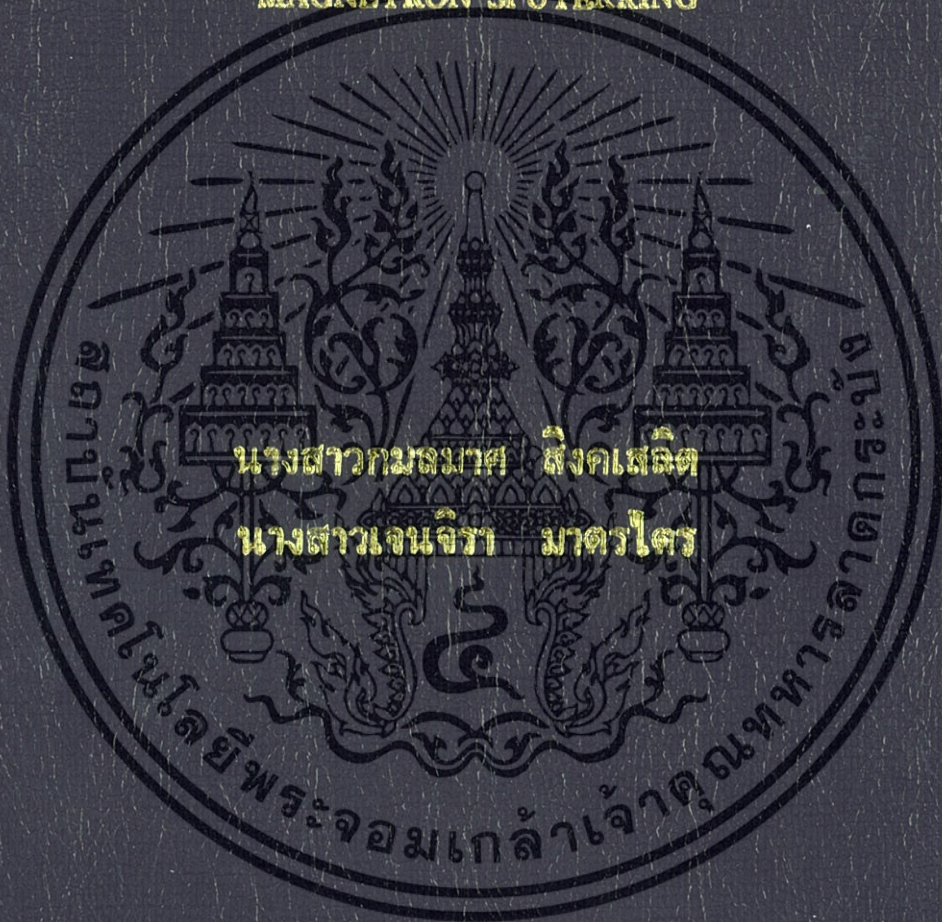


ผลของอัตราส่วนก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อสีและ
คุณสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบ
โดยวิธีสปัตเตอร์แมกนีตรอนสปีดเตอริง

THE INFLUENCE OF Ar:N RATIO ON COLOR AND CORROSION
PROPERTIES OF TIN THIN FILM DEPOSITED BY DC REACTIVE
MAGNETRON SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์

นางสาวกมลมาศ สิงคเสถิต

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

ผลของอัตราส่วนก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อสีและ
คุณสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบ
โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง

**THE INFLUENCE OF Ar:N RATIO ON COLOR AND CORROSION
PROPERTIES OF TIN THIN FILM DEPOSITED BY DC REACTIVE
MAGNETRON SPUTTERING**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE INFLUENCE OF Ar:N RATIO ON COLOR AND CORROSION
PROPERTIES OF TIN THIN FILM DEPOSITED BY DC REACTIVE
MAGNETRON SPUTTERING**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของอัตราส่วนก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อสีและคุณสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบโดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง

THE INFLUENCE OF Ar:N RATIO ON COLOR AND CORROSION PROPERTIES OF TiN THIN FILM DEPOSITED BY DC REACTIVE MAGNETRON SPUTERRING

ชื่อนักศึกษา นางสาวกมลมาศ สิงคเสถิต

นางสาวเจนจิรา มาตรฐานไตร

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ราชศักดิ์ สักคานูภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม	
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
อ.กวางปัญญา สุวรรณสุขใจ	
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ดร.ราชศักดิ์ สักคานูภาพ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของอัตราส่วนก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อสีและคุณสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบโดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตริง	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกมลมาศ	สิงคเสลิต
	นางสาวเจนจิรา	มาตรไทร
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาภาภรณ์	สกุลการะเวก
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ราชศักดิ์	ศักดิ์านภาพ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตริง (DC Reactive Magnetron Sputtering) ที่ส่งผลต่อสีฟิล์มอัตราการเคลือบ และอัตราการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อนำไปประยุกต์เคลือบบนผิวของเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงาม ฟิล์มถูกเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นซิลิคอน (Si) อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวม (Nitrogen Partial Pressure) ที่ใช้คือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางแสดงระนาบที่โดดเด่น (Preferred Orientation) คือ ระนาบ (111) และ (200) จากการศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่าเมื่ออัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะมีความเรียบมากขึ้น แต่จะส่งผลถึงอัตราการเคลือบที่ลดลง นอกจากนี้ ฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากสีทอง-เหลืองเป็นสีทอง-แดง และสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีเมื่ออัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์เคลือบเพื่อความสวยงามคือ 20%

คำสำคัญ: ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์, ดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตริง, สีและการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	The influence of Ar:N ratio on color and corrosion properties of TiN thin film deposited by DC reactive magnetron sputtering
Students	Miss KamolmadSingkaselit Miss Jenjira Marttai
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr.Aparporn Sakulkalavek
Co- Advisor	Dr. Rachsak Sakdanuphab

ABSTRACT

This special project studied the result of Ar:N ratio in the process of preparing a thin film of TiN deposited by DC reactive magnetron sputtering effect on color of film, deposition rate and the rate of corrosion in sodium chloride (NaCl) which was applied as coating for decorations. The film was coated on Si substrate. The ratio of nitrogen per total pressure (Nitrogen Partial Pressure) is 10% 20% 30% 40% and 50% respectively. The analysis by measuring their X-ray diffraction thin film showed the (111) and (200) preferred orientation. Characterization of the surface measured by atomic force microscopy found that when the ratio of nitrogen increased, surface of TiN thin film was smoother but effect on deposition rate was decreased. In addition, the color of TiN thin film changed from golden-yellow to gold – red and became more resistant to corrosion when the ratio of nitrogen increased. Therefore, the ratio of nitrogen suitable for coatings applied for decoration is 20 %

Keywords: Titanium nitride thin film, DC Reactive Magnetron Sputtering, Color and Corrosion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยเนื่องมาจากได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนโดยอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก ที่ได้ให้ความรู้และให้คำแนะนำ ช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่อย่างดีสม่ำเสมอตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.ราชศักดิ์ สักदानุภาพ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล ที่ให้โอกาสและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำงาน พร้อมทั้งอุปกรณ์และบุคลากรที่มีคุณภาพให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงการเล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำ และขอขอบคุณพี่น้องน้องๆรวมทั้งเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือผู้จัดทำมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่านที่ได้กล่าวมา และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

กมลมาศ สิงคเสลิต
เจนจิรา มาตรไตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไทเทเนียม (Titanium)	4
2.1.1 คุณสมบัติของไทเทเนียม	4
2.1.2 การใช้ประโยชน์	4
2.2 ไนโตรเจน (Nitrogen)	5
2.2.1 คุณสมบัติของไนโตรเจน	5
2.2.2 การใช้ประโยชน์	5
2.3 ไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride)	5
2.3.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์	5
2.3.2 เกี่ยวกับเครื่องประดับ	6
2.4 กระบวนการสเป็คเตอรिंगและการเคลือบฟิล์มบาง	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของสเปคโตริง	7
2.4.2 กระบวนการสเปคโตริง	7
2.4.3 อัตราการสเปคโตริง (Sputtering yield, Y)	8
2.5 ดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริง (DC Magnetron Sputtering)	10
2.6 การสเปคโตริงแบบรีแอคทีฟ (Reactive Sputtering)	12
2.7 สมการของ Drude	15
2.7.1 สมมติฐานพื้นฐาน	15
2.7.2 สิ่งที่ Drude Model จะแสดงถึง	15
2.7.3 การประยุกต์ของ Drude Model	15
2.8 ความหยาบผิว	17
2.8.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต	17
2.8.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง	17
2.9 การกัดกร่อน (Corrosion)	18
2.8.1 รูปแบบการเกิดการกัดกร่อน	19
2.8.2 การป้องกันการเกิดการกัดกร่อน	22
2.8.3 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท	22
2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การกัดกร่อน	25
2.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)	26
2.9.1 หลักการทำงานของเครื่อง AFM	26
2.9.2 วิธีการทำงานของเครื่อง AFM	26
2.9.3 การประยุกต์ใช้งาน	27
2.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray diffractometer	28

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตริง

30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นซิลิกอน	30
3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะไทเทเนียมไนไตรด์ โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง	32
3.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	33
3.3 ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction	34
3.4 ทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลต่อสีของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์	37
4.2 ผลการวัด XRD (X-ray diffraction)	38
4.3 ผลต่อความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	39
4.4 ผลต่อความเรียบของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	41
4.5 ผลต่ออัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองจากการวัดและวิเคราะห์	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินการ	3
4.1 อัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวม (Nitrogen Partial Pressure)	36
4.2 อัตราการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	40
4.3 ค่า Roughness root mean square(R_q) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	42
4.4 ค่า Polarization resistanceของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ โทเทเนียม	4
2.2 โครงสร้างแบบ rock-salt ของโทเทเนียมไนไตรด์	5
2.3 อุปกรณ์ต่างๆที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโทเทเนียมไนไตรด์	6
2.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสปีดเตอริงของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากก๊าซอาร์กอนที่มีพลังงานค่าต่างๆ	9
2.5 เส้นทางเดินของอิเล็กตรอนคาโทดเมื่อมีสนามแม่เหล็ก	11
2.6 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ขั้วคาโทดกับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟ (N_2)	13
2.8 พื้นที่ยอดแหลมและช่วงความยาวที่วัด	17
2.9 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และสนามไฟฟ้า	18
2.10 การเกิดการกัดกร่อนแบบ Uniform Attrack	19
2.11 การเกิดการกัดกร่อนที่เกิดเมื่อโลหะต่างชนิดกันต่อกัน	19
2.12 การเกิดการกัดกร่อนแบบผุกร่อนเฉพาะแห่ง	20
2.13 การเกิดแบบ Intergranular Corrosion	20
2.14 เกิดการแตกร้าวในชิ้นงาน	21
2.15 เป็นสภาพเพิ่มอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุ	21
2.16 การเสื่อมสภาพวัตถุทางกล	21
2.17 เกิดสนิมตรงกลางและบริเวณริมจะใส	22
2.18 เครื่องโพเทนชิโอสแตทอุปกรณ์การวัดและเซลล์การกัดกร่อน	24
2.18 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM	27
2.19 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer	28
2.20 หลักการของ Bragg's law	28
3.1 ตัดแผ่นซิลิกอนขนาด 3 x 3 เซนติเมตร	30
3.2 แผ่นซิลิกอนถูกแช่ในกรดซัลฟิวริกผสมกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แผ่นซิลิกอนล้างด้วยน้ำกลั่น	31
3.4 ไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1/10	31
3.5 แผ่นซิลิกอนล้างน้ำกลั่น	31
3.6 เป่าแผ่นซิลิกอน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน	32
3.7 แผ่นซิลิกอนที่ใช้เป็นฐานรองรับ	32
3.8 เครื่องสเปคโตรริง	32
3.9 เครื่องโพเทนชิโอสแตท	34
3.10 เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์	34
3.11 ซีดีฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในชุดเซลล์	35
3.12 เตรียมวัดค่า Open circuit Potential	35
4.1 สีของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน	37
4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับปริมาณของก๊าซไนโตรเจน	40
4.4 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน	41
4.5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน	42
4.6 ผลการวัดการกักกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์	43
4.7 ผลการวัดการกักกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ความต่างศักย์บวก)	44

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	สัญลักษณ์
N_2	ก๊าซไนโตรเจน
Ar	ก๊าซอาร์กอน
Al	อะลูมิเนียม
Cu	ทองแดง
Si	ซิลิกอน
TiN	ไทเทเนียมไนไตรด์
Y	อัตราการผลิตจริง
N_a	จำนวนอะตอมโดยเฉลี่ยที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ
N_i	จำนวนไอออนที่เข้าชน
τ	Mean free time
E	สนามไฟฟ้า
B	สนามแม่เหล็ก
J	ความหนาแน่นกระแส
μ_0	ค่าคงที่แม่เหล็กไฟฟ้า
ϵ_0	สภาพยอมของสุญญากาศ
N	ปริมาณของก๊าซไนโตรเจน
N_{10}	ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 10% ของความดันรวม
N_{20}	ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 20% ของความดันรวม
N_{30}	ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 30% ของความดันรวม
N_{40}	ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 40% ของความดันรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ	สัญลักษณ์
N50	ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซในโตรเจน 50% ของความดันรวม
mbar	มิลลิบาร์
K	ค่าคงที่ของการแปรผันขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง
ω_p	Plasma frequency
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ
e	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
m^*	มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน
nm	นาโนเมตร
s^{-1}	รอบต่อวินาที
μm	ไมโครเมตร
R_a	ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต
R_q	ความหยาบผิวเฉลี่ยค่าตั้งสอง
l	ความยาวของชิ้นงาน
Z	พื้นที่ได้กราฟ
d	ระยะระหว่างระนาบของผลึก
θ	มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และชิ้นงาน
λ	ความยาวคลื่น รังสีเอกซ์
H_2SO_4	กรดซัลฟิวริก
H_2O_2	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
HF	กรดไฮโดรฟลูออริก
SiO_2	ซิลิกอนไดออกไซด์
NaCl	โซเดียมคลอไรด์
OCP	Open Circuit Potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การปรับปรุงเชิงผิวของวัสดุแนวทางหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรม และนักวิจัยคือการเคลือบแข็ง (Hard coating) และการเคลือบเพื่อสวยงาม (decorative coating) การเคลือบสารที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการในลักษณะของฟิล์มบางด้วยการเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum coating) โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition process, PVD) ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีระเหยสาร (Thermal process, Arc vapor deposition) และวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) โดยวิธีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ริงนั้นอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ ไม่ทำให้วัสดุเสียรูปทรงหรือเสียความแข็งแรงเนื่องจากสามารถเคลือบที่อุณหภูมิต่ำ ไม่ทำให้ส่วนคมหรือขนาดของวัสดุผิดไป เพราะการเคลือบหนาเพียง 2-3 ไมโครเมตร การเคลือบซึ่งเตรียมในสภาวะสุญญากาศ ดังนั้นจึงให้การยึดเกาะที่ดีมากระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับ และการเคลือบโดยวิธีสปัตเตอร์ริงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะใด ๆ ต่อสิ่งแวดล้อม

ไทเทเนียมไนไตรด์ เป็นสารประกอบเซรามิกที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ มีความแข็งแรงสูง [1] จึงนิยมใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน สำหรับในอุตสาหกรรมการตัดเจาะแบบแห้งและขึ้นรูป ที่ใช้ความเร็วในการตัดสูงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มาใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย ที่สำคัญฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ยังมีสีทองที่สวยงาม [2] จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เคลือบชิ้นงานที่ต้องการหรือเน้นความสวยงาม เช่น เข็มกลัด ต่างหู นาฬิกากรอบแว่นตา เป็นต้น ทำให้ได้ชิ้นงานสีทองสวยงามที่คงทนไม่เกิดการรอยขีดข่วนได้ง่าย

Ph. Roquiny [2] เคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนที่ค่าต่างๆ ผลการทดลองที่ได้ฟิล์มบางจะมีสีเงินของไทเทเนียมเมื่อปริมาณของแก๊สไนโตรเจนต่ำๆ

และเมื่อเพิ่มปริมาณของแก๊สไนโตรเจนฟิล์มบางที่ได้มีสีเหลืองทอง และฟิล์มบางเป็นสีน้ำตาลแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณของแก๊สไนโตรเจนสูงๆ โดยใช้ทฤษฎีของ Lorentz-Drude อธิบายลักษณะสีของฟิล์มบางที่เปลี่ยนแปลง

Li-JianMeng[4] เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์โดยใช้วิธีดีซีรีแอคทีฟแมกเนตรอนสปัตเตอริงลงบนกระจกสไลด์ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ระบายของฟิล์มบางที่พบในโครงสร้างผลึกคือ (111) และความเข้มข้นจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

Duh, Doong[5] พบว่าอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนมีอิทธิพลความเป็นระนาบและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยที่อัตราการเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแก๊สไนโตรเจนลดลง ผลการวิเคราะห์ห้ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เกิดเมื่อมีอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 90/10 ถึง 70/30 และที่อัตราส่วน 95/5, 60/40 ไม่พบความเป็นระนาบและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

L.Combadiere[3] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับ ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกและลักษณะของพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยเคลือบด้วยวิธีแมกเนตรอนสปัตเตอริง พบว่าที่ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนคงที่ โครงสร้างของฟิล์มบางจะแปรตามอุณหภูมิเมื่อวิเคราะห์ด้วย XRD ฟิล์มบางมีแนวโน้มที่มีความหนาแน่นและความเป็นระนาบที่ (311), (111) และ (200) ที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงกว่า 300°C ซึ่งฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกของ TiN ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับต่ำกว่า 300°C ทำให้โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีอัตราส่วนของ N/Ti จะมากกว่า ซึ่งทำให้อะตอมของไนโตรเจนเกิดหลุดออก (desorption) จากฟิล์มบางในการเคลือบ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่ส่งผลต่อสี อัตราการเคลือบ และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกเนตรอนสปัตเตอริง (DC Reactive Magnetron Sputtering) โดยเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นซิลิกอน (Si) เพื่อนำไปประยุกต์เคลือบบนผิวของเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงามและป้องกันรอยขีดข่วน ซึ่งอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมที่ใช้คือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียมได้จะนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) วิเคราะห์ความหนาและอัตราการเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) และวิเคราะห์ความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่อสี อัตราการเคลือบ และการสึกกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เพื่อนำไปใช้เคลือบบนผิวของเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงามและป้องกันการขีดข่วน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคซีรีแอคทีฟดีแมกนีตรอนสเปคโตรริงเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นซิลิกอน
2. ศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
3. ศึกษาการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินการ

โครงการมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 8 เดือน โดยเริ่มต้นตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2556 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2557 ซึ่งมีการดำเนินการดังนี้

จากแนวทางการดำเนินการข้างต้น สามารถแสดงระยะเวลาดำเนินงาน ได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินการ

การดำเนินการ	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาและรวบรวมข้อมูล								
2.เตรียมชิ้นงาน								
3.การวัดและวิเคราะห์ชิ้นงาน								
4.สรุป								

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ได้ชิ้นงานสีทองสวยงามที่คงทนและไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย
2. นำความรู้ที่ได้จากการทำวิจัยสามารถนำไปเผยแพร่ให้แก่ผู้ที่มีความสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียม (Titanium)

2.1.1 คุณสมบัติของไทเทเนียม [6]

ไทเทเนียม เป็นโลหะที่มีสัญลักษณ์เป็น Ti มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 ถูกค้นพบในคอร์นวอลล์ (Cornwall) โดยวิลเลียม เกรเกอร์ (William Gregor) ในปี ค.ศ. 1791 และได้รับการตั้งชื่อโดย มาร์ติน ไฮน์ริช คลาพโรท (Martin Heinrich Klaproth) ไทเทเนียมมีลักษณะเป็นโลหะทรานซิชันสีเงินวาวที่มีความหนาแน่นต่ำ แข็ง และทนต่อการกัดกร่อน มีจุดเดือดจุดหลอมเหลว คือ 3560 และ 1933 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พลังงานที่ใช้ในการไอออนไนซ์คือ 657.8 กิโลจูลต่อโมล และมีค่าคงที่แลตทิซเท่ากับ 1.588 นาโนเมตร



รูปที่ 2.1 ลักษณะของไทเทเนียม

2.1.2 การใช้ประโยชน์

เนื่องจากกระบวนการสกัดโลหะไทเทเนียมมีความยุ่งยาก โลหะนี้จึงมีราคาค่อนข้างแพง มีการใช้งานที่ค่อนข้างจำเพาะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ใช้เป็นโครงสร้างในการผลิตอาวุธและอุปกรณ์ทางทหาร
2. ใช้เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์
3. ใช้เตรียมสารเคมีของไทเทเนียม

หมายเหตุ ผงของไทเทเนียมที่แห้งสามารถติดไฟและเผาไหม้ได้ในบรรยากาศของไนโตรเจน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไนโตรเจน (Nitrogen)

2.2.1 คุณสมบัติของไนโตรเจน [7]

ไนโตรเจนเป็นธาตุเคมีที่มีสัญลักษณ์เป็น N มีเลขอะตอมเท่ากับ 7 เป็นอโลหะ ค้นพบโดยแดเนียล รัทเทอร์ฟอร์ด (Daniel Rutherford) ในปี ค.ศ. 1772 ในประเทศสกอตแลนด์ (Scotland) มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวคือ 77.40 และ 63.29 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และมีค่าคงที่แลตทิซเท่ากับ 4.039 นาโนเมตร

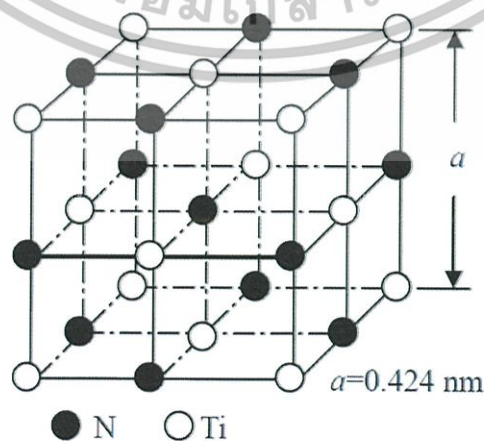
2.2.2 การใช้ประโยชน์

1. ไนโตรเจน ใช้เติมในลมยางของรถยนต์บางรุ่นได้
2. ส่วนประกอบของไนโตรเจนในแอมโมเนีย (NH_3) ใช้เป็นปุ๋ยในพืช
3. กรดไนตริก (HNO_3) ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะได้กรดกัดทองสามารถละลายทองคำได้
4. ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ใช้เป็นยาสลบในทางทันตกรรม
5. โซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ใช้บรรจุในถุงลมนิรภัย

2.3 ไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride)

2.3.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์

ไทเทเนียมไนไตรด์ สัญลักษณ์คือ TiN มีโครงสร้างเป็นแบบ Rock-salt ประกอบด้วยอะตอมของไทเทเนียม ที่มีการเรียงตัวกันแบบ Face-Centered Cubic และมีอะตอมของไนโตรเจนแทรกตัวเป็นแบบ octahedral อยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบ rock-salt ของไทเทเนียมไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไนไตรด์ คือ มีค่าคงที่แลตทิซคือ 0.424 นาโนเมตร มีจุดหลอมเหลว คือ 2900 องศาเซลเซียส ศักยภาพเชิงความร้อน คือ 336.6 กิโลจูลต่อโมล และมีค่า young's modulus คือ 450 จิกะปาสคาล

ไทเทเนียมไนไตรด์ เป็นวัสดุที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นชั้นเคลือบที่มีความแข็งสูงมาก อีกทั้งยังทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าเหล็กและสแตนเลส มีอายุการใช้งานยาวนาน จึงนิยมนำมาเคลือบบนผิวอุปกรณ์เครื่องจักรต่างๆ เช่น ดอกสว่าน และ เครื่องมือตัดเจาะอื่นๆ ทำให้เครื่องมือตัดเจาะมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อทำให้ฟิล์มมีลักษณะบางมากๆ ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะสามารถยอมให้แสงผ่านได้ และมีคุณสมบัติในสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดี นอกจากนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ยังมีสีทองใกล้เคียงกับทองคำบริสุทธิ์ซึ่งให้ความสวยงามอีกด้วย



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ต่างๆที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

หมายเหตุ ข้อเสียของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ คือสามารถเกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส

2.3.2 เกี่ยวกับเครื่องประดับ

ปัจจุบันนาฬิกามีบทบาทสำคัญมากในการบ่งบอกถึงความตรงต่อเวลาของมนุษย์ นาฬิกาแต่ละเรือนที่ลักษณะภายนอกคล้ายๆกันแต่มีราคาที่แตกต่างกันนั้น เพราะวัสดุที่นำมาใช้ในการประดิษฐ์ต่างชนิดกัน และแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ไทเทเนียมไนไตรด์เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมในอุตสาหกรรมนาฬิกา เนื่องจากวัสดุไทเทเนียมไนไตรด์มีความแข็งแรงทนทานมากกว่าสแตนเลสสตีล อีกทั้งยังสามารถป้องกันการเกิดสนิมที่เกิดจากการกัดกร่อนจากน้ำเค็มได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการสเป็คเตอริงและการเคลือบฟิล์มบาง [8]

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนวัสดุรองรับ โดยที่คุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์มขึ้นกับวิธีการเคลือบฟิล์ม การเคลือบฟิล์มบางสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางเคมี (chemical vapor deposition process) และการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition process) เช่น วิธีไอออนเพลตติง (ion plating) และวิธีสเป็คเตอริง เป็นต้น

2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของสเป็คเตอริง

สเป็คเตอริง (sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสเป็คเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากใช้กระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีดีซีแมกเนตรอนสเป็คเตอริง (DC magnetron sputtering) เป็นต้น

2.4.2 กระบวนการสเป็คเตอริง

สเป็คเตอริงเป็นผลของลำดับขั้นการชนระหว่างอะตอมของเป้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากผิวเป้าถูกชนด้วยไอออนบวก อะตอมซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากเป้าไม่มากนัก โดยประมาณไม่เกิน 10 อังสตรอม และอะตอมของผิวเป้าซึ่งถูกสเป็คเตอริงจะเป็นชั้นสุดท้ายในลำดับการชนอันตรกิริยาระหว่างผิวเป้าสารเคลือบกับไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยพลังงานต่างๆกันจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

1. ไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมของเป้าแบบยืดหยุ่นจะสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเป้า ซึ่งส่วนใหญ่รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบและสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า
2. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากเมื่อชนกับเป้าสารเคลือบอาจฝังตัวในเป้าสารเคลือบโดยที่

ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานของไอออนที่เข้าชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวไรสาหรืการเขางานเพอการศกษาเท่านั้น ไมออนุญาตเหเนาเปเซบระโยชนดานการคาไมวารณใดทงห้สน อกทงห้ามมิใหัดดแปลงเนือหา และดองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งที่มการนำไปใช้

3. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลื่อน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลื่อน เรียกกระบวนการนี้ว่า การสปัตเตอร์ริง
4. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลื่อน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลื่อน รวมทั้งมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ด้วย

ในการพิจารณาการชนระหว่างอนุภาคที่เกี่ยวข้องแต่ละคู่ที่ระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของเป้า และระหว่างอะตอมของเป้าด้วยกัน ยึดถือตามแบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่นของแบบจำลองลูกบิลเลียดซึ่งอธิบายด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน ระหว่างการชนโมเมนตัมจะถูกส่งผ่านจากอนุภาคที่เข้าชนไปยังอนุภาคที่ถูกชนในทิศของแนวลากที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองในขณะที่ยึดกัน

กลไกการถ่ายเทโมเมนตัมที่สามารถนำไปสู่การสปัตเตอร์ริง เริ่มต้นจากไอออนบวกชนเป้า แล้วถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่นิ่ง อะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะการชนแบบพลังงานต่ำจะได้รับอิมพัลส์ประกอบของโมเมนตัมในแนวขนานกับผิวเป้าเป็นส่วนใหญ่จึงเคลื่อนตัวออกในแนวเฉียงด้านข้าง และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดจากผิวเป้าได้จากการชนเพียงลำดับแรก การชนกันระหว่างไอออนบวกกับอะตอมนี้เรียกว่า การชนปฐมภูมิ (Primary knock-on) ส่วนอะตอมที่ได้รับอิมพัลส์ประกอบของโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวลึกลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไปและอาจสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกได้ หรือทำให้เกิดการชนกันอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมเป้าสารเคลื่อนจนกระทั่งทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับ ไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด

2.4.3 อัตราการสปัตเตอร์ริง (Sputtering yield, Y)

อัตราการสปัตเตอร์ริง คืออัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลื่อนต่อปริมาณ ไอออนที่เข้าชน ดังสมการ

$$y = \frac{N_a}{N_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Y คือ อัตราการสปีดเตอริง

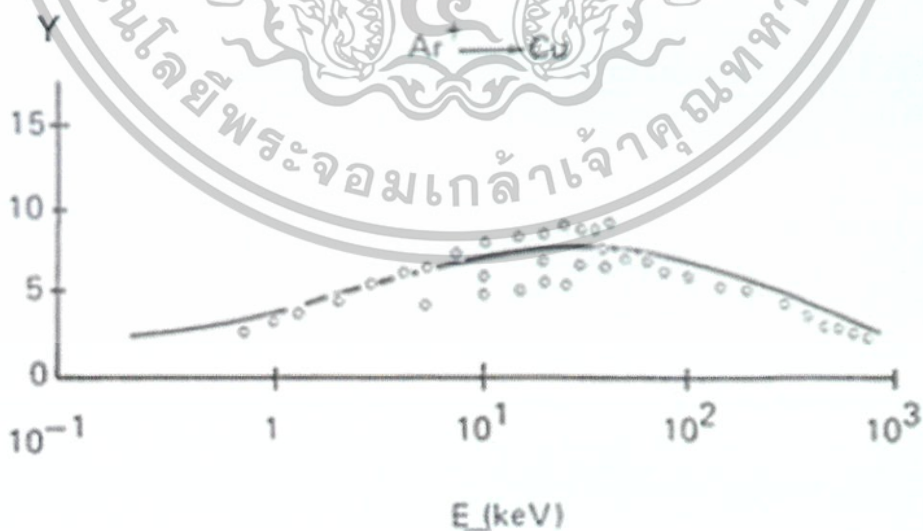
N_u คือ จำนวนอะตอมโดยเฉลี่ยที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ

N_i คือ จำนวนไอออนที่เข้าชน

อัตราการสปีดเตอริงนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆในกระบวนการสปีดเตอริง ดังนี้

2.4.3.1 ค่าพลังงานของไอออนที่เข้าชน

ในการชนระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคแบบโดยตรง จะมีฟังก์ชันการถ่ายเทพลังงาน โดยไอออนบวกที่มีสูงมากพอจนถึงระดับที่เริ่มทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องกับอะตอมสารเคลือบ และเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energies) ซึ่งปกติจะมีค่ามากกว่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิดอะตอมของสารชนิดเดียวกันออกจากผิวสารเคลือบ 1 อะตอม พลังงานขีดเริ่มนี้มีค่าต่างกันขึ้นกับชนิดของไอออนบวกและอะตอมสารเคลือบแต่ละคู่ที่ชนกัน เมื่อพลังงานของไอออนบวกมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้พลังงานขีดเริ่ม อัตราการสปีดเตอริงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แล้วเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อไอออนบวกมีพลังงานระหว่าง 0.1 ถึง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นอัตราการสปีดเตอริงจะเพิ่มขึ้นช้าลงจนคงที่ เมื่อไอออนบวกมีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อไอออนบวกมีพลังงานสูงมากกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอน อัตราการสปีดเตอริงกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไอออนที่พลังงานสูงมีแนวโน้มที่จะฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบมากขึ้น



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสปีดเตอริงของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออน

จากก๊าซอาร์กอนที่มีพลังงานค่าต่างๆ (Chapman 1980)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.2 ชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ

นอกจากนี้อัตราการสเปคโตริงเปลี่ยนแปลงตามชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ โดยเป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดียวจะมีอัตราการสเปคโตริงมากที่สุด เมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมแน่นที่สุด ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นของอะตอมต่ำ ไอออนบวกที่เข้าชนจะมีแนวโน้มที่จะวิ่งเข้าฝั่งตัวในเป้าสารเคลือบมากทำให้อัตราการสเปคโตริงมีค่าต่ำสำหรับชนิดของสารเคลือบพบว่า ทองแดง สังกะสี ดีบุก มีอัตราการสเปคโตริงใกล้เคียงกัน แต่มีค่ามากกว่า อะลูมิเนียมหรือไททานเนียมเมื่อใช้ไอออนชนิดเดียวกันและมีพลังงานเท่ากัน

2.4.3.3 ชนิดของไอออนบวก

เมื่อใช้ไอออนบวกต่างชนิดกันวิ่งเข้าชนจะมีค่าอัตราการสเปคโตริงที่แตกต่างกันออกไป แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคที่เกิดการชนจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากอะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบอัตราการสเปคโตริงจะสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ

2.4.3.4 มุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ

เมื่อทำการเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าสารเคลือบที่หลุดออกมามีการเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่า จึงทำให้อัตราการสเปคโตริงสูงขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมของการเอียงมากกว่า 45 องศา จากนั้นอัตราการสเปคโตริงจะลดลงและเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90 องศา

2.5 ดีซีแมกเนตรอนสเปคโตริง (DC Magnetron Sputtering)

ในช่วงต้นของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสเปคโตริงใช้ระบบดีซีไดโอดสเปคโตริงซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยจัดตำแหน่งของคาโทดให้อยู่ในบริเวณเนกาทีฟโกลว์ และใช้ช่วงแอมบอร์มอลโกลว์ดีสชาร์จในการเคลือบฟิล์มบาง เนื่องจากอัตราการเกิดสเปคโตริงแปรผันตรงกับอัตราสเปคโตริงและปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบในระบบดีซีไดโอดสเปคโตริงสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและความดันก๊าซ โดยค่าความดันก๊าซที่ต้องใช้ในการทำงานมีค่าที่ค่อนข้างสูง (10^{-2} - 10^{-1} mbar) ทำ

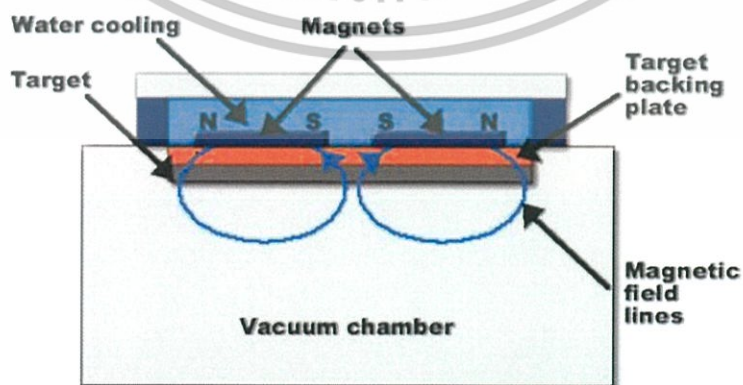
ให้ค่าระยะปลอดการชนกับอะตอมเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร เป็นผลให้อะตอมจากเป้าที่หลุดออกมานี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซในระบบมาก และค่าอิมพีแดนซ์ของพลาสมามีค่าที่สูง ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับระบบจำเป็นต้องมีค่าสูงด้วย (อยู่ในระดับกิโลโวลต์) อัตราการสปีดเตอริงในการเคลือบฟิล์มจึงมีค่าต่ำเมื่อใช้ระบบการสปีดเตอริงแบบนี้

ในการแก้ปัญหานี้จึงมีการใช้สนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้ระบบการดีสชาร์จดีขึ้น โดยสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่แบบไซเคิลอยด์ในพลาสมา ก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปถึงขั้วแอโนด ซึ่งเป็นการทำให้เพิ่มระยะเวลาเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพลาสมา ทำให้โอกาสในการที่อิเล็กตรอนจะไปชนและเกิดการไอออนไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และค่าความดันก๊าซที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่าความดันก๊าซที่ใช้ในระบบไดโอดดีสชาร์จ โดยมีค่าความดันอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-4} มิลลิบาร์



รูปที่ 2.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (Hummel and Guenther 1995)



รูปที่ 2.6 ระบบดีสชาร์จแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การสปัตเตอริงแบบรีแอคทีฟ (Reactive Sputtering)

การสปัตเตอริงแบบรีแอคทีฟ เป็นขบวนการสปัตเตอริงที่มีสารที่ใช้เคลือบอย่างน้อย 1 ชนิดใส่เข้าไปในระบบโดยจะอยู่ในรูปของก๊าซ หรือเป็นการเพิ่มก๊าซรีแอคทีฟเข้าไปในระบบอย่างน้อย 1 ชนิด เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่ใช้ในการเคลือบ ทำให้ได้ฟิล์มของสารประกอบที่มีโลหะและชนิดของก๊าซที่ป้อนเข้าไปเป็นส่วนประกอบ เช่น สารประกอบออกไซด์ของโลหะ และสารประกอบไนไตรด์ของโลหะ เป็นต้น สำหรับประโยชน์หรือข้อได้เปรียบที่ได้จากสปัตเตอริงแบบรีแอคทีฟ ได้แก่

1. สามารถเคลือบฟิล์มซึ่งเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนโดยการรีแอคทีฟเป่าโลหะ ซึ่งเป็นขบวนการที่สะดวกและง่าย
2. สามารถเคลือบฟิล์มซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มแบบสปัตเตอริงที่มีแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบกระแสตรงได้ แทนที่จะใช้แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบอาร์เอฟ (RF radio frequency)
3. สามารถควบคุมขบวนการในระหว่างการเคลือบฟิล์มได้สะดวกและง่าย ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติต่างๆตามต้องการได้

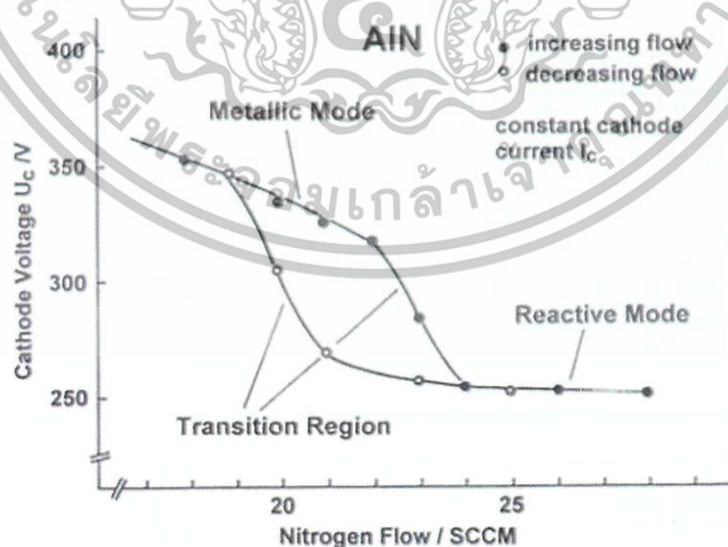
ขบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอริงนั้นมีความแตกต่างจากการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีไอระเหยแบบรีแอคทีฟตรง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของขบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอริงนั้น จะเกิดขึ้นที่เป้าของโลหะที่ใช้ในการสปัตเตอริง นอกเหนือจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่วัสดุรองรับ เป็นผลให้โลหะที่เกิดปฏิกิริยาแล้วนั้น ถูกสปัตเตอริงออกมาด้วย เมื่อการสปัตเตอริงที่มีส่วนผลสมของก๊าซรีแอคทีฟเข้ากับสปัตเตอริงก๊าซ ในขั้นตอนของการปฏิบัติงาน สิ่งหนึ่งที่ต้องควรระวังก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ กับอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟที่ให้กับระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น และขึ้นกับรูปทรงและรูปแบบของระบบที่ใช้ค่อนข้างมากรวมทั้งขึ้นกับขั้นตอนในระหว่างการปฏิบัติงานด้วย ซึ่งมาจากเหตุผลสองประการได้แก่ ประการแรก เมื่อฟิล์มในระหว่างการทำการสปัตเตอริงนั้นมีความอึดตัว หรือฟิล์มโลหะและก๊าซรีแอคทีฟทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ จะทำให้ฟิล์มนั้นประพฤติกรรมตัวคล้ายกับเป็นปั๊มที่เพิ่มเติมเข้ามาในระบบเกตเตอร์ปั๊ม (getter pump) ซึ่งจะทำให้ก๊าซรีแอคทีฟในระบบมีจำนวนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าฟิล์มนั้นยังไม่อึดตัวก็จะทำให้ก๊าซรีแอคทีฟในระบบนั้นมีจำนวนลดลง โดยอัตราเร็วในการปั๊มของเกตเตอร์ปั๊มนั้นจะขึ้นกับอัตราในการเคลือบ ส่วนประกอบของฟิล์ม โครงสร้างฟิล์ม

และอุณหภูมิของฟิล์มในระหว่างการเคลือบ ประการที่สอง ปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะที่ใช้เป็นเป้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สทวงไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้เขาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเปลี่ยนอัตราการสปีดเตอริงของเป่าโลหะนั้นๆ ในระบบดีซีไดโอดนี้ โลหะที่ใช้เป็นเป่า จะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดด้วย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผิวของโลหะที่ใช้เป็นเป่าจะมีผลต่อพลาสมา ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในระบบ

ค่าความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในระบบของการสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ ในการปฏิบัติงานจะใช้หรือบันทึกค่าความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟก่อนที่ระบบ จะมีการทำงาน ซึ่งจะทำให้ก๊าซในภาชนะสุญญากาศที่ใช้เคลือบสารอยู่ในสถานะของพลาสมาและ ทำให้ความดันมีค่าเปลี่ยนแปลงไป สำหรับความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟอาจใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศแทนได้เพราะค่าทั้งสองจะเป็นสัดส่วนกัน

ในการสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ มีความจำเป็นที่ต้องให้ความดันย่อยของ ก๊าซรีแอกทีฟมีค่ามากเพื่อเพิ่มอัตราการชนของก๊าซรีแอกทีฟกับฟิล์มของโลหะในขณะที่ก่อตัว ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาที่ผิวของสารที่ใช้เคลือบให้ได้ฟิล์มตามต้องการ แต่ขณะเดียวกันปริมาณของก๊าซรีแอกทีฟที่เพิ่มขึ้นในระบบนี้จะเข้าไปชนและทำปฏิกิริยากับ เป่าโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดด้วยนั้นก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นผิวของโลหะที่เป็นเป่า บางส่วนเปลี่ยนเป็นสารประกอบของโลหะ ซึ่งเป็นผลให้ผลลัพท์ของอัตราการสปีดเตอริงมีค่า ลดลง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป่านี้ยังสามารถใช้เป็นข้อกำหนดส่วนประกอบของฟิล์ม แบบต่างๆที่ต้องการ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ขั้วแคโทดกับค่าอัตราการไหลของ

ก๊าซรีแอกทีฟ (N_2) (Hummel and Guenther 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ที่ขั้วแคโทดเมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟ (N_2) ที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยควบคุมให้กระแสดิสรจาร์จมีค่าคงที่

เมื่ออัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟมีค่าน้อย ก๊าซรีแอคทีฟจะถูกขจัดออกจากระบบ โดยเกตเตอร์ปั๊มหรือฟิล์มของโลหะที่เกิดขึ้นนั่นเอง เป็นผลให้ปริมาณความดันย่อยของ ก๊าซรีแอคทีฟในภาชนะสุญญากาศมีค่าต่ำ ซึ่งการเคลือบฟิล์มในสภาวะที่อัตราการไหลของ ก๊าซรีแอคทีฟมีค่าต่ำนี้จะเป็นเคลือบฟิล์มในโหมดทำงานแบบโลหะ (metallic mode) และเมื่ออัตรา การไหลของก๊าซรีแอคทีฟมีค่าถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะที่วัสดุรองรับ และเป่าโลหะกับก๊าซรีแอคทีฟมีความอึดตัว ก็จะทำให้ความดันย่อยของก๊าซรีแอคทีฟในภาชนะ สุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ผลที่ตามมาคือ จะทำให้บริเวณผิวหน้าของเป่าโลหะเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทฉนวน ซึ่งจะทำให้ขบวนการสเปคเตอรึงในโหมดการทำงานแบบโลหะมีค่าลดลง และจะทำให้การ สเปคเตอรึงสารประกอบของโลหะลดลงตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป่าโลหะ ทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงจากสภาพของโลหะไปเป็นสารประกอบ ซึ่งส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ทางไฟฟ้าเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Target Poisoning

โดยปกติแล้วการเกิด Target Poisoning จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและก๊าซรีแอคทีฟที่ใช้ และขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในระหว่างเกิดการสเปคเตอรึง และการลดลงของอัตราการสเปคเตอรึงนี้ เนื่องจากพลังงานพันธะของอะตอมในสารประกอบนี้ส่วนใหญ่มีค่าสูง และเนื่องจากมวลของ ไอออนของก๊าซรีแอคทีฟเหล่านี้จะมีค่าน้อยกว่ามวลของก๊าซอาร์กอนที่ใช้เป็นสเปคเตอรึงไอออน ปกติแล้วผิวของเป่าโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิสูง จะทำให้ความต่างศักย์ ดิสรจาร์จและไอออนซึ่งเป็นส่วนประกอบของกระแสดิสรจาร์จมีค่าลดลง

แต่ในกรณีที่ใช้โลหะทอง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าคงที่เป็น เป่าโลหะ เนื่องจากไม่เกิดสารประกอบของออกไซด์เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนมีค่า เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่มีผลต่อความต่างศักย์ดิสรจาร์จและอัตราการเคลือบของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่า การลดลงของอัตราการเคลือบในกรณีใช้เป่าโลหะที่สัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าสูง จะไม่ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของขั้วแคโทดที่ใช้

การที่ผิวของขั้วแคโทดสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติจากโลหะไปเป็นฉนวนนั้นจะทำให้เกิด อนุภาคพลังงานสูงซึ่งประกอบด้วยอะตอมก๊าซรีแอคทีฟ อะตอมที่สะท้อนจากผิวเป่า รวมทั้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เป็นสารประกอบที่เกิดบริเวณผิวของเป้า ที่เคลื่อนที่ไปตกเคลือบยังวัสดุรองรับ ทำให้เราสามารถเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ก๊าซรีเอคทีฟอื่นๆ เพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยากับ โลหะที่ต้องการ ทำให้สามารถเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบได้

2.7 สมการของ Drude (Drude Model) [9]

การนำไฟฟ้าของ Drude Model ถูกเสนอในปี ค.ศ.1900 โดย Paul Drude ซึ่งอธิบายถึงคุณสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนในวัสดุ (โดยเฉพาะ โลหะ) โดยนำทฤษฎีพลังงานจลน์มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในระดับไมโครสโคปในของแข็ง

2.7.1 สมมุติฐานพื้นฐาน

- 1) ระหว่างการชนกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (สำหรับการมีอยู่ของสนามแม่เหล็กทุกตัว) ไม่สนใจอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง (กำหนดให้เป็นอิเล็กตรอนอิสระ-อย่างมีเหตุผล) ผลรวมประจุอิเล็กตรอนไม่นำมาพิจารณา
- 2) Mean free time ระหว่างการชน (τ) (ความน่าจะเป็นของการชนต่อหน่วยเวลา คือ $1/\tau$; ความน่าจะเป็นของการชนในช่วงเวลาน้อยมาก $dt = dt/\tau$) τ คือตำแหน่งหรือความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระ (สมมุติฐานที่ดี)
- 3) อิเล็กตรอนจะเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อนเมื่อชนกับแลตทิซ รูปแบบที่เกิดขึ้นหลังจากการชนที่ทิศทางใดๆกับความเร็วที่มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของบริเวณที่เกิดการชน อุณหภูมิสูงความเร็วของอิเล็กตรอนสูงด้วย

2.7.2 สิ่งที่ Drude Model จะแสดงถึง

1. ความแตกต่างระหว่างโลหะกับฉนวน
2. การส่งผ่านอิเล็กตรอนในโลหะ
3. ความนำความร้อนของโลหะ

2.7.3 การประยุกต์ของ Drude Model

1. DC Electrical conductivity of metal
2. AC Electrical conductivity of metal
3. Application to propagation of electromagnetic waves in metal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแมกเวลล์

$$\nabla \cdot E = 0; \nabla \cdot B = 0; \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \sigma E + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้า

B คือ สนามแม่เหล็ก

J คือ ความหนาแน่นกระแส

μ_0 คือ ค่าคงที่แม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic constant)

ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of free space)

จากสมการของ $E(t) = E(x)e^{i\omega t}$

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 + \frac{i\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0$$

สามารถเขียนเป็นสมการคลื่น

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\omega) E = 0$$

เมื่อ $\epsilon(\omega) = \left(1 + \frac{i\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)$ คือ ความเป็นขั้วไฟฟ้าของโลหะ

เมื่อ $\omega \tau \gg 1$ จะได้

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{i\sigma}{\omega \epsilon_0} = 1 + \frac{i}{\omega \epsilon_0} \left(\frac{i}{1 - i\omega \tau} \right) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

เมื่อ

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m^* \epsilon_0}}$$

เรียกว่า Plasma frequency

แสดงสมการคลื่นสำหรับ $E(x) = E_0 \exp(ikx)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

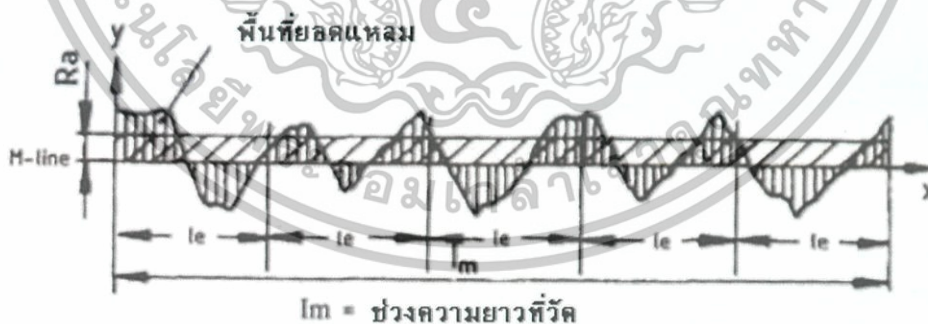
$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\omega) E = 0$$

$$K^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\omega)$$

- โดยที่ K คือ ค่าคงที่ของการแปรผันขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง
- ω_p คือ Plasma frequency
- n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ
- e คือ ความจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
- m^* คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน

2.8 ความหยาบผิว [10]

2.8.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average: R_a) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วย ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานนิยมอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (L_m) โดยที่ค่าของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2.8 พื้นที่ยอดแหลมและช่วงความยาวที่วัด

2.8.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square: R_q) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด ซึ่งค่า Roughness root mean square เป็นค่าที่แสดงถึงลักษณะพื้นผิวโดยรวม คำนวณจากส่วนที่นูนขึ้นมา (peak) และส่วนที่เป็นร่อง (valley) สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

โดยที่ R_q	คือ ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง
l	คือ ความยาวของชิ้นงาน
Z	คือ พื้นที่ใต้กราฟ

2.9 การกัดกร่อน (Corrosion) [11]

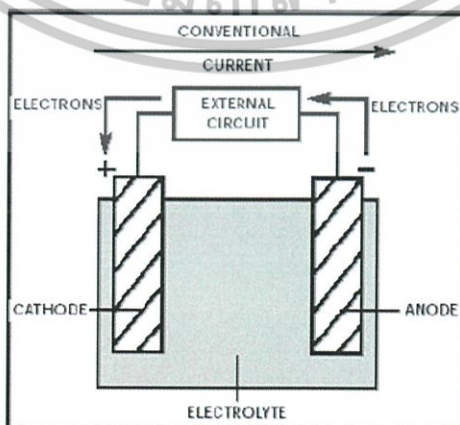
การกัดกร่อน คือ การเสื่อมสภาพหรือการสูญเสียเนื้อของวัสดุ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม องค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุ กับสภาพแวดล้อม จะอธิบายในรูปของ Electrochemistry ซึ่งต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

1. Electrodes

- แอโนด จะเป็นบริเวณที่ผุกร่อน หรือเสียเนื้อโลหะ คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นบริเวณที่กระแสเดินทางออกสู่ Electrolyte
- แคโทด เป็นบริเวณที่ไม่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction)

2. **Electrolyte** เป็นสื่อกลางของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทดไม่จำเป็นต้องเป็นของเหลว

3. **Driving Force หรือ Electric Potential** คือ แรงดันให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทด ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของเนื้อวัสดุในรูปของ โครงสร้าง ชนิดของวัสดุ และองค์ประกอบ



รูปที่ 2.9 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 รูปแบบการเกิดการกัดกร่อน

1. Uniform Attack เป็นรูปแบบที่พบบ่อยที่สุด เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี จะเกิดบนผิวหน้าของวัสดุทั้งหมดหรือบางส่วนที่สัมผัสกับ Electrolyte เป็นบริเวณกว้าง โลหะจะค่อยๆ บางลง เนื่องจากถูกกัดกร่อนและจะเสื่อมสภาพจนใช้งานไม่ได้ในที่สุด



รูปที่ 2.10 การเกิดการกัดกร่อนแบบ Uniform Attack

2. Galvanic or Two - Metal Corrosion เป็นรูปแบบการเกิดการกัดกร่อนที่เกิดเมื่อโลหะต่างชนิดกันต่อกันอยู่ หรือเชื่อมกันด้วยตัวนำไฟฟ้า และมี Electrolyte จึงเกิดความต่างศักย์ในระหว่างโลหะที่ไม่เหมือนกันนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หรือมีกระแสไหลผ่านระหว่างโลหะทั้งสองชนิดนี้ โลหะกลุ่มหนึ่งที่มีศักย์สูงกว่าจะทำหน้าที่เป็นแคโทดที่ไม่ถูกกัดกร่อน ส่วนอีกกลุ่มทำหน้าที่เป็นแอโนดจะถูกกัดกร่อน

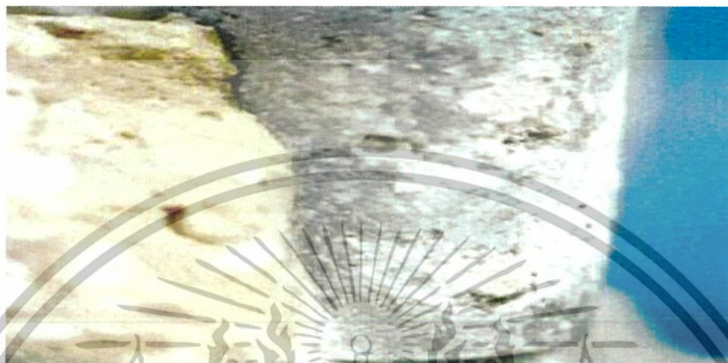


รูปที่ 2.11 การเกิดการกัดกร่อนที่เกิดเมื่อโลหะต่างชนิดกันต่อกัน

3. Crevice Corrosion (Concentration Cell Corrosion or Gasket Corrosion or Deposit Corrosion) เกิดเนื่องจากการมีการสะสมของเนื้อสารละลาย ณ ตำแหน่งหนึ่งมากกว่าอีกตำแหน่ง จึงทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Pitting Corrosion การเกิดการกัดกร่อนแบบนี้เป็นการผุกร่อนเฉพาะแห่ง ลักษณะเป็นรูในเนื้อวัสดุ โดยที่บริเวณแอโนดจะเป็นจุดลึกลงไป การผุกร่อนแบบนี้จะเกิดความเสียหายรุนแรงมาก ถึงแม้จะสูญเสียเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนัก การตรวจ สอบความเสียหายก่อนเกิดการเสียหายทำได้ยาก



รูปที่ 2.12 การเกิดการกัดกร่อนแบบผุกร่อนเฉพาะแห่ง

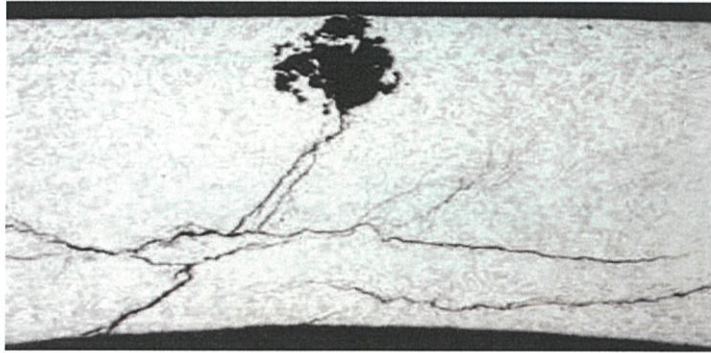
5. Intergranular Corrosion เกิดขึ้นเนื่องจาก Impurity บริเวณขอบของเกรน (Grain Boundaries) โดยที่มีสาร Alloying Element บางตัวสูงกว่าปกติ เป็นการเกิดการผุกร่อนบริเวณขอบของเกรน เนื่องจากโลหะที่ขอบเกรนมักเป็นแอโนด และโลหะภายในเกรนเป็นแคโทด



รูปที่ 2.13 การเกิดแบบ Intergranular Corrosion

6. Stress corrosion โลหะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากในชิ้นงานมี Stress และมีการสัมผัสกับ Corrosive Medium ไม่เกี่ยวกับแรงทาง Mechanic ระหว่างการเกิด Stress Corrosion จะพบว่า ผิวหน้าของโลหะหรือวัสดุไม่ถูกกัดกร่อนเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 เกิดการแตกร้าวในชิ้นงาน

7. Erosion Corrosion เป็นการเพิ่มอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ระหว่าง Corrosive Fluid กับผิววัสดุ โดยทั่วไปแล้วสถานะที่ Corrosive ทุกชนิด จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Erosion ได้



รูปที่ 2.15 เป็นสภาพเพิ่มอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุ

8. Hydrogen Damage เป็นการเสื่อมสภาพวัสดุทางกลอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจน



รูปที่ 2.16 การเสื่อมสภาพวัสดุทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Blistering ลักษณะของ Blister ที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดเป็นสนิมตรงกลาง และที่บริเวณริมๆ จะใสและเป็นแคโทด หลังจากนั้น Blister จะแตกออกซึ่งทำให้โลหะสัมผัสกับ Corrosive Condition



รูปที่ 2.17 เกิดสนิมตรงกลางและบริเวณริมจะใส

2.8.2 การป้องกันการเกิดการผุกร่อน

วิธีที่สามารถป้องกันการเกิดการผุกร่อนนั้น มีหลายวิธี เช่น เป็นการเลือกชนิดของโลหะให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน การเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมให้ Corrosive ลดลง การใช้สารยับยั้ง (Inhibitor) และการทำวัสดุที่ต้องการป้องกันให้มีหน้าที่เป็นแคโทด

การทำ Cold Galvanized สามารถทาห้บนโลหะโดยใช้แปรง ลูกกลิ้ง หรือใช้วิธีพ่นก็ได้ Zinc Metalized เป็นการนำลวดโลหะสังกะสีผ่านเปลวไฟฟืนไปบนพื้นผิวที่ต้องการจะป้องกัน การทำโดยวิธีนี้พื้นผิวต้องถูกทำให้หยาบ โดยการขัดผิวโลหะโดยใช้เม็ดทรายพ่นก่อน นิยมใช้กับตัวถังรถยนต์

Hot Dip Galvanized เป็นการจุ่มชิ้นอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันลงในอ่างซึ่งมีโลหะสังกะสีหลอมเหลว วิธีนี้ผลที่ได้จะคล้ายกับวิธี electroplating แต่ไม่สามารถควบคุมความหนาได้

Electroplating คือ การสะสมของโลหะบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ โดยต่อขั้วลบเข้ากับวัสดุที่ต้องการเคลือบ และขั้วบวกจะต่อกับตัวที่ทำหน้าที่เป็นสารเคลือบ

2.8.3 การทดสอบการกัดกร่อน [12] สามารถแบ่งตามลักษณะได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. การทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory test)
2. การจำลองสภาวะการณ์เหมือนการใช้งานจริงที่เรียกว่า Pilot plant
3. การทดสอบในระหว่างการใช้งาน (Plant or Actual service test)
4. การทดสอบภาคสนาม (Field test) ที่พบส่วนใหญ่ คือ Atmospheric exposure test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีและข้อจำกัดของการทดสอบการกัดกร่อนแต่ละประเภท มีดังนี้

1. การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ
 - 1.1 ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่ต้องการทดสอบต้องมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันกับชิ้นงานจริง แต่มีขนาดเล็กกว่า
 - 1.2 สารละลายหรือสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนควรมีส่วนผสมเหมือนกันกับสิ่งแวดล้อมจริง แต่มีปริมาณน้อยกว่า
 - 1.3 การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ มีประโยชน์ในการคัดกรอง หรือเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการดำเนินการกัดกร่อนในระบบหรือชิ้นส่วนวิศวกรรมใหม่
2. การจำลองสภาวะการกัดกร่อนเหมือนการใช้งานจริงที่เรียกว่า Pilot plant
 - 2.1 เป็นการทดลองที่ดีที่สุด เพราะได้จำลองสภาวะการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด กล่าวคือ ขนาดวัสดุ ปริมาณสาร ความเข้มข้น อุณหภูมิและทุกอย่างที่เกี่ยวข้องในระบบจะต้องมีขนาดที่เหมือน
 - 2.2 การทดสอบในระดับ Pilot plant จะใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน และจะต้องมีการจัดระเบียบการเก็บข้อมูลและตัวอย่างที่ดี เพราะจะมีข้อมูลเป็นจำนวนมาก
3. การทดสอบในระหว่างการใช้งาน และการทดสอบภาคสนาม เป็นการทดสอบที่กระทำในระหว่างการใช้งานจริง

จุดประสงค์ของการทดสอบการกัดกร่อน มีดังนี้

1. เพื่อตรวจสอบและเลือกใช้วัสดุสำหรับสิ่งแวดล้อมใหม่หรือการใช้งานเฉพาะทาง ซึ่งในบางครั้งอาจเป็นโรงงานใหม่ที่ยังไม่เคยสร้าง และไม่เคยทดลองใช้วัสดุกับสิ่งแวดล้อมนั้นมาก่อน
2. ในบางกรณี เพื่อทดสอบวัสดุใหม่ว่ามีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและประสิทธิภาพที่สูงกว่าวัสดุเก่าที่ใช้ในโรงงานนั้นหรือไม่
3. เพื่อตรวจสอบวัสดุทั้งเก่าและใหม่ในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด โดยต้องการทราบปฏิกิริยาระหว่างวัสดุและสิ่งแวดล้อม
4. เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรม
5. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชั้นเคลือบ เช่น ทดสอบคุณภาพความต้านทานการเกิดสนิมของสีกันสนิม โดย Salt spray test เป็นต้น
6. หาอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของชิ้นงาน

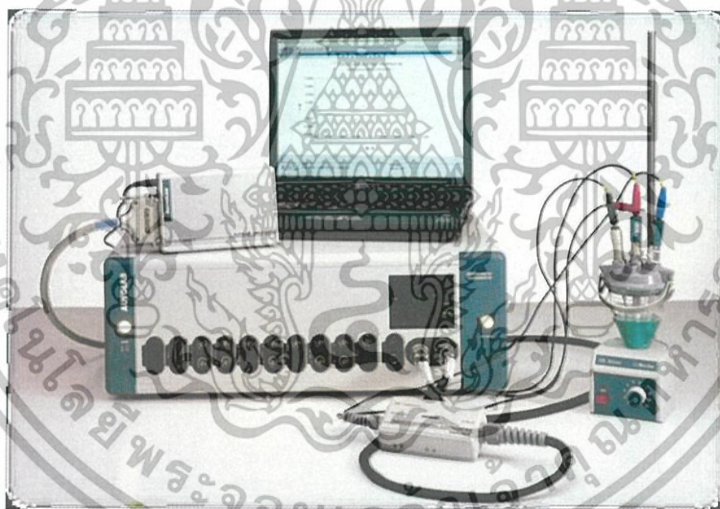
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินความเสียหายจากการกัดกร่อน

การประเมินความเสียหายจากการทดสอบการกัดกร่อน ใช้ค่าสำคัญที่ได้จากการทดสอบ (เปลี่ยนตามวิธีการทดสอบ) 2 ค่า คือ

1. น้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) เท่ากับ (น้ำหนักเริ่มต้น-น้ำหนักสุดท้าย) นำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนต่อปี (Corrosion rate)
2. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density) นำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนต่อปี (Corrosion rate)

หมายเหตุ ในการทดลองครั้งนี้ จะมุ่งเน้นที่การทดสอบด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะทดสอบด้วยเครื่อง โปเทนชิโอสแตท ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบคือ เส้นโค้งโพลาริเซชัน ค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน คือค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนต่อไป



รูปที่ 2.18 เครื่อง โปเทนชิโอสแตท อุปกรณ์การวัด และเซลล์การกัดกร่อน

หลักการทำงานของเครื่องโปเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

ประยุกต์มาจากสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) โดยการวัดค่าแรงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, emf) หรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า คือ เครื่องโปเทนชิโอสแตท ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้มี 3 ส่วนดังนี้

1. Reference electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ working electrode จะได้ศักย์ไฟฟ้าของโลหะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Counter electrode เป็นขั้วอ้างอิงเมื่อวัดเทียบกับ working electrode จะได้กระแสไฟฟ้าของโลหะนั้น

3. Working electrode เป็นโลหะที่ต้องการทดสอบ
ค่าที่วัดได้จากเครื่องโพเทนชิโอสแตท

ค่าสำคัญที่วัดได้จากเครื่องโพเทนชิโอสแตท คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density ในหน่วยแอมป์) และศักย์ไฟฟ้า (ในช่วงที่สนใจทดสอบมีหน่วยเป็น โวลต์)

2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การกัดกร่อน

Lee และ Bayer ได้ศึกษาผลของวิธีการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ต่อการต้านทานต่อการสึกกร่อน โดยมีวิธีการเตรียมฟิล์มบางอยู่ 4 วิธีคือ (1) วิธี อาร์ เอฟ ไดโอดรีแอคทีฟ สเปคโตรริง (2) วิธี ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง (3) วิธี ARE และ (4) วิธี รีแอคทีฟ ไอออน เพลทติง จากผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ไอออน เพลทติง โดยใช้ความดันย่อยของไนโตรเจน 2 mtorr อุณหภูมิขึ้นงาน 250 องศาเซลเซียส อัตราการเคลื่อน 1900 Å/min จะมีค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนดีที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธี อาร์ เอฟ ไดโอดรีแอคทีฟ สเปคโตรริง และ วิธี ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง พบว่าวิธี ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง ให้ผลที่ดีกว่าวิธี อาร์ เอฟ ไดโอดรีแอคทีฟ สเปคโตรริง [13]

W.J. Chou และคณะ ได้ศึกษาการกัดกร่อนของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนสแตนเลสสตีลชนิด 304 โดยมีความหนาของชั้นฟิล์มที่แตกต่างกัน โดยทดสอบในสารละลาย NaCl 5% และ 1 M H₂SO₄ + 0.05 M KSCN ได้พบว่า ความต้านทานการกัดกร่อนขึ้นกับความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีความหนามากสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อย และความหนาวิกฤติมีค่า 0.3 µm และ 0.7 µm สำหรับสารละลาย NaCl 5% และ 1 M H₂SO₄ + 0.05 M KSCN ตามลำดับ (ความหนาวิกฤติ คือ ความหนาที่ทำให้กระแสของการกัดกร่อนลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) น้อยกว่า 20 A/cm²) [14]

H.S. Choi และคณะ ผลิตฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เคลือบบนสแตนเลสสตีลชนิด 316L โดยใช้เทคนิค ICP-assisted reactive magnetron sputtering โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณไนโตรเจน ได้ความหนาของฟิล์มประมาณ 1 – 1.5 µm เมื่อนำมาทดสอบการกัดกร่อนโดยแช่ในสารละลาย 0.05 M H₂SO₄ + 2 ppm HF ที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่ากระแสของการกัดกร่อนมีค่าน้อยกว่า 5×10⁻⁷ A/cm² ซึ่งถือว่าต่ำมาก [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ph. Roquiny และคณะ ได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เคลือบบนกระจกและซิลิกอนโดยใช้วิธี DC reactive magnetron sputtering ผลการวิจัยพบว่าเจดตีของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจน โดยจะมีสีทองเมื่อไนโตรเจนต่ำๆ และจะเปลี่ยนเป็นสีทองแดงเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น [16]

2.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope; AFM) [17]

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope; AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนโดยเฉพาะ ซึ่งเครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้โพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็กซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้ เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ ประโยชน์ของเครื่อง AFM คือ สามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้

2.9.1 หลักการทำงานของเครื่อง AFM

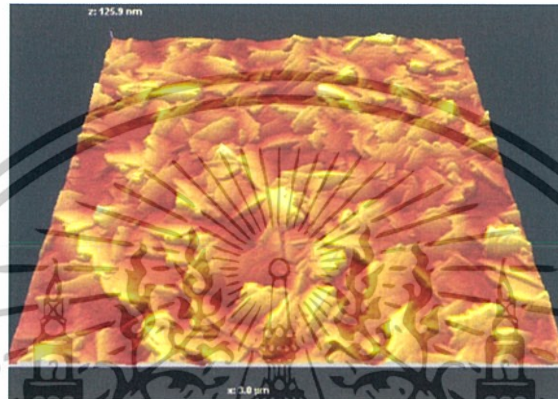
การผ่านแสงเลเซอร์ไปที่ส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์

2.9.2 วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน

1. เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น ซึ่งอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่ไม่ได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยใช้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั่นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงดันในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นมีค่าไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้



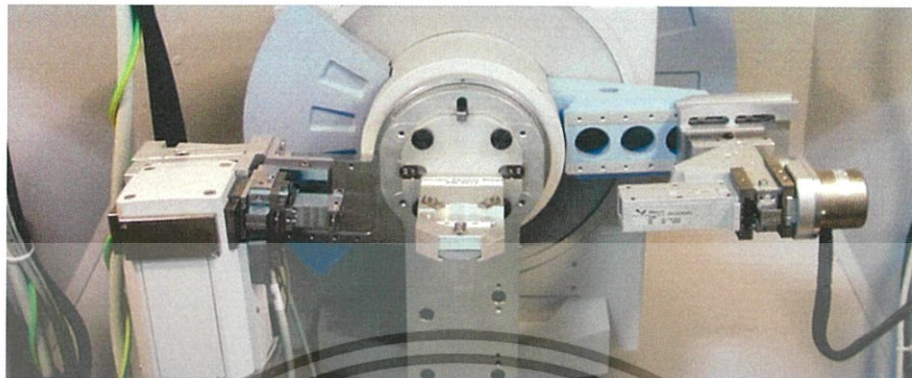
รูปที่ 2.19 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM

2.9.3 การประยุกต์ใช้งาน

1. วิเคราะห์พื้นผิวโลหะ เช่น ผิวของวัสดุพวกเหล็ก อะลูมิเนียม เพื่อดูลักษณะพื้นผิว
2. วิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง เพื่อดูความขรุขระและการกระจายตัวของสารเคลือบบนผิวของฟิล์มบาง
3. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างทางด้านชีวภาพ เช่น ลักษณะของตัวอย่างดีเอ็นเอ เมื่อมีการนำสารพวกพอลิเมอร์เข้าไปผสม หรือดูลักษณะของเซลล์แบคทีเรีย เป็นต้น
4. วิเคราะห์ความหนาของแผ่นฟิล์ม หรือวิเคราะห์ความลึกของรอยตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น วิเคราะห์ความลึกของสารเคลือบบนแว่นตา วิเคราะห์ความหนาของสารเคลือบฟิล์มในระดับนาโนเมตรของกระจกรถยนต์ เป็นต้น
5. วิเคราะห์ลักษณะของสนามแม่เหล็กบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ หรือเครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้แถบแม่เหล็กต่างๆ
6. วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ที่เคลือบเกาะบนผิวของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคไทเทเนียมนาโนบนผิวของกระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ เป็นต้น

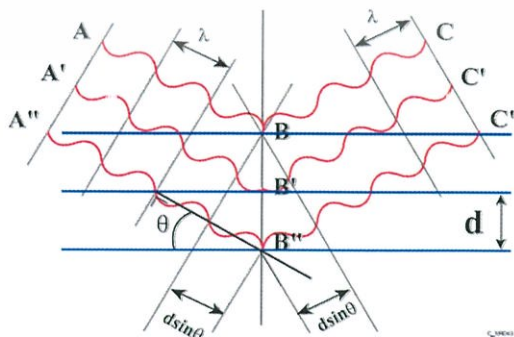
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) [18] เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลักษณะของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง สามารถทำการวิเคราะห์หาลักษณะของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย



รูปที่ 2.21 หลักการของ Bragg's law

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัย

หลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$

โดยที่ d = ระยะระหว่างระนาบของผลึก

θ = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์และชิ้นงาน

λ = ความยาวคลื่น รังสีเอกซ์

n = 1, 2, 3...

ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยังผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้เครื่องตรวจจับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบของตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

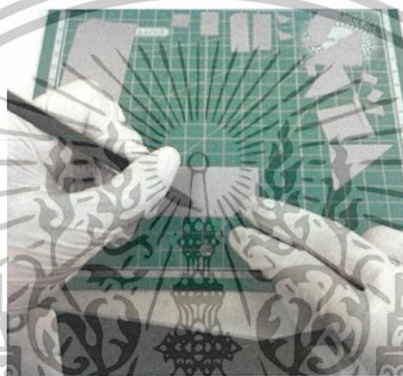
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นซิลิกอน

1. ตัดแผ่นซิลิกอน ขนาด 3 X 3 เซนติเมตร ด้วยปากกาหัวเพชร

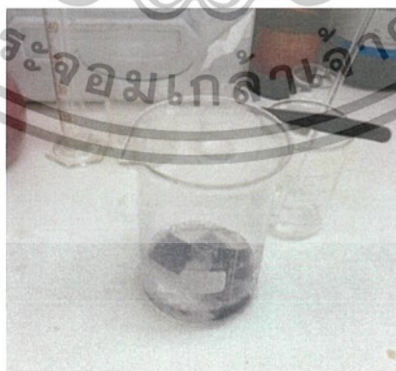


รูปที่ 3.1 ตัดแผ่นซิลิกอนขนาด 3 x 3 เซนติเมตร

2. นำแผ่นซิลิกอนที่ตัดได้มาล้างด้วยกระบวนการเคมี ตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 นำกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ผสมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในอัตราส่วน 1/4

โดยเทกรดซัลฟิวริกลงไปก่อนแล้วค่อยๆ เทไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ตามลงไป



รูปที่ 3.2 แผ่นซิลิกอนถูกแช่ในกรดซัลฟิวริกผสมกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

2.2 นำแผ่นซิลิกอนใส่ลงไป ทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนจำพวกอนินทรีย์

2.3 นำแผ่นซิลิกอนมาล้างน้ำกลั่น ซีดทำความสะอาดให้ทั่วเพื่อกำจัดสารละลายออก

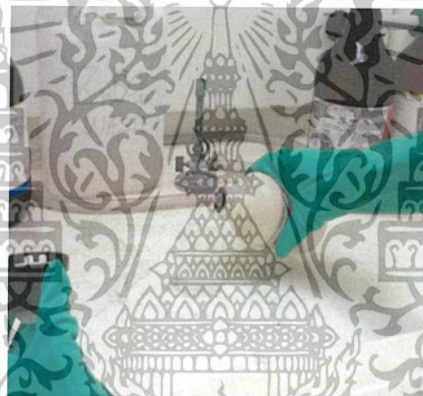
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับผูกพันหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



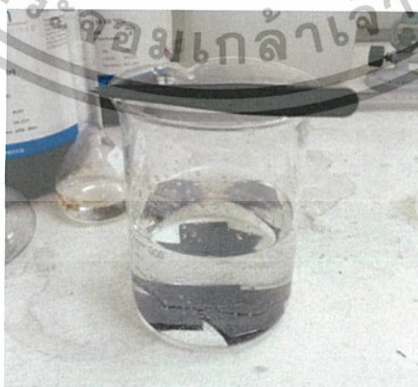
รูปที่ 3.3 แผ่นซิลิกอนล้างด้วยน้ำกลั่น

2.4 ผสมกรดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กับน้ำ (H_2O) ในอัตราส่วน 1/10 แล้วแช่ไว้ 1 นาที เพื่อกำจัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ผิวของแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 3.4 ไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1/10

2.5 นำแผ่นซิลิกอนไปล้างน้ำกลั่นอีกครั้ง เพื่อกำจัดสารละลายกรดออก



รูปที่ 3.5 แผ่นซิลิกอนล้างน้ำกลั่น

3. นำแผ่นซิลิกอนไปเผาให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เป่าแผ่นซิลิกอน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน

4. บรรจุแผ่นซิลิกอนลงในกล่อง จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้นก่อนที่จะนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำในเทเนียมไนไตรด์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นซิลิกอน โดยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงต่อไป

รูปที่ 3.7 แผ่นซิลิกอนที่ใช้เป็นฐานรองรับ

3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง



รูปที่ 3.8 เครื่องสปีดเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบสเปคโตรริง เป็นไปตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทำให้ระบบเป็นสภาวะสุญญากาศ โดยการปั๊มอากาศออกจากระบบจนได้ที่ความดันประมาณ 6×10^{-6} มิลลิบาร์
2. Flush ด้วยก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 4.0×10^{-3} มิลลิบาร์ เป็นเวลา 20 นาที
3. สเปคโตรริงทำความสะอาดผิวของเป้าสารเคลือบเพื่อกำจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนเป้า (TiO_2) โดยจ่ายกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
4. ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับโดยมี Halogen Lamp Heater อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 45 นาที เพื่อให้ฟิล์มมีสภาพยึดติดที่ดีขึ้น
5. สเปคโตรริงชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมที่กำลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อเป็นชั้นกันชนและเพิ่มสภาพยึดติดของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์
6. สเปคโตรริงที่กำลัง 300 วัตต์ ใช้อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจน คือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% เป็นเวลา 60 นาที ตามลำดับ
7. รอให้ภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิ เย็นตัวลงประมาณ 60 นาที แล้วจึงนำตัวอย่างออกมา เพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

3.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ใน Mode Non Contact บนพื้นที่ขนาด 10×10 ตารางไมโครเมตร (μm^2)

หลักการการทำงานของเครื่อง AFM

การผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์

3.3 ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction

นำตัวอย่างไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction ซึ่งใช้รังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ ความยาวคลื่น $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$ ที่ตำแหน่ง 2θ ตั้งแต่ 35 ถึง 60 องศา ใช้หือ Bruker รุ่น D8-Discover

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่างจะใช้ เครื่องตรวจรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ

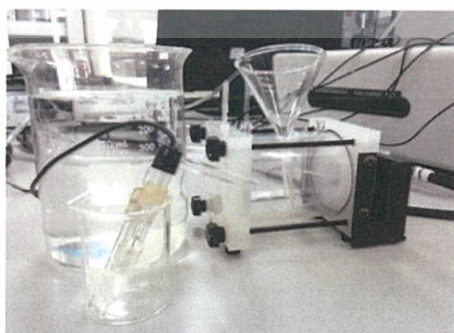
3.4 ทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

3.4.1 วัดการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท



รูปที่ 3.9 เครื่องโพเทนชิโอสแตท

1. นำแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ตัดให้ได้ขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.1% โดยมวล โดยใช้เกลือ 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 499.5 มิลลิลิตร จะได้สารละลายปริมาตร 500 กรัม



รูปที่ 3.10 เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้งทำการทดสอบในชุดเซลล์การกักกร่อน



รูปที่ 3.11 ยึดฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในชุดเซลล์

4. เมื่อติดตั้งในชุดเซลล์ เติมสารละลายเกลือที่เตรียมไว้ลงในชุดเซลล์ ทำการวัดค่า Open Circuit Potential (OCP) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์



รูปที่ 3.12 เตรียมวัดค่า Open circuit Potential

5. ป้อนศักย์ไฟฟ้า โดยเลือกช่วง -750 ถึง 500 มิลลิโวลต์ โดยใช้อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าคือ 0.003 โวลต์ต่อวินาที
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีดีซีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเคลือบฟิล์มบาง วิเคราะห์ความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด สมบัติเชิงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ความเรียบของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และวิเคราะห์การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีเชิงเคมีไฟฟ้า โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวม (Nitrogen Partial Pressure)

ตัวอย่าง	ความดันรวม (mbar)	ความดันของก๊าซไนโตรเจน (mbar)
N10	4.0×10^{-3}	4.2×10^{-4}
N20	4.0×10^{-3}	8.0×10^{-4}
N30	4.0×10^{-3}	1.2×10^{-3}
N40	4.0×10^{-3}	1.6×10^{-3}
N50	4.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมเท่ากับ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์ N แทนปริมาณของก๊าซไนโตรเจน โดยที่

N10 คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 10% ของความดันรวม

N20 คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 20% ของความดันรวม

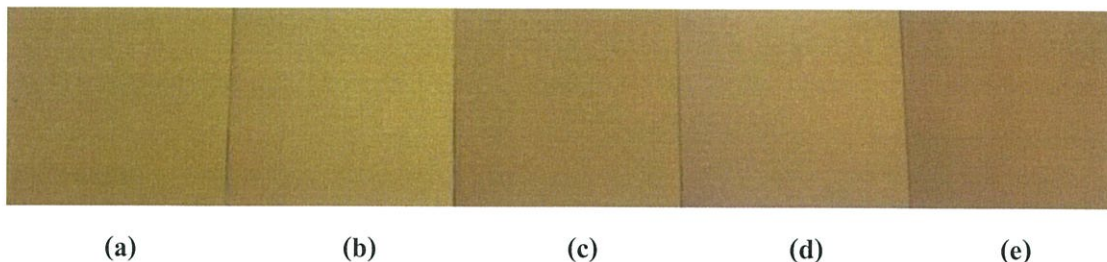
N30 คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 30% ของความดันรวม

N40 คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 40% ของความดันรวม

N50 คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจน 50% ของความดันรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลต่อสีของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์



รูปที่ 4.1 สีของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน

(a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% และ (e) 50 %

จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่ปริมาณก๊าซไนโตรเจนต่ำ ฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลือง (N10) และเมื่อเพิ่มปริมาณของก๊าซไนโตรเจน ฟิล์มที่ได้จะมีสีค่อยๆเปลี่ยนไปจนกระทั่งกลายเป็นสีทองแดง (N50) การเปลี่ยนแปลงของสีของไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณของไนโตรเจนเปลี่ยน สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีของ Drude ดังนี้คือ

จากทฤษฎีของ Drude พบว่า Plasma Frequency (ω_p) มีค่าเป็น

$$\omega_p = \frac{\sqrt{ne^2}}{\sqrt{m^* \epsilon_0}} \quad (1)$$

- โดยที่ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ
- e คือ ความจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
- m^* คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน
- ϵ_0 คือ Permittivity of free space

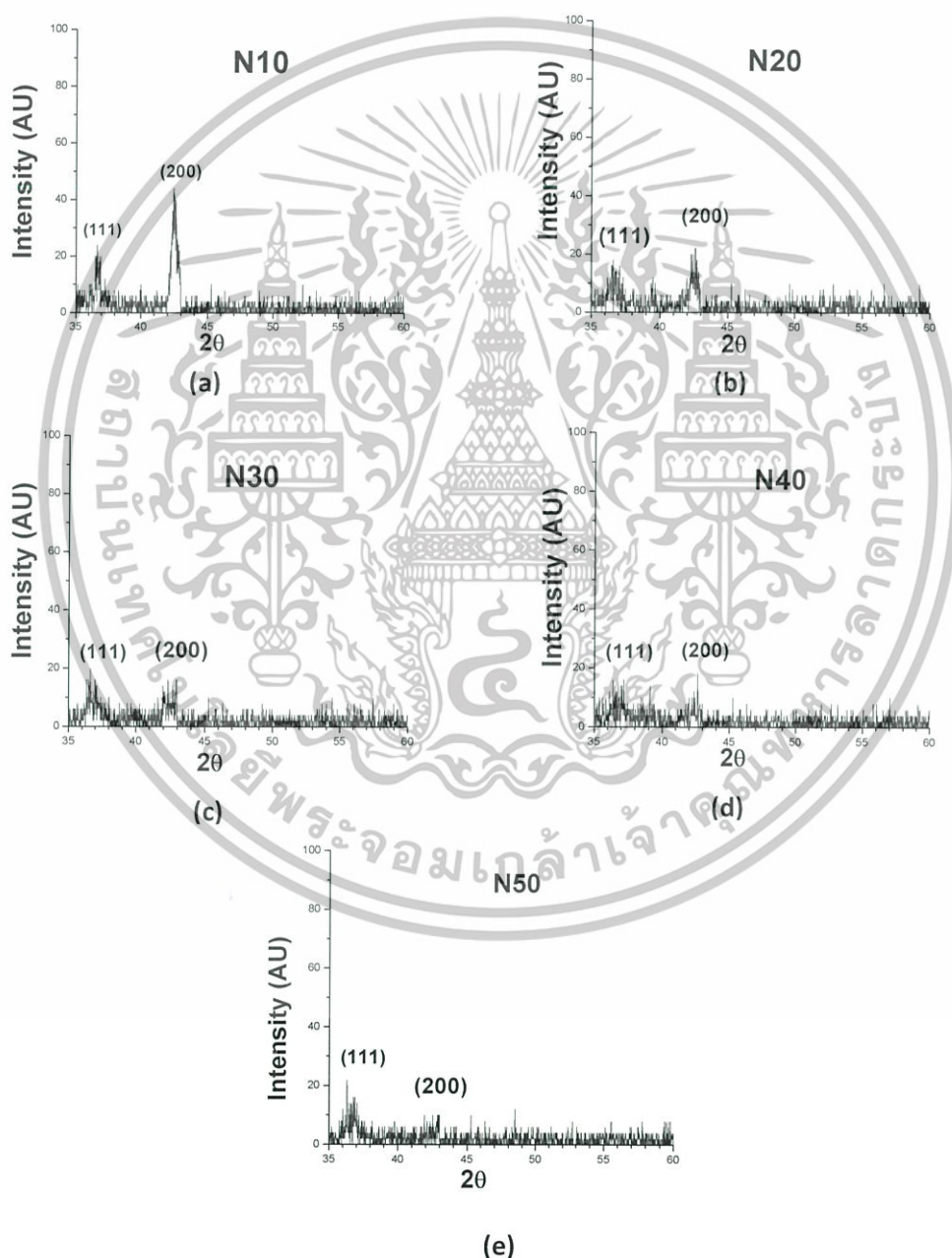
จากสมการ (1) จะเห็นได้ว่า Plasma Frequency (ω_p) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ (n) ดังนั้นเมื่อปริมาณของก๊าซไนโตรเจนในระบบสเปคโตริงเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณอะตอมของโลหะไทเทเนียมมีจำนวนลดลง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะก็ลดลงด้วย ซึ่ง Plasma Frequency ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนน้อย ($\omega_p = 3.58 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$) จะใกล้เคียงกับความถี่ของแสงสีเหลือง ($\omega_{\text{สีเหลือง}}$ ที่ความยาวคลื่น 525 nm เท่ากับ $3.59 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$) จึงทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีสีทองออกเหลือง และเมื่อเพิ่มปริมาณของ

ก๊าซไนโตรเจนในระบบสเปคโตริง ค่า Plasma frequency ($\omega_p = 2.689 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$) จะใกล้เคียงกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของแสงสีแดง ($\omega_{\text{สีแดง}}$) ที่ความยาวคลื่น 700 nm เท่ากับ $2.693 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ จึงทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีสีทองออกแดง

4.2 ผลการวัด XRD (X-ray diffraction)

นำตัวอย่างไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction โดยเริ่มวัดจากมุม 35- 60 องศา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน

(a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% และ (e) 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางนั้นจะมีความเข้มของระนาบ คือระนาบ (111), (200) และ (220) ตรงกับมุม 2θ เท่ากับ 36.6° , 42.59° และ 61.86° ตามลำดับ (เทียบจากข้อมูล PDF381420) จากรูปอัตราส่วนของก๊าชไนโตรเจน 10% (N10) จะเห็นว่าระนาบ (200) จะมีความเข้มมากกว่าระนาบ (111) อัตราส่วนของก๊าชไนโตรเจน 20% (N20) ความเข้มของระนาบ (200) จะลดลง อัตราส่วนของก๊าชไนโตรเจน 30% (N30) และ 40% (N40) เมื่อเทียบกันแล้วความเข้มของระนาบ (111) และระนาบ (200) มีความใกล้เคียงกัน สุดท้ายแล้วที่อัตราส่วนของก๊าชไนโตรเจน 50% (N50) ความเข้มของระนาบ (111) จะโดดเด่นมากกว่าระนาบ (200) สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณของไนโตรเจนในระบบสเปคโตริงน้อย (N10 และ N20) ระนาบ (200) จะมีความเข้มสูงกว่าระนาบ (111) แต่เมื่อปริมาณของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (N30, N40 และ N50) ระนาบ (111) จะมีความเข้มสูงกว่าระนาบ (200)

4.3 ผลต่อความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

นำฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์วิเคราะห์ความหนาและกำหนดหาอัตราการเคลือบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.2 พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีความหนาเท่ากับ 1.238, 0.967, 0.750, 0.516 และ 0.490 ไมโครเมตร สำหรับฟิล์ม N10, N20, N30, N40 และ N50 ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำหนดหาอัตราการเคลือบ (Deposition rate) ได้จาก

$$\text{Deposition rate} = \frac{X}{t} \text{ (}\mu\text{m/นาท)} \quad \text{----- (2)}$$

โดยที่ X คือ ความหนาของฟิล์ม (μm)

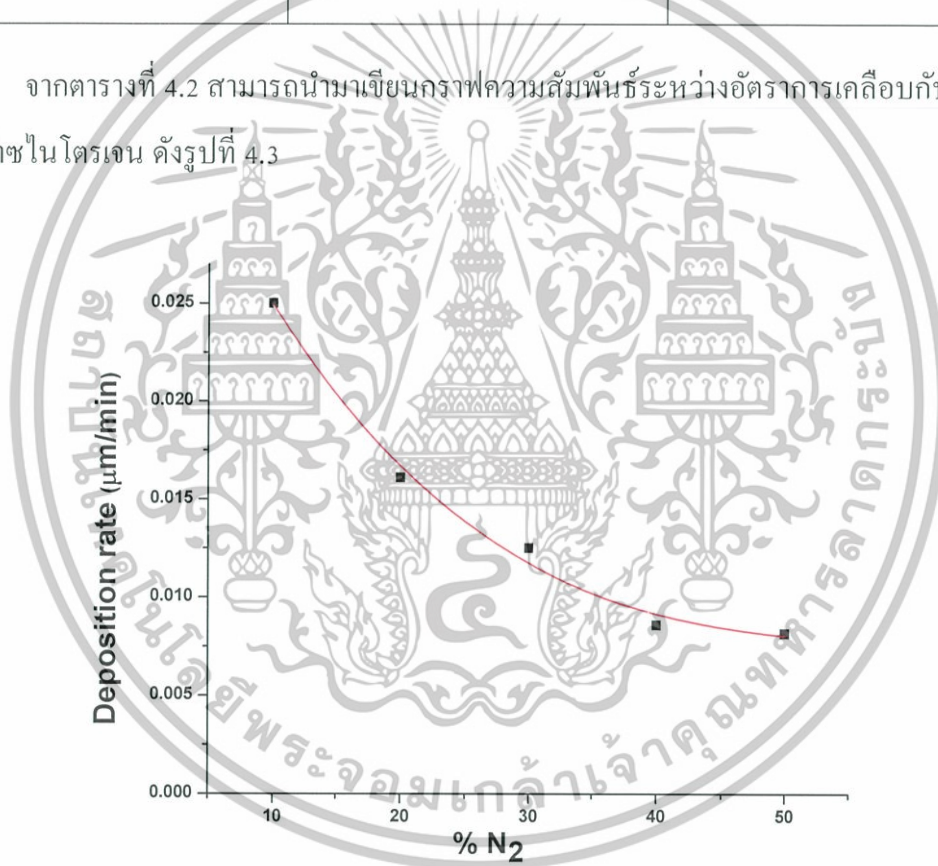
t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (ในที่นี้คือ 60 นาที)

จากผลของสมการ (2) พบว่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งเคลือบโดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตริงที่อัตราส่วนความดันของก๊าชไนโตรเจนคือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ตัวอย่าง	ความหนา (μm)	อัตราการเคลือบ ($\mu\text{m}/\text{นาที}$)
N10	1.238	0.021
N20	0.967	0.016
N30	0.750	0.013
N40	0.516	8.6×10^{-3}
N50	0.490	8.2×10^{-3}

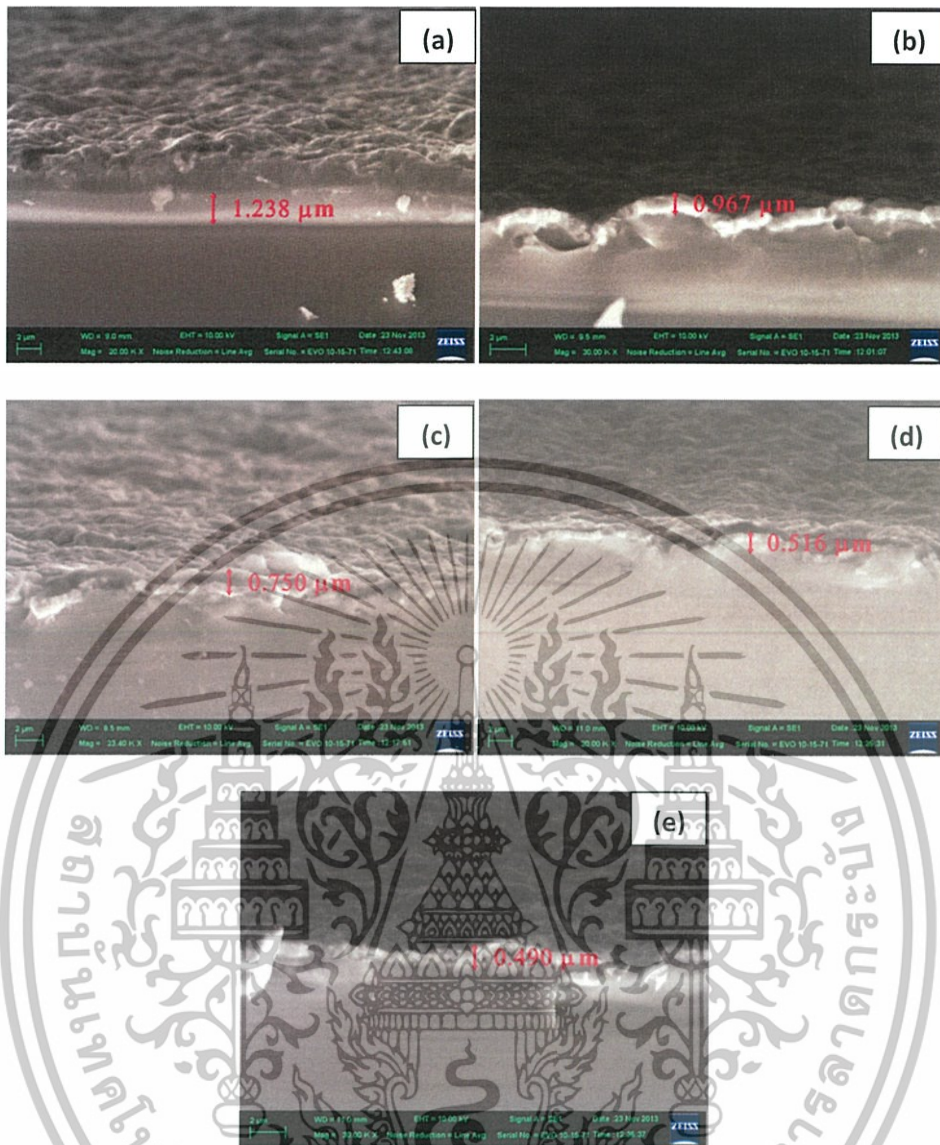
จากตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับปริมาณของก๊าซไนโตรเจน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับปริมาณของก๊าซไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการสเปคโตรริงเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มบางจะลดลง ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อปริมาณของก๊าซไนโตรเจนมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของก๊าซอาร์กอนลดลง ทำให้ไอออนของก๊าซอาร์กอนที่เข้าไปชนกับเป้าโลหะไทเทเนียมมีจำนวนน้อยลง และอะตอมของโลหะไทเทเนียมที่รวมตัวกับก๊าซไนโตรเจนในระบบสเปคโตรริงจะน้อยลงไปด้วย ซึ่งทำให้ฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้บางลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% และ (e) 50 %

4.4 ผลต่อความเรียบของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

การวัดพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ใน Mode Non Contact บนพื้นที่ขนาด 10×10 ตารางไมโครเมตร (μm^2) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5

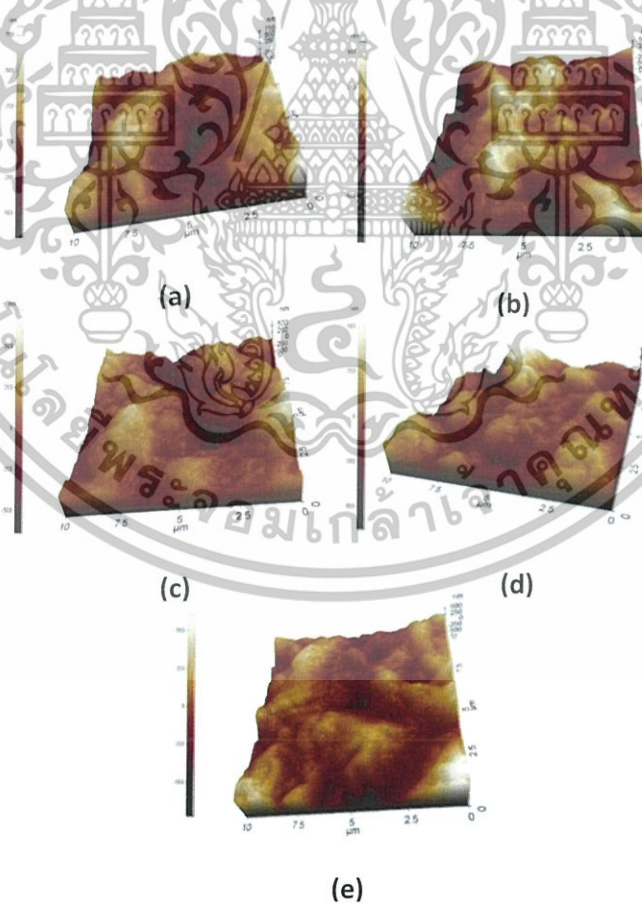
เมื่ออัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะมีลักษณะที่เรียบขึ้น สังเกตได้จากค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square) ที่มีค่าลดลง (แสดงในตารางที่ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_q) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ตัวอย่าง	R_q (nm)
N10	239.938
N20	222.101
N30	198.605
N40	172.724
N50	171.188

ซึ่งอธิบายได้โดย เมื่อก๊าซไนโตรเจนในระบบสเปคโตรริงมากขึ้น จำนวนอะตอมของก๊าซอาร์กอนที่ชนกับเป้าโลหะไทเทเนียมจะมีจำนวนลดลง ส่งผลให้อะตอมของไทเทเนียมมีเวลามากพอที่จะแพร่ไปตามผิวของแผ่นรองรับฟิล์มบางจึงมีความเรียบมากขึ้น

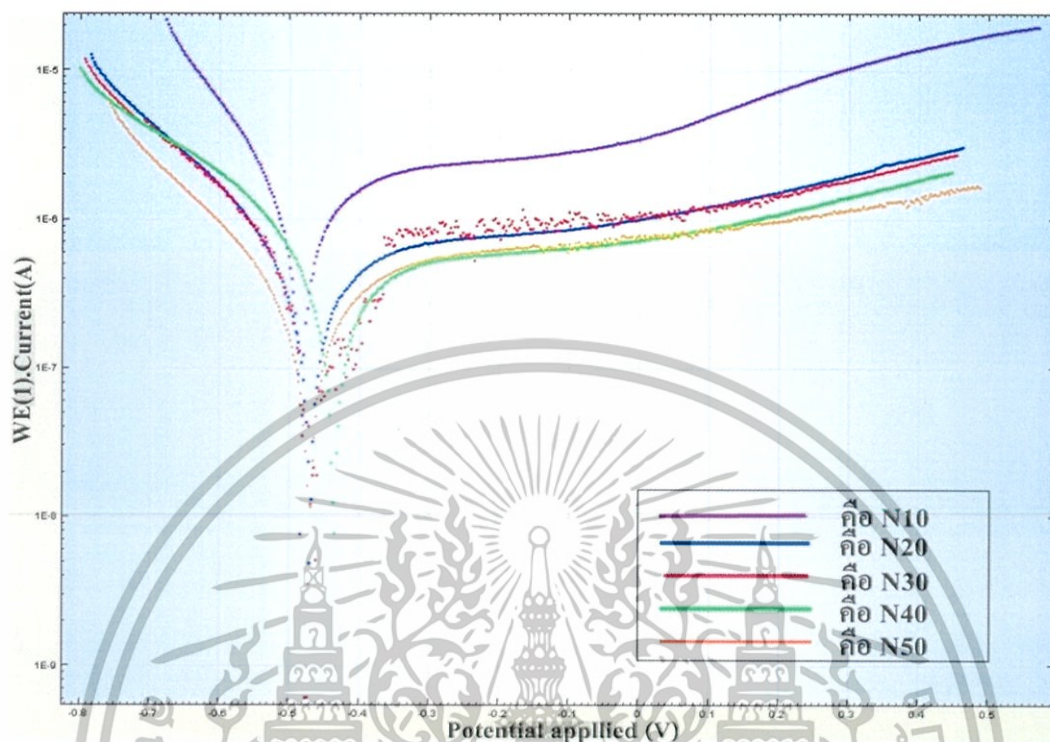


รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณไนโตรเจน

(a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% และ (e) 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

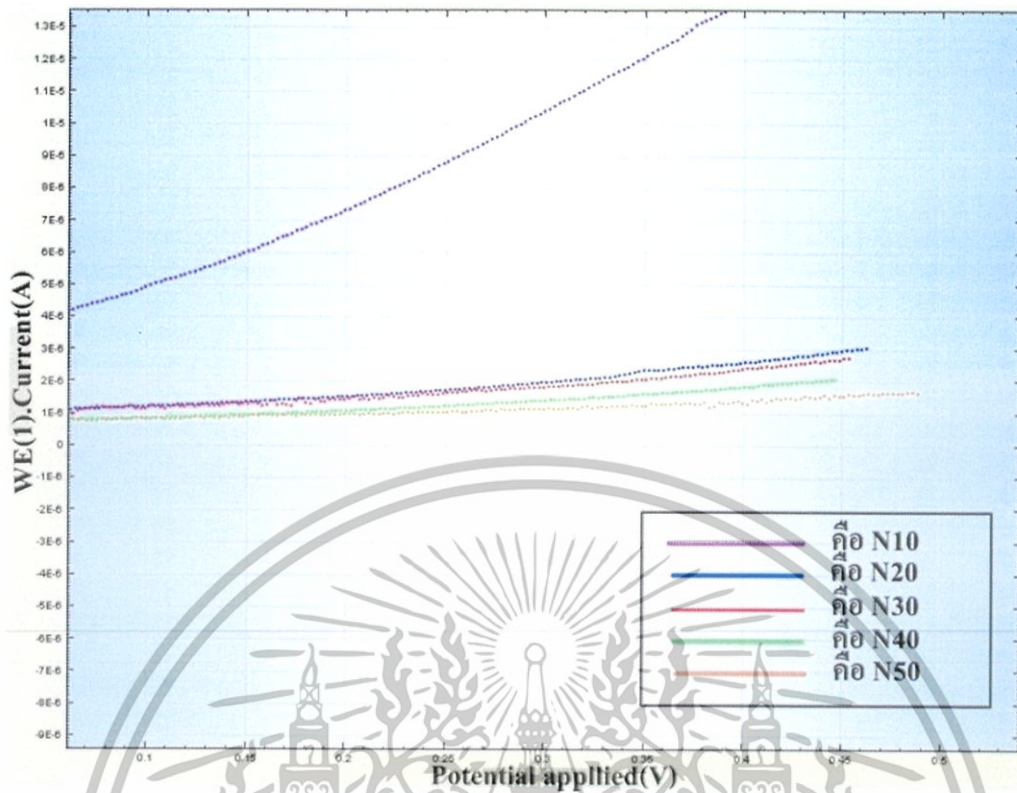
4.5 ผลต่ออัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์



รูปที่ 4.6 ผลการวัดการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

รูปที่ 4.6 แสดงผลของการวัดการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีการดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง โดยมีอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมเท่ากับ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ โดยที่สัญลักษณ์ N แทนปริมาณก๊าซไนโตรเจน จากผลการวัดพบว่า ในช่วงแรกค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความต่างศักย์จนกระทั่งถึง ค่าความต่างศักย์ที่เกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) จากนั้นในช่วงที่สอง พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ดังรูป เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งความต่างศักย์ ที่ทำให้ค่ากระแสต่ำที่สุด (E_{corr}) พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยความดันก๊าซไนโตรเจนที่แตกต่างกันให้ค่า E_{corr} ใกล้เคียงกันในช่วง -0.4 ถึง -0.5 โวลต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีอัตราการกัดกร่อน ที่ใกล้เคียงกันในช่วง 0.0030549 ถึง 0.019562 โวลต์ แต่ถ้าหากพิจารณาให้ละเอียดขึ้น จะพบว่า เมื่อปริมาณอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น อัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของฟิล์มที่มีอัตราส่วนของโลหะ (Ti) และไนโตรเจนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อปริมาณของไนโตรเจนในฟิล์มบางมากขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีความทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลการวัดการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (ความต่างศักย์บวก)

หากพิจารณาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์มีค่าเป็นบวก ที่ความดันก๊าซไนโตรเจน 10% (N10) จะมีกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า N10 จะถูกกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากมีความเป็นโลหะสูงสามารถให้อิเล็กตรอนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ N20 N30 N40 และ N50 ตามลำดับ ซึ่ง N50 จะสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.4 ค่า Polarization resistance ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ตัวอย่าง	Polarization resistance (k Ω)
N10	36.8980
N20	171.430
N30	162.100
N40	243.920
N50	245.060

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนในระบบสเปคโตรริงเพิ่มขึ้น

ค่า Polarization resistance เพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติการพิจารณาการกักกร่อนสามารถพิจารณาได้ 2 กรณี คือ พิจารณาจากความต่างศักย์ที่ทำให้กระแสมีค่าต่ำสุด (E_{corr}) ถ้า E_{corr} มีค่าน้อย (ติดลบมาก) แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นแคโทดหรือมีการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย ดังนั้นฟิล์มจะมีอัตราการกักกร่อนสูง (ทนทานต่อการกักกร่อนได้น้อย) และสามารถพิจารณาจากค่าความต้านทาน เมื่อความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลถึงความต้านทานในการกักกร่อนมากขึ้น กระแสไฟฟ้าจะลดลง ดังนั้นฟิล์มจึงมีอัตราการกักกร่อนต่ำ (สามารถทนทานต่อการกักกร่อนได้ดีขึ้น)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองจากการวัดและวิเคราะห์

โครงการพิเศษนี้ศึกษาอัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนที่ส่งผลต่อสี อัตราการเคลือบ และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ความดันรวม 4.0×10^{-3} มิลลิบาร์ โดยเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นซิลิกอนเพื่อนำไปประยุกต์เคลือบบนผิวของเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงามและป้องกันรอยขีดข่วน โดยอัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่อความดันรวมที่ใช้คือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ

จากการทดลองสามารถปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์บนฐานรองรับที่เป็นซิลิกอนได้ ฟิล์มบางนี้มีลักษณะเป็นสีทองซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจน โดยที่ความดันของก๊าซไนโตรเจน 10% จะได้ฟิล์มบางที่มีสีทองเหลือง และเปลี่ยนเป็นสีทองแดง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนไปเป็น 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งที่ความดันของก๊าซไนโตรเจน 10% จะมีค่า plasma frequency ใกล้เคียงกับค่า Plasma frequency ของแสงสีเหลือง (มีค่าประมาณ $3.58 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$) และที่ความดันของก๊าซไนโตรเจน 50% จะมีค่า Plasma frequency ใกล้เคียงกับค่า plasma frequency ของแสงสีแดง (มีค่าประมาณ $2.689 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$)

ผลการตรวจสอบความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะมีความหนาอยู่ในช่วง 0.490 -1.238 ไมโครเมตร สามารถคำนวณหาอัตราการเคลือบได้ เมื่อความดันของก๊าซไนโตรเจน 10 % ฟิล์มจะมีความหนามากที่สุดและมีอัตราการเคลือบที่สูง ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มนั้นจะมีความขรุขระ และเมื่อความดันของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มจะมีความหนาและมีอัตราการเคลือบลดลง ลักษณะพื้นผิวจะเรียบมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากค่า Roughness root mean square ของฟิล์มลดลง

ผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 % โดยมวล จากกราฟโพลาริเซชันพบว่าค่าความต่างศักย์ที่เกิดการกัดกร่อน หรือ E_{corr}

ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนความดันก๊าซไนโตรเจนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในช่วง -0.4 ถึง -0.5 โวลต์ เมื่อพิจารณาค่า Polarization resistance ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ พบว่าเมื่อความดันของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ค่า Polarization resistance จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้กระแสการกัดกร่อนลดต่ำลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟที่ความดันของก๊าซไนโตรเจน 10% กระแสการกัดกร่อนมีค่าสูง และที่ความดันก๊าซไนโตรเจน 20%,30%,40% และ 50% กระแสการกัดกร่อนจะลดลงตามลำดับ ซึ่งอัตราการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสการกัดกร่อน ถ้ากระแสการกัดกร่อนต่ำฟิล์มบางจะสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี

ในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ อัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบบนผิวของเครื่องประดับเพื่อเพิ่มความสวยงามและป้องกันรอยขีดข่วนคือ 20% เนื่องจากที่ความดันของก๊าซไนโตรเจน 20% ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีลักษณะพื้นผิวของค่อนข้างเรียบ มีอัตราการเคลือบที่เหมาะสม และเมื่อนำไปทดสอบอัตราการกัดกร่อน พบว่าสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีพอสมควร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำให้ฟิล์มมีความหนาขนาดเท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ดีควรจะมีเงื่อนไขอย่างเดียวกัน
2. ในการเคลือบฟิล์มควรที่จะเคลือบลงบนวัตถุที่ใช้ทำเครื่องประดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Yin, L. Hang, S. Zhang, X.L. Bui (2007), “Thin solid films” 515 (2007) 2829-2832. Thermal oxidation properties of titanium nitride and titanium–aluminum nitride materials—A perspective for high temperature air-stable solar selective absorber applications.,.
- [2] Ph. Roquiny, F. Bodart, G. Terwagne (1999). “Surface and Coatings Technology”, 116–119 (1999) 278–283. Belgium: Colour control of titanium nitride coatings produced by reactive magnetron sputtering at temperature less than 100°C.
- [3] Laurette Combadiere, Jean Machet (1995). “Surface and Coatings Technology”, 88 (1996) 17-27. France: Reactive magnetron sputtering deposition of TiN films. I. Influence of the substrate temperature on structure, composition and morphology of the films.
- [4] Li-Jian Meng, M.P. dos Santos (1996). “Surface and Coatings Technology”, 90 (1997) 64-70. Portugal: Characterization of titanium nitride films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering at different nitrogen pressures.
- [5] Duh, J.G. and Doong, J.C. (1993). “Surface and Coating Technology”, Vol. 56 (1993) 257-266. Structure, Hardness and Adhesion in electroless nickel interlayer modified TiN coating on mild steel.
- [6] คุณสมบัติของไทเทเนียม (ออนไลน์). (2554). สืบค้นจาก: <http://www.wikipedia.org>
[19 ตุลาคม 2556]
- [7] คุณสมบัติของไนโตรเจน (ออนไลน์). (2554). สืบค้นจาก: <http://archive.lib.cmu.ac.th>
[19 ตุลาคม 2556]
- [8] กระบวนการสเป็คเตอรिंगและการเคลือบฟิล์มบาง (ออนไลน์). (2548). สืบค้นจาก: <http://www.thapra.lib.su.ac.th> [15 ตุลาคม 2556]
- [9] แบบจำลองของ Drude (ออนไลน์). (2555). สืบค้นจาก: <http://www.physics.iisc.ernet.in>
[5 ธันวาคม 2556]
- [10] ความหยาบผิว (ออนไลน์). (2547). สืบค้นจาก: www.siamstainless.com/wp-content/.../07/ความหยาบผิวสแตนเลส-ss.pdf. [5 ธันวาคม 2556]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] ประพิศพรรณ เตชะวานิชชัย, พีรพร พิมพา และ อาจารย์พวงจันทร์ เหล่าศิริชน. (2551).การกัดกร่อน(Corrosion)สืบค้นจาก: <http://www.buchemical.co.th/download/present7.pdf>.
[3 ตุลาคม 2556]
- [12] พรวสา วงศ์ปัญญา. (2555). การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท.สืบค้นจาก: http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Lab_6_Corrosion_testing_by_Potentiostatic_technique.pdf [12 ตุลาคม 2556]
- [13] Li-JianMeng a,*1, M.P. dos Santos b. Surface and Coatings Technology 90 (1997)
- [14] W.-J. Chou et al. Corrosion Science 43 (2001).
- [15] D.-H. Han*, W.-H. Hong, H.S. Choi, J.J. (2009).
- [16] P. Roquiny et al. Surface and Coatings Technology 116–119 (1999)
- [17] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. (2556).Atomic force microscope. สืบค้นจาก: <http://www.nano.kmitl.ac.th> [20 พฤศจิกายน 2556]
- [18] มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. (2554).เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สืบค้นจาก: <http://www.mfu.ac.th> [20 พฤศจิกายน 2556]