวกันตามทางผลึกวิทยา (Crystallographic) ด้วยและมีการต่อเชื่อมของฟิล์มกันไป ลักษณะโดยทั่วไปของฟิล์มขณะที่เกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินและหุบเขา ถ้าอะตอมที่ผิวมีพลังงานมันจะสามารถเคลื่อนที่เพื่อเลือกที่จะเข้าไปตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุรองรับมีค่าสูงขึ้น การลดอัตราการเคลือบ (Deposition rate) สามารถช่วยการโตของผลึกให้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมจะมีเวลาในการโตที่นานพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของตัววัสดุรองรับสูงและอัตราการเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนที่มีขนาดใหญ่มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยและได้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากพอในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของตัววัสดุรองรับต่ำแต่อัตราการเคลือบสูง ก็จะทำให้ผลในลักษณะเดียวกัน

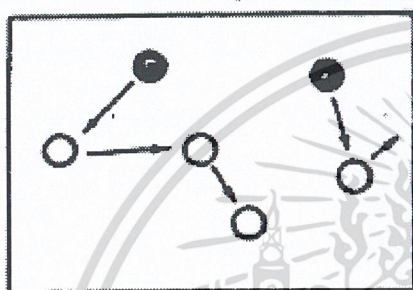
(a) Single Atom Arrives



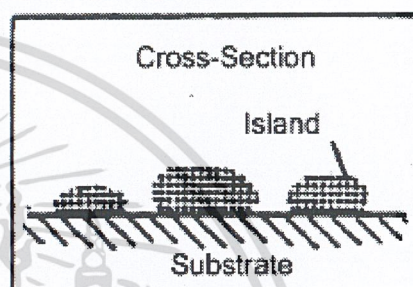
(e) Growth



(b) Migration Re-evaporation



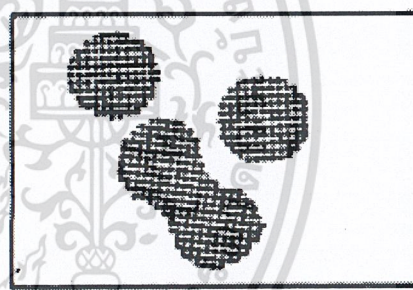
(f) Island Shape



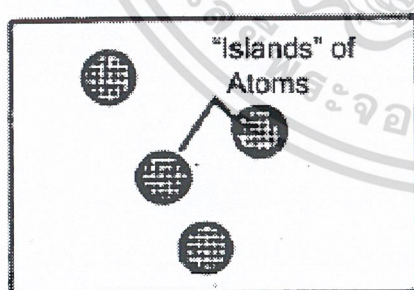
(c) Collision & Combination of Single Atoms



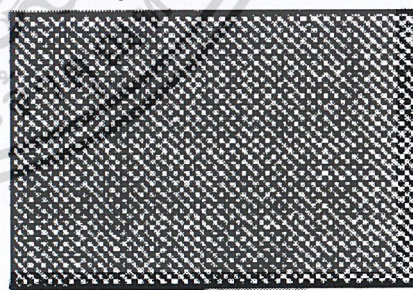
(g) Coalescence



(d) Nucleation



(h) Continuity



รูปที่ 2.10 การเกิดฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ฟิสิกส์พื้นฐานของการสปีดเตอริง (ชัยวิทย์, 2529)

พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นกลางและอนุภาคที่มีประจุ ทั้งประจุบวกและประจุลบ อยู่รวมกันในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมของอนุภาคเหล่านี้ เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่าๆกัน และแสดงพฤติกรรมรวม (Collective behavior) ไอออนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุและมีมวลหนักจึงถูกเร่งให้มีพลังงานสูงได้ในสนามไฟฟ้า เมื่อ ไอออนไปปะทะวัสดุเป้าทำให้เกิดการคายเทโมเมนตัมเพียงพอที่จะขับเคลื่อนที่เป็นกลางออก จากผิวของวัสดุเป้าได้ อะตอมที่เป็นกลางเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปจับกับวัสดุรองรับ แต่ในขณะที่ ไอออนเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายจะชนกับอนุภาคของอะตอมที่เป็นกลางในพลาสมาอยู่เสมอ ไอออน จึงสูญเสียพลังงานไปบางส่วน หรือถูกสะท้อนให้เคลื่อนที่ออกจากแนวเดิม อะตอมเป็นกลางที่ หลุดออกมาจากเป่าก็เกิดการชนกับอนุภาคที่เป็นกลางของก๊าซ ก่อนที่จะไปจับที่วัสดุรองรับ เช่นกัน เพื่อลดปัญหานี้จึงต้องให้กระบวนการในการชนเกิดขึ้นที่ความดันต่ำ เพราะวิถีอิสระเฉลี่ย (Mean free path) แปรผกผันกับความดัน และการใช้ความดันต่ำยังลดอัตราการชนของอะตอม เป็นกลางของก๊าซที่ชนกับวัสดุเป้าและวัสดุรองรับ ในการชนของไอออนอาจทำให้อิเล็กตรอน หลุดออกมาจากวัสดุเป้า ด้วยเรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) และค่าเฉลี่ยของอะตอมที่เป็นกลางที่หลุดออกมาต่อการชนของไอออนหนึ่งตัวว่า ผลผลิต

2.3 หลักการและเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทางของฟิล์มบาง (Educational Physics Remote Laboratory, n.d.; พรนิภา, 2558)

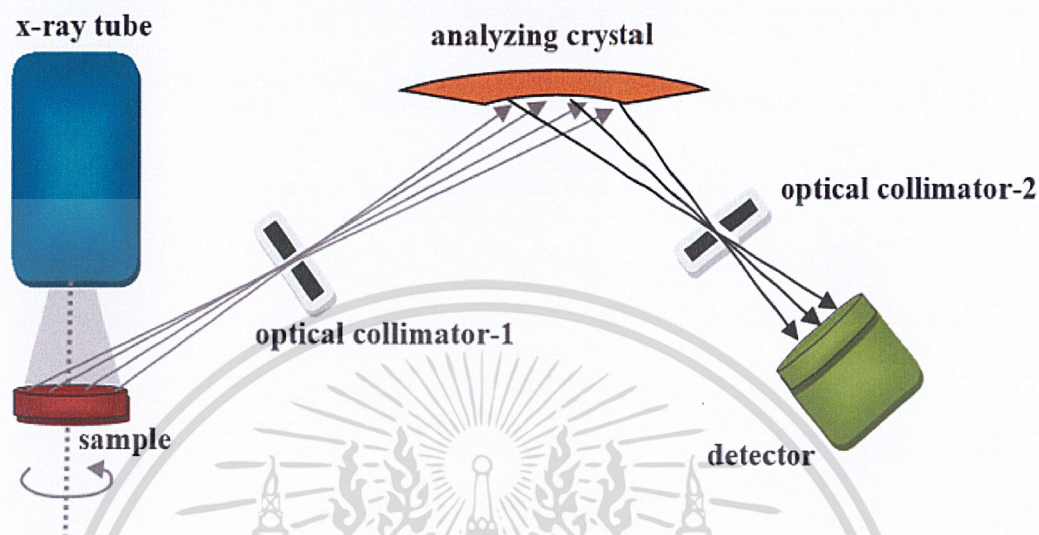
2.3.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มีมุมต่างๆ กันซึ่งในปี ค.ศ.1912 W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มีมุมตกกระทบ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มีมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ จากหลักการของ W.L. Bragg ทำให้มีการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก จนมีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ขึ้นในปี ค.ศ.1948 และพัฒนาจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักเคมีวิทยา วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา และโลหวิทยา เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) ของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ได้ทั้งในรูปแบบผง (Powder) และแบบฟิล์มบาง (Thin Film) ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก และระนาบผลึกของสารตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มีมุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด โดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึก ที่แตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สำหรับสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ หรือ XRD pattern ที่เฉพาะตัวเปรียบเสมือนกับลายนิ้วมือของคนที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป

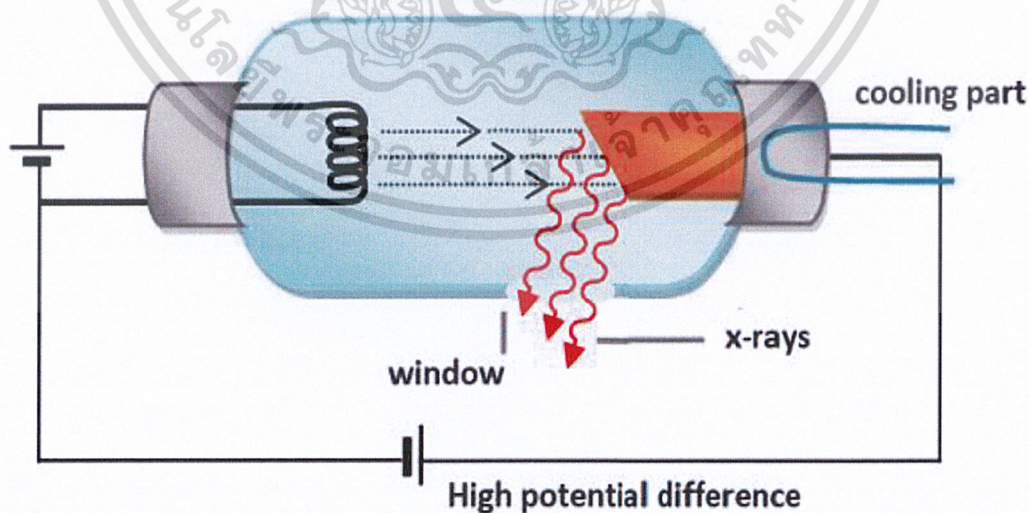
2.3.1.1 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่เป็นหลอดปิดและอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ซึ่งจะทำให้เส้นลวดเกิดความร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยของอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนวงในสุด หรือชั้น K-shell ของอะตอมทองแดงนั้นเกิดหลุดออกไปและเกิดเป็นช่องว่างขึ้นซึ่งเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมาคือชั้น L-shell และ M-shell เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วย อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ หรือที่เรียกว่า Detector



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของ X-ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 2.12 หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 การเตรียมตัวอย่าง XRD

สารตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีขนาดอนุภาคประมาณ 40 ไมครอน หรือบดให้มีความละเอียดมากที่สุด โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง ประมาณ 1 – 2 กรัม ตักสารตัวอย่างลงใน sample holder แล้วใช้ glass plate กดอัดตัวอย่างให้แน่นเพื่อให้มีผิวหน้าที่เรียบที่สุด สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งหรือฟิล์มบาง จะต้องมีขนาดกว้าง x ยาว x หนา ไม่เกิน 10 x 10 x 2 มิลลิเมตร และใช้ด้านหน้าที่เรียบที่สุดในการวิเคราะห์ โดยใช้เทปใสยึดติดตัวอย่างเข้ากับ Sample Holder

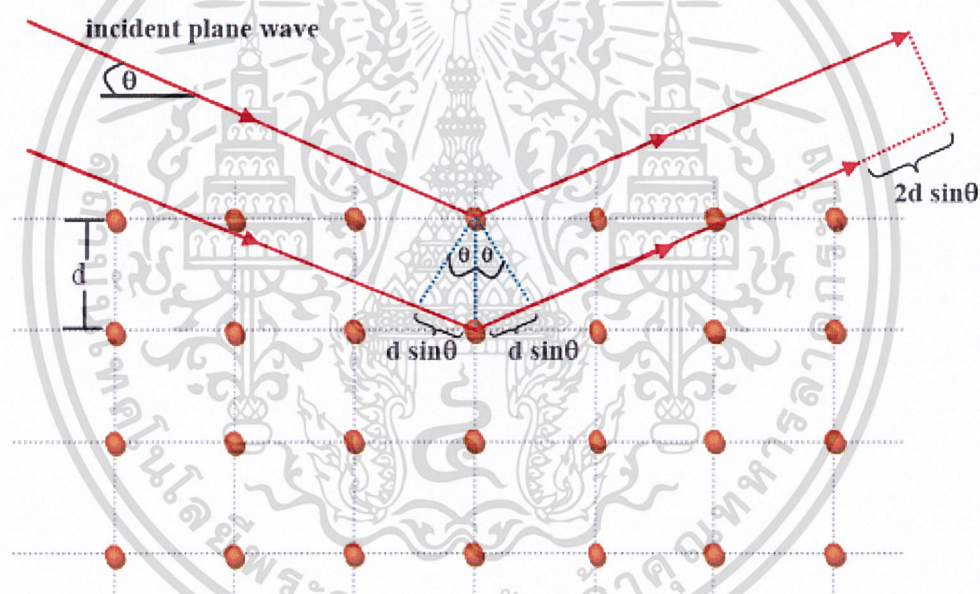
2.3.1.3 การประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในงานวิจัย

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในสารตัวอย่างเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (Phase analysis) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเฟสที่เป็นผลึกจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยผลึกชนิดใดและมีโครงสร้างเป็นแบบใด
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารตัวอย่างในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเป็นค่าที่แปรผันตามปริมาณของเฟสที่เป็นผลึกภายในสารตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มของพีคคำนวณหาปริมาณของเฟส และองค์ประกอบต่างๆภายในสารตัวอย่างได้
3. การวิเคราะห์ขนาดของผลึก (Crystallite size) และความเครียดระดับจุลภาค (Microstrain) ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นผลเนื่องมาจากเครื่องมือและลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่างได้แก่ ความเครียดจุลภาค ข้อบกพร่องของผลึก และขนาดของตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาขนาดผลึกและความเครียดจุลภาคจากความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้
4. เมื่อใช้หน่วยควบคุมอุณหภูมิ HTK16 ร่วมกับเครื่อง XRD จะทำให้สามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ภายใต้สภาวะตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1600°C ทั้งในบรรยากาศปกติ สุญญากาศ หรือบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.4 การเลี้ยวเบนกับกฎของแบรกก์ W.L. Bragg

การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray Diffractometer หรือ XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non - destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างกันผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งวัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกันแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกจะเป็นไปตามกฎของ Bragg ดังสมการที่ (2.9)



รูปที่ 2.13 กฎของ Bragg

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.10) เรียกว่า กฎของแบรกก์ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (h k l) ซึ่งค่า h k l เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0,1,2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และค่าคงที่ของโครงผลึก (a, b, c, α , β , γ) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีค่าต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆ ในกรณีอย่างง่าย เมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic) ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกดังนี้ $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.4)$$

โดย h,k,l คือ ตำแหน่งของผลึกที่แกนของผลึกนั้น ๆ

a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.5)$$

โดย a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

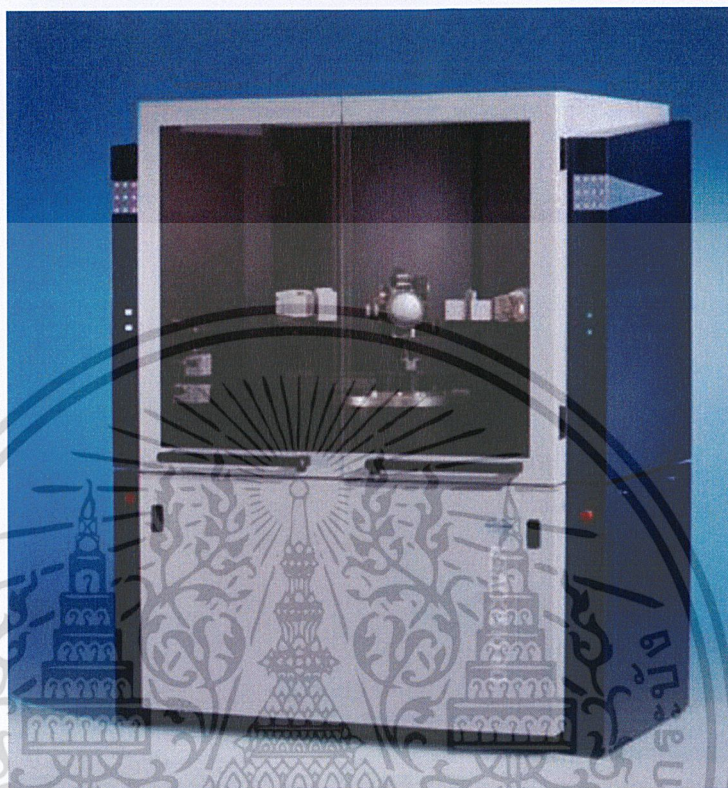
λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54059 Å)

θ คือ มุมแบรกก์ (Bragg's angle)

ระนาบต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อน เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมาไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆจะถูกตรวจหาค่าทั้งสองจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลที่กำลังมาแล้วก็จะสามารถคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.14 เครื่อง X- ray Diffractometer : XRD
รุ่น D8 Discover โดย Bruker Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.5 การวัดขนาดอนุภาค หรือ Crystallite size (P.Bindu. et al, 2014)

ในการวัดเพื่อหาขนาดของอนุภาคหรือ Crystallite size สามารถทำได้โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer eqations) ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{hkl}\cos\theta} \quad (2.6)$$

โดย D คือ ขนาดของผลึก

K คือ ค่าคงที่ เท่ากับ 0.9

θ คือ มุมแบรกก์ (Bragg's angle)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เท่ากับ 1.54059 Å

β_{hkl} คือ ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค (FWHM)

2.3.1.6 การศึกษาความเครียดของฟิล์มบาง (Strain)

การวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วย XRD ยังสามารถใช้ข้อมูลในการศึกษาความเครียดของฟิล์มบาง ไททานเนียมออกไซด์ได้ดังนี้

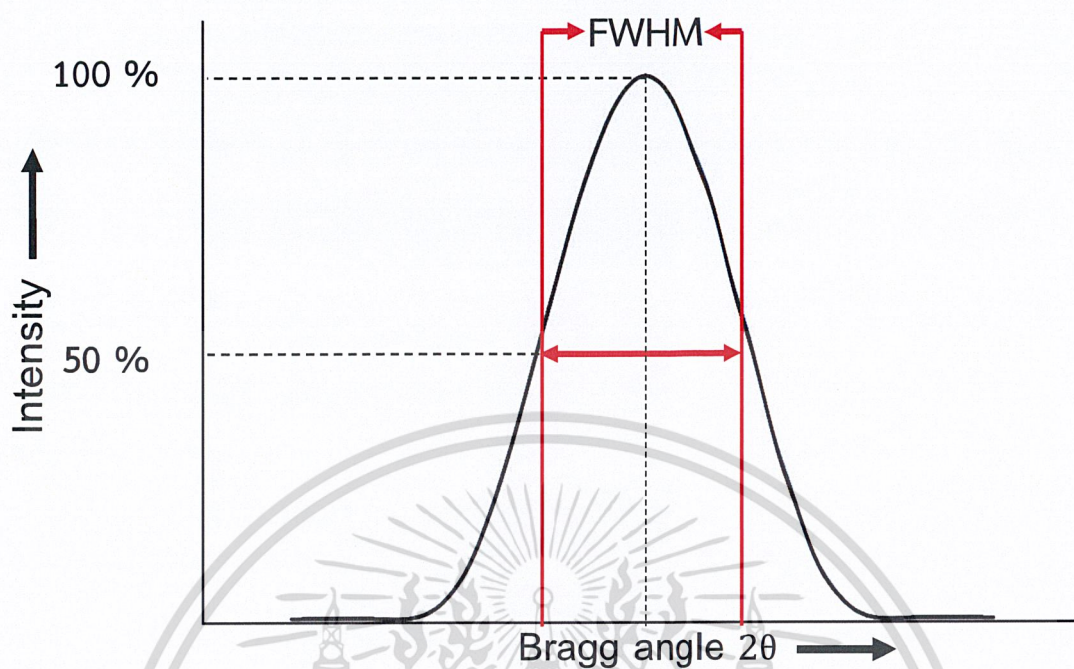
$$\epsilon = \frac{\beta_{hkl}}{4\tan\theta} \quad (2.7)$$

โดย ϵ คือ ความเครียด (Strain)

β_{hkl} คือ ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค (FWHM)

θ คือ มุมแบรกก์ (Bragg's angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



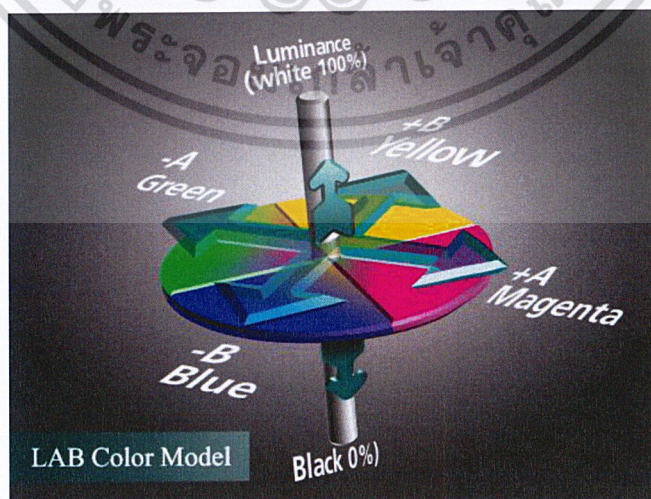
รูปที่ 2.15 แสดงการหาค่า Full width at half maximum หรือ FWHM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

(Wenjuan Liu. et al, 2014; Aballtechno, 2015)

จากหลักการพื้นฐานเรื่องสีในบทความการมองเห็นสี จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้วัดสีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานทางด้านสีคือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination มีสำนักงานใหญ่อยู่ในประเทศฝรั่งเศส ซึ่งองค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการทางด้านวิชาการ และการวิจัย คือระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีเขียว (Green) สีแดง (Red) และ สีน้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืดและความสว่างของสีได้ ดังนั้นระบบ CIE จึงได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีเขียว สีแดง และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังคงขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้มีการพัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือระบบ $L^*-a^*-b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b$) นอกจากนี้ทางด้านบริษัท Hunter lab ในอเมริกาก็เป็นอีกองค์กรหนึ่งซึ่งได้ทำการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสี จนในที่สุดได้ระบบของ Hunter lab เองออกมาซึ่งเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติ เช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ $L^*-a^*-b^*$ ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่างระบบสีของ CIE และ Hunter lab คือสูตรการคำนวณค่าสี ซึ่งทั้ง L-a-b และ $L^*-a^*-b^*$ ล้วนมีพื้นฐานการคำนวณมาจากค่าจากระบบ X-Y-Z เหมือนกันทั้งสิ้น



รูปที่ 2.16 L-a-b Chart ของ CIE Lab scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในองค์กรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่าเครื่อง Spectrophotometer ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขได้ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น reflectance curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมาก็จะมีความยาวคลื่นต่างกันโดยที่

สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร

สีเขียว มีความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร

สีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร

ระบบการวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer มีอยู่หลายระบบด้วยกันคือระบบ Chromaticity coordinate , ระบบ Munsell , ระบบ Tristimulus Value และระบบ CIE L*a*b* ระบบ Tristimulus Value ค่าที่หาได้ออกมาเป็น X, Y, Z โดยค่านี้จะระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างกันของสีที่มองเห็น จึงไม่สามารถที่นำมาใช้ประโยชน์อะไรได้มาก

ระบบ CIE Chromaticity coordinate เป็นวิธีการที่สามารถระบุความหมายของสีได้ชัดเจนขึ้นซึ่งค่าที่ได้เป็น

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.8)$$

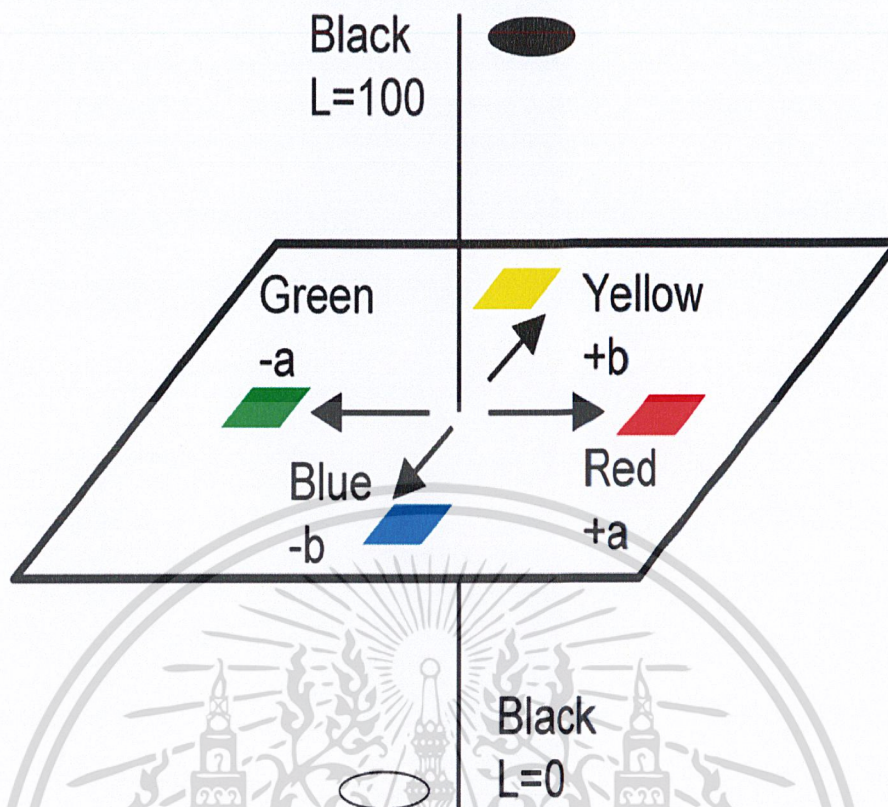
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.9)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.10)$$

โดยที่ค่า x และ y เป็นค่าที่ระบุความเป็นสี ส่วนความสว่างของสีเป็นค่า Y แต่วิธีการวัดสีโดยวิธีการนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบอกค่าความแตกต่างของสี

อุปกรณ์วัดสี spectrophotometer ในท้องตลาดมีหลายรุ่นและหลายยี่ห้อ ที่นิยมใช้ได้แก่ของ Hunter lab, Nikon และ Minolta ซึ่ง spectrophotometer บางรุ่นสามารถบอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น X-Y-Z L-a-b L*-a*-b* รวมไปถึง CMYK (Crayon-Magenta-Yellow-Black) ซึ่งเป็นระบบสีนิยมใช้ในเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์ CIE ได้กำหนดหน่วยวัดสีมีสัญลักษณ์ L*-a*-b* โดยทั้ง 3 ตัวแปลมีรายละเอียด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดง CIE Lab color space

แกน L^* บ่งบอกถึง ความสว่าง (Lightness) มีค่าตั้งแต่ 0 -100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

การหาความแตกต่างของสี พิจารณาจากระยะห่างของพิกัดสีนั้นๆ เช่น จุดที่ 1 วัดค่าสีได้ $L1^* a1^* b1^*$ จุดที่ 2 วัดค่าสีได้ $L2^* a2^* b2^*$ จะได้ความแตกต่างของสี (ΔE) ระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ตามสมการที่ 2.9

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแหล่งกำเนิดแสงจำแนกได้ดังต่อไปนี้

Illuminant A มีการกระจายพลังงานใกล้เคียงกับหลอดไส้ทั้งสแตน (Incandescent lamp) ซึ่งมีอุณหภูมิสี (Color temperature) อยู่ในช่วง 2,848-2856 เคลวิน

Illuminant B เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จาก หลอดไฟแบบ Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสง แล้วให้แสงที่มีอุณหภูมิสี 4,900 เคลวิน

Illuminant C เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จาก หลอดแบบ Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสง แล้วให้แสงที่มีอุณหภูมิสี 6,700 เคลวิน

Illuminant D เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ แทนแสงแดดตอนกลางวัน แต่อุณหภูมิสีต่างกัน เช่น D_{65} และ D_{75} โดยที่

D_{65} เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มีอุณหภูมิ 6,500 เคลวิน

D_{75} เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มีอุณหภูมิ 7,500 เคลวิน

และเรานิยมใช้ D_{65} เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการวัด (ภคินัย, 2550)

นอกจากการวัดสีโดยใช้ Spectrophotometer แล้ว ยังมีเทคนิคอีกอย่างหนึ่งในการวัดสีซึ่งต้นทุนต่ำกว่าการใช้ Spectrophotometer คือ การใช้สแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อตรวจสอบค่าสี โปรแกรมสำเร็จรูปบางโปรแกรมเช่น Photoshop® สามารถบอกถึงค่าสีในระบบต่าง ๆ ของภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ได้ด้วย ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Photoshop® เพื่อหาค่าสีในระบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) ค่าสีที่อ่านได้ก่อนเทียบกับอุปกรณ์วัดสีที่มีความเที่ยงตรง เนื่องจากการอ่านค่าสีโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าสี เช่น คุณภาพของอุปกรณ์สแกนภาพ หรือ การดัดจอประมวลภาพในคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การวิเคราะห์ความต้านทานต่อรอยขีดข่วนโดยเทคนิค Scratch Test (TOMÁŠ, 2015)

Scratching เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมแพร่หลายในการใช้งานกับวัสดุที่มีความแข็งมาตั้งแต่ปี 1812 เมื่อ Friedrich Mohs นักขุดแร่ชาวเยอรมันได้นำค่าความแข็งของแร่ออกมาใช้โดยสเกลนี้มีแร่ธาตุสิบชนิด 1. talc, 2. gypsum, 3. calcite, 4. fluorite, 5. apatite, 6. orthoclase feldspar, 7. quartz, 8. topaz, 9. corundum, 10. diamond หรือที่เรารู้จักกันว่าความแข็งของโมส์

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งของโมส์

ความแข็ง	ชนิดแร่
1	ทัลก์ (Talc)
2	ยิปซัม (Gypsum)
3	แคลไซต์ (Calcite)
4	ฟลูออไรต์ (Fluorite)
5	อะพาไทต์ (Apatite)
6	ออร์โทเคลส (Orthoclase)
7	ควอตซ์ (Quartz)
8	โทแพซ (Topaz)
9	คอรัันดัม (Corundum)
10	เพชร (Diamond)

โดยจะเรียงลำดับจากแร่ที่มีความแข็งน้อยที่สุดไปมากที่สุด โดยค่าความแข็งนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดง่าย ๆ ที่วัสดุที่แข็งกว่าสามารถขูดวัสดุอื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่าความแข็งนี้อาจจะเพียงพอแค่สำหรับแนวคิดพื้นฐานของแร่ธาตุ แต่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการปฏิบัติทางอุตสาหกรรม

ความแข็งหมายถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเจาะหรือการเสียดสีโดยวัสดุอื่น โดยการทดสอบความแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ 1. Rebound hardness Test 2. Indentation Test และ 3. Scratch Test โดยที่ Rebound hardness Test คือการวัดการตีกลับหรือสะท้อนกลับของแรงที่กระทำจากความสูงคงที่ไปยังตัววัสดุ Indentation Test คือการวัดโดยการประเมินจากขนาดของรอยที่โดยกระทำโดยหัวกดในงานทางด้านวิศวกรรมส่วนมากจะใช้หัวกดชนิด Vickers, Brinell และ Rockwell ในการทดสอบ และ Scratch Test คือการวัดค่าเอกซารนี้เป็นเอกซารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งโดยประเมินจากรอยขีดข่วน ในกรณีของพื้นผิวของฟิล์มโดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิค Scratch Test โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.3.1 Scratch Test

เป็นการทดสอบวัดความสามารถในการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบหรือฟิล์มกับตัววัสดุรองรับ ด้วยการวัดค่าแรงกระทำวิกฤต โดยส่วนมากนิยมวัดค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (First crack initiation, L_{c1}) และค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการหลุดลอกสมบูรณ์ (Full delamination, L_{c2}) ซึ่งค่าสุดท้ายนี้ทางอุตสาหกรรมถือว่ามีความสำคัญสูงสุด เพราะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึง ความเสียหายโดยสมบูรณ์ของชั้นเคลือบหรือฟิล์ม

ในการทำการทดสอบรอยขีดข่วนระดับนาโน และระดับไมโคร พื้นผิวของชิ้นงานจะต้องมีลักษณะที่เรียบและ เป็นเงาวาว ในการทดสอบรอยขีดข่วนระดับนาโน และระดับไมโครทางมีสิ่ง ผิดปกติบนพื้นผิวอาจก่อให้เกิดความผันผวนในด้าน แรงและความลึกของการทดสอบ ซึ่งอาจทำให้ การหาค่ามีความซับซ้อนหรือไม่สามารถหาค่าได้ เมื่อชิ้นงานพร้อมสำหรับการทดสอบใดไม่มีสิ่ง ผิดปกติใดๆชิ้นงานจะถูกนำเข้าไปภายในภาชนะ (Chamber) ซึ่งในระหว่างการทดสอบจะแยกชิ้นงาน ที่ทำการทดสอบออกจากสภาพแวดล้อมภายนอกเนื่องจากอาจทำให้เกิดความผิดพลาดระหว่างทำ การทดสอบได้ ในขั้นตอนถัดไปจะทำการเลือกตำแหน่งที่จะทำการทดสอบและทำการพิจารณา บริเวณโดยรอบๆ เมื่อชิ้นงานถูกทดสอบแล้วจะมีการวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทดสอบ เช่น แรงในแนวตั้ง,แรงในแนวนอน,ความลึก และความกว้าง ของรอยขีดข่วน

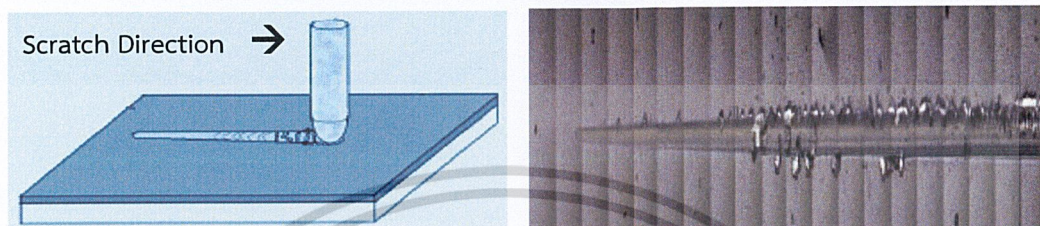
จากการทดสอบในแนวดิ่ง หรือ Vertical Load การทดสอบรอยขีดข่วนสามารถทำได้ 3 วิธี คือ 1.การทดสอบที่แรงกดเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงอย่างต่อเนื่อง (Progressive Load) 2.การทดสอบโดยแรงกดคงที่ (Constant Load) และ 3.การทดสอบที่แรงกดเพิ่มขึ้น (Incremental) โดยที่ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของการทดสอบที่แรงกดเพิ่มขึ้นแบบเป็น เส้นตรงอย่างต่อเนื่อง (Progressive Load) และ การทดสอบโดยแรงกดคงที่ (Constant Load) พอสังเขปดังนี้

การทดสอบที่แรงกดเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงอย่างต่อเนื่อง (Progressive Load)

การทดสอบนี้ดำเนินการโดยการใช้การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง (เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง) หรือแรงกระทำคงที่ หัวสไตส์เคลื่อนที่ไปทั่วชิ้นงานที่มีการเพิ่มแรงกระทำแบบเส้นตรง จนกว่าจะเกินค่าแรงกระทำวิกฤตเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก (Critical loads, L_c) , แรงปกติ (F_z) และ

แรงแทนเจนต์ (F_x) จะถูกบันทึกไว้ และทำการตรวจสอบความเสียหายด้วยกล้อง Optical ไม่ว่า: Microscope โดยเรียกการวัดหรือบันทึกระหว่างการทดสอบชิ้นงานว่า Acoustic Emission หรือ AE

โดยที่ L_c (Critical Loads) เป็นฟังก์ชันของการยึดเกาะของสารเคลือบผิว, รัศมีสปลายไตลส์, อัตราแรงกระทำ, สมบัติเชิงกลของพื้นผิวและการเคลือบ, ความหนาของการเคลือบ, ความเค้นภายในสารเคลือบ, การกระจายขนาดของข้อบกพร่องของพื้นผิวหน้าที่อยู่ระหว่างวัสดุรองรับ กับ สารเคลือบ, และแรงเสียดทานระหว่างปลายสไตลส์และสารเคลือบผิว

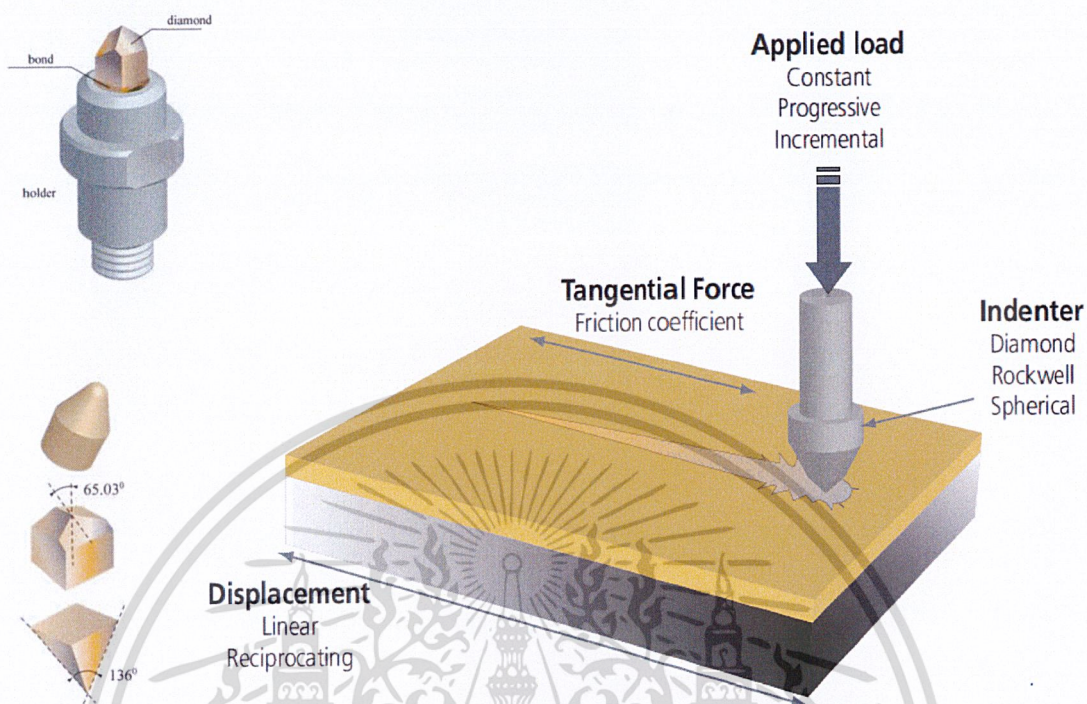


รูปที่ 2.18 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสไตลส์เมื่อทำการทดสอบ

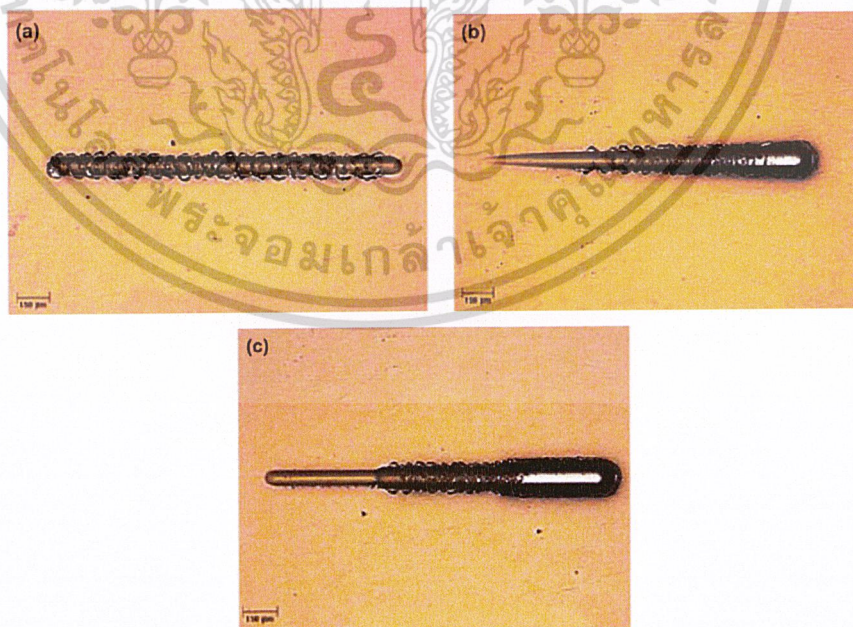
การทดสอบโดยแรงกดคงที่ (Constant Load)

การทดสอบการยึดเกาะจะใช้กับแรงกดปกติ (Normal Load) อย่างต่อเนื่องบนผิวสารเคลือบเพื่อให้ผิวสารเคลือบเกิดความเสียหาย และตรวจสอบการยึดเกาะแต่ละครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้น แรงกดทำให้เกิดความเสียหายบนผิวสารเคลือบเรียกว่า แรงกระทำวิกฤต (Critical loads, L_c) โดยที่การวัดหรือบันทึกระหว่างการทดสอบขึ้นงาน หรือ Acoustic Emission (AE) และความต้านทานพื้นผิวทางไฟฟ้า หรือ Electrical Surface Resistance (ESR) จะถูกวัดพร้อมกันในระหว่างการทดสอบการยึดเกาะที่แรงกระทำคงที่เพื่อยืนยันความเสียหาย การทดสอบแรงกระทำคงที่ต้องใช้เวลานานขึ้น แต่จะให้ความแม่นยำทางสถิติมากขึ้นการทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำเหมาะสำหรับการตรวจสอบแบบรวดเร็วและการประกันคุณภาพ Quality Assurance (QA) ของผิวสารเคลือบดังนั้นเทคนิคนี้จึงเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับงานด้านวิจัยและพัฒนาทางด้านกระบวนการเคลือบ

ในระหว่างการทดสอบการยึดเกาะสามารถเกิดความเสียหายได้ 3 ประเภทคือ ยืดหยุ่น (Elastic), พลาสติก (Plastic) และ รอยแตก (Fracture) ซึ่งการทดสอบรอยขีดข่วน (Scratch Tests) ได้รับการพัฒนาโดยองค์กร ASTM (American Society for Testing and Materials)



รูปที่ 2.19 ภาพแสดงขณะทำการทดสอบการยัดเกาะ



รูปที่ 2.20 แสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ได้อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
 (a) Constant Load, (b) Progressive Load และ (c) Incremental
 ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

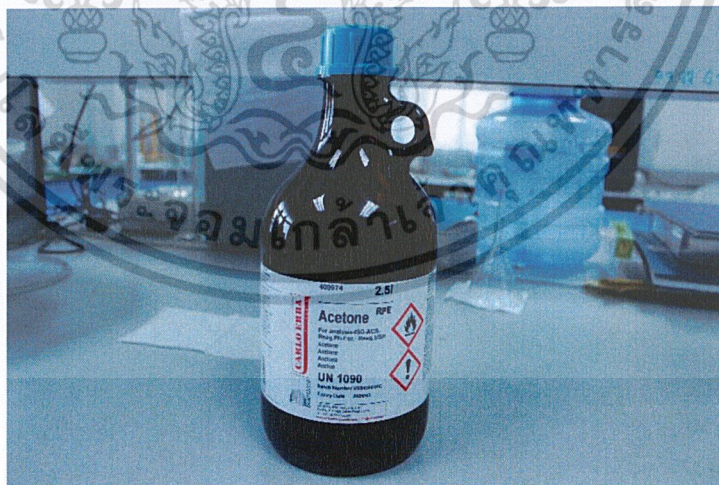
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมแผ่นสแตนเลส (Stainless304) เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับ และขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์โดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นสแตนเลส (Stainless304) เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับ

3.1.1 อุปกรณ์ทำความสะอาดวัสดุรองรับ

1. อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) กระดาษทรายเบอร์ 1000,2000 และ 4,000
- 2) อะซีโตน (Acetone)
- 3) เมทานอล (Methanol)
- 4) น้ำ DI (Deionized water)
- 5) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)
- 6) ปิกเกอร์
- 7) ฟอร์เซฟ (Forceps)



รูปที่ 3.1 สารอะซีโตน (Acetone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับ

1. ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบาง เราจะเตรียมสแตนเลสที่ต้องการเคลือบ โดยการนำแผ่นสแตนเลสมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000, 2000 และ 4000 ตามลำดับ
2. หลังจากทำการขัดด้วยกระดาษทรายแล้ว นำแผ่นสแตนเลสใส่ลงในบีกเกอร์โดยจัดเรียงแผ่นสแตนเลสให้เป็นแนวตั้ง
3. เทสารอะซิโตน (Acetone) ลงในบีกเกอร์
4. นำบีกเกอร์วางลงในเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)
5. ทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิกและจับเวลา 15 นาที



รูปที่ 3.2 เทสารอะซิโตน (Acetone) ลงในบีกเกอร์



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่องอัลตราโซนิกขณะที่กำลังทำความสะอาดแผ่นสแตนเลสด้วยสารอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่อครบ 15 นาทีแล้วให้น้ำแผ่นสแตนเลสออกโดยใช้ฟอร์เซพคีบออกเพื่อป้องกันการเกิดสิ่งปนเปื้อนบนตัววัสดุรองรับ

7. นำแผ่นสแตนเลสมาทำความสะอาดด้วยน้ำ DI (Deionized water) เพื่อล้างสารอะซิโตนที่ติดอยู่กับตัวสแตนเลส

8. นำแผ่นสแตนเลสมาเป่าให้แห้ง และนำแผ่นสแตนเลสที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วเก็บลงในกล่องที่เข้ดทำความสะอาดด้วยเมทานอล

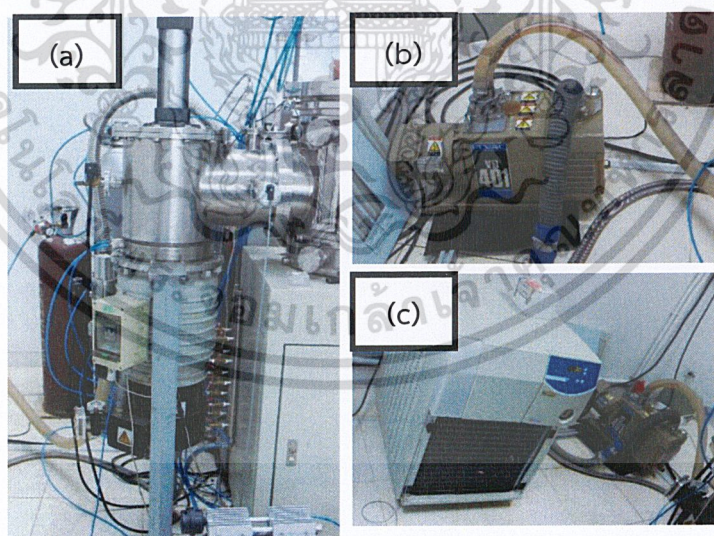
3.2 การเตรียมฟิล์มบาง TiO_xN_y โดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

1. ถังขดลวดความร้อน ภายในจะขดลวดเมื่อทำการป้อนความร้อนให้ขดลวดจะทำให้ น้ำมันร้อนระเหยเป็นไอ ซึ่งไอของน้ำมันจะไปจับกับโมเลกุลของอากาศภายในภาชนะสุญญากาศเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศ

2. บั้มดูดอากาศ (Rotary pump) หน้าทีดูดอากาศภายในภาชนะสุญญากาศ เพื่อให้ภายในภาชนะสุญญากาศเป็นสภาวะสุญญากาศ

3. เครื่องทำความเย็น (Cooling Diffusion) ทำหน้าที่ควบคู่กับขดลวดความร้อน



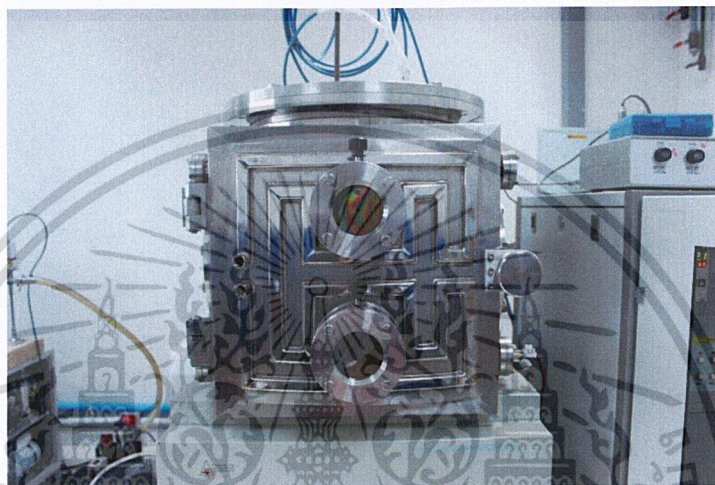
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

(a) ถังขดลวดความร้อน (b) Rotary pump และ (c) เครื่องทำความเย็น

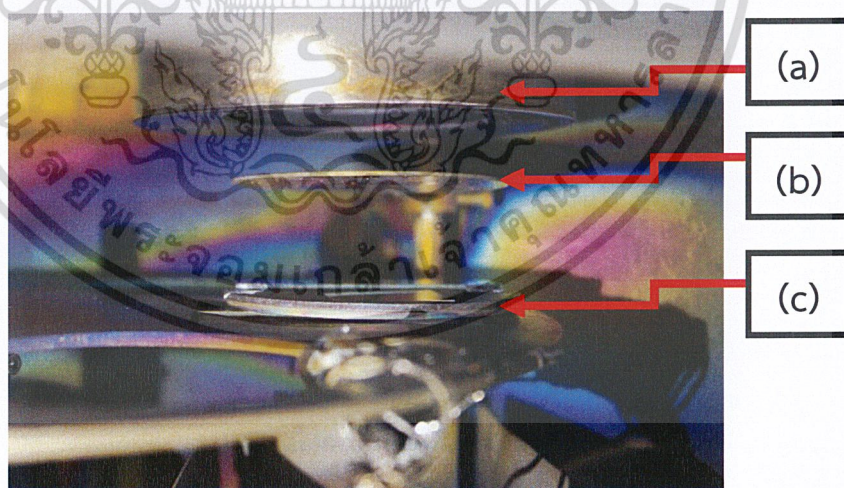
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) ภายในภาชนะสุญญากาศประกอบด้วย

- ชัตเตอร์ ทำหน้าที่ปิดไอออนจากเป้าสารเคลือบ
- เป้าสารเคลือบ (Target)
- จานวางแผ่นรองรับ
- หลอดไฟ



รูปที่ 3.5 ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง

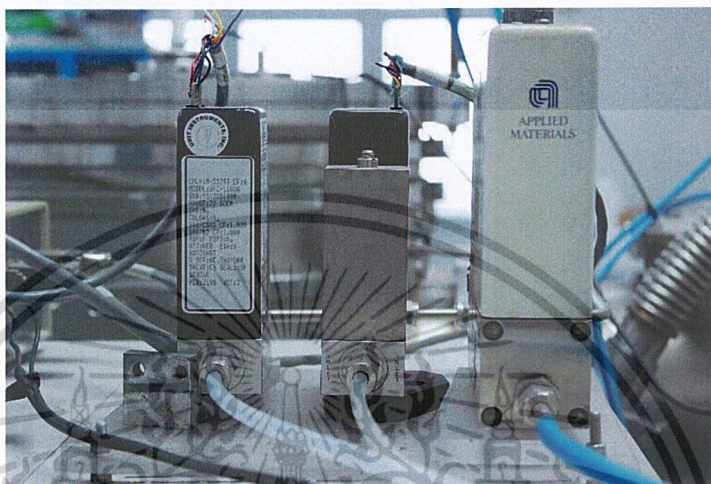


รูปที่ 3.6 ภาพแสดงส่วนประกอบภายในภาชนะสุญญากาศ (a) เป้าสารเคลือบ (Target)

(b) ชัตเตอร์ และ (c) จานวางวัสดุรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แก๊สอาร์กอน (Ar) , แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2)
6. Mass flow controller
7. แหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 3.7 Mass flow controller ของแก๊สอาร์กอน (Ar) , แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2)



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์

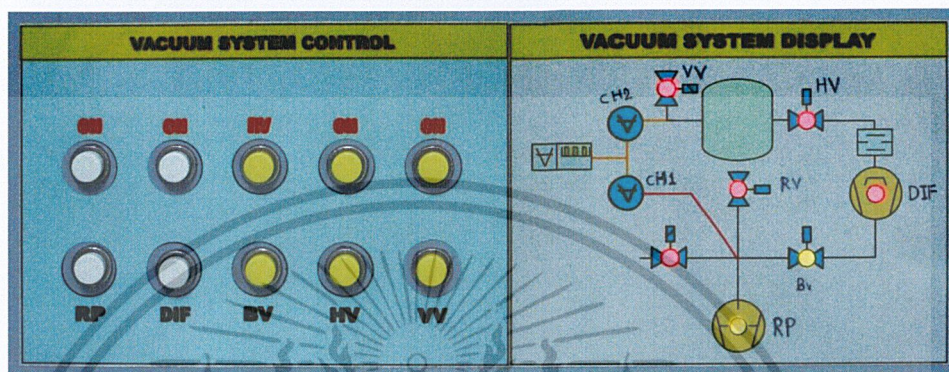
ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
เป้า (Target)	ไททาเนียมบริสุทธิ์ (99.995%)
วัสดุรองรับ (Substrate)	แผ่นสแตนเลส (Stainless304)
ระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับ	5 เซนติเมตร
ความดันพื้นฐาน (Base pressure)	1.0×10^{-6} mbar
ความดันรวม (Working pressure)	3.3×10^{-3} mbar
ก๊าซอาร์กอน (Argon)	28 sccm
ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen)	12 sccm
ก๊าซออกซิเจน (Oxygen)	1 sccm
อุณหภูมิวัสดุรองรับ	150 °C
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ	1,2,5,7,10 และ 12 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

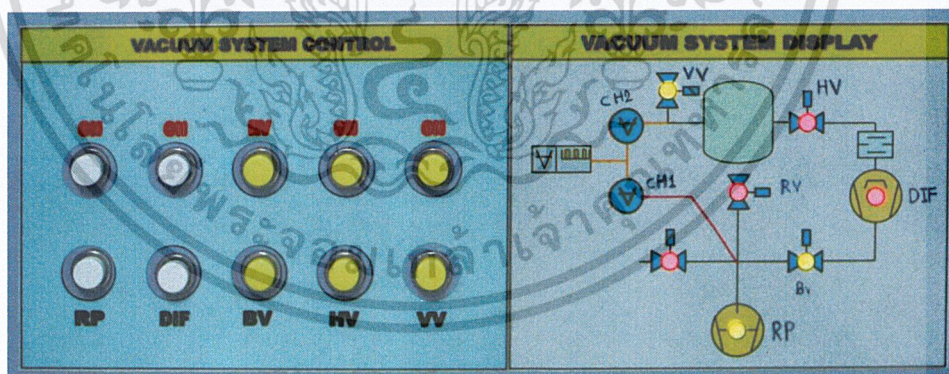
3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมภาชนะสุญญากาศสำหรับการสปีดเตอริง

1. เปิดสวิตช์ Main Breaker
2. ปั๊มอากาศออกด้วยปั๊มโรตารี RP (Rotart Pump) โดยกดปุ่ม RP (ON) เหนือปุ่ม RP โดย
สังเกตที่แผงควบคุมไฟ RP และ BV (Backing Valve) จะติดเป็นสีเขียว



รูปที่ 3.9 เตรียมภาชนะสุญญากาศให้มีอากาศเท่ากับภายนอก

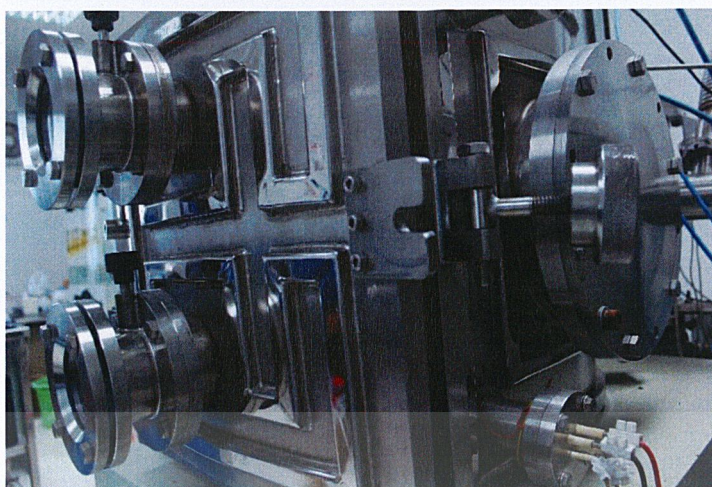
3. หมุนตัวล็อกประตู Chamber ออกแล้วกดปุ่ม VV (ON) เหนือปุ่ม VV (Vent Valve) เพื่อ
นำอากาศเข้าสังเกตที่แผงควบคุม ไฟ VV จะติดเป็นสีเขียว



รูปที่ 3.10 การนำอากาศเข้าเพื่อเปิดตัวล็อกฝา Chamber

4. ประตู Chamber เปิดออกทำการกดปุ่ม VV (Vent Valve) โดยกดที่ปุ่ม VV สังเกตที่
แผงควบคุม ไฟ VV จะติดเป็นสีแดง และประตู Chamber จะเปิดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การเปิดประตู Chamber

5. นำวัสดุรองรับ (Substrate) วางบนแท่นวางใน Chamber โดยมีระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบ (Target) และวัสดุรองรับเป็นระยะ 5 cm โดยสังเกตให้วัสดุรองรับตรงกับขีดเตอร์ แล้วทำการปิดประตู Chamber ให้สนิท

6. กดปุ่ม RV (Roughing Valve) เพื่อเริ่มทำการดูดอากาศภายใน Chamber ออกแล้วรอให้ความดันภายใน Chamber อยู่ที่ 3×10^{-2} mbar โดยดูได้จากจอแสดงผลภายในของ Chamber โดยกดดูที่ CH2

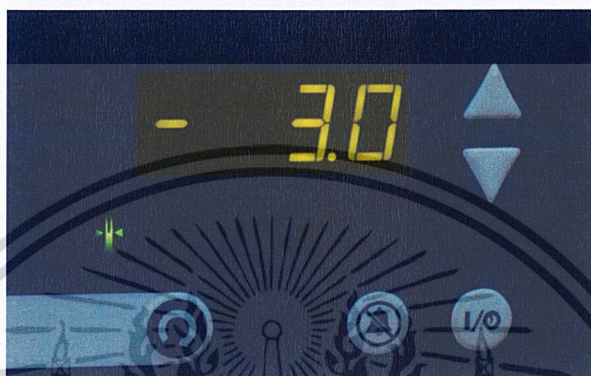


รูปที่ 3.12 ทำการดูดอากาศภายใน Chamber ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อความดันภายใน Chamber ได้ตามที่ต้องการแล้วกดปุ่ม BV

8. กดปุ่ม DIF (ON) เหนือปุ่ม DIF เพื่อให้ขดลวดร้อน (ประมาณ 40 นาที) พร้อมกับเปิด Cooling Diffusion โดยที่อุณหภูมิต่ำสุดของเครื่อง Cooling Diffusion จะอยู่ที่ $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยก่อนการเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion Pump) ควรตรวจสอบการทำงานของ Cooling Diffusion ก่อนเสมอ



รูปที่ 3.13 อุณหภูมิต่ำสุดของเครื่อง Cooling Diffusion เท่ากับ $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$

9. เมื่อขดลวดร้อน กดปุ่ม HV (ON) เหนือปุ่ม HV (High Vacuum) แล้วจากนั้นรอให้ความดันภายใน Chamber อยู่ที่ระดับสถานะสุญญากาศสูง จนความดันใน Chamber มีค่าประมาณ 1.0×10^{-6} mbar ซึ่งเป็นความดันต่ำสุด (Base Pressure)



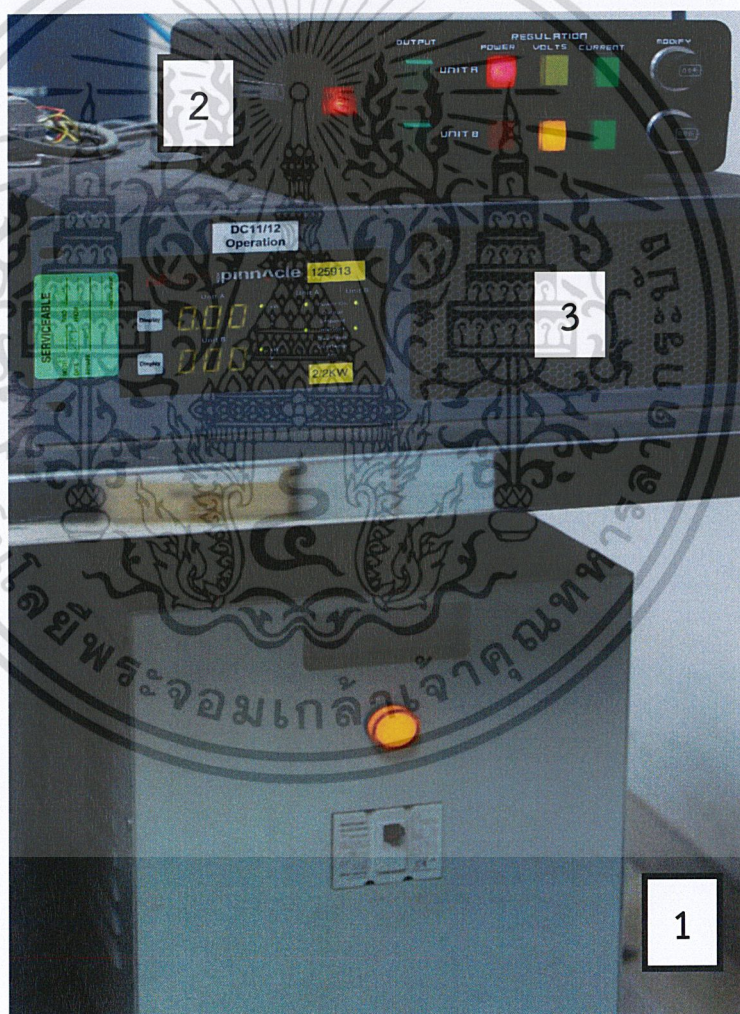
รูปที่ 3.14 ทำให้ภายใน Chamber มีสถานะสุญญากาศสูง (High Vacuum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เมื่อได้ความดันตามที่ต้องการให้ทำการให้ความร้อนวัสดุรองรับ (Substrate) โดยเปิดหลอดไฟ Halogen และจ่ายกำลังให้กับหลอดไฟ 35 Vatt โดยอุณหภูมิจะอยู่ช่วงอุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.2.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดเป้าสารเคลือบ หรือ Pre-Sputtering

1. เปิดวาล์วแก๊สอาร์กอน (Ar) เพื่อทำการทำความสะอาดเป้าสารเคลือบ โดยการเปิดสวิตช์กล่องควบคุมความดันแก๊ส แล้วเปิดสวิตช์ที่ตู้ไฟโดยจะมีไฟสีส้มขึ้น หลังจากนั้นกดเปิดสวิตช์ตัวควบคุม หรือ Controller (ไฟที่สวิตช์ขึ้นสีแดง) แล้วจึงยกสวิตช์ด้านหลังของ DC Operation ขึ้น

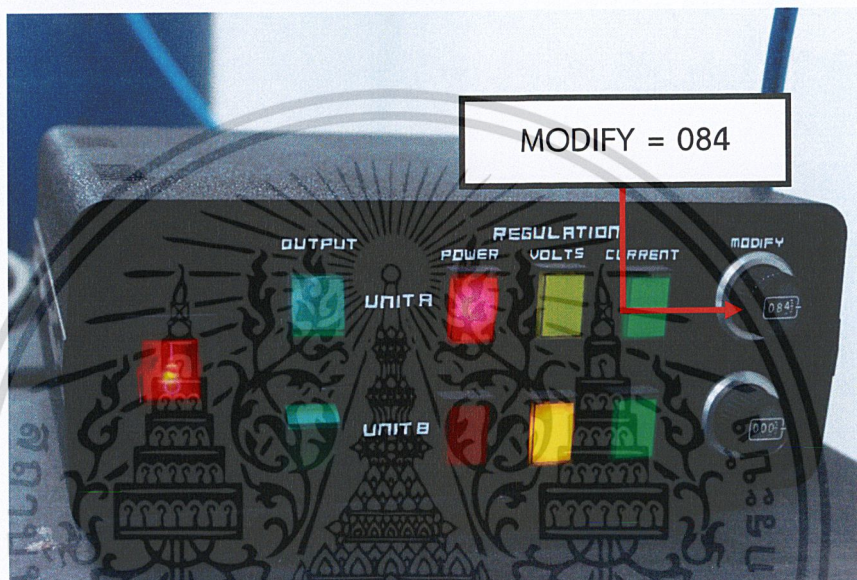


รูปที่ 3.15 แสดงลำดับการเปิดแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใส่แก๊สอาร์กอน (Ar) เข้าไปใน Chamber โดยหมุนกล่องควบคุมความดันแก๊สอาร์กอน (กล่องสีดำ) ไปที่ 220 โดยใช้ Power = 240 Watt โดยหมุน MODIFY ของ UNIT A ไปที่ 084 เมื่อพร้อมแล้วจึงกดปุ่ม OUTPUT ที่ UNIT A (สีเขียว) จับเวลา 5 นาที

3. เมื่อครบ 5 นาที ให้ทำการปิดปุ่มสวิตช์ OUTPUT ที่ UNIT A ก่อนเป็นลำดับแรก แล้วจึงลดแก๊สที่กล่องควบคุมความดันแก๊สอาร์กอนลงเป็น 000 แล้วรอประมาณ 5 นาที

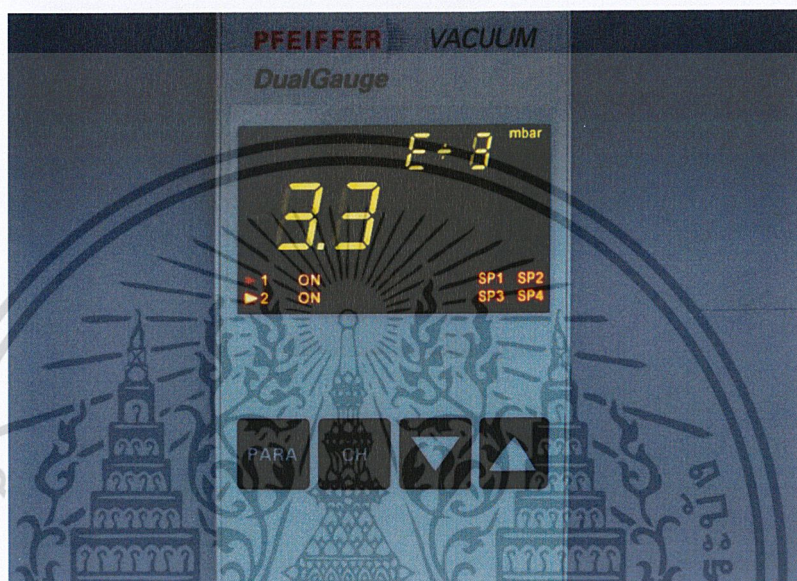


รูปที่ 3.16 ภาพแสดงค่า MODIFY ที่ 084

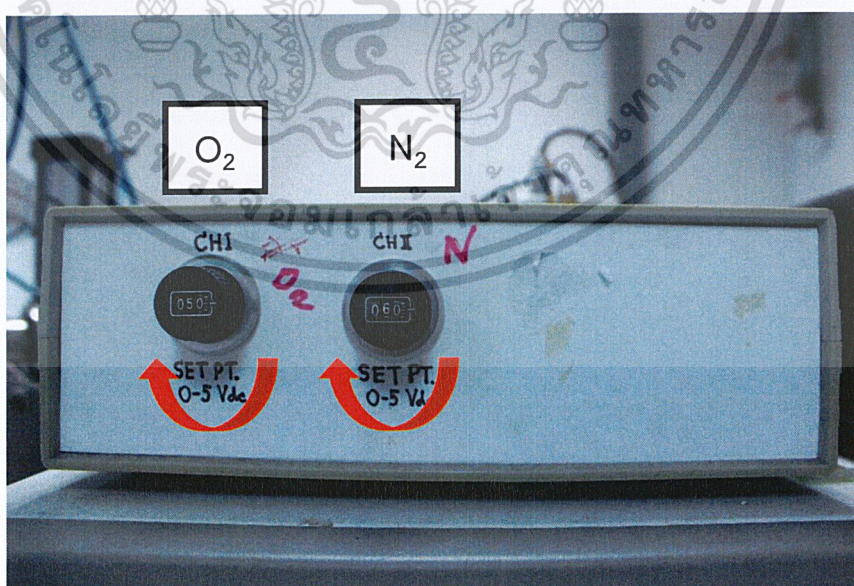
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์

1. เริ่มทำการ Sputtering ที่ Current Density = 17.5 mA/cm^2 , Power = 240 Watt โดยใส่ แก๊สอาร์กอน(Ar) ,ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N) ลงไปภายใน Chamber โดยปรับ Volume ของกล่องควบคุมความดันแก๊ส Ar = 093 , O_2 = 050 และ N_2 = 060 ความดันรวมจะอยู่ที่ $3.3 \times 10^{-3} \text{ mbar}$

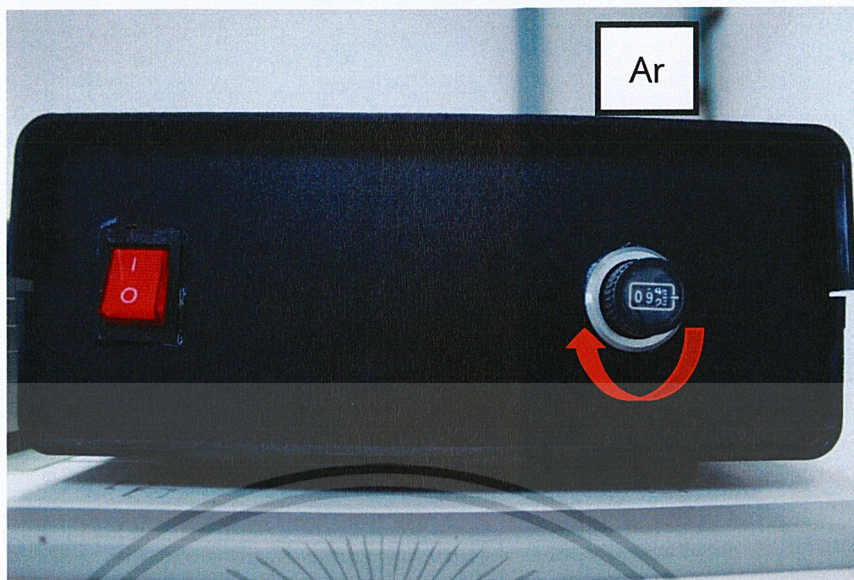


รูปที่ 3.17 แสดงความดันรวม (Working pressure) ที่ $3.3 \times 10^{-3} \text{ mbar}$



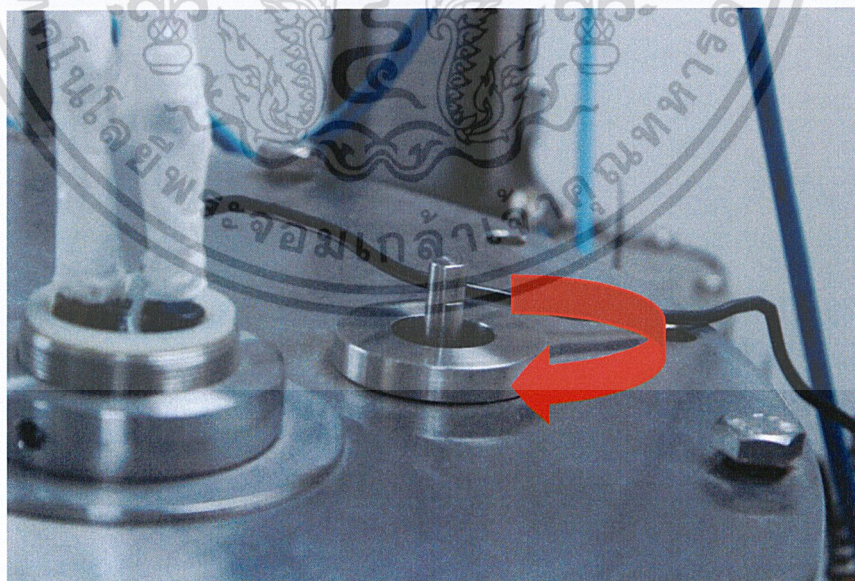
รูปที่ 3.18 แสดงVolume ของกล่องควบคุมความดันแก๊ส O_2 = 050 และ N_2 = 060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดง Volume ของกล่องควบคุมความดันแก๊ส Ar = 093

2. กดเปิดปุ่มสวิตช์ OUTPUT ที่ UNIT A จากนั้นหมุนชุดเตอร์ตามเข็มนาฬิกา แล้วทำการจับเวลาทันทีเมื่อชุดเตอร์สุด คือการเริ่มสปีดเตอริง เมื่อเวลาครบตามที่ต้องการให้หมุนปิดชุดเตอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) โดยมองให้ชุดเตอร์บังเป้าสารเคลือบ (Target) แล้วกดปิดปุ่มสวิตช์ OUTPUT ที่ UNIT A ทันที โดยจับเวลา 2,5,7,10,12,15 และ 20 นาทีตามลำดับ โดยจะมีการพัก เมื่อทำการสปีดเตอริงได้ 3 นาทีให้ทำการพัก 5 นาที ทำแบบนี้ซ้ำเรื่อยๆจนกว่าจะได้เวลาตามเงื่อนไขที่ต้องการ



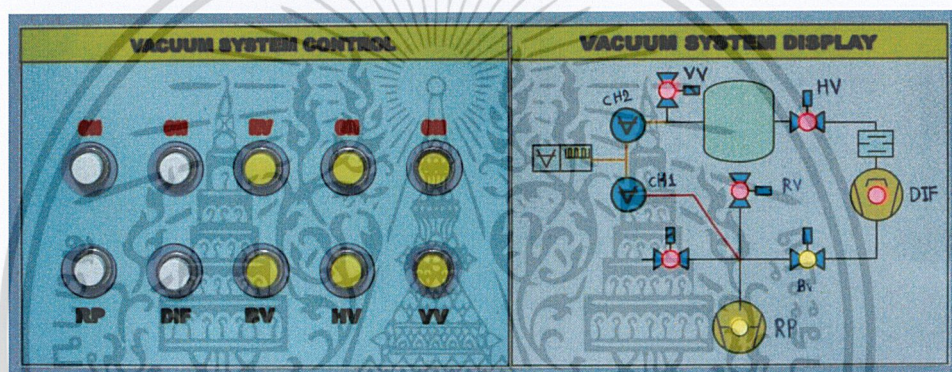
รูปที่ 3.20 แสดงการหมุนชุดเตอร์ในทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อทำการสปีดเตอริงเสร็จแล้วและปิดปั๊มสวิตช์ OUTPUT ที่ UNIT A เรียบร้อยแล้ว ให้ปิดสวิตช์ด้านหลังของ DC Operation ลงเป็นลำดับแรก ตามด้วยการปิดสวิตช์ตัวควบคุม หรือ Controller (ไฟที่สวิตช์สีแดงดับลง) แล้วจึงปิดสวิตช์ที่ตู้ไฟ (ไฟสีส้มดับลง)

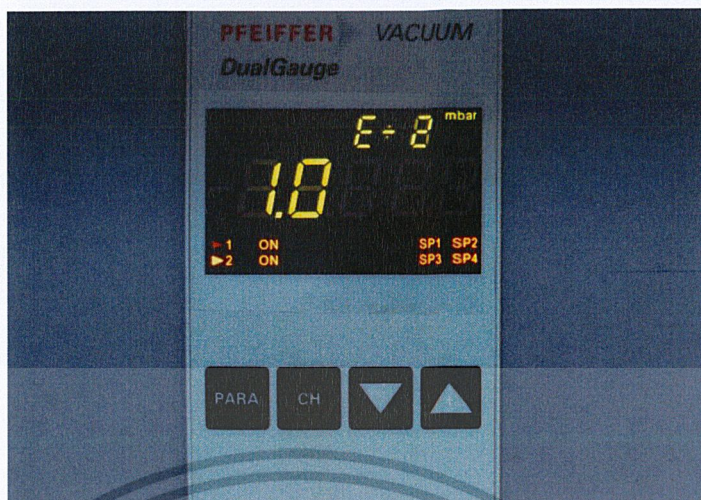
3.2.5 ขั้นตอนการปิดเครื่องสปีดเตอริง

1. ทำการปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion Pump) โดยกดปุ่ม DIF (OFF) แล้วรอให้อุณหภูมิขดลวดเย็นลง (ประมาณ 40 นาที) เมื่อขดลวดหายร้อนแล้ว กดปิด HV (High Vacuum) โดยกดปุ่ม HV (OFF) สังเกตแผงควบคุมไฟจะเป็นสีแดง



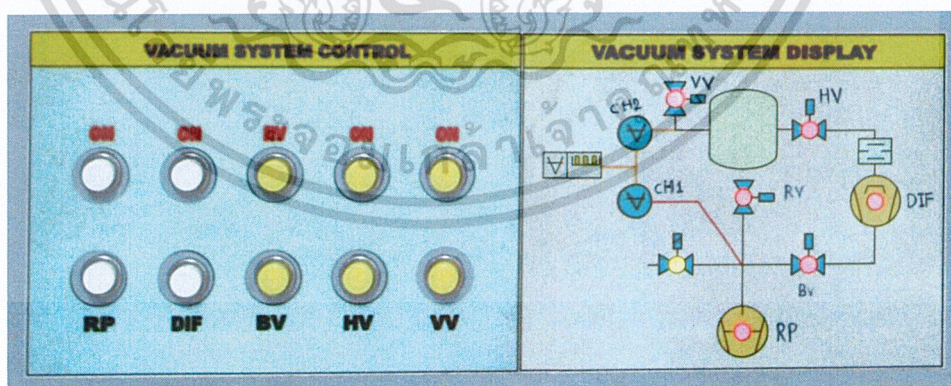
รูปที่ 3.21 แสดงการปิด Diffusion Pump และ ปิด High Vacuum

2. รอให้ความดันภายใน Chamber เพิ่มขึ้น (ประมาณ 1×10^{-2} mbar)
3. หมุนตัวลีดฝา Chamber ออกแล้วกดปุ่ม VV (ON) เหนือปุ่ม VV (Vent Valve) เพื่อนำอากาศเข้า สังเกตที่แผงควบคุมไฟ VV จะติดเป็นสีเขียว



รูปที่ 3.22 แสดงค่าความดันภายใน Chamber ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1×10^{-2} mbar

4. ประตูลูก Chamber เปิดออกทำการกดปิด VV (Vent Valve) โดยกดที่ปุ่ม VV สัญญาณที่แผงควบคุมไฟ VV จะติดเป็นสีแดง
5. นำวัสดุรองรับ (Substrate) ที่ทำการเคลือบฟิล์มไททาเนียมออกซิไนไตรด์เรียบร้อยแล้วออกจาก Chamber แล้วทำการปิดประตูลูก Chamber ให้สนิท แล้วกดปุ่ม RV เพื่อทำการปิด RV
6. ทำการปิดปั๊มโรตารี (RP) โดยกดปุ่ม RP (OFF) สัญญาณที่แผงควบคุมไฟจะเป็นสีแดง



รูปที่ 3.23 แสดงการปิดปั๊มดูดอากาศ (Rotary Pump)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ปิดสวิตช์เครื่องสเป็คเตอริงโดยการปิดสวิตช์ Main Breaker ลง



รูปที่ 3.24 การปิดเครื่องสเป็คเตอริง

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางไททานเนียมออกซิไนไตรด์

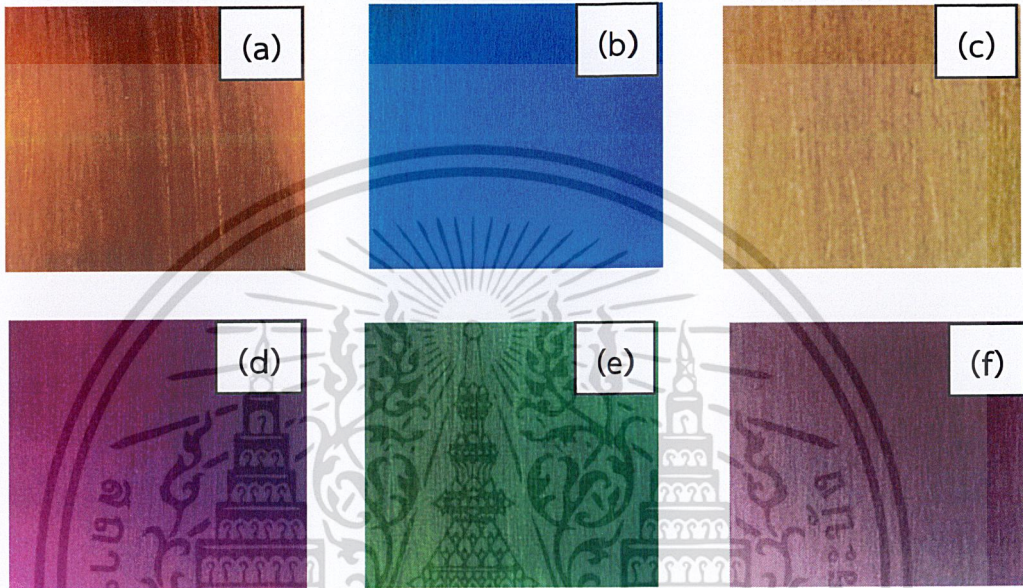
1. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)
2. วิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ระบบ CIE L*a*b*
3. การวิเคราะห์ความต้านทานต่อรอยขีดข่วนโดยเทคนิค Scratch test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์สีของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์



รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) ที่เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส (Stainless304) โดยเรียงตาม เวลาการเคลือบ (a) 1 นาที่ (b) 2 นาที่ (c) 5 นาที่ (d) 7 นาที่ (e) 10 นาที่ และ (f) 12 นาที่

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส (Stainless304) โดยใช้เงื่อนไขตามตารางที่ 3.1 โดยภาพที่ปรากฏได้จากการถ่ายภาพจากกล้องดิจิตอลบนพื้นที่ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ พบว่าที่เวลาที่แตกต่างกันออกไปจะได้ฟิล์มที่มีสีที่แตกต่างกันออกไปเช่นเดียวกันโดยที่ 1 นาที่ คือสี Dark Goldenrod , 2 นาที่ คือสี Sapphire Blue, 5 นาที่ คือสี Brass , 7 นาที่ คือสี Purple Jam , 10 นาที่ คือสี Pine Green และ 12 นาที่ คือสี Viola Purple ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสีที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกันระหว่างเวลาในการเคลือบ และ ความหนา โดยเมื่อเวลาการเคลือบเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจาก Color list of current colored titanium รูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม Color list of current colored titanium โดยที่ความหนาของฟิล์มเป็นชั้นความหนาของชั้นออกไซด์

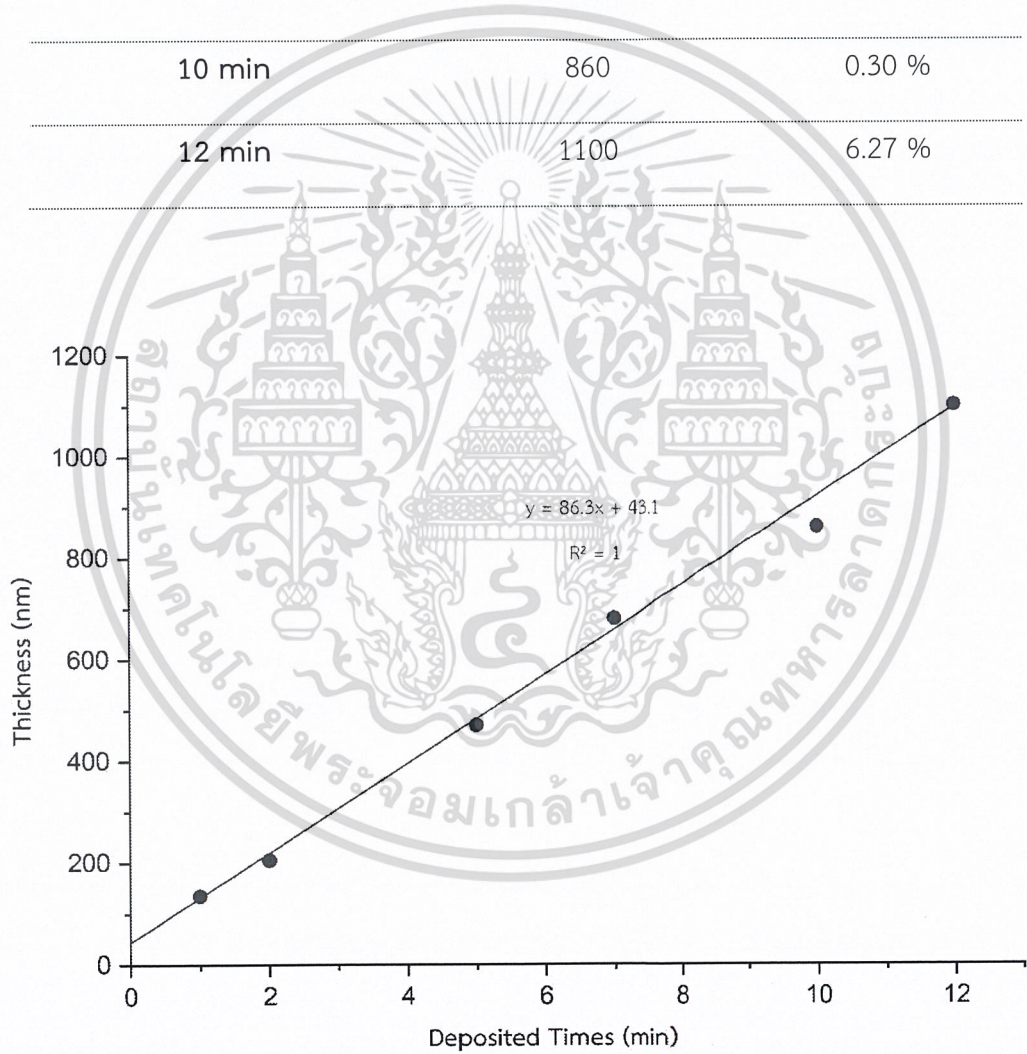


รูปที่ 4.2 ตารางสีและความหนาของไททาเนียม หรือ Color list of current colored titanium (HORIE USA, 2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เวลาในการเคลือบและความหนาของฟิล์มบางไททานเนียมออกซิไนไตรด์

Deposited Time	Thickness (nm)	Error
1 min	135	56.51 %
2 min	205	18.83 %
5 min	470	8.98 %
7 min	680	12.62 %
10 min	860	0.30 %
12 min	1100	6.27 %



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมออกซิไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าความหนาของฟิล์มบางหลังเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ที่ทำโดยเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเคลือบแต่ละครั้งสามารถอัตราการใช้ฟิล์มจากค่าความชันของกราฟระหว่างความหนาของฟิล์มและเวลาการเคลือบ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยเวลาในการเคลือบจะได้ความหนาต่างๆดังตารางที่ 4.1 เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับเวลาในการเคลือบพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น โดยอัตราการใช้ฟิล์มเท่ากับ 86.3 นาโนเมตรต่อนาที่ ($R^2=0.1$) จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงคุณภาพพบว่าเวลาการเคลือบส่งผลต่อสี และความหนาของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวิเคราะห์ผลในเชิงปริมาณจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 การวิเคราะห์สีและค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดซ์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

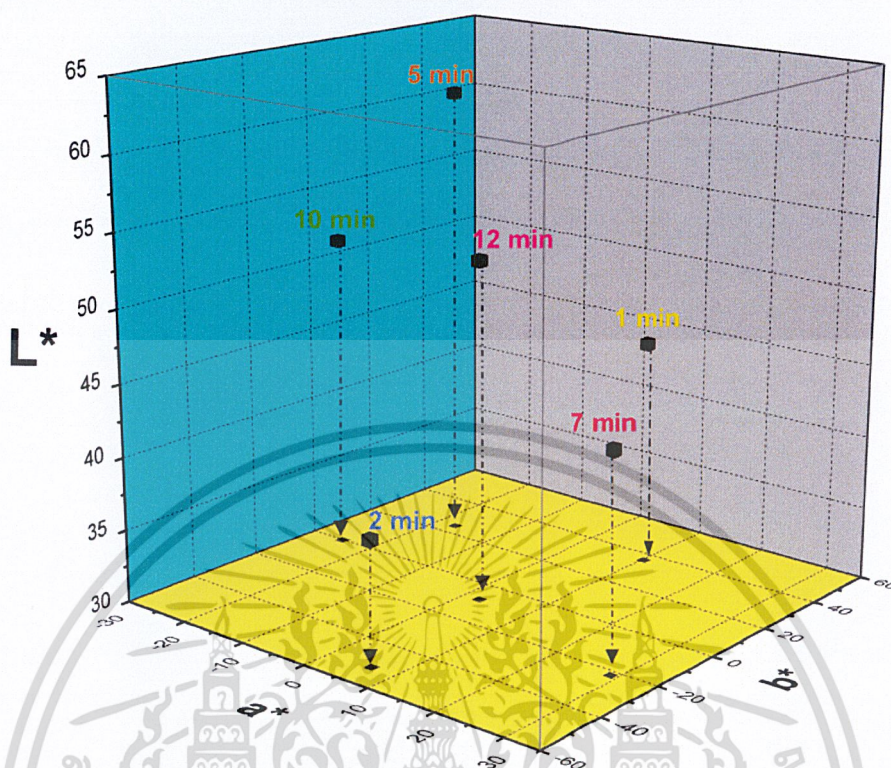
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าด้วยระบบ CIE $L^*a^*b^*$

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดซ์

Deposited Time	L^*	a^*	b^*
1 min	45.56	10.22	35.99
2 min	38.38	6.37	-51.60
5 min	61.44	-17.01	24.57
7 min	44.56	28.99	-22.09
10 min	51.74	-24.79	-0.24
12 min	53.12	2.45	-8.12

เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2 มาพลอตกราฟในรูปแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* บอกถึงความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0 -100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว แกน a^* บอกถึงค่าสีแดง (+a) จนถึงค่าสีเขียว (-a) และแกน b^* บอกถึงค่าสีเหลือง (+b) จนถึงค่าสีน้ำเงิน (-b) ค่าที่ได้ออกมาดัง

เอกสารรูปที่ 4.4 สารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

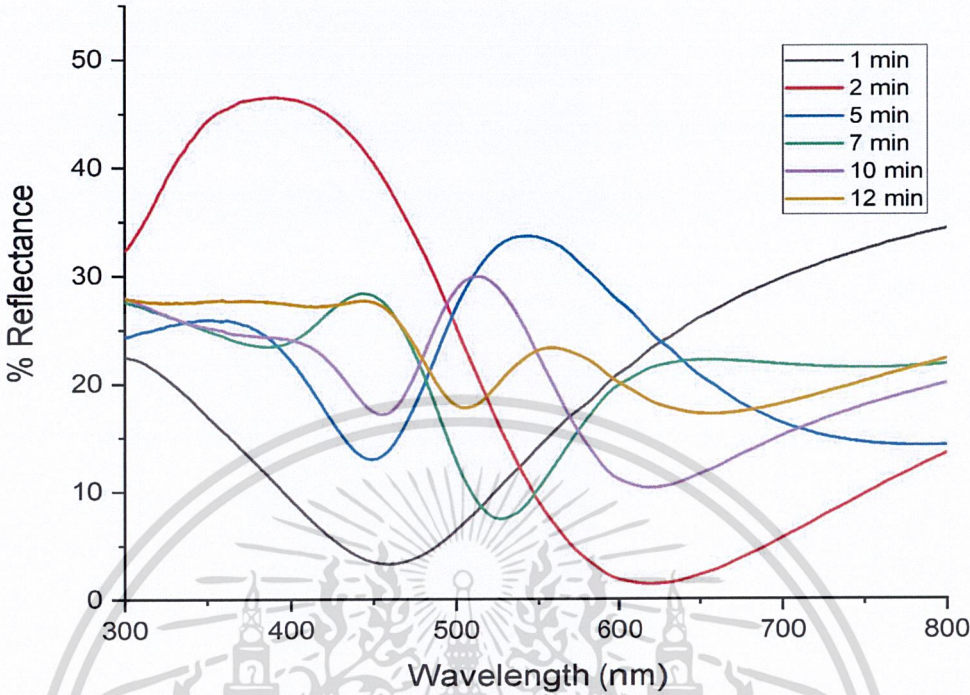


รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* ในรูปแบบ 3 มิติ

สีที่หลากหลายของฟิล์ม TiO_xN_y เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่ปกคลุมพื้นผิวมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากการเกิดสีของฟิล์มเกิดจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นฟิล์มออกไซด์ (Oxide) ทำให้เกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดระหว่างรังสีที่ตกกระทบแล้วสะท้อนออกจากชั้นออกไซด์กับรังสีที่หักเหเข้าสู่ชั้นของไซด์ไปตกกระทบที่ผิวโลหะแล้วสะท้อนออกมาเมื่อเกิดการแทรกสอดของรังสีที่หักเหเข้าสู่ชั้นออกไซด์ไป และรังสีที่สะท้อนออกมาแล้วส่งผลทำให้แสงที่เข้ามายังตามองเห็นสีนั้นๆ นอกจากนี้ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์มก็ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟิล์มเช่นเดียวกันกล่าวคือ เมื่อเวลาการเคลือบเพิ่มมากขึ้นฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการที่อะตอมตกลงมายังบนตัววัสดุรองรับมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ซึ่งปริมาณออกซิเจนถือว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มพอสมควรจากข้อมูล (P.K. Barhai. et al., 2010) ที่พบว่าถ้าปริมาณออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อสีของฟิล์ม TiO_xN_y ทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ค่าการสะท้อนแสง (%Reflectance)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงและความยาวคลื่น

ตารางที่ 4.3 ค่าการสะท้อนแสงที่เวลาการเคลือบต่างๆ

Deposited Time (minute)	Thickness (nm)	% R
1 min	135	-
2 min	205	46.54
5 min	470	33.6
7 min	680	23.38
10 min	860	29.93
12 min	1100	23.00

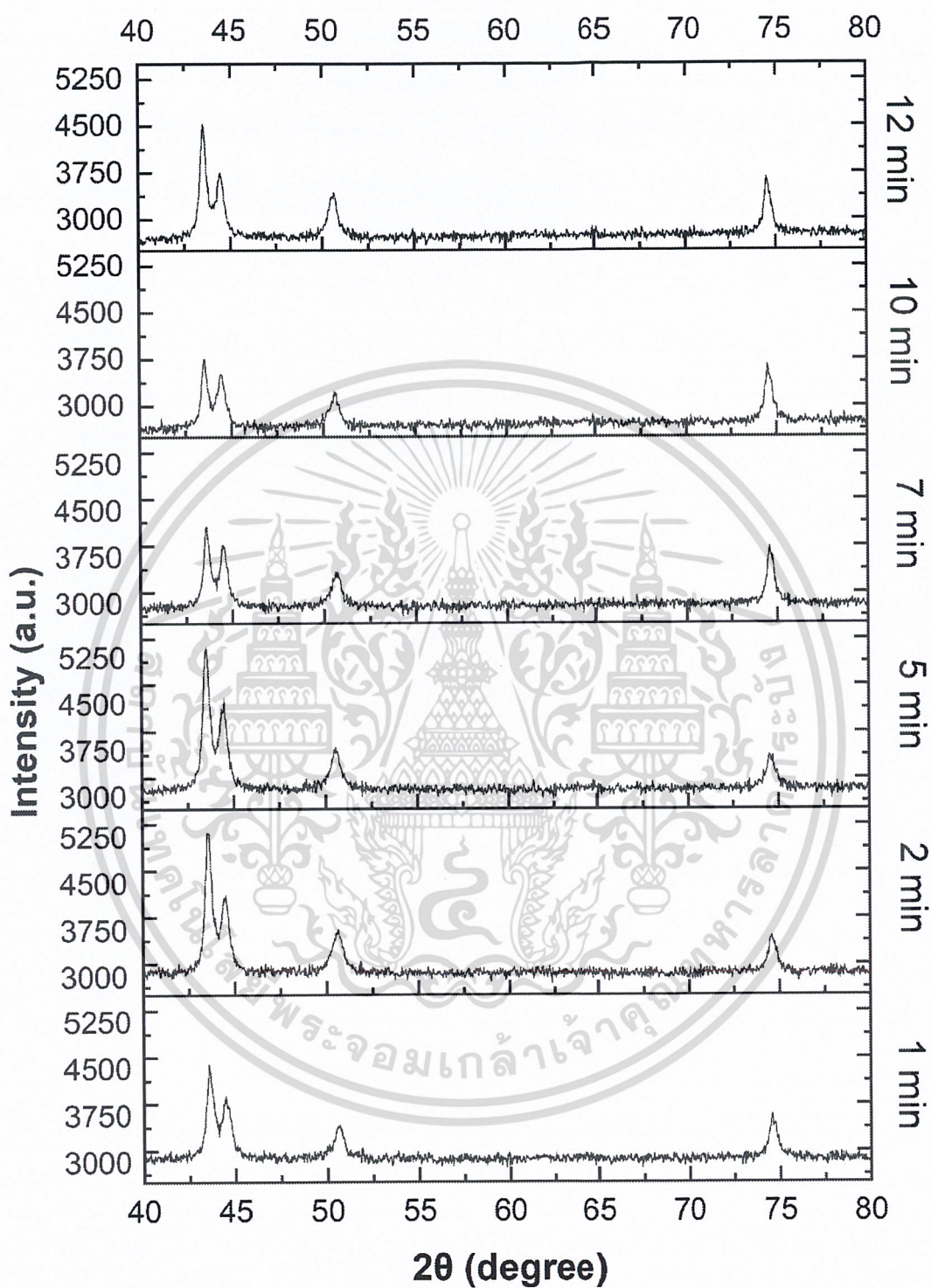
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 ลักษณะกราฟของค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดซ์ในไตรด์ มีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (Sine wave) เนื่องจากปรากฏการณ์การแทรกสอดแบบหักล้างจากการเคลื่อนที่ของฟิล์มบางตามทฤษฎีแสงคือ แสงสะท้อนที่ผิววัสดุรองรับและแสงสะท้อนที่ผิวบนสุดของฟิล์มบางจะเกิดการเปลี่ยนเฟส 180 องศาทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างของแสงทั้งสอง สำหรับค่าการสะท้อนแสงพิจารณาตลอดช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร พบว่ามีการสั่นแบบออสซิลเลตอยู่ระหว่าง 1 ถึง 47 % ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล (S.Van Gilsa. et al, 2004) ที่พบว่าไททาเนียมจะมีค่าการสะท้อนออสซิลเลตอยู่ในช่วง 5-50 % และที่เวลา 1 นาที พบว่าที่ความหนา 135 นาโนเมตร ไม่สามารถหาค่าการสะท้อนแสงได้โดยที่เวลาการเคลือบต่างๆได้ค่าดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสะท้อนแสงลดลงเนื่องจากระยะทางเดินของแสงในวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลให้ลดการสะท้อนแสงที่ออกมาจากผิวของวัสดุรองรับได้ ความหนาที่มากกว่าจะให้ค่าการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าเนื่องจากฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า ฟิล์มอาจปกคลุมทั่วทั้งผิวได้ไม่ดีเท่ากับการเคลือบฟิล์มด้วยความหนาที่มากกว่า



4.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ (TiO_xN_y) ที่เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส (Stainless 304) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ 1, 2, 5, 7, 10 และ 12 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction หรือ XRD มาวิเคราะห์หาค่าขนาดอนุภาคและความเครียดจากสมการที่ 2.6 และ 2.7 ได้ผลออกมาดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiN ที่ระนาบ (200)

Deposited Time	Thickness (nm)	Strain (%)	Crystallite size (nm)
1	135	0.54	17.39
2	205	0.50	18.66
5	470	0.53	17.56
7	680	0.52	17.98
10	860	0.50	18.66
12	1100	0.51	18.20
เฉลี่ย	-	0.52	18.07

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที ของฟิล์มบางพันธะ TiO₂ ที่ระนาบ (114)

Deposited Time	Thickness (nm)	Strain (%)	Crystallite size (nm)
1	135	0.70	13.02
2	205	0.68	13.37
5	470	0.66	13.86
7	680	0.63	14.53
10	860	0.68	13.49
12	1100	0.68	13.37
เฉลี่ย	-	0.67	13.61

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที่ ของฟิล์มบางพันธะ TiO_2 ที่ระนาบ (-305)

Deposited Time	Thickness (nm)	Strain (%)	Crystallite size (nm)
1	135	0.67	12.16
2	205	0.77	10.57
5	470	0.66	12.26
7	680	0.61	13.22
10	860	0.63	12.78
12	1100	0.62	13.11
เฉลี่ย	-	0.66	12.35

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดรด์ที่เวลาเคลือบ 1-12 นาที่ ของฟิล์มบางพันธะ TiO_2 ที่ระนาบ (413)

Deposited Time	Thickness (nm)	Strain (%)	Crystallite size (nm)
1	135	0.34	16.91
2	205	0.34	16.59
5	470	0.39	14.75
7	680	0.29	19.79
10	860	0.32	17.77
12	1100	0.29	19.79
เฉลี่ย	-	0.33	17.60

จากตารางที่ 4.4-4.7 พบว่าค่าความเครียดมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.8 % และขนาดผลึกมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม TiO_xN_y ไม่ส่งผลต่อความเครียดของฟิล์ม และในขณะเดียวกันความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มก็ไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกเช่นเดียวกัน

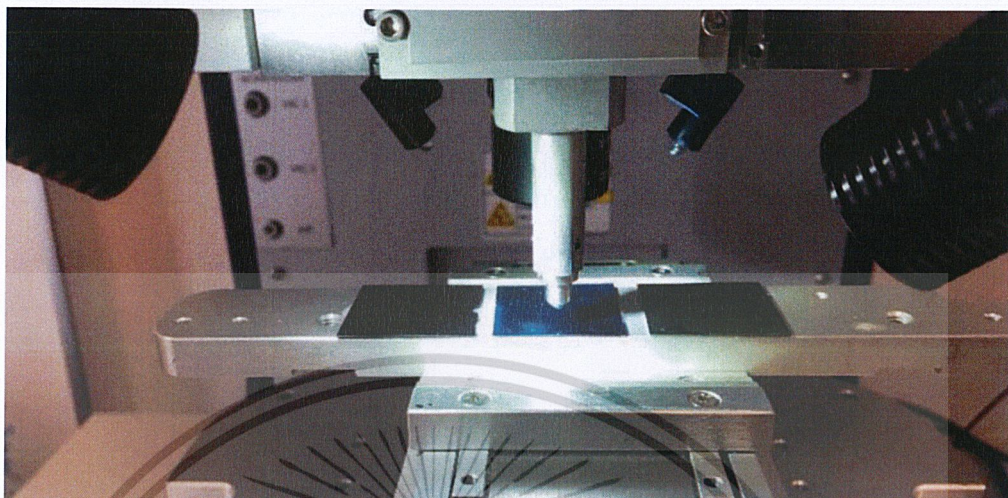
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟ XRD เป็นอัตราส่วนระหว่าง TiN / TiO₂

Deposited Time	Thickness (nm)	Ratio of TiN / TiO ₂
1	135	0.50
2	205	0.64
5	470	0.70
7	680	0.44
10	860	0.37
12	1100	0.55

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเวลาและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อค่าพื้นที่ใต้กราฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากข้อมูลพบว่าปริมาณของ TiN มีน้อยกว่า TiO₂ เนื่องจากอะตอมของไททาเนียม (Ti) ที่เมื่อโดยอาร์กอน (Ar) ชนหลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบ (Target) จะเคลื่อนที่ไปรวมกับออกซิเจน (O₂) ได้ดีกว่าไนโตรเจน (N₂) และปริมาณออกซิเจนนี้ยังส่งผลกับค่าการสะท้อนแสง นอกจากนี้ยังพบว่าที่เวลา 5 นาที ความหนา 470 นาโนเมตร โครงสร้างของฟิล์มมีการฟอร์มตัวได้ดีที่สุด

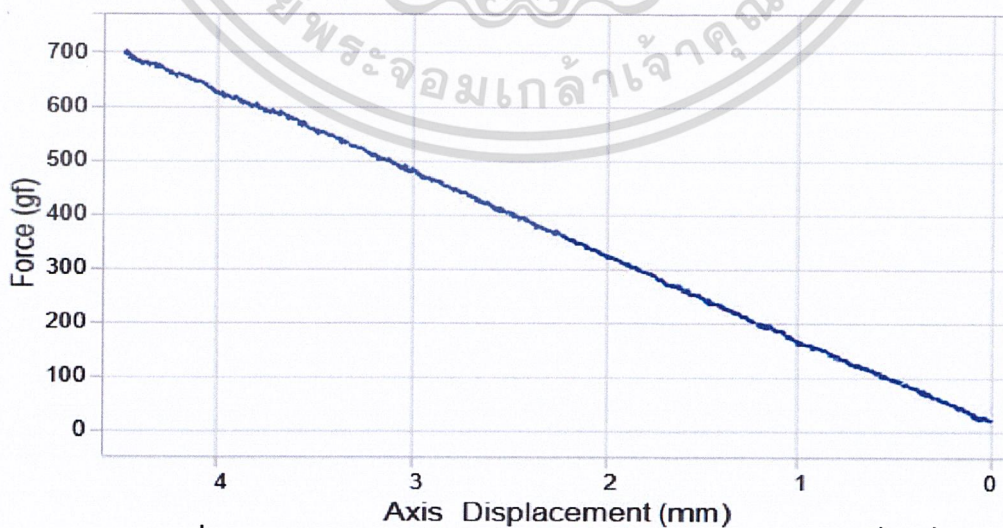
4.4 การวิเคราะห์ความต้านทานต่อรอยขีดข่วนโดยเทคนิค Scratch test



รูปที่ 4.8 แสดงขณะทำการทดสอบโดยเทคนิค Scratch test



รูปที่ 4.9 รอยขีดข่วนหลังจากทำการทดสอบโดยเทคนิค Scratch test



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและทิศทางการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นใบโฆษณาการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขการทดสอบโดยเทคนิค Scratch test

Factor	Responses
Loading Rate	8.035 gf/s
Pre-Test Speed	0.100 mm/s
Scratch Test Speed	0.200 mm/s
Test Load	700.000 gf
Scratch Distance	20.000 mm

การทดสอบโดยเทคนิค Scratch test ทำโดยการลากหัวกดเพชรไปบนพื้นผิวโดยใช้แรงกดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆดังรูปที่ 4.10 จนกว่าผิวสารเคลือบจะเกิดการแตกร้าวหรือแยกตัวออกจากวัสดุรองรับ เราสามารถมองเห็นรอยขีดข่วนจากการทำการทดสอบได้ภายใต้กล้องกำลังขยายสูง โดยในการทดสอบตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ จะถูกยึดติดอยู่บนแท่นอลูมิเนียมอย่างแน่นหนา และมีการใช้เงื่อนไขในการทดสอบดังตารางที่ 4.9 จะได้ผลออกมาดังตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.10 ค่า Frist crack initiation, L_{c1}

วัดครั้งที่	Critical scratch force or Frist crack initiation, L_{c1} (gf)		
	Substrate	Blue	Yellow
1	208.66	243.54	237.50
2	185.18	210.63	303.05
3	181.96	231.13	213.55
เฉลี่ย	191.93	228.43	251.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าที่จุดที่แรงกระทำวิกฤตทำให้เกิดรอยแตกแรกหรือ First crack initiation, L_{c1} จากผลการทดลองพบว่าตัววัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลส (Stainless304) มีแรงกระทำวิกฤตทำให้เกิดรอยแตกแรก (L_{c1}) เฉลี่ยที่ 191.93 gf ตัวชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_xN_y ที่มีสีฟ้ามีแรงกระทำวิกฤตทำให้เกิดรอยแตกแรก (L_{c1}) เฉลี่ยที่ 228.43 gf และตัวชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_xN_y ที่มีสีเหลืองมีแรงกระทำวิกฤตทำให้เกิดรอยแตกแรก (L_{c1}) เฉลี่ยที่ 251.37 gf โดยเราพบว่าเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไนไตรด์ (TiO_xN_y) ลงบนวัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลสแล้วตัวฟิล์มมีการยึดเกาะที่ดีและสามารถทนต่อรอยขีดข่วนได้เป็นอย่างดีจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อความสวยงามของสีที่หลากหลายและยืดอายุการใช้งานของเครื่องประดับให้นานมากขึ้นกว่าเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดรด์ถูกเตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง บนแผ่นรองรับที่เป็นสแตนเลส (Stainless304) โดยมีเงื่อนไขการเคลือบดังนี้ อัตราการไหล $\text{Ar} : \text{O}_2 : \text{N}_2$ เท่ากับ $28 : 1 : 12$ sccm , ระยะห่างระหว่างเป้ากับตัววัสดุรองรับ 5 เซนติเมตร , ความดันรวม 3.3×10^{-3} mbar และ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 1,2,5,7,10 และ 12 นาที่ โดยเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเคลือบซึ่งมีผลต่อความหนาและสีของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีเวลาเคลือบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และมีสีเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาและเวลาเคลือบโดยฟิล์มมีอัตราการเคลือบเท่ากับ 86.3 นาโนเมตรต่อนาที สีที่หลากหลายของฟิล์มที่ทำการเคลือบที่เวลาแตกต่างกันนั้นเนื่องมาจากฟิล์มออกไซด์ที่ปกคลุมพื้นผิวมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปดังเช่นผลการทดลองนี้ที่มีความหนาที่แตกต่างกันออกไปทำให้มีสีที่แตกต่างกัน ค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางไททาเนียมออกซิไดรด์มีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (Sine wave) โดยค่าการสะท้อนแสงพิจารณาตลอดช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร พบว่ามีการสั่นแบบออสซิลเลตแบบไททาเนียมคืออยู่ระหว่าง 1 ถึง 47 % โดยที่ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นค่าการสะท้อนแสงลดลง ความหนาที่มากกว่าจะให้ค่าการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าเนื่องจากฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า ฟิล์มอาจปกคลุมทั่วทั้งผิวได้ไม่ดีเท่ากับการเคลือบฟิล์มด้วยความหนาที่มากกว่า และปริมาณออกซิเจนภายในฟิล์มก็ส่งผลต่อค่าการสะท้อนเช่นเดียวกัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่ามีสารประกอบอยู่ 2 ชนิดคือ TiN และ TiO_2 โดยที่ TiN มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Tetragonal และ TiO_2 มีโครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic เราพบว่าฟิล์มหลังเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเคลือบมีองค์ประกอบของ TiN และ TiO_2 ซึ่งประกอบกันเป็นฟิล์ม TiO_xN_y โดยที่ปริมาณของ TiN มีน้อยกว่า TiO_2 นอกจากนี้เวลาที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลทำให้การพอร์มตัวของโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม TiO_xN_y ไม่ส่งผลต่อความเครียดและขนาดผลึกของฟิล์ม

การเคลือบฟิล์มบาง TiO_xN_y ลงบนวัสดุรองรับที่เป็นสแตนเลส (Stainless304) สามารถป้องกันรอยขีดข่วนได้และมีการยึดเกาะที่ดีจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการเคลือบเครื่องประดับในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อความสวยงามของสีที่หลากหลายและยืดอายุการใช้งานของเครื่องประดับให้นานมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปลูกฟิล์มไททาเนียมออกซิไดรต์อาจใช้อัตราการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าหรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในอัตราส่วนที่น้อยกว่าในงานวิจัยนี้ เนื่องจากอาจจะทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงทำให้สามารถที่จะควบคุมสีที่ออกมาให้ตามสีที่ต้องการได้ง่ายกว่า และในอนาคตหากสามารถคำนวณหาเงื่อนไขที่เพิ่มประสิทธิภาพการยิดเกาะได้ดีมากขึ้น อาจจะได้ฟิล์มที่นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่สามารถนำเอาฟิล์มไททาเนียมออกซิไดรต์ไปเคลือบวัสดุทางการแพทย์เช่น รากฟันเทียม เนื่องจากสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและป้องกันการกักร้อนรวมถึงมีความแข็งแรง เป็นต้น



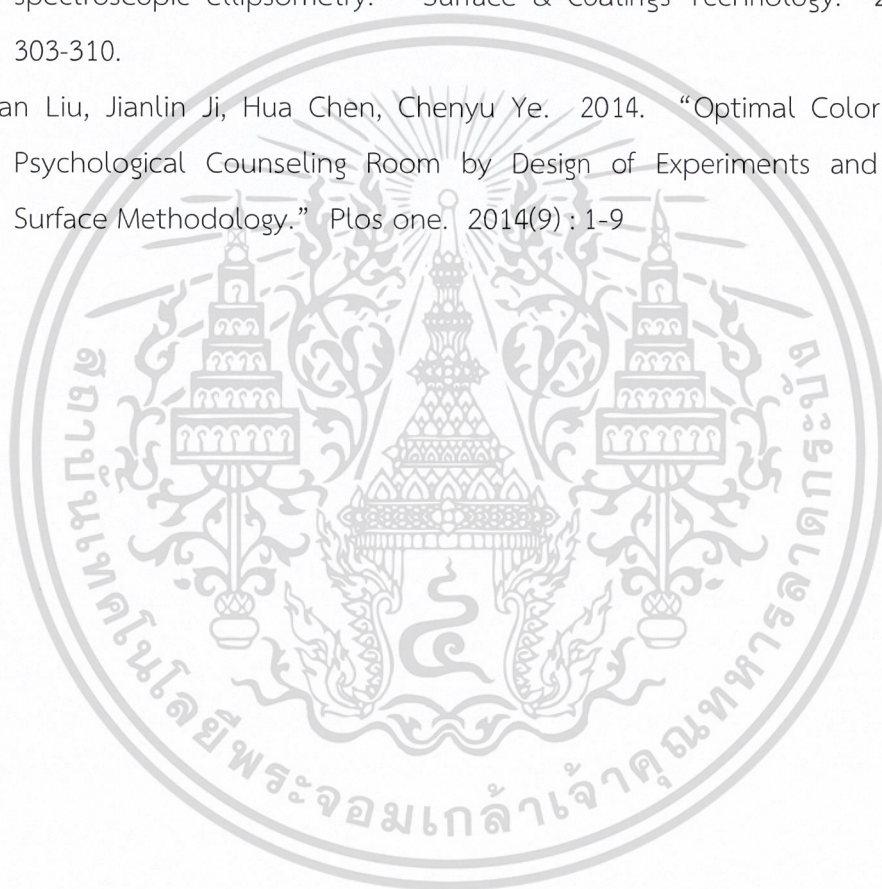
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ชัยวิทย์ ศิลาวัณานาย. 2529. “ฟิลิกส์ของดิสชาร์จไฟฟ้า.” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- พริภา ขาวสมบูรณ์. 2558. “เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD).” จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่นปีที่ 2 ฉบับที่ 4 ประจำเดือน มกราคม 2558
- ภคินัย ทองทิอัมพร. 2550. “การมองเห็นและการวัดสี.” กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 28 มิถุนายน 2550
- วรารุณี เถาลัดดา. 2553. “การออกแบบและสร้างแคโทดสำหรับระบบปลูกฟิล์มบางอาร์เอฟ แมกนีตรอนสเป็คเตอริง.” งบประมาณเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเภตส่งเสริมนักวิจัยประจำปี 2533.
- สุรสิงห์ ไชยคุณ และคณะ. 2544. “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีสเป็คเตอริงสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ.” รายงานการวิจัยประจำปี 2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Aballtechno. 2015. **หลักการการวัดสี Color Measuring.** [Online]. Available : <https://www.aballtechno.com/b/18>
- Dmitri Kopeliovich. 2012. **Metals crystal structure.** [Online]. Available : http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metals_crystal_structure
- Educational Physics Remote Laboratory. n.d. **X-ray spectrometer for the X-ray measurement.** [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/nuclearremotelaboratory/x-ray>
- HOIRE USA. 2019. **Basic Color list of Titanium colors, produced with anodic oxidation (124 Colors).** [Online]. Available : <https://www.horieusa.com/colors.htm>
- Ing. TOMÁŠ KADLÍČEK. 2015. **“Scratch Test.”** Ph.D. Micromechanics and microstructural description of materials, AKAD University.
- Mu-Hsuan Chan , Fu-Hsing Lu. 2009. “X-ray photoelectron spectroscopy analyses of titanium oxynitride films prepared by magnetron sputtering using air/Ar mixtures.” Thin Solid Films. 2009(517) : 5006–5009.
- Micro Magnetics. n.d. **Magnetron Sputtering Technology.** [Online]. Available : <http://www.directvacuum.com/sputter.asp>

P.Bindu , Sabu Thomas. 2014. “Estimation of lattice strain in ZnO nanoparticles: X-ray peakprofile analysis.” J Theor Appl Phys. 2014(8) : 123–134

- P.K. Barhai , Neelam Kumari , I. Banerjee , S.K. Pabi , S.K. Mahapatra. 2010. “Study of the effect of plasma current density on the formation of titanium nitride and titanium oxynitride thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering.” Vacuum. 2010(84) : 896–901.
- Sam Zeloof. 2017. **SEM Sample Preparation–DC Sputtering**. [Online]. Available : <http://sam.zeloof.xyz/sem-sample-preparation-dc-sputtering/>
- S. Van Gilsa, P. Mast, E. Stijns, H. Terryn. 2004. “Colour properties of barrier anodic oxide films on aluminium and titanium studied with total reflectance and spectroscopic ellipsometry.” Surface & Coatings Technology. 2004(185) : 303-310.
- Wenjuan Liu, Jianlin Ji, Hua Chen, Chenyu Ye. 2014. “Optimal Color Design of Psychological Counseling Room by Design of Experiments and Response Surface Methodology.” Plos one. 2014(9) : 1-9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้