

ผลของพารามิเตอร์การกัดผิวและโครงสร้างต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

นางสาวกึ่งเพชร อัจฉมาภินันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECT OF ETCHING PARAMETERS AND STRUCTURE ON OPTICAL PROPERTY OF  
TITANIUM DIOXIDE THIN FILM

Miss Kingpetch Archaapinun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials Engineering

Department of Metallurgical

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของพารามิเตอร์การกัดผิวและโครงสร้างต่อ  
สมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

โดย

นางสาวกึ่งเพชร อัจฉาภินันท์

สาขาวิชา

วิศวกรรม โลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.อดิศร บุรณวงศ์)

กึ่งเพชร อัญมณีอินทรีย์ : ผลของพารามิเตอร์การกัดผิวและโครงสร้างต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (EFFECT OF ETCHING PARAMETERS AND STRUCTURE ON OPTICAL PROPERTY OF TITANIUM DIOXIDE THIN FILM)  
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์, 91 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้น, โปรไฟล์อุณหภูมิในกระบวนการกัดผิวและการกวนสารละลายในการกัดผิววัสดุพื้นซิลิกอนและการเคลือบฟิล์ม  $TiO_2$  พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกัดผิวเพื่อสร้างผลึกรูปพีระมิดให้เกิดปกคลุมผิวคือ กระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มีการกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็วรอบการกวนสารละลาย 150 รอบต่อนาทีและกระบวนการกัดผิวในช่วงเพิ่มอุณหภูมิแก่สารละลายจนถึง 60 องศาเซลเซียส โดยสามารถลดการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm. จาก 28.04 เหลือ 16.78% สำหรับการเคลือบผิวด้วยฟิล์ม  $TiO_2$  โดยใช้อัตราการไหล  $Ar:O_2$  5:15 sccm., ระยะระหว่างเป้าถึงวัสดุพื้น 8 เซนติเมตร, ความดันรวม  $7 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์, กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมป์แรงที่และควบคุมความหนาชั้นเคลือบที่ 190 และ 420 nm. พบว่าได้ฟิล์ม  $TiO_2$  ชนิดอนาเทส ซึ่งที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm. ค่าการสะท้อนแสงลดลงจาก 28.04 เหลือ 8.82% และ 17.85% สำหรับความหนาชั้นเคลือบที่ 190 และ 420 nm. ตามลำดับ

เมื่อใช้การกัดผิวตามเงื่อนไขข้างต้นร่วมกับการเคลือบผิวด้วย  $TiO_2$  พบว่าค่าการสะท้อนแสงลดลงเหลือ 5.97 และ 4.9% สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 nm. ตามลำดับ จากการเพิ่มการสะท้อนแสงตามแนวเฉียงของพีระมิดเข้าสู่ซิลิกอนและการแทรกสอดแบบหักล้างของชั้นฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าการกัดผิวและการเคลือบ  $TiO_2$  ชนิดอนาเทส เป็นวิธีที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้สามารถลดการสะท้อนแสงได้

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของฟิล์ม  $TiO_2$  หลังผ่านการอบอ่อนเพื่อให้ได้ฟิล์ม  $TiO_2$  ชนิดรูไทล์ โดยนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 nm. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าฟิล์ม  $TiO_2$  ชนิดรูไทล์ร่วมกับการใช้วัสดุพื้นหลังผ่านการกัดผิวแล้วให้ค่าการสะท้อนแสง 10.07 และ 17.86% ตามลำดับ ซึ่งยังสูงกว่าฟิล์ม  $TiO_2$  ชนิดอนาเทส ดังนั้นฟิล์ม  $TiO_2$  ชนิดรูไทล์จึงไม่เหมาะสมในการใช้เป็นชั้นกันสะท้อนแสง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการและวัสดุ...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5470122121: MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: Anisotropic etching / Titanium dioxide / Reflectance

KINGPETCH ARCHAAPINUN: EFFECT OF ETCHING PARAMETERS AND STRUCTURE ON OPTICAL PROPERTY OF TITANIUM DIOXIDE THIN FILM.

ADVISOR: ASST.PROF PATAMA VISUTTIPITUKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.PROF NIRUN WITIT-ANUN, Ph.D., 91 pp.

This research studied effect of solution concentration, temperature profile and stirring of etching solution on surface texturing of Si substrate and TiO<sub>2</sub> coating. The result showed that the optimum etching condition which created pyramid structure covering entire Si surface is texturing in NaOH 10 M of concentration with magnetic stirring the solution 150 rpm and heating period to 60°C of temperature profile at wavelength 550 nm can be reduced from 28.04 to 16.78%. Anti-reflection TiO<sub>2</sub> coating was done by using Ar:O<sub>2</sub> flow rate of 5:15 sccm with constant current of 500 mA and fixed total pressure of 7x10<sup>-3</sup> mbar. The distance between target and substrate was 8 cm. Thickness of the coating anatase TiO<sub>2</sub> film can be controlled at 190 and 420 nm by selecting coating holding time of 73 and 169 mins, respectively. The coating TiO<sub>2</sub> film can reduce the reflectance of Si from 28.04 to 8.82% and 28.04 to 17.85% for 190 and 420 nm thick TiO<sub>2</sub> film, respectively. Combining surface texturing and TiO<sub>2</sub> coating, it was found that the reflectance can be reduced to 5.97 and 4.9% for 190 nm and 420 nm thick TiO<sub>2</sub> film. These small values of percent reflectance is obtained due to increasing in refraction into silicon substrate and destructive interference of anti-reflection TiO<sub>2</sub> film. In addition, this research studied effect of TiO<sub>2</sub> phase on reflectance by using annealing process at 900°C for 1 and 4 hours to convert anatase TiO<sub>2</sub> to rutile TiO<sub>2</sub> with 190 and 420 nm thick. The reflectance etched Si with rutile TiO<sub>2</sub> coating are 10.07% for 190 nm and 17.86% for 420 nm. The higher values of percent reflectance of rutile TiO<sub>2</sub> film coating implies that the most appropriate phase of TiO<sub>2</sub> film to apply as the anti-reflectance layer is anatase phase.

Department:.....Metallurgical Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study:....Metallurgical and Materials Engineering....Advisor's Signature.....

Academic Year:.....2013.....Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงสั่งสอนวิธีการคิดในการแก้ไขปัญหาที่พบจากงานวิจัย และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ธีรนุช ควรเชิดชู ที่สละเวลาในการถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ทั้งเนื้อหาวิชาและการใช้ชีวิตประจำวันต่อข้าพเจ้า รวมถึงวิธีการคิดแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์.ดร มาวิน สุประดิษฐ ณ อยุธยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์.ดร อติสร บุณยวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ต่อข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมาบัดนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่เอื้อเพื่อวัสดุ,อุปกรณ์และห้องปฏิบัติการในการทดลองสำหรับการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยและขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนทุน 72 พรรษาเพื่ออุดหนุนการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่ร่วมศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัดนี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กับข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 เซลล์สุริยะ (Solar Cell).....	5
2.1.1 ความสำคัญและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์สุริยะ .....	5
2.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพแก่เซลล์สุริยะ.....	8
2.2 เทคนิคการลดการสะท้อนแสง.....	9
2.2.1 การสร้างโครงสร้างผิวขรุขระ .....	9
2.2.2 การเคลือบผิวบนด้วยชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-Reflection) .....	11
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.4 เทคนิคในการเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	13
2.5 การเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยเทคนิครีเอคทีฟ .....	16
2.6 ปัจจัยในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.6.1 ผลของกำลังไฟฟ้า.....	17
2.6.2 ผลของค่าความดันย่อยของออกซิเจน .....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 แผนผังงานวิจัย .....	19
3.1.1 การเตรียมผิววัสดุพื้น โดยการสร้างผิวขรุขระในสารละลายต่าง และหาสมบัติของของวัสดุพื้นี่เตรียมได้.....	19

3.1.2	การเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนบน วัสดุพื้นด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนี ตรอนสปัตเตอร์ริงและหา สมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมได้ .....	20
3.2	ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุพื้น .....	20
3.3	ขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างผิวขรุขระ .....	20
3.4	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุพื้นก่อนการเคลือบฟิล์มบาง.....	21
3.5	ขั้นตอนการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ..	22
3.5.1	ขั้นตอนการสร้างภาวะสุญญากาศ.....	24
3.5.2	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง .....	25
3.6	กระบวนการอบอ่อน.....	26
3.7	การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน .....	26
3.7.1	การทำโครงสร้างผลึก .....	26
3.7.2	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	27
3.7.3	การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและการหาความหนาของชิ้นงาน .....	27
3.7.4	การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง .....	27
บทที่ 4	ผลวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล .....	29
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติการสะท้อน แสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก.....	29
4.1.1	ผลของความเข้มข้นสารละลายต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้น ซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	29
4.1.2	ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการ กัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	36
4.1.3	ผลของโปรไฟล์อุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอน หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	37
4.1.4	ผลของการกวนสารละลายต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอน หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	40
4.1.5	ความหนาของผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธี แอนไอโซทรอปิก .....	43



4.1.6	ผลของวัสดุพื้นฉลิกอนต่อสมบัติการสะท้อนแสงหลังกระบวนการ กัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก.....	45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลือบต่อฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์.....	47
4.2.1	เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง .....	47
4.2.2	โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	48
4.3	ผลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส .....	51
4.3.1	โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน .....	51
4.3.2	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิด อนาเทส.....	52
4.3.3	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิด อนาเทส.....	54
4.3.4	โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึก ชนิดอนาเทส .....	56
4.3.5	สมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุพื้นฉลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส .....	57
4.4	ผลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ .....	59
4.4.1	กระบวนการอบอ่อนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	59
4.4.2	โครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการ อบอ่อน .....	61
4.4.3	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึก ชนิดรูไทล์.....	64
4.4.4	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิด รูไทล์.....	65
4.4.5	โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึก ชนิดรูไทล์.....	66
4.4.6	สมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุพื้นฉลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ .....	68
4.5	ผลของความหนาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติการสะท้อนแสง .....	71

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	78
รายการอ้างอิง .....	80
ภาคผนวก .....	85
ภาคผนวก ก .....	86
ภาคผนวก ข .....	87
ภาคผนวก ค .....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	แสดงมลพิษจากการผลิตไฟฟ้าในหน่วยกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง [3].....	1
ตารางที่ 1.2	แสดงจุดเด่นและจุดด้อยของเซลล์สุริยะชนิดต่างๆ[3] .....	2
ตารางที่ 2.1	แสดงค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุที่เคลือบเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงสำหรับ เซลล์สุริยะ [1].....	11
ตารางที่ 4.1	ความหนาผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการกัดผิวและหลังกระบวนการ กัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	44
ตารางที่ 4.2	สรุปเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน .....	48
ตารางที่ 4.3	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	50
ตารางที่ 4.4	ความหนาผิวฟิล์มบางบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส..	53
ตารางที่ 4.5	ความหนาผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ .....	65
ตารางที่ 4.6	สรุปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร.....	77

## สารบัญญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	แสดงเซลล์สุริยะขณะรับแสงอาทิตย์ [3] .....2
ภาพที่ 2.2	แสดงเซลล์สุริยะในสภาวะที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์ [3] .....6
ภาพที่ 2.3	แสดงเซลล์สุริยะในสภาวะที่แสงอาทิตย์ตกกระทบ [3] .....7
ภาพที่ 2.4	แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าครบวงจร [3].....7
ภาพที่ 2.5	แสดงสเปกตรัมของคลื่นแสงที่ตามองเห็น [28] .....8
ภาพที่ 2.6	แสดงภาพตัดขวางเซลล์สุริยะที่มีโครงสร้างผิวขรุขระแบบผลึกรูปพีระมิด [1] .....10
ภาพที่ 2.7	แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงจากผิวของเซลล์สุริยะ [1] โดยที่เส้นหมายเลข .....10
ภาพที่ 2.8	แสดงปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่มีความหนาเท่ากับ 1/4 ของความยาวคลื่นแสง [1].....12
ภาพที่ 2.9	แสดงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ [26] .....13
ภาพที่ 2.10	แสดงเทคนิคการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยวิธีต่างๆ [27].....13
ภาพที่ 2.11	แสดงการเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สทำปฏิกิริยากับอะตอมของเป้าที่บริเวณต่างๆ[21] .....16
ภาพที่ 3.1	แผนผังงานดำเนินงานวิจัย.....19
ภาพที่ 3.2	แสดงส่วนประกอบหลักของระบบการเคลือบของเครื่องเคลือบ [25].....22
ภาพที่ 3.3	แสดงเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย .....23
ภาพที่ 3.4	แสดงไดอะแกรมระบบเครื่องสูบลูสุญญากาศของระบบเคลือบสปีดเตอริง[25] .....24
ภาพที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคของแผ่นวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ; (ก) ความเข้มข้น 5 โมลาร์, (ข) ความเข้มข้น 10 โมลาร์, (ค) ความเข้มข้น 15 โมลาร์, (ง) ความเข้มข้น 20 โมลาร์.....30
ภาพที่ 4.2	กลไกในระหว่างกระบวนการกัดผิวแบบแอนไอโซทรอปิก [30] .....31
ภาพที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับอัตราการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [32] .....32
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดผิวกับความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [38].....34
ภาพที่ 4.5	การจัดเรียงพันธะบนผิววัสดุพื้นซิลิกอนบนระนาบต่างๆ [31].....35

ภาพที่ 4.6	แผนภาพโครงสร้างผลึกรูปพีระมิดของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [31].....	35
ภาพที่ 4.7	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ไม่มีการกวนสารละลาย อุณหภูมิคงที่ 60 นาที; (ก) 60 องศาเซลเซียส, (ข) 80 องศาเซลเซียส .....	36
ภาพที่ 4.8	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก.....	37
ภาพที่ 4.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1,2 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก.....	37
ภาพที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1,2,3 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	38
ภาพที่ 4.11	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และไม่มีการกวนสารละลาย ; การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง (ก) ช่วงที่ 1 ดังภาพที่ 4.8, (ข) ช่วงที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 4.9, (ค) ช่วงที่ 1, 2 และ 3 ดังภาพที่ 4.10 .....	39
ภาพที่ 4.12	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1 ดังภาพที่ 4.8 ; (ก) ไม่มีการกวนสารละลาย, (ข) กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที และ (ค) กวนสารละลาย ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที.....	40
ภาพที่ 4.13	แผนภาพแสดงการเกิดฟองไฮโดรเจนเกาะที่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนในระหว่างกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [30].....	41
ภาพที่ 4.14	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์, กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที .....	42
ภาพที่ 4.15	ความหยาบผิวจากเครื่อง Atomic Force Microscope ของวัสดุพื้นซิลิกอน; (ก) ก่อนกระบวนการกัดผิว (ข) หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก.....	43

ภาพที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนและหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	45
ภาพที่ 4.17	แผนภาพแสดงแสงตกกระทบที่ผิววัสดุพื้นซิลิกอน ; (ก) ก่อนผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก, (ข) หลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก .....	46
ภาพที่ 4.18	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	49
ภาพที่ 4.19	กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	49
ภาพที่ 4.20	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	51
ภาพที่ 4.21	ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส.....	52
ภาพที่ 4.22	ความหนาของชั้นเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ควบคุมเวลาเคลือบ ; (ก) 1 ชั่วโมง 12 นาที, (ข) 2 ชั่วโมง 35 นาที .....	54
ภาพที่ 4.23	ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาคหลังการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส; (ก) ความหนาฟิล์ม 190 นาโนเมตร, (ข) ความหนาฟิล์ม 420 นาโนเมตร .....	55
ภาพที่ 4.24	ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นซิลิกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส.....	56
ภาพที่ 4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสความหนา 190 นาโนเมตร.....	57
ภาพที่ 4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสความหนา 420 นาโนเมตร.....	58
ภาพที่ 4.27	กลไกการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [7].....	60
ภาพที่ 4.28	แผนภาพความดันและอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [46].....	61
ภาพที่ 4.29	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	61

ภาพที่ 4.30	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร.....	62
ภาพที่ 4.31	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร.....	63
ภาพที่ 4.32	ความหยาบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อน.....	64
ภาพที่ 4.33	ภาพสองมิติของโครงสร้าง TiO <sub>2</sub> ออกตะฮีดรัลของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามแนวแกน C [47] ; (ก) โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส, (ข) โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์.....	65
ภาพที่ 4.34	ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิงกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์.....	66
ภาพที่ 4.35	ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นซิงกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ; (ก) หลังกระบวนการเคลือบด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริง, (ข) หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง.....	67
ภาพที่ 4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิงกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ภายหลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับ ความหนา 190 นาโนเมตร.....	68
ภาพที่ 4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิงกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ภายหลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงสำหรับ ความหนา 420 นาโนเมตร.....	69
ภาพที่ 4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิงกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส.....	71
ภาพที่ 4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิงกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส.....	72

- ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่น  
 ของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิด  
 อนุนาเทส ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....74
- ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่น  
 ของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมได  
 ออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนุนาเทส ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ  
 900 องศาเซลเซียส.....75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันความต้องการการใช้พลังงานเป็นปัญหาของคนทั่วโลก มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทั้งเรื่องปัญหาการเกิดภัยธรรมชาติรวมถึงไปถึงราคาเชื้อเพลิงก็มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณการสำรองเชื้อเพลิงลดลง ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าแหล่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ โดยเฉพาะน้ำมันที่มีราคาสูงและจัดอยู่ในกลุ่มประเภทพลังงานใช้แล้วหมดไป นักวิจัยจึงแสวงหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและก่อปัญหาน้อยลง เช่น ชีวมวล น้ำ ลม ความร้อนใต้พิภพ และแสงแดด ดังนั้นการหันมาให้ความสนใจแหล่งพลังงานที่สะอาดกว่าจึงเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุงในด้านการใช้พลังงานหมุนเวียน หนึ่งในแหล่งพลังงานนั้นก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร การใช้งานแสงอาทิตย์กับระบบแสงสว่าง การติดตั้งระบบแสงอาทิตย์ของระบบสูบน้ำ การนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับระบบการทำความร้อนหรือร่วมกับระบบทำความเย็นก็สามารถนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้เช่นกัน [1,2]

ตารางที่ 1.1 แสดงมลพิษจากการผลิตไฟฟ้าในหน่วยกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง [3]

ชนิดโรงไฟฟ้า	CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>
Coal	322.8	1.8	3.4
Oil	258.5	0.88	1.7
Natural gas	178	0.9	0.001
Nuclear	7.8	0.003	0.3
Photovoltaic	5.3	0.007	0.02
Biomass	0	0.6	0.14
Wind	6.7	Very low	Very low
Hydro	5.9	Very low	Very low
Geothermal	51.5	Very low	Very low

การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษจากขบวนการผลิตไฟฟ้าที่น้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรทั่วไปที่ใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้าแล้ว ระบบไฟฟ้าเซลล์สุริยะมีการบำรุงรักษาน้อยมากและเป็นการใช้งานแบบอัตโนมัติจึงมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ, การซ่อมบำรุงต่ำและสะดวกต่อการใช้งาน [1,2]

ตารางที่ 1.2 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยของเซลล์สุริยะชนิดต่างๆ[3]

ตระกูล	ประสิทธิภาพ	พลังงานในการผลิต	ราคา	วัตถุดิบ	ความน่าเชื่อถือ	สิ่งแวดล้อม
Single crystal silicon	15-24	Bad	bad	Good	Very Good	Very Good
Polysilicon	10-17	Good	Good	Good	Good	Very Good
Amorphous Silicon	8-13	Very Good	Very Good	Very Good	Good	Very Good
GaAs	18-30	Bad	Very Bad	Bad	Very Good	Bad
CdS/CdTe	10-15	Good	Good	Bad	Good	Bad
CdS/CuInSe2	10-15	NA	NA	Bad	Good	Bad

\*\*หมายเหตุ NA หมายถึง not applicable or not available

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการประกอบแผงเซลล์แสงสุริยะของประเทศนั้นได้เริ่มมีบทบาทและมีแนวโน้มการเติบโตมากขึ้นทั้งด้านผู้ประกอบการและผู้ใช้ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตกันอย่างแพร่หลายคือซิลิกอน โดยมีการใช้มากที่สุดถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักสำหรับการผลิตโครงสร้างรอยต่อ p-n [3] แต่เนื่องจากเซลล์สุริยะยังมีข้อจำกัดและจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาทั้งในด้านประสิทธิภาพของเซลล์และต้นทุนที่ใช้ในการผลิตซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะนั้นมีค่าต่ำมากจึงทำให้นักวิจัยในปัจจุบันพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยการลดการสะท้อนและทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น ประกอบการพัฒนาเทคโนโลยีพื้นผิวกำลังได้รับความสนใจอย่างมากซึ่งการเคลือบฟิล์มบางทับที่ด้านบนของเซลล์จัดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยเรื่องลดการสะท้อนแสงและทำให้แสงเดินทางเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้น ทั้งนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นออกไซด์อย่างหนึ่งของโลหะทรานซิชันที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติทางแสงที่ดี ในงานวิจัยนี้จึงพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ โดยศึกษาผลของการเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่

เป็นชั้นกันสะท้อนแสงต่อโครงสร้างและค่าการสะท้อนแสง โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ ลักษณะพื้นผิวของวัสดุพื้น ซึ่งสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะและ กระตุ้นให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกันสะท้อนด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง
- 1.2.2 เพื่อหาผลของลักษณะพื้นผิวต่อการต้านทานการสะท้อนแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเป็นชั้นกันสะท้อน
- 1.3.2 เตรียมผิววัสดุพื้นด้วยวิธี Anisotropic etching ด้วยสารละลายทางเคมี โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol) ที่ความเข้มข้น 5 ถึง 20 โมลาร์ ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิใน กระบวนการกัดผิวที่ 60 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 เตรียมผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยใช้เทคนิครีแอคทีฟ (Reactive) ในการสปีดเตอริง ซึ่งใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง เป็นแก๊สทำงาน และใช้แก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงเป็นแก๊สทำปฏิกิริยา
- 1.3.4 เจือใจในการเคลือบดังนี้ วัสดุพื้นที่ใช้คือซิลิกอนเวเฟอร์ เป้าที่ใช้คือไทเทเนียม กระบวนการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง, กำหนดความดันพื้น (base pressure) คงที่ เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-5}$ , กำลังไฟฟ้า 220 วัตต์และค่าความหนาของฟิล์มในช่วง 60 ถึง 180 นาโนเมตร ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น ความดันรวมขณะเคลือบ (total pressure) ในช่วง  $3.0 \times 10^{-3}$  ถึง  $7.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์, ระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุพื้น 5 ถึง 15 เซนติเมตร, อัตราส่วนระหว่าง แก๊สออกซิเจนต่อแก๊สอาร์กอน เพื่อให้ได้เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามที่ต้องการ ตรวจสอบผลของลักษณะพื้นผิวของวัสดุพื้นระหว่างวัสดุพื้นเรียบซิลิกอนเวเฟอร์กับวัสดุ พื้นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านวิธีแอนไอโซทรอปิกต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมได ออกไซด์ที่เป็นชั้นกันสะท้อน
- 1.3.5 กระบวนการอบอ่อนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นชั้นกันสะท้อนด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริงและทราบลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, SEM, UV-VIS Spectrometry และ AFM แล้วสามารถนำมาสรุปหาความสัมพันธ์ของลักษณะพื้นผิวของวัสดุพื้กับลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางที่ได้โดยจะเป็นประโยชน์พื้นฐานอันเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับเซลล์สุริยะต่อไป

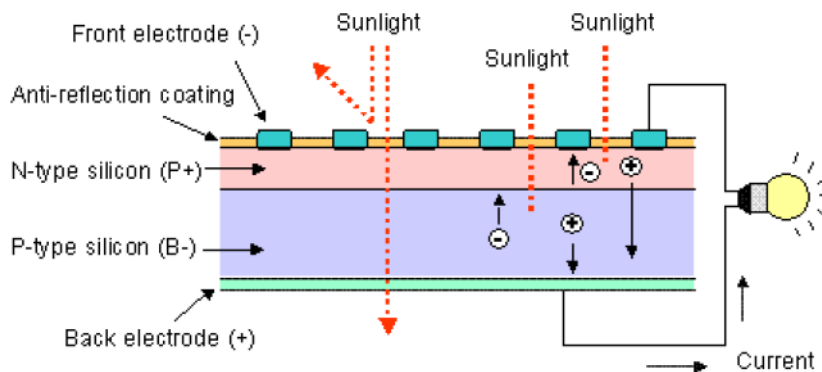
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซลล์สุริยะ (Solar Cell)

##### 2.1.1 ความสำคัญและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์สุริยะ

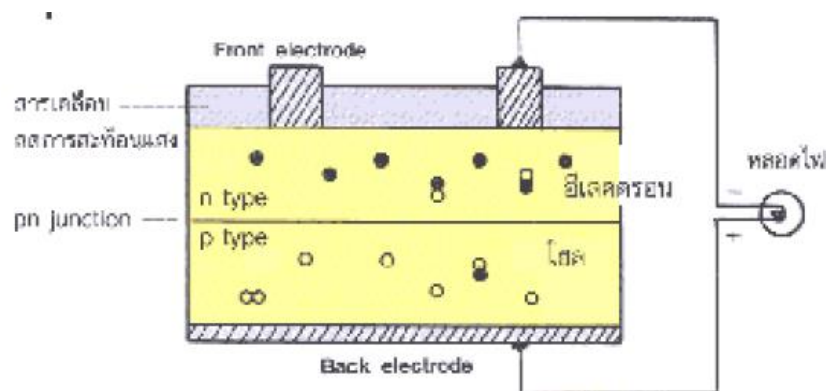
เซลล์สุริยะหรือที่เรียกว่า Solar Cell เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดไฟ) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (dc current) ได้ทันทีที่มีแสงตกกระทบ โดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) กล่าวคือ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อเกิดสมดุลระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า เห็นได้ว่าเป็นวิธีเปลี่ยนรูปพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรงที่ง่ายที่สุด ดังนั้นเซลล์สุริยะจึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษที่ทำลายสภาพแวดล้อมขณะใช้งาน [1,2]



ภาพที่ 2.1 แสดงเซลล์สุริยะขณะรับแสงอาทิตย์ [3]

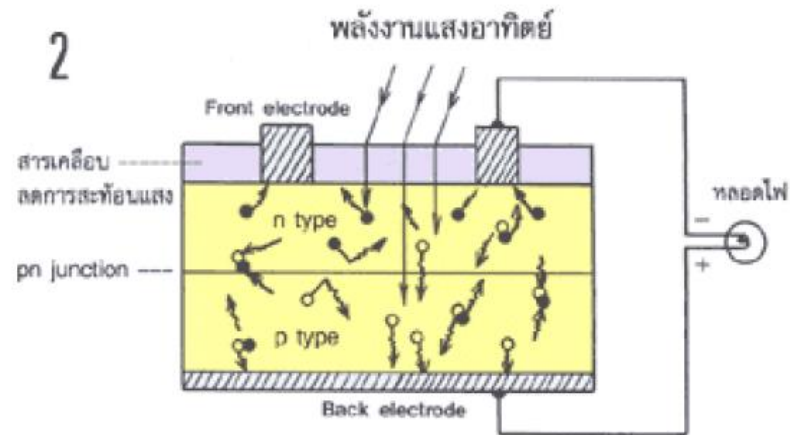
หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ รอยต่อพีเอ็น (p-n) ของสารกึ่งตัวนำ และวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดได้แก่ ซิลิกอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตซ์หรือทราย แสงซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจากแสงและวัสดุสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ประกอบกันเป็นเซลล์สุริยะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ n type ซิลิกอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่เจือสารด้วยสารฟอสฟอรัส มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และ p type ซิลิกอน

สารกึ่งตัวนำที่เจือสารด้วยโบรอนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เนื่องจากโครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (hole) เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิดมาประกบต่อกันเป็นรอยต่อ p-n (p-n junction) ทำให้เกิดเป็นเซลล์สุริยะ ในสถานะที่ยังไม่มีแสงแดด n type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมอิเล็กตรอน ส่วน p type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ ภายในส่วนใหญ่เป็นโฮลแต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อยเช่นกัน ด้านหลังของ p type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล [3]



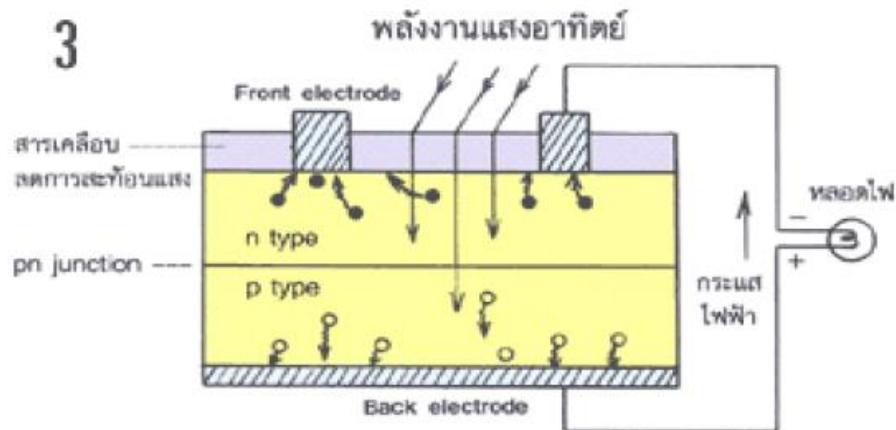
ภาพที่ 2.2 แสดงเซลล์สุริยะในสถานะที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์ [3]

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์สุริยะ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของทั้งสอง ถ้าอิเล็กตรอนและโฮลมีพลังงานสูงพออิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n type ส่วนโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p type [3]



ภาพที่ 2.3 แสดงเซลล์สุริยะในสภาวะที่แสงอาทิตย์ตกกระทบ [3]

อิเล็กตรอนจะวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode ส่วนโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจร จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลวิ่งจับคู่กัน [3]

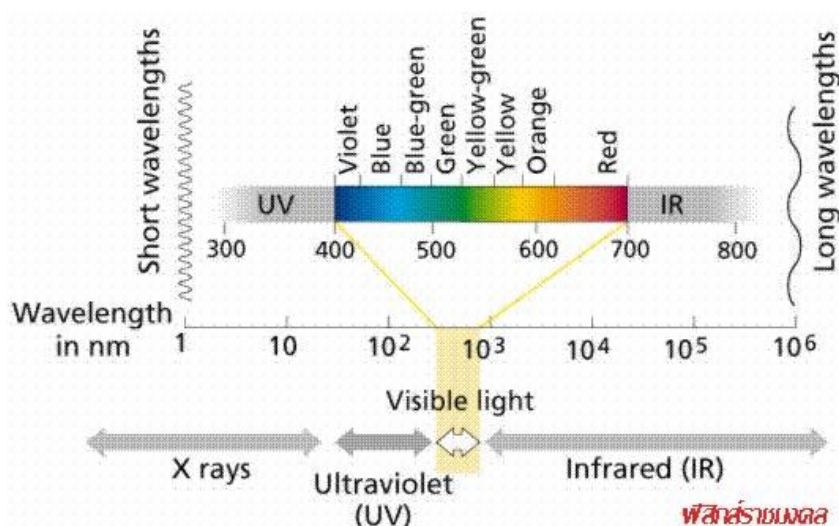


ภาพที่ 2.4 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าครบวงจร [3]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลเมื่อครบวงจรในที่สุด ดังนั้นหากสามารถลดการสะท้อนของแสงของเซลล์สุริยะได้มากขึ้นก็จะทำให้เซลล์สุริยะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพแก่เซลล์สุริยะ

เป็นที่ทราบกันว่ารังสีอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แสงที่ตามองเห็น (Visible light) และแสงอินฟราเรด หากพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะต้องคำนึงถึงสเปกตรัมแสงและการตอบสนองต่อสเปกตรัมประกอบกัน แม้ว่าสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์มีช่วงค่อนข้างกว้างตั้งแต่ 380-1100 นาโนเมตร แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องการตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิกอนที่สามารถตอบสนองได้เฉพาะแสงในช่วงที่ตามองเห็นและแสงอินฟราเรดเท่านั้น ดังนั้นช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์สุริยะสามารถดูดกลืนไปใช้งานได้จึงแคบลง อีกทั้งค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุซิลิกอนมีค่าค่อนข้างสูงประมาณ 6.00-3.50 ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสงมากถึง 54 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความยาวคลื่นสั้น และมีการสูญเสีย 34 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความยาวคลื่นยาว [2]



ภาพที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแสงที่ตามองเห็น [4]

ในปัจจุบันเทคนิคพื้นฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การชักนำให้แสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำให้มากที่สุด, การขยายผลการตอบสนองเชิงสเปกตรัมให้กว้างมากขึ้น, การผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลให้ได้มากที่สุด, การรวบรวมคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ผลิตด้วยแสงให้มากที่สุด, การลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์สุริยะ ซึ่งการชักนำแสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำให้มากขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ (1) การสร้างลายโลหะด้านหน้าวิธีนี้จะทำให้มีพื้นที่ลดลง แต่ผลนี้ทำให้เกิดความต้านทานอนุกรมแฝงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของเซลล์ลงได้ (2) การเคลือบด้วยชั้นป้องกันการสะท้อนที่ผิวด้านหน้า โดยวิธีนี้จะช่วยให้เซลล์สุริยะสามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้นและ (3) การสร้างผิวด้านรับแสงมีโครงสร้างขรุขระเพื่อเพิ่มระยะทางเดินแสงโดยจะสามารถลดการสะท้อนกลับของแสงที่ออกจากผิวและเป็น



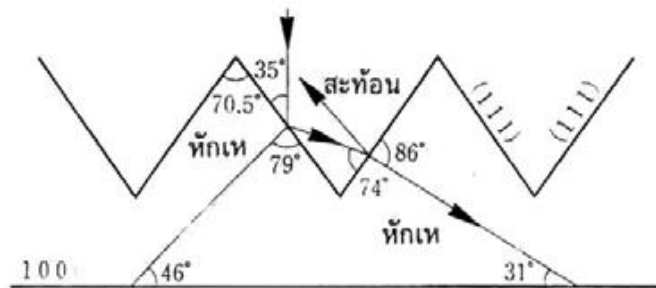
การเพิ่มโอกาสให้แสงที่ผ่านเข้ามาเกิดการสะท้อนแสงกลับอีกด้วย [1,2] ดังนั้นจะเห็นว่าวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาคือวิธีที่ 2 และ 3

## 2.2 เทคนิคการลดการสะท้อนแสง

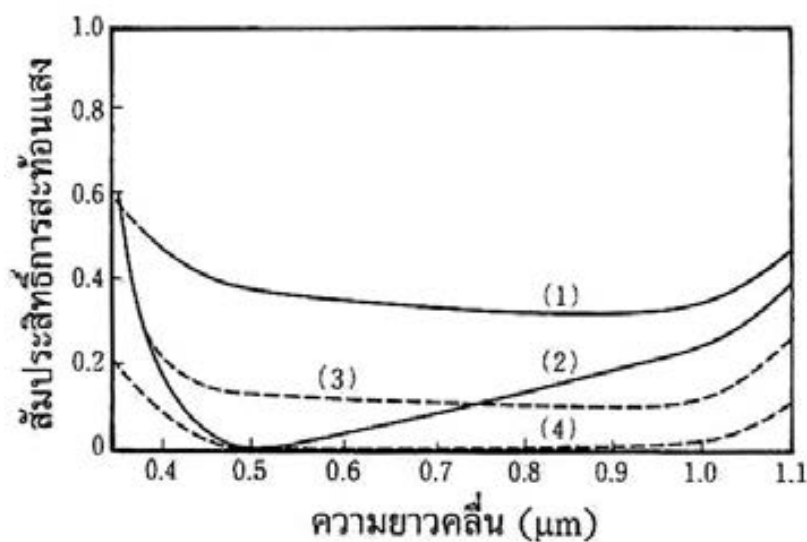
### 2.2.1 การสร้างโครงสร้างผิวขรุขระ

เนื่องจากผิวด้านรับแสงของเซลล์สุริยะ โดยทั่วไปเป็นผิวเรียบมันแบบกระจกเงา ดังนั้นแม้ว่าจะเคลือบผิวด้วยฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating , ARC) แล้วก็ตามแต่ยังคงมีการสะท้อนแสงเกิดขึ้นได้ วิธีลดการสะท้อนแสงที่ได้ผลมากอีกวิธีหนึ่งได้แก่ การทำให้ผิวของซิลิคอนนั้นขรุขระและมีโครงสร้างรูปร่างเดียวกันด้วย ซึ่งเป็นวิธีการกัดผิวตามแนวระนาบของผลึก ในกรณีของซิลิคอนนั้นจะได้ผิวที่มีรูปทรงแบบพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม เรียกว่า โครงสร้างผิวเท็กซ์เจอร์ (textured surface) [1] ซึ่งผิวขรุขระนี้จะช่วยให้แสงสามารถหักเหเข้าสู่แผ่นเซลล์หรืออาจเรียกว่าการกักแสง (light trapping) วิธีการผิวกัดให้เกิดโครงสร้างผิวขรุขระสามารถทำได้หลายวิธีเช่น Reactive Ion Etching, Mechanical Texturization ,การกัดผิวแบบแห้ง (Dry Etching) และการกัดผิวแบบเปียก (Wet Etching) ซึ่งการกัดผิวแบบเปียกก็ประกอบไปด้วย Isotropic Etching และ Anisotropic Etching โดยการสร้างโครงสร้างผิวขรุขระแบบเปียกด้วยวิธี Isotropic Etching จะเป็นกระบวนการกัดผิวในสารละลายกรดซึ่งให้อัตราการกัดผิวที่เหมือนกันในทุกทิศทางของการจัดเรียงตัวของผลึก โครงสร้างภายหลังจากการกัดมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม (semicircular) แม้ขั้นตอนการทำงานจะไม่ซับซ้อนแต่มีความอันตรายอย่างมากเนื่องจากกรดที่ใช้คือ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) หรือที่รู้จักกันในชื่อ กรดกัดแก้ว แม้ว่าเป็นเพียงกรดอ่อน แต่ว่ามีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงและยากต่อการใช้งาน เนื่องจากเมื่อสูดดมจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ และเนื้อเยื่อที่ลึกลงไปจะตาย อีกทั้งเกิดการกัดกร่อนถึงกระดูกที่อยู่ด้านล่าง เมื่อสัมผัสกับร่างกาย ส่วนวิธี Reactive Ion Etching นั้น โครงสร้างผิวที่ได้จะมีลักษณะเหมือนเข็ม ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ภาพโครงสร้างทางจุลภาคลำบากและค่าใช้จ่ายในการทำค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวิธีแบบเปียกด้วยวิธี แอนไอโซทรอปิกที่ใช้สารละลายต่างในกระบวนการกัดผิว ส่วนวิธี Mechanical Texturing เป็นวิธีสร้างโครงสร้างผิวขรุขระที่มีข้อจำกัดในบางวัสดุพื้นคือไม่สามารถใช้กับวัสดุพื้นมีลักษณะบางหรือง่ายต่อการแตกหักได้ ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้คือการกัดผิวแบบเปียกชนิดแอนไอโซทรอปิก ประโยชน์ที่เห็นได้จากวิธีนี้คือ ขั้นตอนของกระบวนการไม่ซับซ้อน,ราคาต่ำและเกิดอันตรายน้อยกว่า เนื่องจากสารเคมีที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โครงสร้างผิวขรุขระที่ได้จากกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม (random pyramid texture) ซึ่งโครงสร้างเช่นนี้จะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ทำให้แสงที่เดินทางเข้ามาจะสะท้อนที่

ผิวของผลึกรูปพีระมิดและเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้นเกิดการสะท้อนแสงในวัสดุพื้นหลายครั้ง ดังนั้นระยะทางการเดินของแสงในวัสดุพื้นจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดกลืนแสงมากขึ้น [5-10]



ภาพที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางเซลล์สุริยะที่มีโครงสร้างผิวขรุขระแบบผลึกรูปพีระมิด [1]



ภาพที่ 2.7 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงจากผิวของเซลล์สุริยะ [1] โดยที่เส้นหมายเลข

- (1) เป็นกรณีผิวที่ยังไม่มีชั้น AR (Anti-Reflection)
- (2) เป็นกรณีเคลือบชั้น AR (ดัชนีหักเหแสง 2.25) ลงบนผิวเรียบ
- (3) เป็นกรณีผิวขรุขระ
- (4) เป็นกรณีเคลือบชั้น AR ลงบนผิวขรุขระ

จากภาพที่ 2.7 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงกรณีผิวขรุขระในเส้นประหมายเลข (3) และ (4) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสะท้อนแสงแทบไม่มีเลย นิยมเรียกเซลล์สุริยะมีทั้งชั้นป้องกันการสะท้อนแสงและผิวขรุขระเช่นนี้ว่า เซลล์ดำ (black cell) เพราะเมื่อมองผิวของเซลล์สุริยะ พบว่าสีของเซลล์สุริยะเป็นสีดำ [1]

### 2.2.2 การเคลือบผิวบนด้วยชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-Reflection)

แสงที่ตกกระทบเซลล์สุริยะ บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับหมด แต่บางส่วนจะถูกสารกึ่งตัวนำสะท้อน ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นสาเหตุของการสูญเสียแสงในเซลล์สุริยะแต่เราสามารถชักนำให้แสงเดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้มากขึ้น ด้วยการลดการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหน้าโดยการเคลือบฟิล์มบางที่โปร่งใสและมีดัชนีหักเหแสงน้อยที่บนผิวด้านบนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating : ARC) ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิดเช่น ซิลิคอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ), อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) [1]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุที่เคลือบเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์สุริยะ [1]

วัสดุ	ดัชนีหักเหแสง	วัสดุ	ดัชนีหักเหแสง
$\text{MgF}_2$	1.3-1.4	$\text{Si}_3\text{N}_4$	1.9
$\text{SiO}_2$	1.4-1.5	$\text{TiO}_2$	2.3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.8-1.9	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	2.1-2.3
$\text{SiO}$	1.8-1.9	$\text{ZnS}$	2.3-2.4

แต่ทั้งฟิล์มบางต้องมีการออกแบบความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงให้เหมาะสมคือ

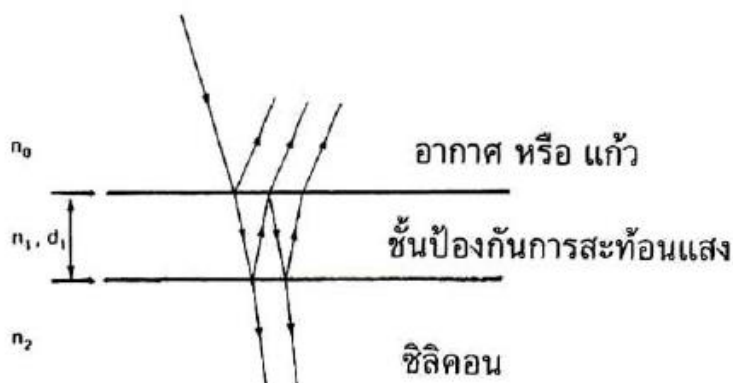
1. ความหนา  $d_1$  ของชั้น AR ควรมีความเป็นไปตามกฎ  $1/4$  ของความยาวคลื่นแสง โดยแสงที่พิจารณาโดยกำหนดให้มีความยาวคลื่น  $\lambda$  (เช่น ยอดของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์) และค่าดัชนีหักเหแสงของชั้น AR เท่ากับ  $n_1$  ดังนั้นความหนาที่เหมาะสมของชั้น AR จะเป็นตามสมการ[1]

$$d_1 = \frac{\lambda}{4n_1}$$

2. ผลของการสะท้อนกลับของแสงจะมีค่าลดลงถ้าค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบางมีความสัมพันธ์ในรากที่สองของผลคูณ  $n_0 n_2$  ดังนั้นชั้น AR ควรมีความโปร่งใสที่ดีและค่าดัชนีหักเหแสง  $n_1$  ซึ่งในอุดมคติควรมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลคูณของค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศและของสารกึ่งตัวนำ[1]

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$

โดยที่  $n_0, n_1, n_2$  คือค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศ ชั้น AR และสารกึ่งตัวนำตามลำดับ

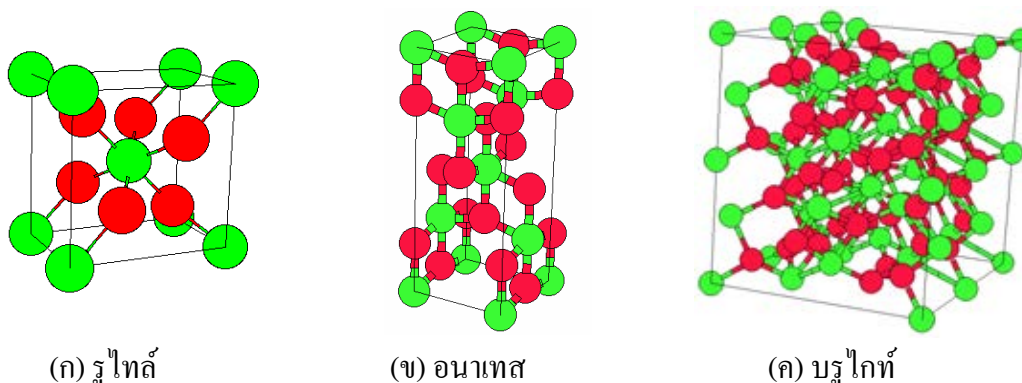


ภาพที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่มีความหนาเท่ากับ  $1/4$  ของความยาวคลื่นแสง [1]

จากเงื่อนไขทั้งสองนี้จะสามารถทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนมีค่าน้อยลง เนื่องจากเงื่อนไขข้อที่หนึ่งนั้นจะทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนที่ผิวบนสุดและแสงสะท้อนที่ผิวฟิล์มบางนั้นมีเฟสแตกต่างกัน 180 องศา ดังนั้นทำให้แสงสะท้อนจากทั้งสองแห่งเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างเมื่อสะท้อนออกจากเซลล์สุริยะ จึงทำให้แสงสะท้อนสุทธิมีความเข้มน้อยลง[1]

### 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มวิจัยทั่วโลก เนื่องจากเป็นสารประกอบที่น่าสนใจหลายประการ เช่น มีสมบัติการส่งผ่านแสงดี มีค่าดัชนีหักเหสูง, มีเสถียรภาพทางเคมี, มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการขีดขีด และเป็นฟิล์มที่ลักษณะใสจากสมบัติที่โดดเด่นนี้ทำให้มีการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจากอะตอมของไทเทเนียมจับกับอะตอมของออกซิเจน ซึ่งการจับกันมีด้วยกันหลายลักษณะ เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุเป็น  $\text{Ti}^0, \text{Ti}^{2+}, \text{Ti}^{3+}$  และ  $\text{Ti}^{4+}$  ส่วนออกซิเจนมีประจุเป็น  $\text{O}^{2-}$  ทำให้มีโอกาสรวมตัวกันเป็น  $\text{TiO}_x$  ที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน [13] ในธรรมชาตินั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกชนิดแตกต่างกันได้ 3 ชนิดคือ รูไทล์ (rutile), อนาเทส (anatase), และ บรูไกท์ (brookite) ซึ่งอนาเทสและรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเทระโกนอล (tetragonal) ส่วนบรูไกท์ มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) แต่ปกติมักไม่พบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึกชนิดบรูไกท์จะพบเพียงโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์, อนาเทส และอสังฐานเท่านั้น [7-10]



(ก) รูไทล์

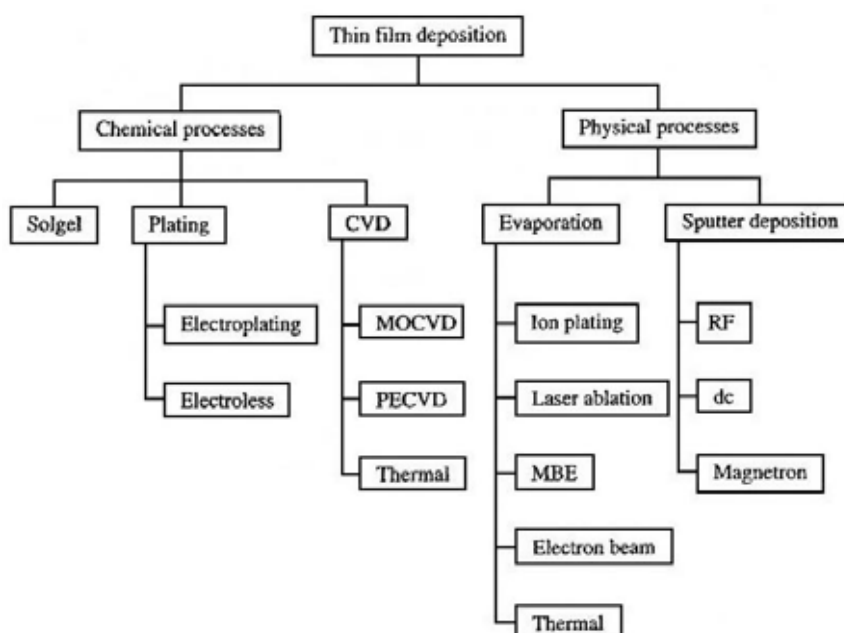
(ข) อนาเทส

(ค) บรูไกท์

ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ [26]

โครงสร้างผลึกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ต่างชนิดกันนั้นจะมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยส่วนมากจะเป็นการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ แต่ปัจจุบันเริ่มมีการสนใจฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้อย่างแพร่หลาย เช่น ตัวตรวจจับแก๊ส, ไดโอดีทรานซิสเตอร์ในเซลล์หน่วยความจำชนิดตัวเก็บประจุ รวมถึงเซลล์สุริยะด้วยเช่นกัน โดยปกติแล้วสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวของผลึกของฟิล์มบาง ซึ่งก็ขึ้นกับเทคนิคการเตรียมตลอดจนเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง[11]

## 2.4 เทคนิคในการเคลือบผิวฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 2.10 แสดงเทคนิคการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยวิธีต่างๆ [27]

ปัจจุบันวิธีการเตรียมฟิล์มบางมีได้หลายเทคนิคด้วยกัน ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและคุณภาพของฟิล์มบางที่ต้องการ เช่น การเคลือบไอทางเคมี (chemical vapor deposition), การพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis), การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation), โซลเจล (Sol-gel deposition), วิธีสปัตเตอร์แบบคลื่นวิทยุ (RF magnetron sputtering), ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ (DC magnetron sputtering) โดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์จะเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการระเหยสาร (evaporation) แล้ววิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์นั้น อีออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบวัสดุพื้นแล้วจะฝังตัวแน่นลงในวัสดุพื้นได้มากกว่า ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุพื้นดีกว่า อีกทั้งวิธีการระเหยสารถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะกับสารเคลือบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีโซลเจลจะพบว่าวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์สามารถใช้ได้วัสดุพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำ ได้ฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีการยึดเกาะที่ดีมากกว่าสุดท้ายเมื่อเทียบกับวิธีสปัตเตอร์แบบคลื่นวิทยุแล้ว วิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์มีความหนาแน่นพลาสมาต่ำกว่าทำให้วิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์เมื่อเทียบที่กำลังไฟฟ้าเท่ากัน วัสดุพื้นเกิดความร้อนต่ำกว่า นอกจากนี้การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์นั้นยังมีข้อได้เปรียบคือสามารถควบคุมอัตราการเคลือบและสมบัติของฟิล์มได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพ ทั้งยังสามารถประยุกต์ไปสู่การเคลือบบนวัสดุพื้นขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย โดยสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขการเคลือบ เช่น กำลังไฟฟ้า, เวลาเคลือบ, อัตราไหลแก๊สความดันรวม, ความดันย่อย เป็นต้น [12,14-15]

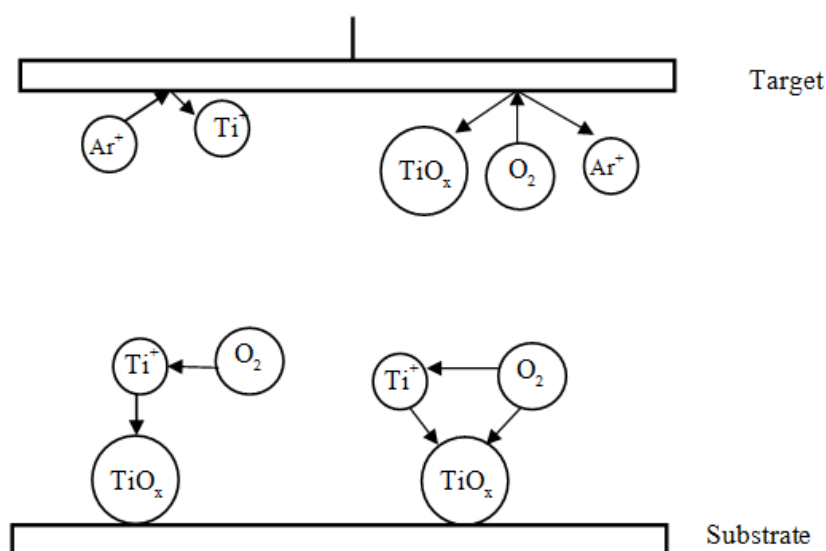
การเคลือบแบบง่ายที่สุดเรียกว่า ระบบเคลือบแบบดีซี สปัตเตอร์ ประกอบด้วยคาโทด คือ แผ่นเป้าและอานอโดใช้เป็นทิวางวัสดุพื้น โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุพื้นจะอยู่ระหว่าง 4 ถึง 10 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยอัตราการสปัตเตอร์จะขึ้นกับผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณอีออนที่วิ่งชนเป้า ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์นั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณอีออนที่วิ่งชนเป้าซึ่งในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ปกติจะทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด หรือเพิ่มความดัน โดยมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1 \text{ mA/cm}^2$  และความดันประมาณ  $1.33 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ นอกจากนี้พบว่าในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% และยังมีข้อเสียคือเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย ต่อมามีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ [20,21,25] ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าและ

มีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสputtering สูงขึ้นด้วย แต่สำหรับการเคลือบด้วยวิธีนี้ถ้ามีการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (defects) ภายในเกรนของฟิล์มมากขึ้น จะส่งผลให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุพื้นลดลงแต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอานาลานซ์แมกนีตรอน สputtering (Unbalanced Magnetron Sputtering) [25] คือการทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่ง โดยจัดแม่เหล็กของระบบซึ่งแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก, กลับกัน หรือใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุพื้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติจึงมีผลทำให้คุณภาพของฟิล์มดีขึ้น

หากพิจารณาเปรียบเทียบระบบสputtering ทั้ง 3 แบบ จะพบว่าในกรณีระบบสputtering ปกตินั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับที่คาโทดโดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสputtering เลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสputtering มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสputtering ซึ่งทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็กช่วยจึงเกิดระบบแมกนีตรอน สputtering โดยสนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้น โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสputtering คงอยู่อย่างต่อเนื่อง จากอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้เกิดการไอออไนซ์อะตอมแก๊สเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้าหมายมีลักษณะเป็นการชนแบบซ้าๆ ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาในปริมาณมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสputtering มากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงที่สามารถจะหลุดออกจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้ได้และจะวิ่งเข้าหาขั้วคาโทดโดยทันที ส่วนระบบอานาลานซ์ แมกนีตรอน สputtering นั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดออกจากสนามแม่เหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาชุดที่สองบริเวณผิวหน้าของวัสดุพื้นทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุพื้นมีค่าสูงมากกว่าในระบบแมกนีตรอน สputtering แบบปกติมาก โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มที่เรียกว่า Ion-Assisted Deposition ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีมีความหนาแน่นสูงและมีการยึดติดที่ดีขึ้น [13-16,20,21,25]

## 2.5 การเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยเทคนิครีแอคทีฟ

สำหรับเทคนิครีแอคทีฟ (reactive) ในกระบวนการสปัตเตอริงนั้นเป็นกระบวนการสปัตเตอริงที่มีการป้อนแก๊สทำปฏิกิริยา (reactive gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อเกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนวัสดุพื้น การสปัตเตอริงที่มีเป้าเป็นโลหะบริสุทธิ์และป้อนแก๊สไวปฏิกิริยานั้นจะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ ถ้าป้อนแก๊สอะเซททิลีน ( $C_2H_2$ ) หรือ มีเทน ( $CH_4$ ) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สทำปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ แต่คาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมามีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์แก๊สทำปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สทำปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไทเทเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ตามภาพ ใต้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



ภาพที่ 2.11 แสดงการเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สทำปฏิกิริยากับอะตอมของเป้าที่บริเวณต่างๆ[21]

1. แก๊สทำปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไทเทเนียมที่ผิวหน้าเป้า กลายเป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วถูกสปัตเตอริงให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุพื้น ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง ส่วนถ้าอัตราการสปัตเตอริงต่ำพบว่าการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนเป้า โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สทำปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมไทเทเนียมที่ถูกสปัตเตอริง ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุพื้นแล้วตกเคลือบบนวัสดุพื้น กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้



น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สทำปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจนรวมตัวกับไทเทเนียมบนผิววัสดุพื้น การทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง โดยทั่วไปความดันแก๊สทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการโกลว์ดีสซาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สทำปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยเพื่อรักษาสถานะโกลว์ดีสซาร์จไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราการเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สทำปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide ( $Fe_3O_4$ ) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟสปีดเตอริง ถูกจำกัดในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide ( $Fe_2O_3$ ) แต่ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe) แทน [20,21]

## 2.6 ปัจจัยในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

### 2.6.1 ผลของกำลังไฟฟ้า

M.F.Hossain, S.Biswas และคณะ [22] หาผลของกำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติโพโตแคตาไลติก เนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผลึกนั้นเกิดได้ยาก ต้องมีการป้อนกำลังไฟฟ้าที่สูงจึงจะเกิดได้ โดยเขาใช้กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 500 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่ากำลังไฟฟ้าที่มากกว่า 200 วัตต์ สามารถทำให้เกิดฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอนาเทสได้ และความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมากขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้ามมากขึ้น

### 2.6.2 ผลของค่าความดันย่อยของออกซิเจน

M.Horprathuma, P. Eiamchai และคณะ [23] หาผลของค่าความดันย่อยของออกซิเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีดีซีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยเขาหาค่าความดันย่อยของออกซิเจนในช่วง  $4.8 \times 10^{-4}$  ถึง  $5.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสรูทล์สามารถเกิดได้ที่  $4.8 \times 10^{-4}$  มิลลิบาร์ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสอนาเทสเกิดได้ที่  $5.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ และเมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วย AFM พบว่าที่ค่าความดันย่อยของออกซิเจน  $4.8 \times 10^{-4}$  มิลลิบาร์ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีค่าความหยาบผิว 1.68 นาโนเมตร เนื่องจากที่ค่าความดันย่อยออกซิเจนต่ำๆ นั้น sputtered adatoms มีพลังงานสูง ทำให้โมบิลิตี (mobility) ของอะตอมสูงเพียงพอที่จะทำให้ผิวเรียบ แต่ถ้าเป็นค่าความดันย่อยออกซิเจนสูง  $5.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ จะได้ค่าความหยาบผิว 2.33 นาโนเมตร ผิวฟิล์มที่ได้มีความขรุขระมากกว่าเพราะว่าพลังงานของ sputtered adatoms ลดลง ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่

ของ sputtered adatoms นั้นลดลง ผิวฟิล์มจึงขรุขระและเมื่อนำไปตรวจสอบแบบภาคตัดขวางด้วย SEM พบว่า ฟิล์มที่เคลือบที่ความดันย่อยของออกซิเจน  $1.5 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ มีความหนาประมาณ 135 นาโนเมตรและจากการหา Reflectance Spectra ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectra ที่มุมตกกระทบ 8 องศา สำหรับระนาบในแนวตั้งของฟิล์มพบว่าการเคลือบผิวที่ค่าความดันย่อยออกซิเจนสูงจะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงตามไปด้วย

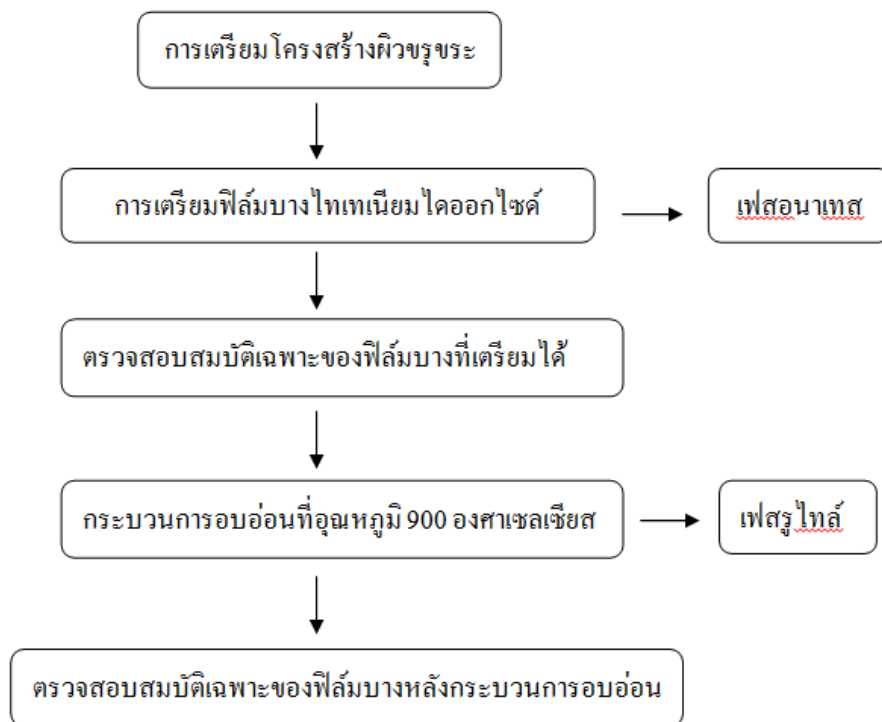
Baoshun Liua, Xiujian Zhao และคณะ [24] หาผลของความดันย่อยออกซิเจนต่อโครงสร้างและสมบัติโฟโตแคตาไลติกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีสปีดเทอริง พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่ความดันย่อยออกซิเจนต่างกันจะให้เฟสที่แตกต่างกัน โดยถ้าความดันย่อยออกซิเจนในช่วง 0.015 ถึง 0.04 มิลลิทอร์ จะให้ระนาบการจัดเรียงผลึก (101) โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส แต่ถ้าค่าความดันย่อยออกซิเจนที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.35 ปาสคาล ขนาดเกรนจะลดลงตาม Scherrer's Formula มาอยู่ในช่วง 30 ถึง 37 นาโนเมตรด้วย แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนหรือการอบอ่อนหลังการเคลือบก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่เกิดเช่นกัน

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ (1) การเตรียมผิววัสดุพื้น โดยการสร้างโครงสร้างผิวขรุขระในสารละลายต่างและหาสมบัติของวัสดุพื้นเตรียมได้ (2) การเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนบนวัสดุพื้นซิลิกอนด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริงและหาสมบัติของฟิล์มบางชั้นกันสะท้อนที่เตรียมได้

#### 3.1 แผนผังงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังงานดำเนินงานวิจัย

3.1.1 การเตรียมผิววัสดุพื้น โดยการสร้างผิวขรุขระในสารละลายต่างและหาสมบัติของของวัสดุพื้นที่เตรียมได้

3.1.1.1 การเตรียมผิววัสดุพื้นด้วยสารละลายต่าง

3.1.1.2 การหาสมบัติของวัสดุพื้นที่เตรียมได้

- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นด้วยเทคนิค SEM
- หาค่าความหยาบผิวหยาบของวัสดุพื้นด้วยเทคนิค AFM
- หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

3.1.2 การเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนบนวัสดุพื้นด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริงและหาสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.1.2.1 การเคลือบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนบนวัสดุพื้น

3.1.2.2 การหาสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนที่เตรียมด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

- ตรวจสอบภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนด้วยเทคนิค FESEM
- ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนด้วยเทคนิค XRD
- หาค่าความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนด้วยเทคนิค AFM
- หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

### 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุพื้น

วัสดุพื้น (substrate) ที่ใช้ในการทดลอง คือ แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ชนิดพี (silicon wafer, p-type) ที่มีระนาบการจัดเรียงตัวของผลึก(orientation) (400) ความหนา 280  $\mu\text{m}$  เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว สภาพต้านทานไฟฟ้า 100 โอห์ม.เซนติเมตร โดยจะสร้างผิวขรุขระและเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริง (dc unbalanced magnetron sputtering) แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์จะถูกนำไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละอองหรือคราบไขมันต่างๆที่ผิวของแผ่น โดยนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ไปอูลตราโซนิคด้วยอะซิโตน (acetone) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นไปอูลตราโซนิคด้วยน้ำปราศจากไอออน (de-ionized water) เป็นเวลาอีก 15 นาที สุดท้ายล้างผ่าน (rinse) ด้วยเอทานอลจำนวน 5 ครั้ง ก่อนนำมาเป่าแห้งด้วยลมเย็น ทั้งนี้ตลอดการทดลองจะใช้ปากคีบสำหรับคีบชิ้นงานทุกครั้งเพื่อกำจัดคราบน้ำมือจากการสัมผัสชิ้นงาน

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างผิวขรุขระ

การเตรียมโครงสร้างผิวขรุขระด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) เป็นวิธีที่ทำให้ได้วัสดุพื้นที่มีลักษณะเป็นรูปผลึกพีระมิด วิธีนี้จะใช้ส่วนผสมในกลุ่มอัลคาไลน์ (alkaline) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยมีหน้าที่กัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ทำให้แต่ละระนาบมีอัตราการกัดที่แตกต่างกัน กลุ่มอัลคาไลน์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) รวมไปถึง EPD หรืออาจเรียกว่า EPW ซึ่งเป็นส่วนผสมของ ethylenediamine, pyrocatecol และน้ำ แต่ก็มีส่วนละลายอัลคาไลน์อื่นๆ เช่น  $\text{NH}_4\text{OH}$ ,

Hygraxine, Ethanolamine, Tetremethyl Ammonia Hydroxide (TMAH) ซึ่งการนำส่วนผสมชนิดต่าง ๆ มาใช้งานนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นที่สำคัญประกอบด้วย เช่น อัตราการกัด, การเลือกกัดแบบ แอนไอโซทรอปิก, คุณภาพของผิว, กระบวนการที่สามารถควบคุมได้, ความปลอดภัย, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต้นทุนของสารละลาย สารละลาย EPD นั้น อยู่ในกลุ่มอัลคาไลน์ที่มีคุณสมบัติ 3 แบบที่ดีสำหรับการกัดขนาดไมโคร และยังสามารถใช้ได้กับผิววัสดุพื้นได้หลายชนิด แต่ถ้าเป็นกรณีที่วัสดุพื้นมีการเจือสาร (dopping) สารละลาย EPD จะให้ผลการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกที่ต่ำกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่มาก สำหรับข้อดีของการใช้ส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นคือ ต้นทุนต่ำกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, TMAH และไม่เป็นพิษสมบัติเด่นของการกัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือจะให้คุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกได้โดยธรรมชาติ โดยมีอัตราการกัดเปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงตัวของผลึก (orientation) ของวัสดุพื้น [6]

สารละลายที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างผิวขรุขระถูกเตรียมโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มาทำปฏิกิริยากับสารละลายระหว่าง น้ำปราศจากไอออน (de-ionized Water) กับ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol: IPA) อัตราส่วน 2:1 คงที่ โดยในที่นี้ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่เติมลงไปเพื่อลดความเป็นด่าง, ทำให้อัตราการกัดลดลง และทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดฟองไฮโดรเจนไม่ให้มีมากเกินไปหรือกำจัดฟองไฮโดรเจนให้ออกจากผิวซิลิกอนเวเฟอร์ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของผลึกรูปพีระมิดสม่ำเสมอและขนาดของผลึกรูปพีระมิดมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังช่วยให้พีระมิดมีความแหลมคมมากขึ้นด้วย [5] ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ส่วนผสมคือน้ำปราศจากไอออน 37.5 มิลลิลิตร, ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 12.5 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม แล้วนำมาคนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วซึ่งทำภายในตู้ดูดควัน รองนสารละลายเย็นตัว นำสารละลายและชิ้นงานใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตั้งบนเครื่องกวนและแปรผันตัวแปรตามเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตาเผาแล้วล้างสารละลายออกจากแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์โดยการนำไปถูด้วยน้ำปราศจากประจุ (de-ionized water) เป็นเวลา 60 นาที แล้วล้างผ่าน (rinse) ด้วยเอทานอลจำนวน 5 ครั้ง สูดท้ายเป่าแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ให้แห้งด้วยลมเย็น

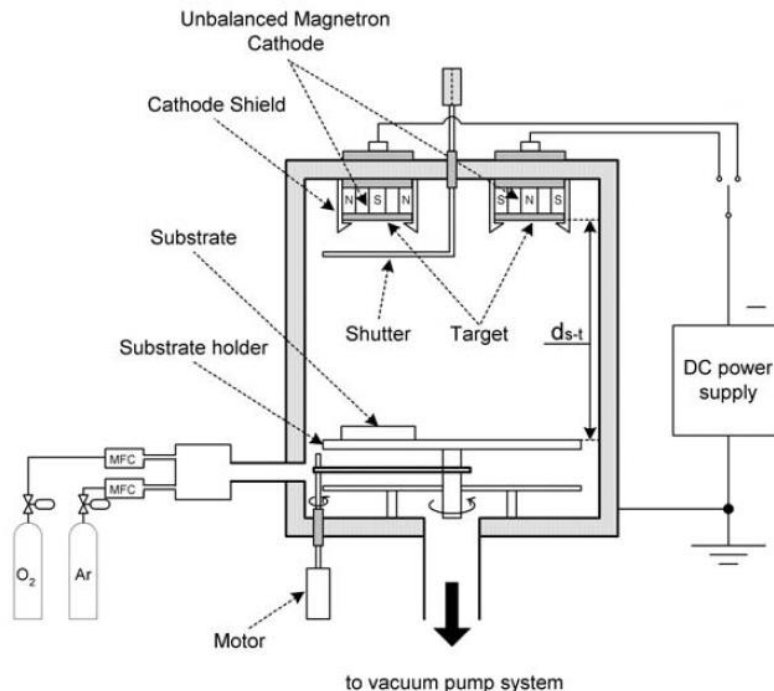
### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุพื้นก่อนการเคลือบฟิล์มบาง

วัสดุพื้นที่ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้คือ ซิลิกอนเวเฟอร์ วัสดุพื้นนี้ก่อนนำมาเคลือบฟิล์มจะต้องทำความสะอาดสิ่งสกปรก เช่น คราบฝุ่นไขมัน สารอินทรีย์ต่างๆ เพื่อให้ได้ผิววัสดุพื้นที่สะอาด ทำให้ฟิล์มที่เคลือบติดแน่นลงบนผิวหน้าของวัสดุพื้น สำหรับการทำความสะอาดวัสดุพื้นเริ่มจากนำวัสดุพื้นไปล้างด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) โดยใช้อุลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยอะซิโตน

(acetone) โดยใช้อุลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปล้างต่อด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ โดยใช้อุลตราโซนิกอีก 10 นาที นำวัสดุพื้นขึ้นด้วยปากคีบ เป่าด้วยลมเย็นจนแห้ง จากนั้นนำวัสดุพื้นใส่เข้าไปในภาชนะสุญญากาศเพื่อรอการเคลือบ

### 3.5 ขั้นตอนการเคลือบผิวฟิล์มบางด้วยวิธีดีซี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษานี้เตรียมขึ้นจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบ ดีซี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (Homemade DC unbalanced magnetron sputtering) ด้วยเทคนิครีแอคทีฟ สปัตเตอริง โดยเครื่องเคลือบที่ใช้ในการศึกษามีห้องเคลือบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310.0 มิลลิเมตร สูง 370.0 มิลลิเมตร ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูงเป็นแก๊สทำงาน ใช้แก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงเป็นแก๊สทำปฏิกิริยา ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร์โอมิเครื่องสูบลกล โรตารีเป็นเครื่องสูบลทำย การวัดความดันในห้องเคลือบใช้มาตรวัดความดันของ PFEIFFER ประกอบด้วยชุดแสดงผล รุ่น TPG262 Dual Gauge และหัววัดแบบช่วงกว้าง รุ่น PKR251 Compact Full Range Gauge ในส่วนของ การจ่ายแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยตัวควบคุมการไหลของมวล (mass flow controller) ของ MKS type247D



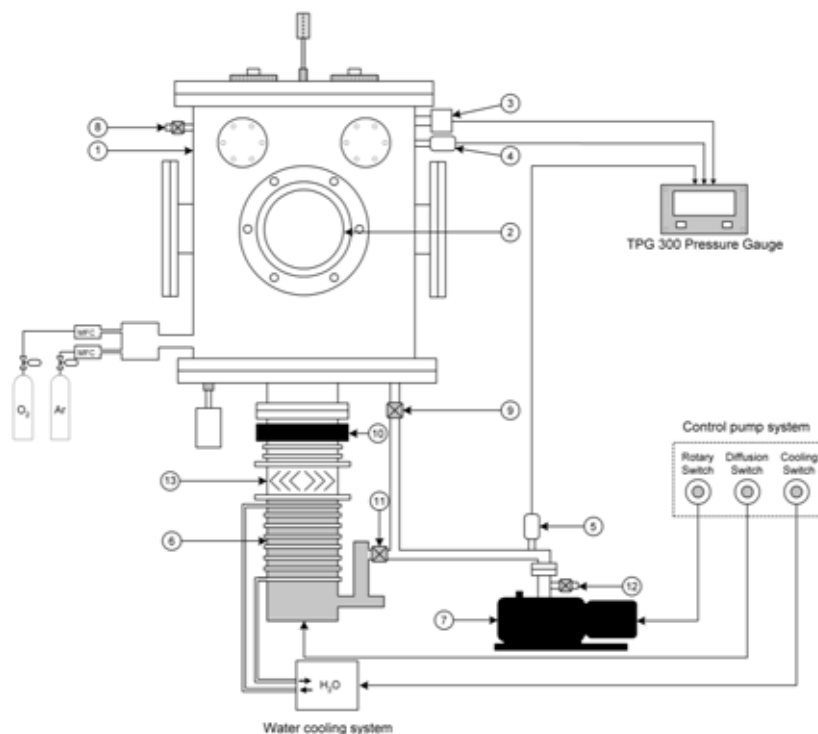
ภาพที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบหลักของระบบการเคลือบของเครื่องเคลือบ [25]



ภาพที่ 3.3

แสดงเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย

- (ก) ลักษณะของเครื่องทั้งระบบ
- (ข) ภาชนะสุญญากาศ (ห้องเคลือบ)
- (ค) ลักษณะภายในภาชนะสุญญากาศ (ห้องเคลือบ)
- (ง) แผ่นปิดบนติดตั้งคาโทดขนาด 2 นิ้ว
- (จ) ทรานคิวเซอร์สำหรับจ่ายแก๊สและแก๊สที่ใช้
- (ฉ) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ
- (ช) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ



ภาพที่ 3.4 แสดงไดอะแกรมระบบเครื่องสูบลูญากาศของระบบเคลือบสปีดเตอริง[25]

- |                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| 1. ภาชนะสุญญากาศ            | 8. วาล์วปล่อย        |
| 2. หน้าต่าง                 | 9. วาล์วหยาบ         |
| 3. มาตรวัดความดันแบบเพนนิ่ง | 10. วาล์วสุญญากาศสูง |
| 4. มาตรวัดความดันแบบพิรานี  | 11. วาล์วท้าย        |
| 5. มาตรวัดความดันแบบพิรานี  | 12. วาล์วปล่อย       |
| 6. เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ     | 13. แบริ่งเฟิล       |
| 7. เครื่องสูบลโรตารี        |                      |

### 3.5.1 ขั้นตอนการสร้างภาวะสุญญากาศ

1. ตรวจสอบเช็ควาล์วหยาบ (หมายเลข 8), วาล์วท้าย (หมายเลข 10) และวาล์วสุญญากาศสูง (หมายเลข 9) ให้อยู่ในสภาพปิดทั้งหมด
2. เปิดสวิตช์หลัก เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบต่าง ๆ ของเครื่อง เช่น ระบบวัดความดันและระบบควบคุมการทำงานของระบบเครื่องสูบลูญากาศ เป็นต้น หลังจากนั้นเปิดสวิตช์โรตารี เพื่อให้เครื่องสูบลโรตารี (หมายเลข 6) ทำงาน
3. ทำการสูบลอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (หมายเลข 5) โดยใช้เครื่องสูบลโรตารี โดยเปิดวาล์วท้าย เพื่อให้เครื่องสูบลโรตารี สูบลอากาศออกจากเครื่องสูบลแบบแพร่ไอจนความดันในเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ เมื่ออ่านจากหัวอ่านแบบช่วงกว้าง (หมายเลข 3) มีค่าน้อยกว่า  $10^{-2}$



มิลลิบาร์ ซึ่งเป็นความดันที่เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ สามารถทำงานได้ พร้อมทั้งเปิดสวิตช์แบบแพร่ไอ (diffusion) เพื่อให้ตัวทำความร้อนของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ทำงานเป็นการเริ่มต้มน้ำมัน ใช้ประมาณ 20 นาที

4. ในระหว่างการต้มน้ำมันนำวัสดุพื้นที่ต้องการเคลือบวางในภาชนะสุญญากาศโดยก่อนวางวัสดุพื้นต้องตรวจความดันในภาชนะสุญญากาศ ยังคงอยู่ในสถานะเป็นสุญญากาศหรือไม่ ถ้ายังเป็นสุญญากาศ ก็เปิดวาล์วปล่อย เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศเท่ากับความดันบรรยากาศ หลังจากนั้นเปิดฝาครอบภาชนะสุญญากาศออก นำวัสดุพื้นที่ต้องการเคลือบวางบนแท่น ปิดฝาครอบและปิดวาล์วปล่อย (หมายเลข 7) ให้สนิท

5. สร้างสถานะสุญญากาศขั้นต้นในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบกกลโรตารีโดยการปิดวาล์วท้าย แล้วเปิดวาล์วหยาบเพื่อให้เครื่องสูบกกลโรตารีสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศ มีค่าประมาณ  $10^{-2}$  มิลลิบาร์ เมื่ออ่านความดันจากหัวอ่านแบบช่วงกว้าง

6. เมื่อต้มน้ำมันจนครบ 20 นาที ทำการสร้างสถานะสุญญากาศสูงในภาชนะสุญญากาศด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยปิดวาล์วหยาบ แล้วเปิดวาล์วท้าย หลังจากนั้นเปิดวาล์วสุญญากาศสูง เพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อทำความดันในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับสถานะสุญญากาศสูง หรืออยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-6}$  มิลลิบาร์

7. จับเวลาและรอนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $3 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความดันพื้น (base pressure) ก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3.5.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง

1. ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศโดยเก็บเศษฝุ่นผง และเช็ดทำความสะอาดคราบสกปรกภายในที่เกิดขึ้นขณะสปีดเตอร์ในครั้งที่ผ่านมามีออกให้หมดด้วยยาขัด โลหะ (Wenol) เช็ดซ้ำด้วยอะซิโตนจนคราบสกปรกหมดแล้วเช็ดตามด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ใช้ลูมิเนียมฟอยล์บุผนังด้านในภาชนะสุญญากาศ เพื่อป้องกันคราบ ติดตามผนังขณะสปีดเตอร์

2. เปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็น และระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อระบายความร้อนของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump : DF) และขั้วลบ (cathode) ขณะทำการสปีดเตอร์

3. นำวัสดุพื้นที่ต้องการกระบวนการทำความสะอาดแล้วเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมาวางที่แท่นวางวัสดุพื้นเป็นขั้วบวก (anode) และติดตั้งเป้าไทเทเนียม (99.97%) เส้นผ่าศูนย์กลาง 54.0 มิลลิเมตร ที่คาโทด จากนั้นกำหนดระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุพื้นเริ่มต้นเป็น 10 เซนติเมตร ก่อนทำการสปีดเตอร์ต้องปิดเป้าด้วยชัตเตอร์ (shutter) แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท

4. สเป็คเตอร์หน้าเป้า (pre-sputtering) ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนประมาณ 10 นาที และปิดแผ่นบัง (shutter) ที่ติดตั้งระหว่างเป้ากับแท่นวางวัสดุพื้น

5. ลดความดันในภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันพื้น เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ แล้วปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศด้วยตัวควบคุมการไหลของมวล เพื่อทำการเคลือบ สำหรับเงื่อนไขการเคลือบแต่ละครั้งต้องกำหนดอัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน และควบคุมความดันรวมขณะเคลือบเริ่มต้น (total pressure) เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์

6. เปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หมุนปรับเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า จนเกิดการโกลว์ดีจชาร์จ แล้วปรับกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ

7. นำฟิล์มออกจากภาชนะสุญญากาศ และตรวจสอบสมบัติต่างๆต่อไป

### 3.6 กระบวนการอบอ่อน

จากหัวข้อที่ 2.3 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกชนิดต่างๆของไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมธาตุผสม, การเปลี่ยนแปลงความดัน และ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วที่สุดสำหรับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านกระบวนการอบอ่อนซึ่งใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดลองใช้เวลาอบอ่อนเป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะนำไปตรวจสอบเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์

### 3.7 การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน

ลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางสามารถหาได้จากเทคนิคต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จะหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางต่อไปนี้ โครงสร้างผลึก, ลักษณะพื้นผิว และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

#### 3.7.1 การหาโครงสร้างผลึก

การหาโครงสร้างผลึกสามารถหาได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD, Rigaku รุ่น Rint 2000 และ D8-Advance, Bruker AXS Model D8 Discover) โดยจะใช้ Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่ 40 กิโลวัตต์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ แล ทำการวิเคราะห์จากตำแหน่ง 20 ถึง 60 องศา ด้วยอัตราสแกน 0.02 องศาต่อวินาที สเปกตรัมที่วัดได้จะบันทึกอยู่ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับมุม 2 theta ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดกับมาตรฐานอ้างอิงของแฟ้ม JCPDS เพื่อหารูปแบบโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ต่อไป

### 3.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในลักษณะสามมิติสามารถทำได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM; JEOL รุ่น JSM 6400)

### 3.7.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและการหาความหนาของชั้นงาน

วัสดุที่ผ่านการกัดด้วยสารละลายต่างจะนำไปวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope ที่มีความละเอียดในการในระดับนาโนและใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 1x1 ตารางไมครอน พร้อมทั้งวัดค่าความขรุขระและหาความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM)

### 3.7.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจะใช้เทคนิค Integrating Sphere ร่วมกับเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) เนื่องจากถ้าเป็นวัสดุที่มีสีหรือลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านที่แตกต่างกันด้วย ถ้าวัสดุทึบแสงมีพื้นผิวที่เงามัน เมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการสะท้อนแสงกลับที่มีทิศทางเดียว เรียกว่า Specular Reflection ซึ่งมีมุมสะท้อนเท่ากับมุมกระทบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวของวัสดุ แต่ถ้าผิวของวัสดุทึบแสงนี้ไม่เรียบมีผิวขรุขระจะเกิดการกระเจิงแสงเกิดขึ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Diffusion Reflection แต่ส่วนวัสดุที่โปร่งแสงจะเรียกว่า Diffusion Transmission ในกรณีของวัสดุโปร่งใสเช่นกระจก จะเกิดการทะลุผ่านของแสงเรียกว่า Regular Transmission ลักษณะของแสงสามารถวัดออกเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของการสะท้อนแสงที่ส่องผ่านเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ถ้าผิวไม่เรียบนั้นผลที่ได้จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากผิวของวัสดุทำให้เกิดการหักเหและเบี่ยงเบนลำแสงที่ตกลงบนตัวรับแสงในตำแหน่งที่ต่างกันและเพิ่มจำนวนการหักเหแสงในระบบทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ใช่ค่าการสะท้อนแสงหรือการส่งผ่านแสงที่แท้จริง ดังนั้นการใช้ Integrating Sphere เป็นวิธีที่สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียของแสงที่หักเหหรือกระเจิงออกไปได้ ซึ่งในลักษณะนี้เราอาจเรียกว่า Hemispherical Reflectance โดย Integrating Sphere เป็นอุปกรณ์ประกอบในการวัดการสะท้อนหรือส่งผ่านแสง ซึ่งภายในมีลักษณะเป็นทรงกลมเคลือบด้วยวัสดุสีขาวเพื่อให้เกิดการกระจายแสงที่ดี ทรงกลมนี้มีช่องเปิดเพื่อให้แสงเดินทางเข้าและออก การวัดการสะท้อนแสงด้วย Integrating Sphere เป็นการวัดการสะท้อนแสงของวัตถุโดยไม่คิดผลของความมันและลักษณะของผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่าการสะท้อนแสงจะคิดออกมาเป็นร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (% reflectance) โดยจะเลือกวัดแบบ Specular Excluded Mode ซึ่งเป็นการวัดแสงสะท้อนแบบกระจายหรือ diffuse เพียงอย่างเดียว ส่วนลำแสงสะท้อนกลับตรง (specular) จะถูกแยกออกด้วยชุด

Specular Light Trap หรือ Gloss Trap ซึ่งเป็นช่องสำหรับให้แสงชนิดนี้ ออก โดยถ้าผิวมีความหยาบ นั้นจะทำให้แสง specular มีมุมสะท้อน โตกว่ามุมตำแหน่งของช่อง [6]

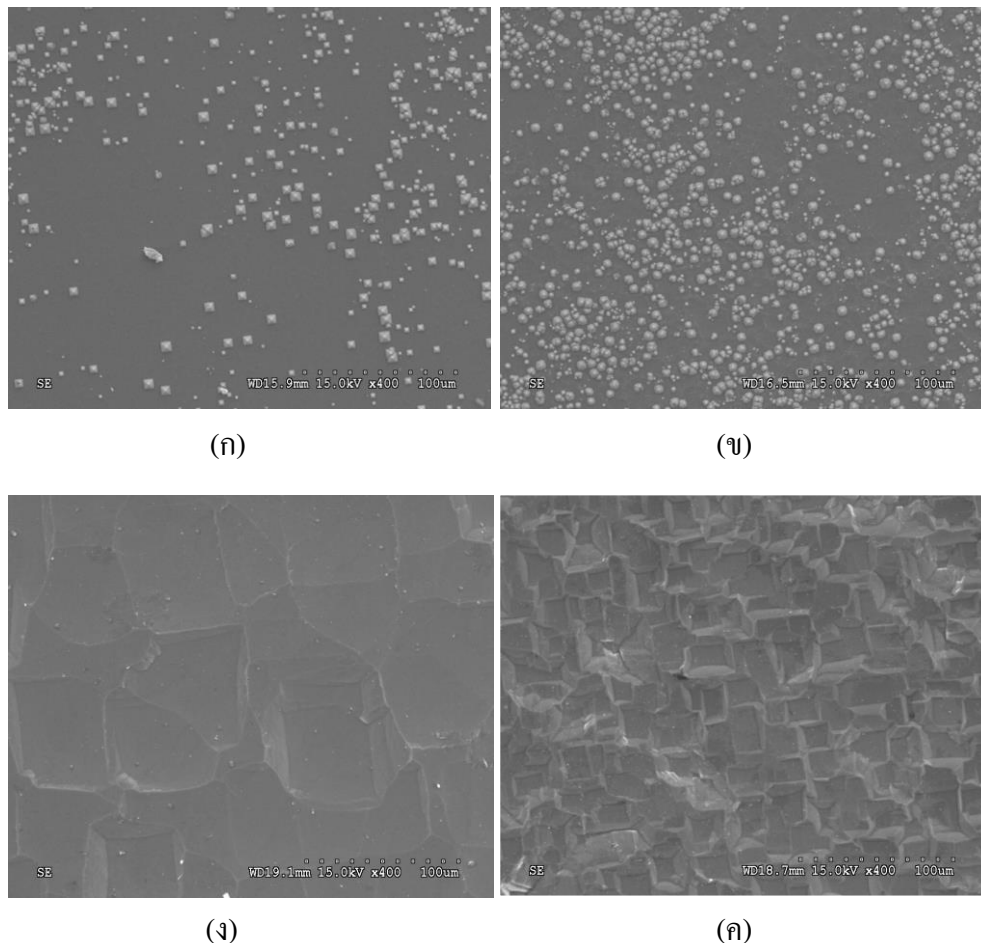
## บทที่ 4

### ผลวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

#### 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

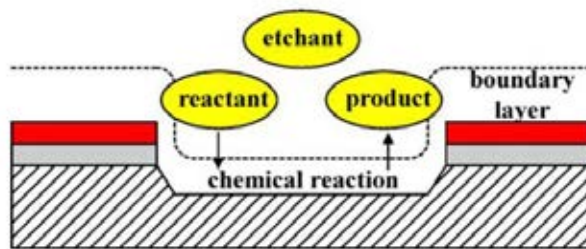
##### 4.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

ความเข้มข้นของสารละลายคือตัวแปรที่มีความสำคัญในกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก จากภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกไม่มีการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสภายในเตา ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นไม่เท่ากันโดยภาพที่ 4.1 (ก) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ พบผลึกรูปพีระมิดเกิดขึ้นกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ภาพที่ 4.1 (ข) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ พบผลึกรูปพีระมิดเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.1 (ก) แต่ความหนาแน่นมากขึ้น ภาพที่ 4.1 (ค) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ไม่พบผลึกรูปพีระมิด แต่วัสดุพื้นซิลิกอนมีลักษณะพื้นผิวเป็นแอ่งสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ และภาพที่ 4.1 (ง) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20 โมลาร์ ไม่พบผลึกรูปพีระมิด แต่วัสดุพื้นซิลิกอนมีลักษณะพื้นผิวเป็นแอ่งสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก แสดงให้เห็นว่าในกรณีกระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำมีแนวโน้มการเกิดผลึกรูปพีระมิดที่ดีกว่ากรณีกระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง



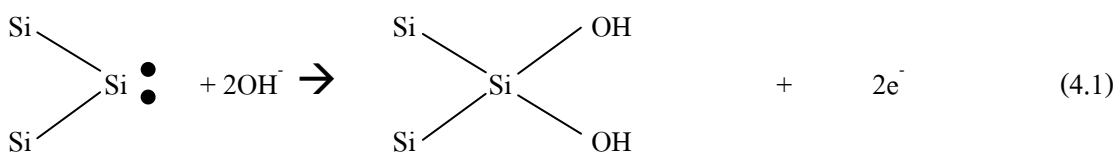
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ; (ก) ความเข้มข้น 5 โมลาร์, (ข) ความเข้มข้น 10 โมลาร์, (ค) ความเข้มข้น 15 โมลาร์, (ง) ความเข้มข้น 20 โมลาร์

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความหนาแน่นของการเกิดผลึกรูปพีระมิด โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการกัดผิวจะเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งในกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก โซเดียมไอออนจะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นไอออนที่ไม่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการกัดผิว [6,35] และกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 4.2 คือ 1) การซึมผ่าน Boundary Layer ของสารกัด (etchant) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และแพร่เข้าสู่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอน 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำปฏิกิริยา (reactant) กับ ซิลิกอนอะตอมที่ผิวบน และ 3) การแพร่ของผลิตภัณฑ์ทางปฏิกิริยาเคมี (reaction product) [30]

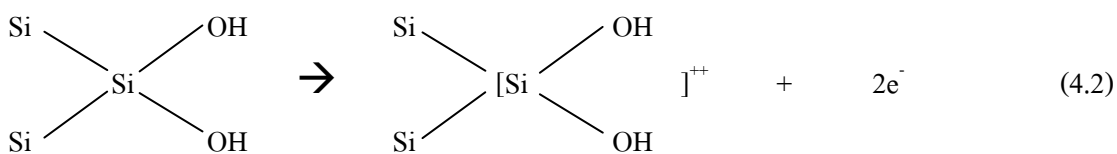


ภาพที่ 4.2 กลไกในระหว่างกระบวนการกัดผิวแบบแอนไอโซทรอปิก [30]

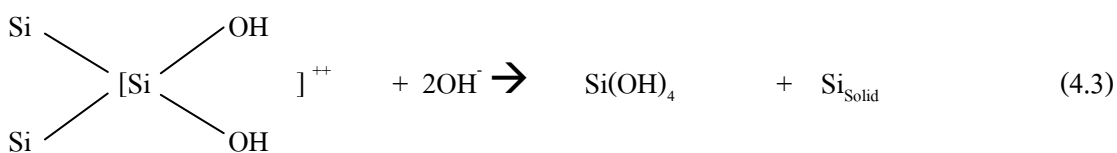
สำหรับวัสดุพื้นซิลิกอนระหว่างกระบวนการกัดผิวในสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ การกัดผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ในขั้นตอนออกซิเดชัน (oxidation step) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนอะตอมที่ผิวบน [32,40]



ไฮดรอกไซด์ไอออนทำหน้าที่ในการเป็น Catalyst Spectator เข้าแทนที่ตำแหน่งพันธะที่แขวนขาด (dangling bond) ในซิลิกอนอะตอม ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะไปอยู่ในแถบพลังงานนำกระแส (conduction band) และ Silicon Hydroxide ที่ได้จะเปลี่ยนรูปเป็น Silicon Hydroxide Complex



เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนออกซิเดชันจะต่อด้วยขั้นตอนปฏิกิริยาเคมี (chemical step) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เป็นกระบวนการกัดผิวโดยแท้จริง เมื่อสารละลายเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมซิลิกอนที่ผิวบน ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และมีสมบัติเป็น Activate Etching จะเข้าทำลายพันธะอะตอมซิลิกอนที่ผิวบน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนปฏิกิริยาเคมี เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ทางปฏิกิริยาเคมี คือ Si(OH)<sub>4</sub> ที่เรียกว่า กรดออร์โทซิลิซิก (orthosilicic acid) และอะตอมซิลิกอนหลุดออกจากผิว



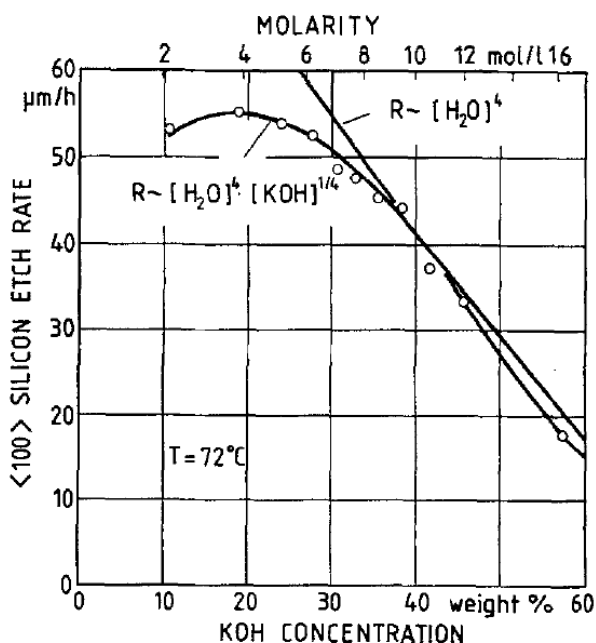
ภายหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนปฏิกิริยาเคมีแล้วผลิตภัณฑ์ทางปฏิกิริยาเคมีจะแพร่ผ่านกลับเข้าไปยังสารละลาย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเป็นเบสสูงกว่าบริเวณอื่น ต่อมา  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ก็จะเกิดการสลายตัวกลายเป็นซิลิเกตในรูป  $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$  และ  $2\text{H}^+$  อยู่ในสารละลาย



ซึ่ง  $2\text{H}^+$  สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้เป็นโมเลกุลน้ำ



เมื่อรวมทุกสมการในขั้นตอนออกซิเดชันและขั้นตอนปฏิกิริยาเคมีจะเห็นว่า การทำลายพันธะอะตอมซิลิกอน 1 อะตอมโดยสมบูรณ์จะใช้ทั้งโมเลกุลน้ำอิสระและโมเลกุลของไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Irena Zubel [32] ที่ศึกษาอัตราการกัดผิววัสดุพื้นซิลิกอนในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับอัตราการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [32]

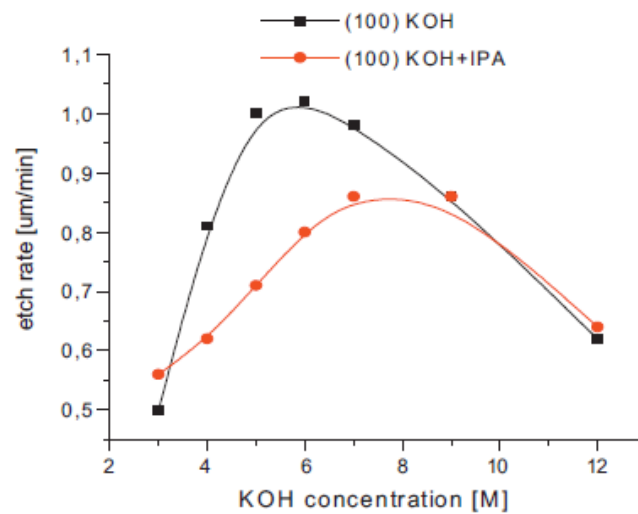
$$R = k_0 [\text{H}_2\text{O}_{\text{free}}]^4 [\text{OH}_{\text{free}}]^{1/4} e^{-E_a/kT} \quad (4.6)$$

โดยจากการทดลองได้พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดผิวกับความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำอิสระและไฮดรอกไซด์ไอออนดังสมการที่ 4.6 จะเห็นว่าอัตราการกัดผิววัสดุพื้นซิลิกอนขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำอิสระและความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน โดยน้ำเป็น Activate Species ที่มีส่วนในกระบวนการกัดผิว ส่วนไฮดรอกไซด์ไอออนทำหน้าที่แทนที่ตำแหน่ง



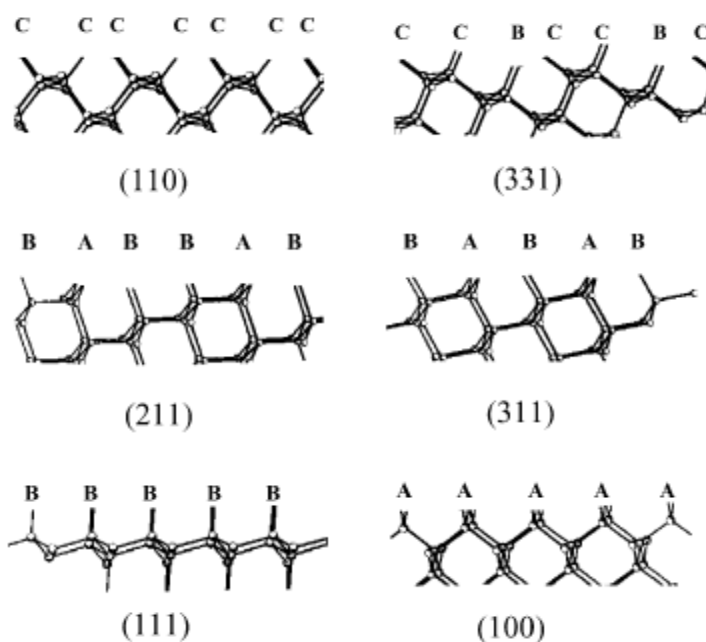
พันธะที่แขนขาในขั้นตอนออกซิเดชันและเข้าทำลายพันธะอะตอมซิลิกอนที่ผิวบนในขั้นตอนปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้การใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการกัดผิวยังให้ผลเช่นเดียวกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงอัตราการกัดผิวซิลิกอนในสารละลายทั้งสองชนิดจะให้ค่าสูงเฉพาะบางความเข้มข้นเท่านั้น [35] ซึ่งในกระบวนการกัดผิวซิลิกอนในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นสามารถใช้แบบจำลองอัตราการกัดผิว  $[OH]^\alpha [H_2O]^\beta$  เหมือนกันสำหรับอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัดได้ เนื่องจากทั้งโซเดียมและโพแทสเซียมเป็นอัลคาไลน์หมู่หนึ่ง เมื่อประกอบกับไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์จะได้เบสแก่ทั้งคู่โดยถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในจำนวนโมลที่เท่ากันจะทำให้เมื่อละลายน้ำแล้วสามารถแตกตัวได้สมบูรณ์เป็นอัลคาไลน์ 1 โมล และไฮดรอกไซด์ไอออน 1 โมลเท่ากัน อีกทั้งโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนเป็นไอออนธาตุเบาและมีรัศมีอะตอมขนาดเล็ก ดังนั้นอัลคาไลน์ไอออนทั้งสองชนิดนี้จึงไม่มีส่วนในกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโอโทรปิก ฉะนั้นผลของกระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จึงมาจากไฮดรอกไซด์ไอออนและโมเลกุลน้ำอิสระเท่านั้น จากผลการทดลองภาพโครงสร้างทางจุลภาคจะเห็นว่ากรณีกระบวนการกัดผิวในไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำจะให้อัตราการกัดผิวที่ต่ำ แต่ในกรณีกระบวนการกัดผิวที่ใช้ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงจะทำให้ความเข้มข้นโมเลกุลน้ำอิสระ ( $[H_2O_{free}]$ ) ลดลงเนื่องจากต้องใช้โมเลกุลน้ำในการละลายอัลคาไลน์เพื่อให้เกิดการแตกตัว [6] ดังนั้นอัตราการกัดผิวจึงต่ำเช่นกัน แต่กรณีกระบวนการกัดผิวที่ใช้ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นปานกลาง ทำให้มีทั้งโมเลกุลน้ำอิสระเหลือและไฮดรอกไซด์ไอออนที่มากเพียงพอจึงทำให้ได้อัตราการกัดผิวที่เหมาะสม

ส่วนไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่เติมในส่วนผสมการกัดจะมีส่วนช่วยในการลดแรงตึงผิวระหว่างสารละลายและผิววัสดุพื้น จึงทำให้แนวโน้มความสัมพันธ์ของอัตราการกัดผิวกับความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงทิศทางเดิม โดยในงานวิจัยของ Irena Zubel [38] ที่ศึกษาการกัดผิววัสดุพื้นซิลิกอนในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 40°C ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ได้รายงานผลการทดลองดังภาพที่ 4.4 ระบุว่าลักษณะแนวโน้มของการกัดผิวซิลิกอนในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 40°C ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์มีแนวโน้มเหมือนการกัดผิวซิลิกอนในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แต่การเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จะแสดงการลดลงของอัตราการกัดผิวตลอดทุกความเข้มข้นเนื่องจากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำและแอลกอฮอล์ (alcohol-water phenomena) [38] เพื่อช่วยในการลดแรงตึงผิว



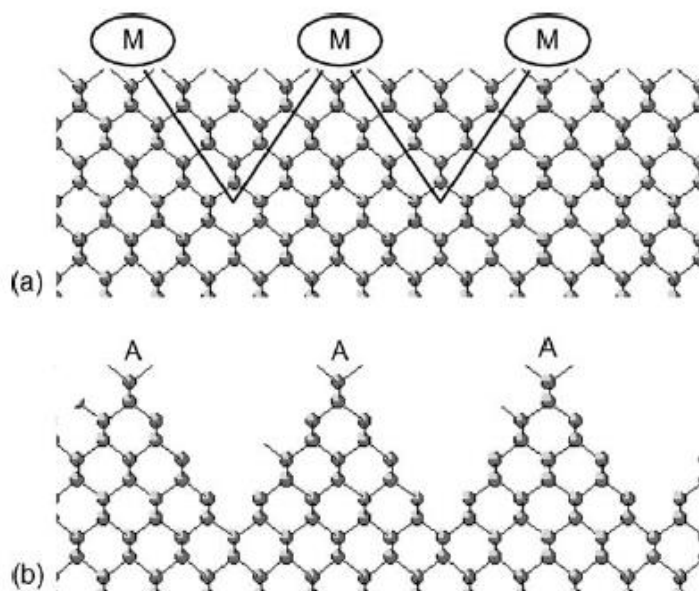
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดผิวกับความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [38]

ลักษณะการเกิดผลึกรูปพีระมิดในกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกสามารถอธิบายได้จาก Electrochemical Corrosion ในส่วนของ Selectivity of Solution กล่าวคือการจัดเรียงตัวผลึกในระนาบ (orientation) ที่แตกต่างกัน จะทำให้อัตราการกัดผิวที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากการเลือกทำปฏิกิริยา ซึ่งอัตราการกัดผิวในแต่ละระนาบจะแปรผันตามความหนาแน่นของอะตอมร่วมประสาน (co-ordinated atom) ที่ตำแหน่งผิวบน (surface site) ของวัสดุพื้นซิลิกอน โดยรูปแบบการจัดเรียงอะตอมที่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในการแตกพันธะเรียงจากเร็วไปช้าได้ดังนี้ SM (Step Monohydrides), SD (Step Dihydrides) > TD (Terrace Dihydrides) > TM (Terrace Monohydrides) [31,40,41] ซึ่งวัสดุพื้นซิลิกอนระนาบ (100) เป็นระนาบที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่เกาะกับซิลิกอนอะตอม 2 ตัว ส่วนที่ผิวบนสุดของวัสดุพื้นซิลิกอนมีจัดเรียงอะตอมแบบ TD ซึ่งการจัดเรียงอะตอมแบบ TD เป็นการจัดเรียงอะตอมชนิดที่ไม่มี พันธะที่ผิว (surficial bond) หรือเรียกว่าการจัดเรียงอะตอมชนิด A ดังภาพที่ 4.5 โดยกระบวนการกัดผิวจะสิ้นสุดเมื่ออัตราการกัดของระนาบ (hkl) น้อยกว่าอัตราการกัดของระนาบ (100) [31,34,40] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระนาบ (100) กับระนาบ (111) แล้วพบว่าระนาบ (100) เป็นระนาบที่มีระยะห่างระหว่าง 2 ระนาบที่อยู่ติดกันมาก จึงทำให้ความหนาแน่นพันธะโควาเลนต์ของอะตอมต่ำ ดังนั้นการแตกของพันธะตลอดแนว (100) เกิดได้ง่าย แต่ระนาบ (111) เป็นระนาบที่ผิวบนมีการจัดเรียงตัวของอะตอมชนิด TM ซึ่งมีพันธะที่ผิวจัดเรียงอะตอมชนิด B ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งมีอัตราการแตกพันธะช้าที่สุด จึงทำให้ระนาบ (111) เป็นระนาบที่มีอัตราการกัดผิวช้าที่สุด ฉะนั้นเมื่อกัดผิวแล้วมาชนกับด้านข้างพีระมิดที่มีระนาบ (111) จึงทำให้อัตราการกัดผิวน้อยกว่าอัตราการกัดผิวที่ด้านล่างของพีระมิดที่เป็นระนาบ (100) กระบวนการกัดผิวจึงหยุด



ภาพที่ 4.5 การจัดเรียงพื้นระนาบผิววัสดุพื้นซีลิกอนบนระนาบต่างๆ [31]

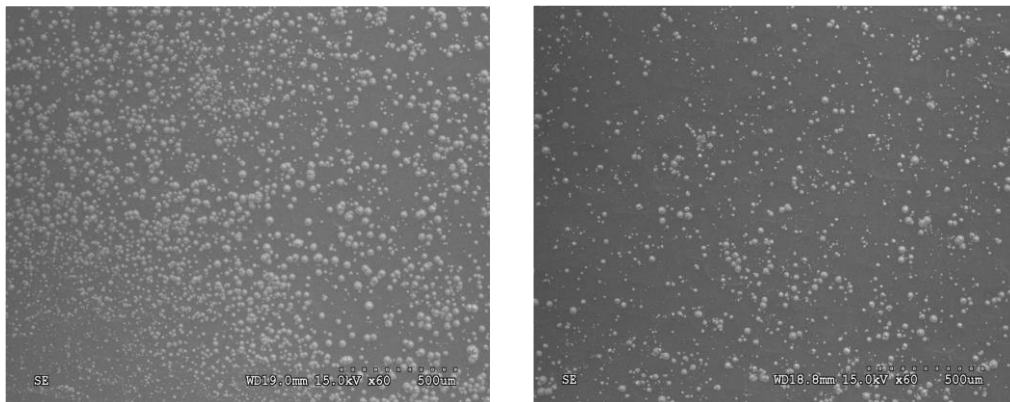
ดังนั้นหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ซีลิกอนระนาบ (100) จะเกิดผลลึกรูปพีระมิดซึ่งเกิดจากการตัดกันของระนาบ (100) กับระนาบ (111) โดยการกัดผิวที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แผนภาพโครงสร้างผลึกรูปพีระมิดของวัสดุพื้นซีลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [31]

#### 4.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

พิจารณาอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวดังภาพที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ไม่มีการกวนสารละลาย และใช้อุณหภูมิในกระบวนการกัดผิวไม่เท่ากัน ภาพที่ 4.7 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสในกระบวนการกัดผิว จะพบผลึกรูปพีระมิดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณเนื้อพื้น ส่วนภาพที่ 4.7 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนสำหรับกระบวนการกัดผิวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าความหนาแน่นในการเกิดผลึกรูปพีระมิดต่ำกว่าการใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดผิวซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol; IPA) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ที่ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อช่วยยับยั้งการเกิดฟองไฮโดรเจนในกระบวนการ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จัดเป็นวัตถุไวไฟ (flammable substance) ที่มีจุดวาบไฟ (flash point) น้อยกว่า 12 องศาเซลเซียสและมีจุดเดือด 82.4 องศาเซลเซียส [33]



(ก)

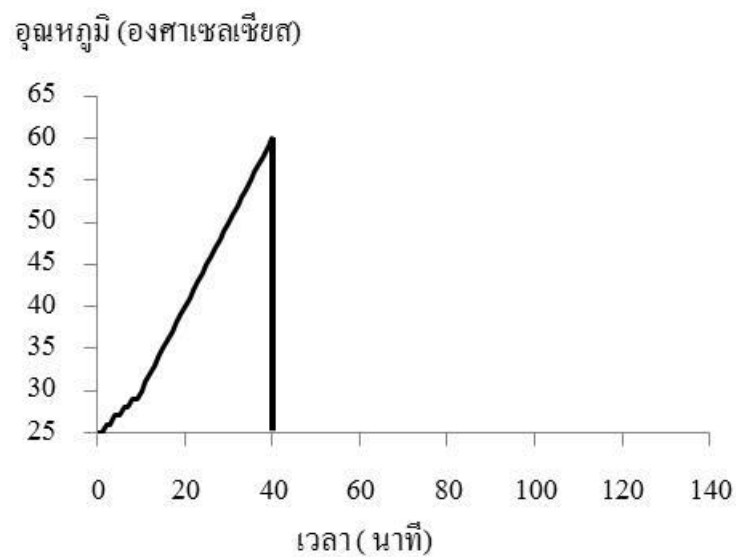
(ข)

ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ไม่มีการกวนสารละลาย อุณหภูมิคงที่ 60 นาที; (ก) 60 องศาเซลเซียส (ข) 80 องศาเซลเซียส

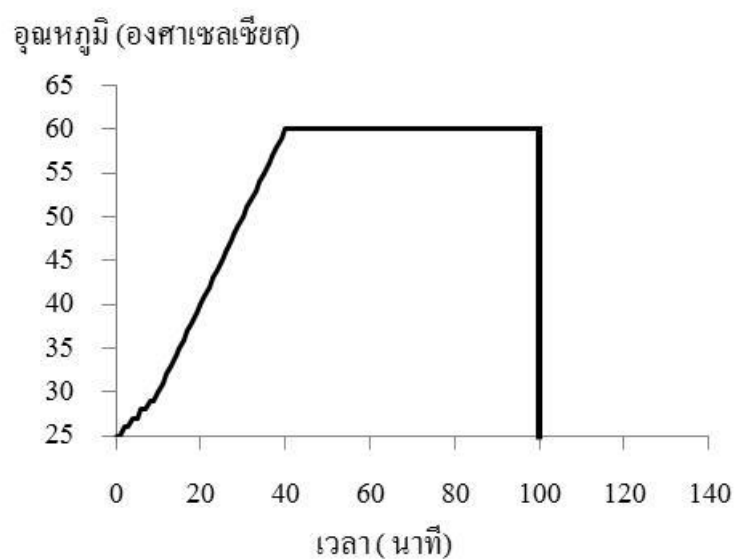
เนื่องจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในการกัดผิวใกล้เคียงกับจุดเดือดของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จึงทำให้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์สามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการกัดผิว ดังนั้นปริมาณไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จึงลดลงในระหว่างกระบวนการกัดผิว ส่งผลให้แรงตึงผิวที่บริเวณผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนสูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลน้ำจับตัวที่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนแทนไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ โดยน้ำเป็นโมเลกุลที่มีพันธะไฮโดรเจนแข็งแรง

และมีแรงดึงผิวสูงถึง 72 mN/m [38] ทำให้เกิดสภาพไฮโดรฟิลิกระหว่างโมเลกุลน้ำกับวัสดุพื้นซilikอน เป็นการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับอะตอมซilikอนที่ผิวของวัสดุพื้น ส่งผลให้กระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสความหนาแน่นผลึกรูปพีระมิดน้อยลง

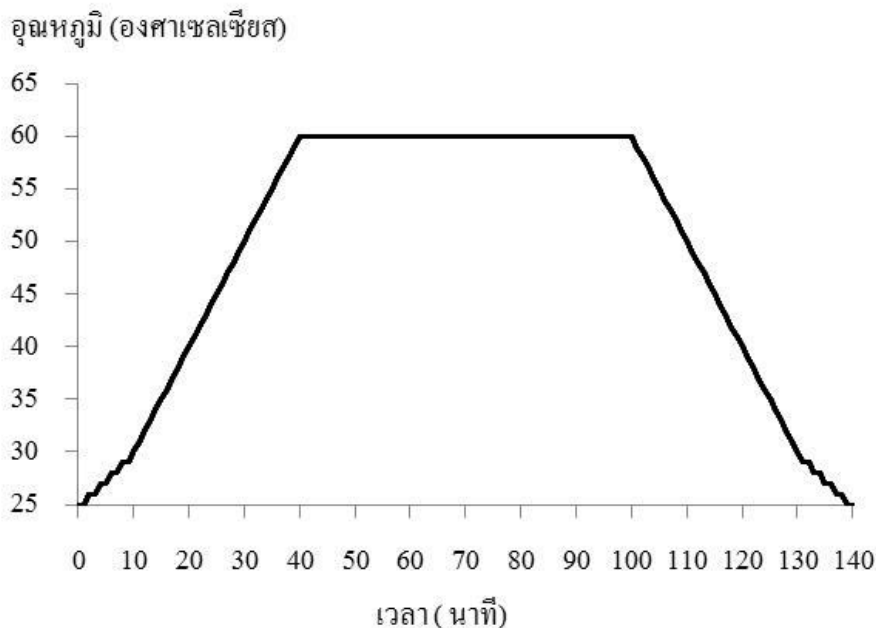
4.1.3 ผลของโปรไฟล์อุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซilikอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



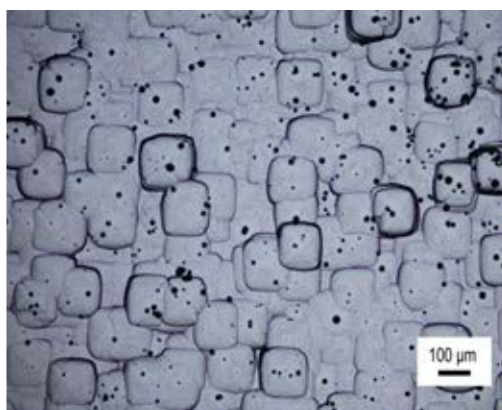
ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1,2 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



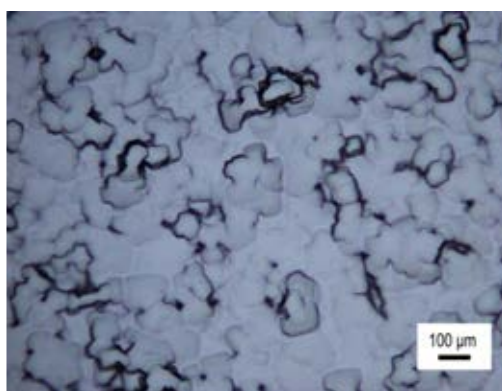
ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1,2,3 ของกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

ภาพที่ 4.11 (ก) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุพื้นซิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในช่วงที่ 1 ดังภาพที่ 4.8 และวัสดุพื้นซิกอนเย็นตัวในน้ำ จะพบจุดสีดำที่เป็นผลึกรูปพีระมิดกระจายทั่วบริเวณวัสดุพื้นที่มีลักษณะเป็นสีเหลือง ส่วนภาพที่ 4.11 (ข) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุพื้นซิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในช่วงที่ 1, 2 และวัสดุพื้นซิกอนเย็นตัวในน้ำ ดังภาพที่ 4.9 ไม่พบจุดสีดำที่เป็นผลึกรูปพีระมิด พบเฉพาะเนื้อพื้นที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน และสุดท้ายภาพที่ 4.11 (ค) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุพื้นซิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในช่วงที่ 1, 2, 3 และวัสดุพื้นซิกอนปล่อยให้เย็นตัวในสารละลาย ดังภาพที่ 4.10 พบเนื้อพื้นที่มีลักษณะเป็นสีเหลือง จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 มีแนวโน้มที่จะให้ผลที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

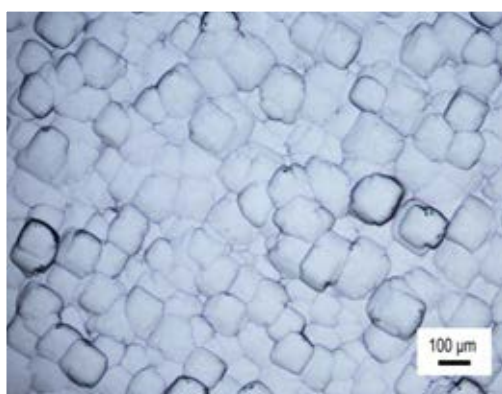
(ก)



(ข)

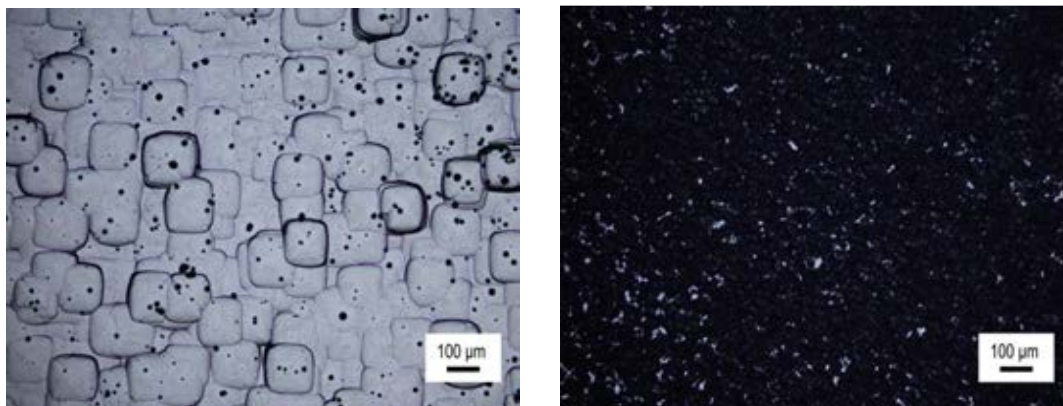


(ค)



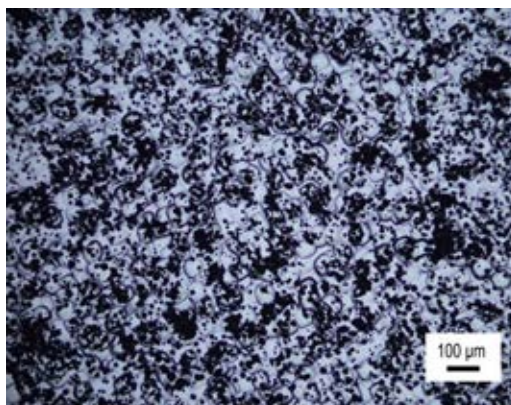
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และไม่มีการกวนสารละลาย ; การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง (ก) ช่วงที่ 1 ดังภาพที่ 4.8, (ข) ช่วงที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 4.9, (ค) ช่วงที่ 1, 2 และ 3 ดังภาพที่ 4.10

4.1.4 ผลของการกวนสารละลายต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิติคอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของวัสดุพื้นซิติคอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ 1 ดังภาพที่ 4.8 ; (ก) ไม่มีการกวนสารละลาย, (ข) กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที และ (ค) กวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที

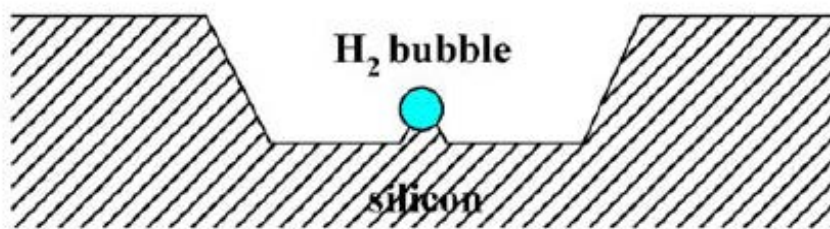
เมื่อพิจารณาผลของการกวนสารละลาย ภาพที่ 4.12 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิติคอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก เมื่อไม่มีการกวนสารละลาย พบว่ามีจุดสีดำที่เป็นผลึกรูปพีระมิดเกิดขึ้นกระจายตัวบนเนื้อพื้น ความหนาแน่นผลึกรูปพีระมิดต่ำ ภาพที่ 4.12 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิติคอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเมื่อมีการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที พบว่าผลึกรูปพีระมิดเกิดกระจายตัวปกคลุมทั่วบนเนื้อพื้น ความหนาแน่นของผลึกรูปพีระมิดสูง และภาพที่ 4.12 (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิติคอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเมื่อมีการกวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที พบว่าผลึกรูปพีระมิดที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นลดลง จะ



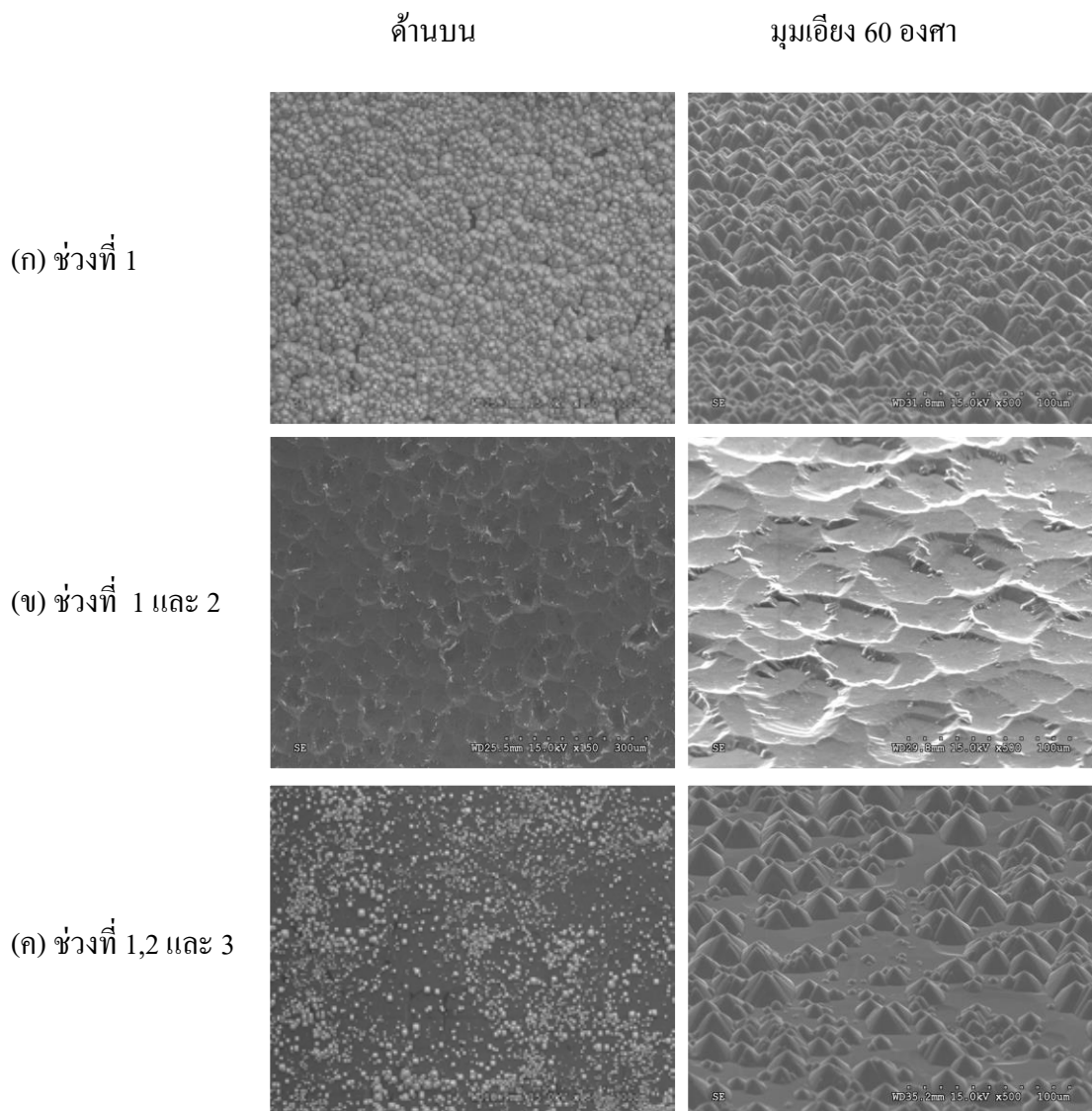
เห็นว่า การกวนสารละลายด้วยความเร็วรอบที่สูงกว่าไม่ได้ยืนยันความหนาแน่นของการเกิดผลึกรูปพีระมิดที่ดีกว่า เนื่องจากการกวนสารละลายด้วยความเร็วรอบที่สูงจนเกินไป ส่งผลให้อัตราการกัดผิวที่สูงขึ้น ทำให้เวลาในการเกิดผลึกรูปพีระมิดไม่เพียงพอ ดังนั้นความหนาแน่นของการเกิดผลึกจึงลดลง แต่การกวนสารละลายส่งผลต่อความหนาแน่นของการเกิดผลึกรูปพีระมิดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่มีการกวนสารละลาย เนื่องจาก 4 อิเล็กตรอนที่ไปอยู่ในแถบพลังงานนำกระแส (conduction band) จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 สามารถรวมตัวกับโมเลกุลน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวของซิลิกอน เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 4.7 [32,40]



จะพบว่า มีฟองไฮโดรเจน (hydrogen bubbles) เกิดขึ้นดังภาพที่ 4.13 ตามสมการที่ 4.8 ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะทำตัวเกาะ (trap) กับผิวบนของซิลิกอน เกิดเป็น Pseudo-Mask สามารถกันไม่ให้สารละลายเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมซิลิกอนได้ แสดงให้เห็นว่าการใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายจะทำให้ฟองไฮโดรเจนจึงเกิดการกระจายตัว เกิดการแพร่ของฟองที่เกาะบริเวณผิวหน้าของซิลิกอนกลับเข้าไปยังสารละลายอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในกรณีที่กระบวนการกัดผิวไม่มีการกวนสารละลายที่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนจะเกิด Pseudo-Mask ตลอดเวลา กันไม่ให้สารละลายเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมซิลิกอนได้ อัตราการกัดผิวจึงต่ำ แต่กรณีที่มีการกวนสารละลายด้วยความเร็วรอบที่สูงเกินไปก็จะส่งผลให้อัตราการกัดผิวสูง ผลึกรูปพีระมิดจึงเกิดได้น้อยลง [30,32,40]



ภาพที่ 4.13 แผนภาพแสดงการเกิดฟองไฮโดรเจนเกาะที่ผิวบนของวัสดุพื้นซิลิกอนในระหว่างกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก [30]

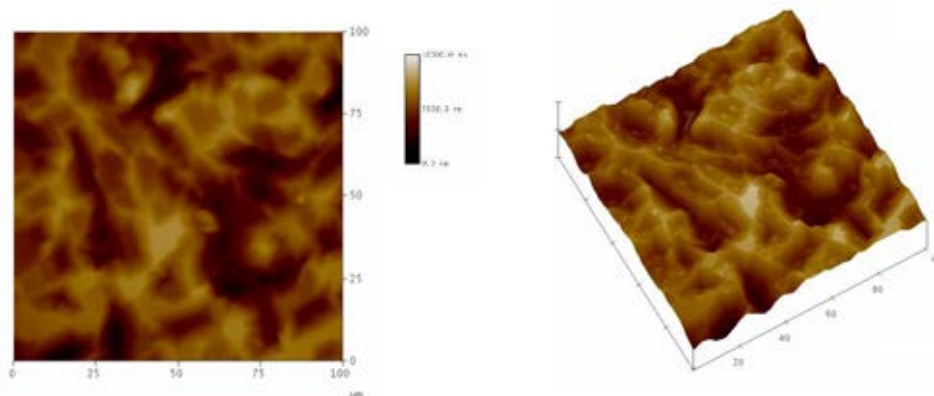


ภาพที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์, กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที

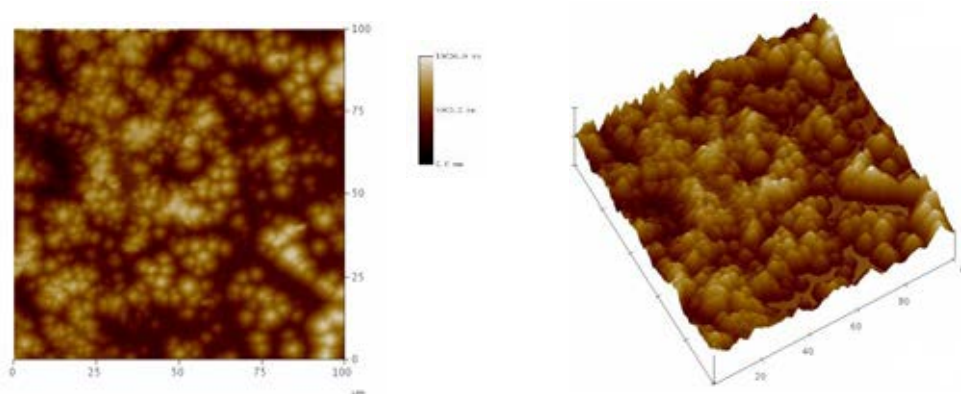
ภาพที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์, กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีตามโปรไฟล์อุณหภูมิในภาพที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.14 (ก) จะพบว่าเมื่อมีผลึกรูปพีระมิดเกิดขึ้นเกิดปกคลุมทั่วผิววัสดุพื้นซิลิกอน ส่วนภาพที่ 4.14 (ข) พบเฉพาะวัสดุพื้นซิลิกอนที่ถูกกัดผิวมีลักษณะเป็นแอ่งสี่เหลี่ยมและภาพที่ 4.14 (ค) พบผลึกรูปพีระมิดกระจายตัวเล็กบนวัสดุพื้นซิลิกอนแต่ความหนาแน่นของผลึกรูปพีระมิดน้อยกว่าในภาพที่ 4.14 (ก) อาจเนื่องจากในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 60 องศาเซลเซียส ปฏิริยาการกัดผิวที่เกิดขึ้นไม่รุนแรงมาก แต่สำหรับการคงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ทำให้ความรุนแรงของ

ปฏิกิริยาการกัดผิวมากและเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดผิวนาน จึงทำให้พบว่าผลึกรูปทรงพีระมิดบนวัสดุพื้นซิลิกอนหายไป เนื่องจากผลึกรูปพีระมิดที่มีระนาบ (111) ไม่สามารถทนความรุนแรงของปฏิกิริยาการกัดผิวได้จึงทำให้เกิดลักษณะเป็นแอ่งสี่เหลี่ยมแทน แต่เมื่อกระบวนการกัดผิวอยู่ในช่วงลดอุณหภูมิจะพบผลึกรูปพีระมิดกระจายตัวบนวัสดุพื้นอีกครั้ง แต่ความหนาแน่นของผลึกรูปพีระมิดไม่มากเท่าในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากความรุนแรงของปฏิกิริยาการกัดลดลงจากการลดอุณหภูมิ ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกได้ดังนี้ กระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์, กวนสารละลายด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิในกระบวนการกัดผิว 60 องศาเซลเซียส ตามโปรไฟล์อุณหภูมิในช่วงที่ 1 ในภาพที่ 4.8

#### 4.1.5 ความหยาบผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



(ก) ก่อนกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



(ข) หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

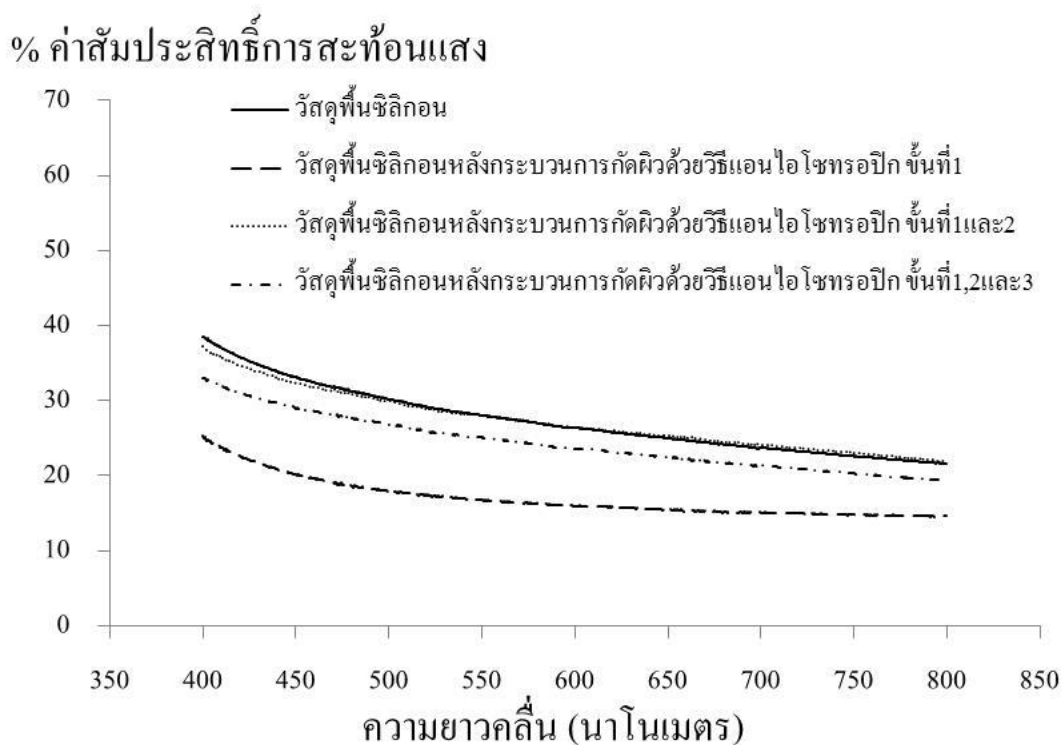
ภาพที่ 4.15 ความหยาบผิวจากเครื่อง Atomic Force Microscope ของวัสดุพื้นซิลิกอน; (ก) ก่อนกระบวนการกัดผิว (ข) หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

เมื่อทำการวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) โดยใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 100x100 ตารางไมครอน พบว่าลักษณะผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนและหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกมีการเปลี่ยนแปลง โดยภาพที่ 4.15 (ก) แสดงวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการกัดผิว ส่วนภาพที่ 4.15 (ข) แสดงวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ในภาพที่ 4.15 (ก) จะเห็นว่าผิวมีลักษณะเป็นแอ่งไม่เรียบ แต่หลังจากวัสดุพื้นซิลิกอนผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกในภาพที่ 4.15 (ข) พบว่าผิวมีลักษณะเป็นแท่งปลายแหลมกระจายทั่วทั้งผิวและทำให้ระดับความสูงต่ำที่ผิวไม่เท่ากัน จากลักษณะของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกจะพบว่าเกิดยอดปลายแหลมซึ่งคือผลึกรูปพีระมิดดังแสดงในภาพที่ 4.15 (ข) เมื่อวัดค่าความหยาบผิวพบว่ามีความหยาบผิวที่แตกต่างกัน โดยความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากพื้นผิววัสดุพื้นที่มีลักษณะเป็นผลึกรูปพีระมิดหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า Ra ของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการกัดผิวและวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากค่า Ra คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟของความหยาบผิวจากวัสดุพื้นทั้งสองชนิดมีความใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่า surface area diff ของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการกัดผิวและวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากค่า surface area diff คัดจากพื้นที่ผิวของวัสดุพื้น

ตารางที่ 4.1 ความหยาบผิวของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการกัดผิวและหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

	วัสดุพื้นซิลิกอนก่อน กระบวนการกัดผิว	วัสดุพื้นซิลิกอนหลัง กระบวนการกัดผิว
Rms (Rq) ( $\mu\text{m}$ )	1.225	1.384
Mean Roughness (Ra)(nm)	991.77	1143
Surface area diff (%)	10.744	32.430
$R_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	6.836	8.842

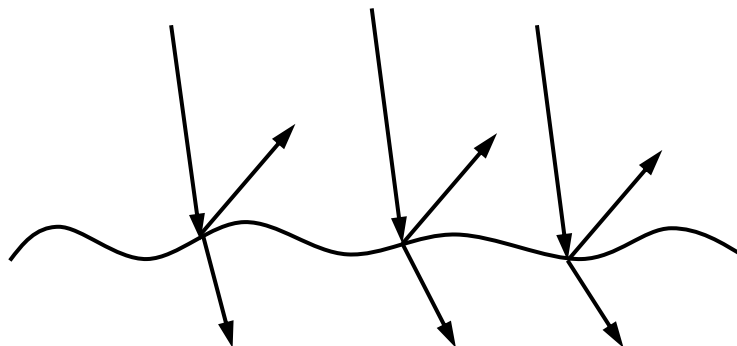
#### 4.1.6 ผลของวัสดุพื้นซีกก่อนต่อ หลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก



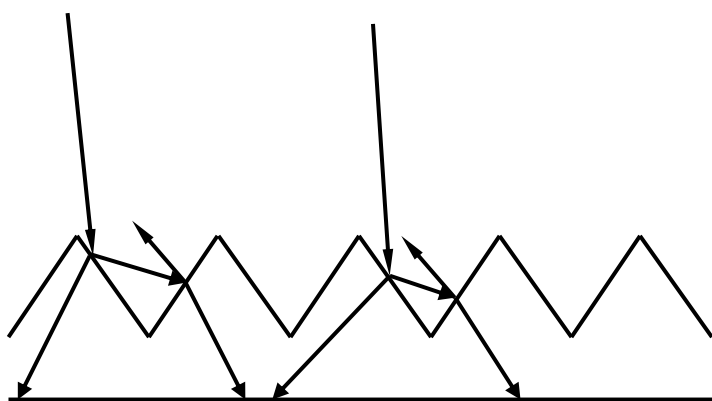
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซีกก่อนและหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สำหรับวัสดุพื้นซีกก่อนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงได้โดยสามารถตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometry ชนิด Integrating Sphere mode ในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร จากภาพที่ 4.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (% reflectance) สัมพันธ์กับฟังก์ชันของความยาวคลื่นพบว่าลักษณะการเกิดผลึกรูปพีระมิดที่ผิววัสดุพื้น ในงานวิจัยสมบัติทางแสงสนใจค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร เนื่องจากถือเป็นค่ากลางของช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (visible) จากตารางที่ 4.2 พบว่าวัสดุพื้นซีกก่อนกระบวนการกัดผิวมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่สูง เมื่อวัสดุพื้นซีกก่อนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกตามเงื่อนไขที่เลือกแล้วพบว่าสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงลดลงได้ เนื่องจากความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างผิวขรุขระที่มีลักษณะเป็นผลึกรูปพีระมิดหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกจะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ของผิววัสดุพื้นซีกก่อนทำให้แสงที่เดินทางเข้ามาเมื่อเกิดจากทิศทางในแนวเฉียงของแสงที่เดินทางเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้น แสงจะสะท้อนที่ผิววัสดุพื้นซีกก่อนที่มีผลึกรูปพีระมิดและเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้น จากนั้นจึงเกิดการสะท้อนแสงในวัสดุพื้นหลายครั้ง ดังนั้น

ระยการเดินทางของแสงในวัสดุพื้นจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดกลืนแสงในวัสดุพื้นมากขึ้น [1,6] ดังภาพที่ 4.17



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.17 แผนภาพแสดงแสงตกกระทบที่ผิววัสดุพื้นซิลิกอน ; (ก) ก่อนผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก, (ข) หลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

วัสดุพื้นซิลิกอน	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว	28.04%
หลังกระบวนการกัดผิวในช่วงอุณหภูมิที่ 1	16.78 %
หลังกระบวนการกัดผิวในช่วงอุณหภูมิที่ 1 และ 2	28.03%
หลังกระบวนการกัดผิวในช่วงอุณหภูมิที่ 1,2 และ 3	25.07%

## 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลือบต่อฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

### 4.2.1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง เป็นวิธีที่มีความละเอียดอ่อนอย่างมาก ลักษณะเฉพาะของฟิล์มขึ้นกับตัวแปรการเคลือบ และผลจากเครื่องเคลือบ เนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นฟิล์มออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ดังนั้นจึงเลือกตัวแปรการเคลือบจากงานวิจัยเรื่องผลของระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าสารเคลือบต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีดีซี ริแอกตีฟ สปีดเตอริง [42] ที่เคลือบฟิล์มซึ่งมีระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุพื้นในช่วง 8 ถึง 14 เซนติเมตร พบว่าเมื่อระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุพื้นเท่ากับ 8, 10 และ 12 เซนติเมตร พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เนื่องจากเมื่อระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุพื้นน้อยพลังงานของสารเคลือบมีค่ามากพอที่จะฟอร์มตัวเป็นผลึกที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส แต่เมื่อระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุพื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นอะตอมสารเคลือบมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกับไอออนในพลาสมาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบ ทำให้พลังงานของอะตอมสารเคลือบที่ไปถึงวัสดุพื้นมีค่าน้อยจนไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นผลึกได้ และจากงานวิจัยเรื่องผลของความดันรวมต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี ริแอกตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง [43] ความดันรวมขณะเคลือบในช่วง  $3 \times 10^{-3}$  ถึง  $9 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ โดยการปล่อยแก๊สเข้าห้องเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เท่ากับ 5 ต่อ 15 sccm และใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 220 วัตต์ คงที่ตลอดการเคลือบ พบว่าความดันรวม  $3.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกเฉพาะแบบรูไทล์ และที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $7.0 \times 10^{-3}$  และ  $9.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกเฉพาะแบบอนาเทส ส่วนความดันรวมที่  $5.0 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ พบว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบผสมของรูไทล์และอนาเทส ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอม (mobility) โดยถ้าความดันรวมต่ำ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะมีโครงสร้างผลึกรูไทล์ และเมื่อเพิ่มความดันรวมจะทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสมากขึ้น เนื่องจากในขณะความดันรวมต่ำ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอมจะสูงเนื่องจากไม่เกิดจากสูญเสียพลังงานจากการ scattering หรือการชน จึงทำให้อะตอมมีพลังงานสูงและมีความสามารถในการเคลื่อนที่ ทำให้การจัดเรียงโครงสร้างผลึกจึงเป็นชนิดรูไทล์ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกชนิดที่มีความหนาแน่นสูง แต่ถ้าความดันรวมสูงขึ้น โอกาสในการชนกันของอะตอมจะสูงขึ้น จึงเกิดการสูญเสียพลังงานทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอมลดลง เมื่ออะตอมของธาตุถูกดูดซับที่พื้นผิว จึงทำให้เกิด

การจัดเรียงโครงสร้างผลึกชนิดอานาเทสซึ่งเป็นโครงสร้างชนิดที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า สรุปลงเงื่อนไขการเคลือบในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อให้ได้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอานาเทสได้ดังตารางที่ 4.3

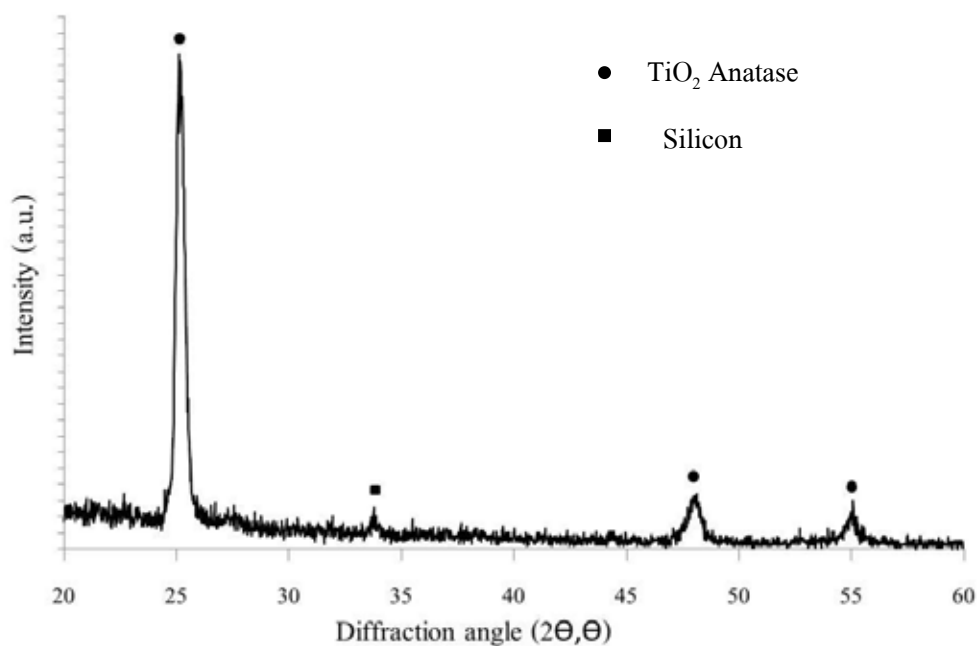
ตารางที่ 4.2 สรุปลงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน

ตัวแปรการเคลือบ	เงื่อนไข
อัตราการไหล Ar:O <sub>2</sub> (sccm.)	5:15
ระยะระหว่างเป้าถึงวัสดุพื้น (เซนติเมตร)	8
ความดันรวม (มิลลิบาร์)	7x10 <sup>-3</sup>
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	500

#### 4.2.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มที่เตรียมได้จะนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ดังแสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าหลังกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์พบพีคที่ตำแหน่ง 25.307, 48.043 และ 55.068 องศา ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์จากแฟ้มอ้างอิงมาตรฐาน JCPDS No. 78-2486 พบว่าตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอานาเทสระนาบ (101) , (200) และ (211) ตามลำดับ สำหรับพีคที่ตำแหน่ง 33.038 องศาเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนจากแฟ้มอ้างอิงมาตรฐาน JCPDS No. 71-1088 พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตรงกับธาตุซิลิกอนซึ่งคือวัสดุพื้น

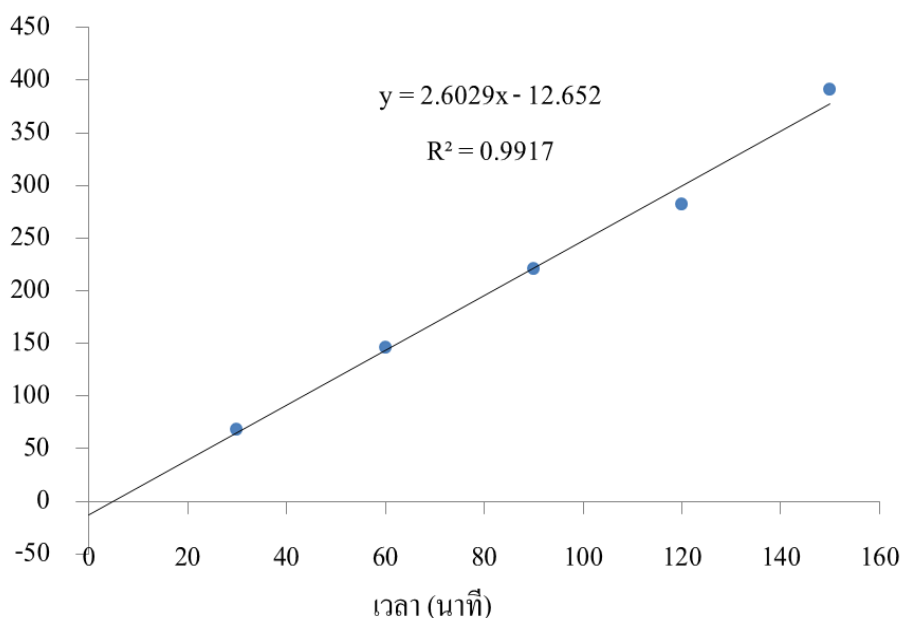




ภาพที่ 4.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.2.3 การควบคุมความหนาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน

ความหนา (นาโนเมตร)



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

จากกราฟอัตราการเคลือบ ในภาพที่ 4.19 จะเห็นว่า ขั้นตอนระหว่างการเกิดชั้นเคลือบของการเคลือบไอทางกายภาพจะต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่การสร้างไอและการเคลื่อนที่ของไอด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงไปยังผิววัสดุพื้นจนกระทั่งเกิดนิวเคลียสจนกระทั่งโตขึ้นเป็นเกรนและชั้นเคลือบ

ดังนั้นจะเห็นว่าในกระบวนการเคลือบในงานวิจัยนี้จะต้องใช้เวลาประมาณ 13 นาที สำหรับการพักตัว (incubation time) แล้วจึงเริ่มเกิดชั้นเคลือบ [44,45] ส่วนความหนาของฟิล์มบางหลังเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ทำได้โดยการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มแต่ละครั้ง สำหรับความหนาของฟิล์มบางในการศึกษานี้จะควบคุมเวลาเคลือบโดยพิจารณาจากอัตราเคลือบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้อัตราเคลือบหาได้จากค่าความชันของกราฟความหนาฟิล์มและเวลา งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาอัตราเคลือบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการนำฟิล์มที่เคลือบได้ไปวัดความหนาด้วยเทคนิค AFM โดยความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบที่เวลาต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้เคลือบเพิ่มขึ้น ความหนาฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น โดยเวลาการเคลือบจะได้ความหนาต่างๆดังตารางที่ 4.4 เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับความหนาเคลือบ พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น โดยอัตราการโตของชั้นเคลือบเท่ากับ 2.60 นาโนเมตรต่อนาที ( $R^2 = 0.9917$ )

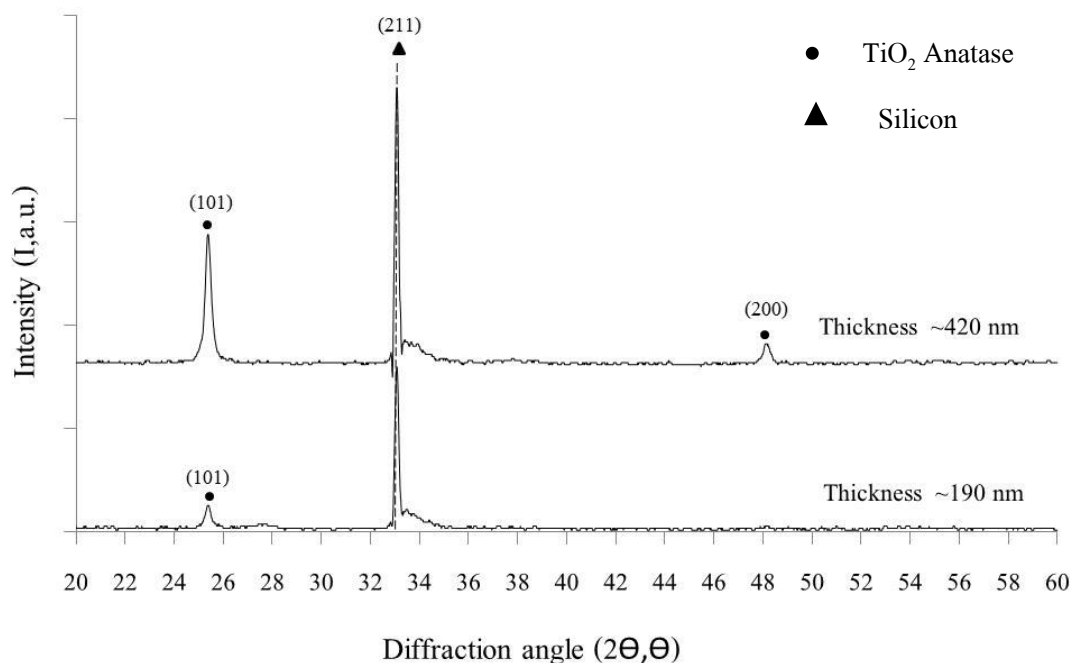
ตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

เวลาเคลือบ(นาที)	1	2	3	ความหนาฟิล์มเฉลี่ย
30	68.921	68.386	67.335	~68.21
60	146.66	145.24	146.21	~146.04
90	222.89	219.73	221.18	~221.27
120	282.97	282.94	279.19	~281.70
150	390.18	391.58	390.68	~390.81

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกันสะท้อนควรมีการแทรกสอดแบบหักล้างของแสงที่สะท้อนที่ผิวบนสุดและแสงที่สะท้อนที่วัสดุพื้น โดยสำหรับค่าดัชนีหักเหแสงประมาณ 2.3 ฟิล์มชั้นกันสะท้อนควรมีความหนาประมาณ 180 และ 420 นาโนเมตร ซึ่งการควบคุมความหนาชั้นเคลือบสามารถทำได้โดยการควบคุมเวลาเคลือบ ดังนั้นควรใช้เวลาเคลือบ 1 ชั่วโมง 9 นาที และ 2 ชั่วโมง 41 นาที ตามลำดับ

### 4.3 ผลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

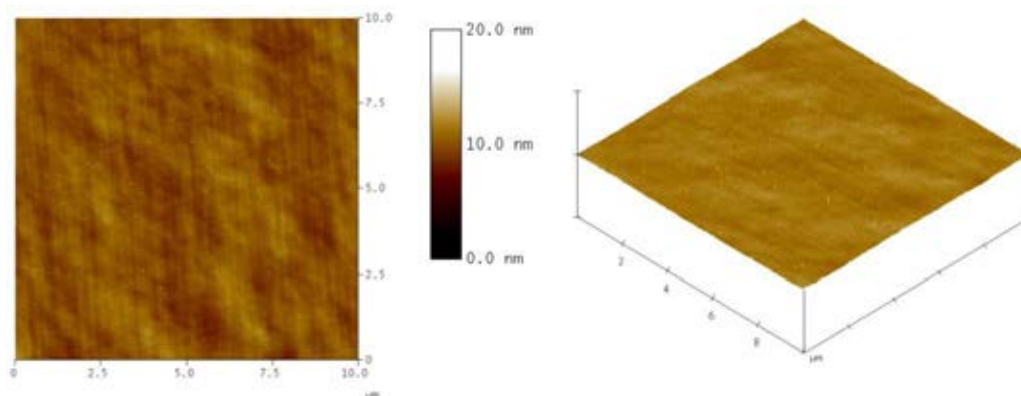
#### 4.3.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน



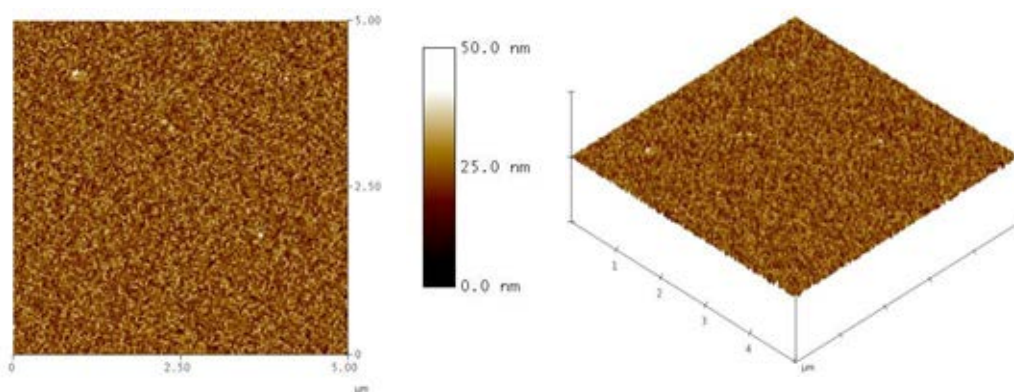
ภาพที่ 4.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร พบพีคที่ตำแหน่ง 25.307 องศา ส่วนความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตรพบพีคที่ตำแหน่ง 25.307 และ 48.043 องศา เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ตามมาตรฐาน JCPDS No.78-2486 ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสระนาบ (101) และ (200) ตามลำดับ จากข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้แสดงว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเท่านั้น สำหรับพีคที่ตำแหน่ง 33.038 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามมาตรฐาน JCPDS No. 71-1088 ตรงกับธาตุซิลิกอนซึ่งคือวัสดุพื้น

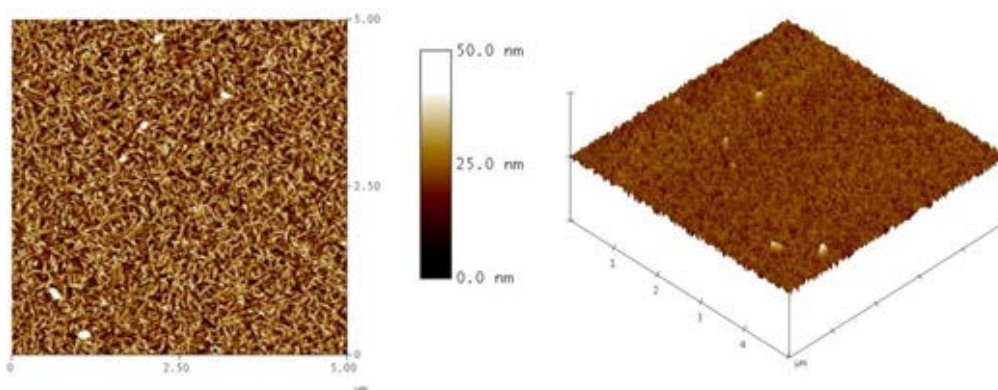
#### 4.3.2 ความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอานาเทส



(ก) วัสดุพื้นซิลิกอนด้านเรียบ



(ข) ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร



(ค) ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร

#### ภาพที่ 4.21 ความหยาบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอานาเทส

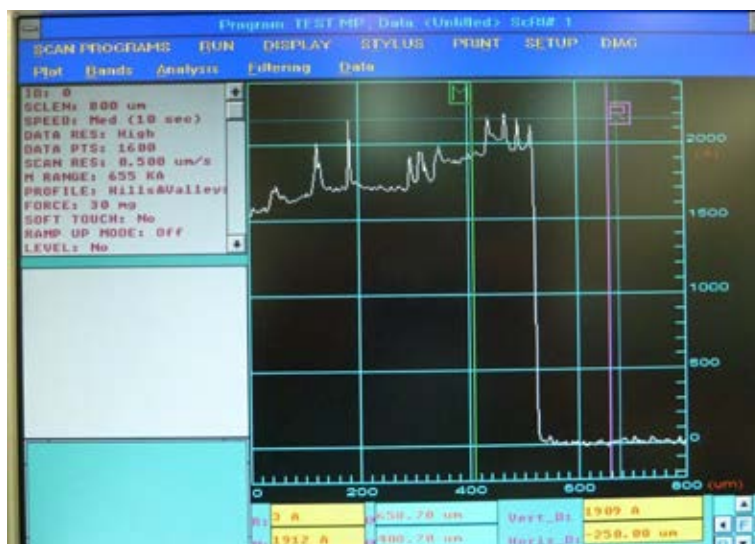
เมื่อทำการวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) โดยใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 5x5 ตารางไมครอน ลักษณะของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุพื้น

ซิลิกอนมีลักษณะดังภาพที่ 4.21 (ก) แสดงความหยาบผิวของฟิล์มที่มีความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มที่ได้เกรนมีลักษณะหยาบและกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ส่วนภาพที่ 4.21 (ข) แสดงความหยาบผิวของฟิล์มที่มีความหนา ชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร พบว่าเกรนมีลักษณะหยาบและขนาดเกรนใหญ่ขึ้น แสดงถึงการใช้เวลาเคลือบนานขึ้นนอกจากได้ชั้นเคลือบที่หนาขึ้นแล้วค่าความหยาบผิวยังเพิ่มมากขึ้นดังตารางที่ 4.5

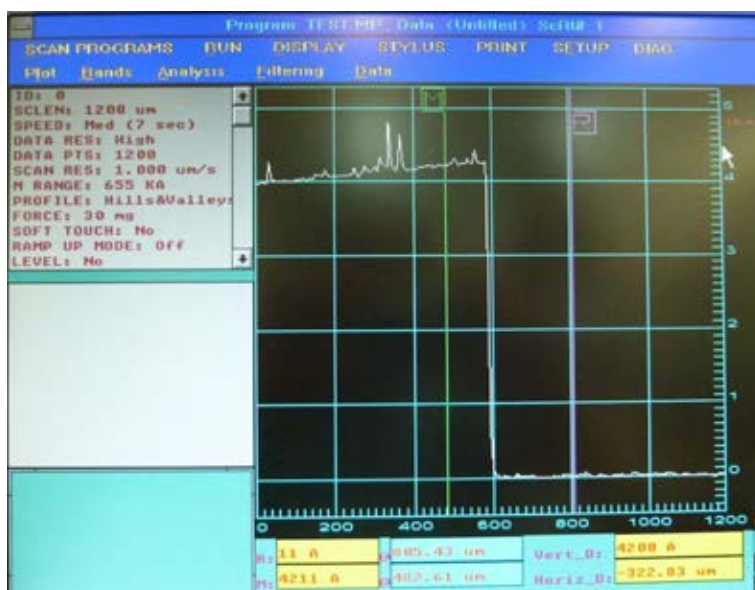
ตารางที่ 4.4 ความหยาบผิวฟิล์มบางบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

	วัสดุพื้นซิลิกอนด้านเรียบ	ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร	ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร
$R_{rms}$ (nm.)	0.681	4.449	7.513
$R_a$ (nm.)	0.532	3.56	6.08
$R_{max}$	2.412	19.201	35.985
%Surface area diff	0.035	10.034	18.384

### 4.3.3 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

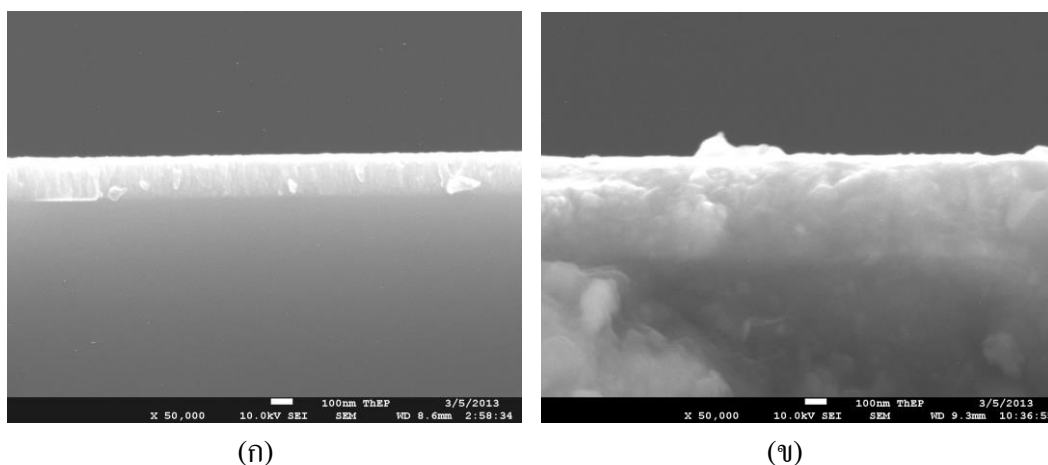


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.22 ความหนาของชั้นเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ควบคุมเวลาเคลือบ ;  
 (ก) 1 ชั่วโมง 12 นาที, (ข) 2 ชั่วโมง 35 นาที



ภาพที่ 4.23 ภาคตัดขวางโครงสร้างจุลภาคหลังการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส; (ก) ความหนาฟิล์ม 190 นาโนเมตร, (ข) ความหนาฟิล์ม 420 นาโนเมตร

จากการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ตามตัวแปรที่กำหนดในตารางที่ 4.3 และควบคุมเวลาเคลือบเพื่อให้ได้ความหนาฟิล์มที่ต้องการ เมื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Profilometer พบว่า การใช้เวลาเคลือบ 1 ชั่วโมง 12 นาที ได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 190 นาโนเมตร ส่วนการใช้เวลาเคลือบ 2 ชั่วโมง 35 นาที ได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 420 นาโนเมตรดังภาพที่ 4.22 และ 4.23

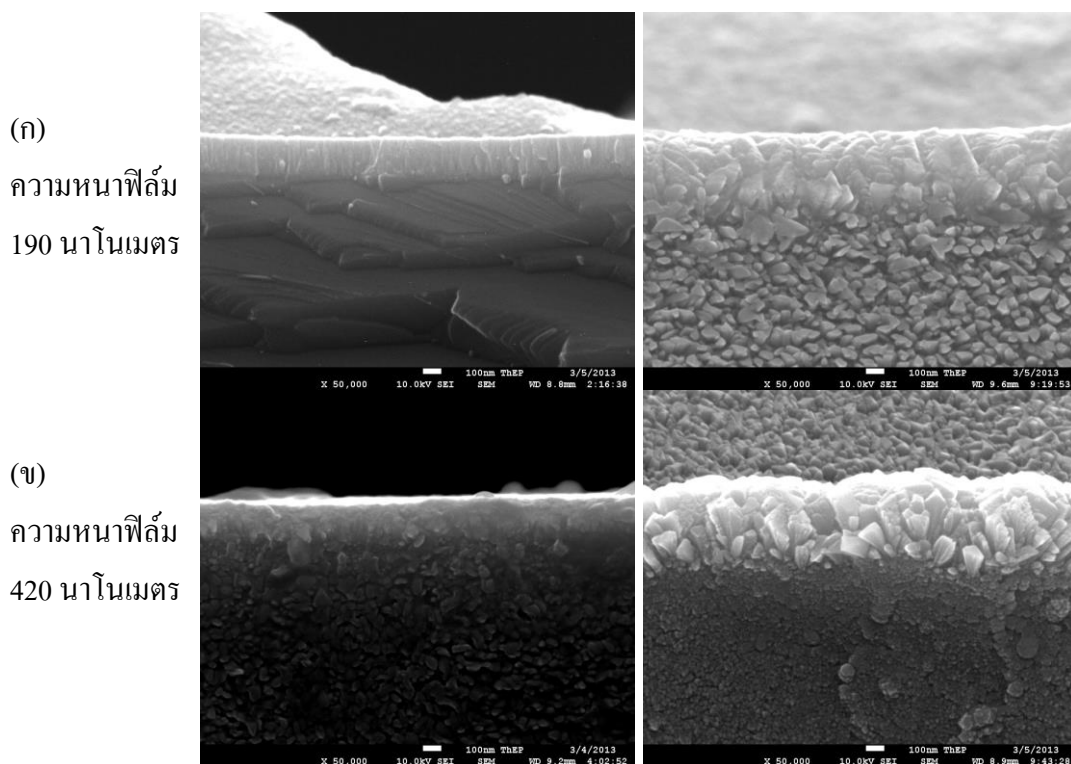
#### 4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

ก่อนกระบวนการกัดผิว

หลังกระบวนการกัดผิวด้วย

ด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

วิธีแอนไอโซทรอปิก



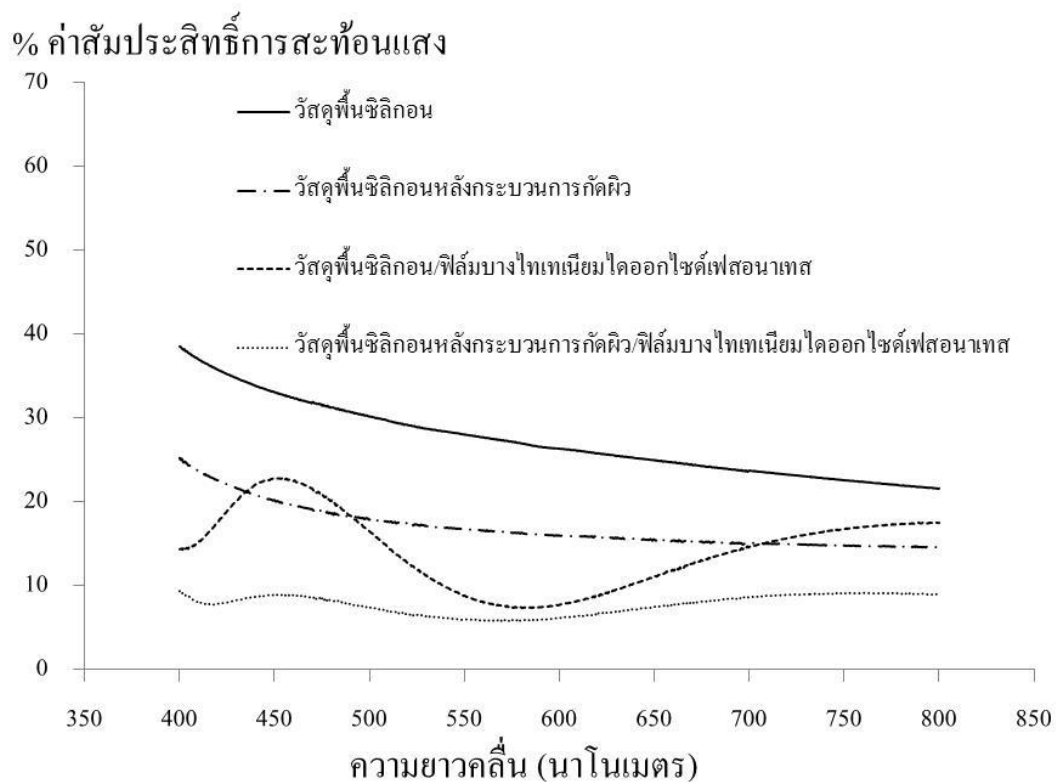
ภาพที่ 4.24 ภาพตัดขวางโครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นซิลิกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

โครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มหลังกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีแมกเนตรอนสปัตเตอริง มีลักษณะเกรนแบบคอลัมน์าร์ ซึ่งเกิดจากการสะสมของอะตอมที่แพร่ผ่านตามผิวโดยสามารถโตได้ทั้งแนวตั้งฉากและแนวขนานกับผิว เมื่อนิวเคลียสโตขึ้นจนเป็นชั้นฟิล์มจนกลอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดแล้วจึงสามารถโตต่อในทิศทางตั้งฉากกับผิวเท่านั้น ทำให้พบฟิล์มที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์าร์อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 4.24 ส่วนวัสดุพื้นที่เป็นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกจะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบมีลักษณะอยู่ใน Structure Zone Model 1 [44,45] ซึ่งมีลักษณะเกรนแบบคอลัมน์าร์อย่างไม่เป็นระเบียบในลักษณะกรวยคว่ำ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นผลจากลักษณะเนื้อวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก มีพื้นที่ผิว (surface area) มากกว่าวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอมเท่ากัน วัสดุพื้นที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าจะมีจำนวนนิวเคลียสต่อหน่วยพื้นที่น้อยกว่าวัสดุพื้นที่มีพื้นที่ผิวดต่ำกว่า

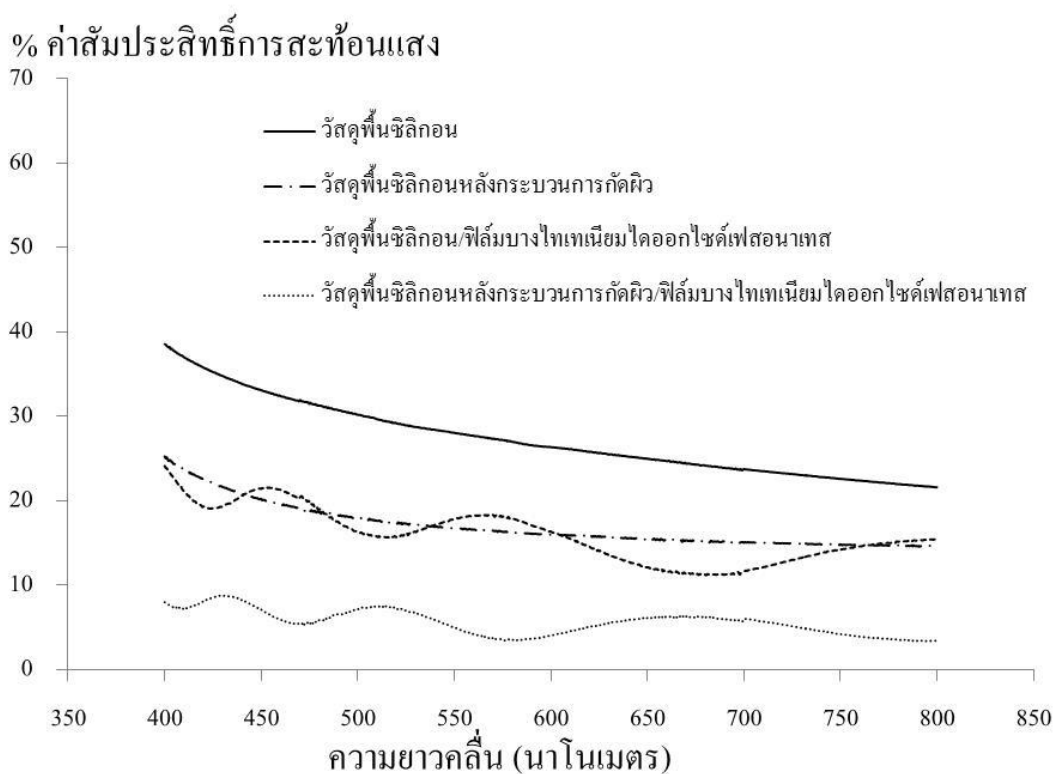


ความแตกต่างอีกประการหนึ่งคือ ระบายจัดเรียงอะตอมที่ต่างกัน การเกิดนิวเคลียสบนระนาบไม่เท่ากัน เนื่องจากวัสดุพื้นที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะทำให้อะตอมถูกดูดซับที่ผิวได้ดีกว่าและอะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำลง [44,45] planar density แต่ระนาบไม่เท่ากัน ทำให้อะตอมที่ถูกดูดซับที่ผิวเกิดนิวเคลียสได้ไม่เท่ากัน

#### 4.3.5 สมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส



ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสความหนา 190 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสความหนา 420 นาโนเมตร

ลักษณะกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนก่อนกระบวนการเคลือบฟิล์มและหลังกระบวนการเคลือบฟิล์มมีความแตกต่างกัน โดยวัสดุพื้นซิลิกอนหลังเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีลักษณะกราฟเป็นกราฟไซน์ (sine wave) เนื่องจากปรากฏการณ์การแทรกสอดแบบหักล้างจากการเคลือบฟิล์มบางตามทฤษฎีแสงคือ แสงสะท้อนที่ผิววัสดุพื้นและแสงสะท้อนที่ผิวบนสุดของฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนเฟส 180 องศาทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างของแสงทั้งสอง [58] สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจะพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นค่ากลางของช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์สุริยะดูดกลืนและจะพิจารณาตลอดช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรด้วยเนื่องจากเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์สุริยะดูดกลืนที่แท้จริง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ในภาพที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เท่ากับ 8.82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เท่ากับ 5.97 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์

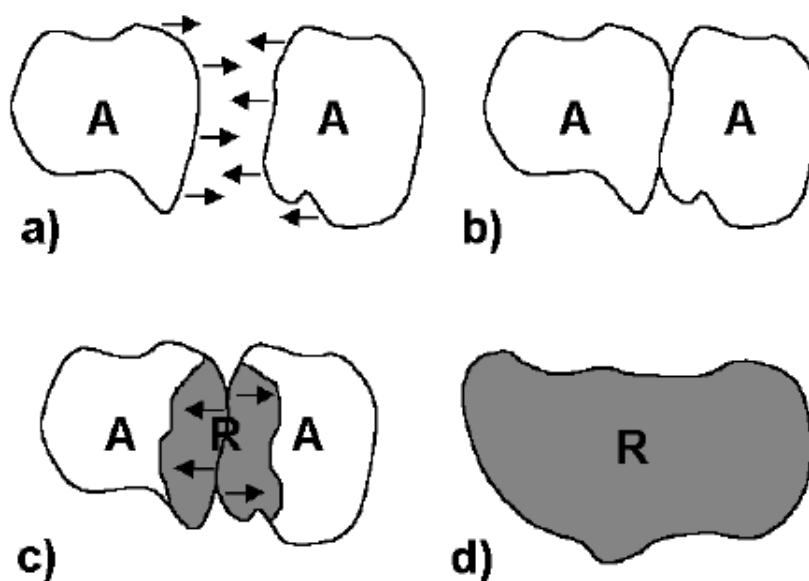
การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เท่ากับ 17.85 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 4.90 เปอร์เซ็นต์สำหรับวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ดังภาพที่ 4.26 จะเห็นว่าสำหรับทั้งความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร การใช้วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าการใช้วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวตลอดทั้งช่วง เนื่องจากวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก จะมีโครงสร้างที่ผิวลักษณะเป็นผลึกรูปพีระมิดซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง (light trapping) ทำให้แสงที่เดินทางเข้ามาสู่วัสดุพื้นในแนวเฉียงสะท้อนที่ผิวของผลึกรูปพีระมิดและเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้นทำให้เกิดการหักเหและสะท้อนแสงในวัสดุพื้นหลายครั้ง ดังนั้นระยะทางเดินของแสงในวัสดุพื้นซิลิกอนจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ลดการสะท้อนแสงที่ออกจากผิววัสดุพื้นได้ [1,6] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความหนาชั้นเคลือบ 190 กับ 420 นาโนเมตรบนวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเหมือนกัน พบว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร เนื่องจากความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ฟิล์มอาจปกคลุมทั่วผิววัสดุพื้นที่มีความขรุขระไม่ดีเท่าการเคลือบด้วยความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร

#### 4.4 ผลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์

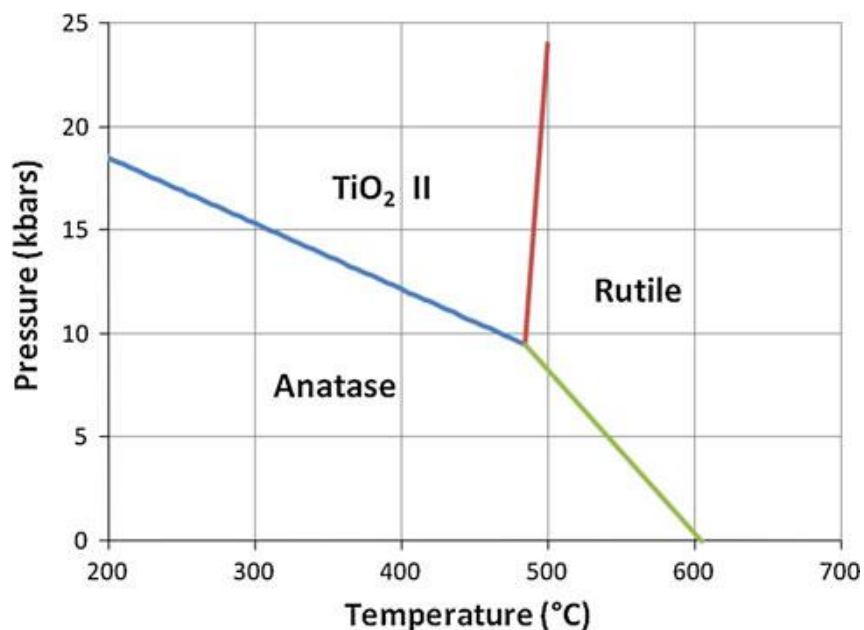
##### 4.4.1 กระบวนการอบอ่อนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการอบอ่อนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง จำทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปสู่โครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดซึ่งคือชนิดรูไทล์ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกนี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ เนื่องจากพลังงานอิสระ (free energy) ของโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ต่ำกว่าชนิดอนาเทส ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้โดยการวิธีการควบคุมทางจลนศาสตร์ซึ่งจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา จากภาพที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นว่าโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเป็นชนิดรูไทล์สามารถเริ่มได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยกลไกการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เริ่มจากอนุภาคเล็กๆของอนาเทสจะเริ่มเข้าหากันและรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ จากนั้นความร้อนจากกระบวนการคายความร้อน (exothermic) ในกระบวนการอบอ่อนจะทำให้เกิดนิวเคลียสของรูไทล์ [7,47] ดังภาพที่ 4.27 แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิในการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นก็แปรผันอยู่ในช่วง 400-1200

องศาเซลเซียส ซึ่งจะเป็นผลมาจากกระบวนการให้อุณหภูมิของเครื่องมือที่ใช้ จากงานวิจัยของ Baoxing Zhao [46] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบอุ่นต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่สามารถเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเป็นชนิดรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกให้อุณหภูมิอบอุ่น 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 1 และ 4 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร ในการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากชนิดอนาเทสเป็นชนิดรูไทล์

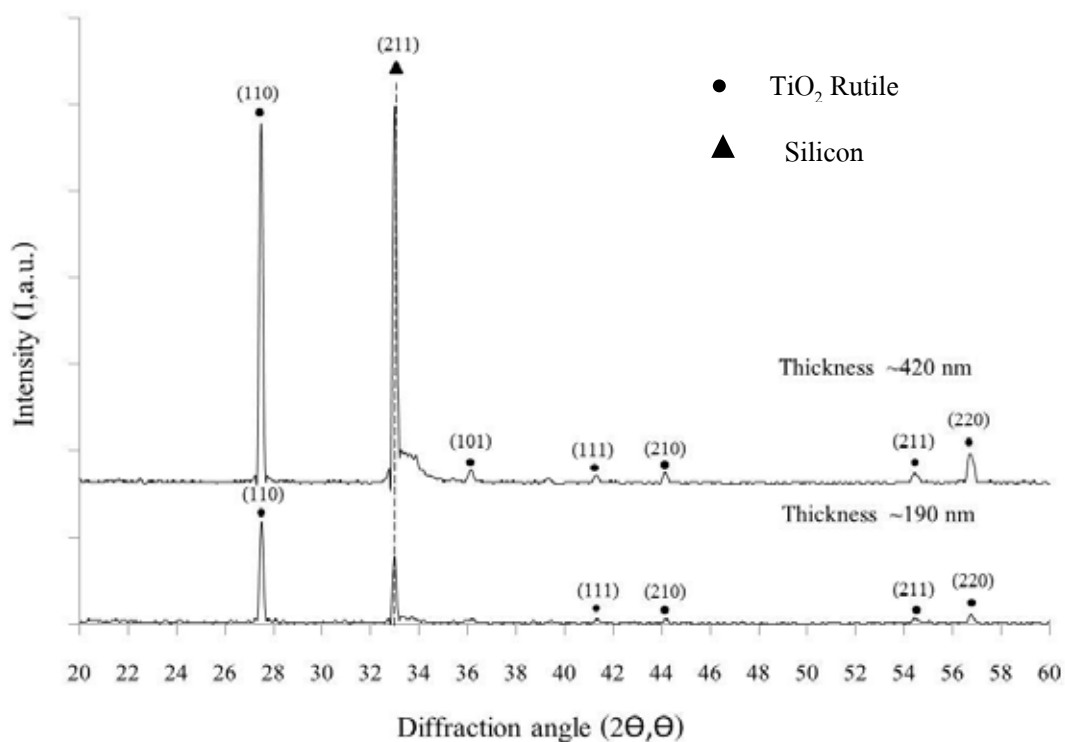


ภาพที่ 4.27 กลไกการเปลี่ยน โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [7]



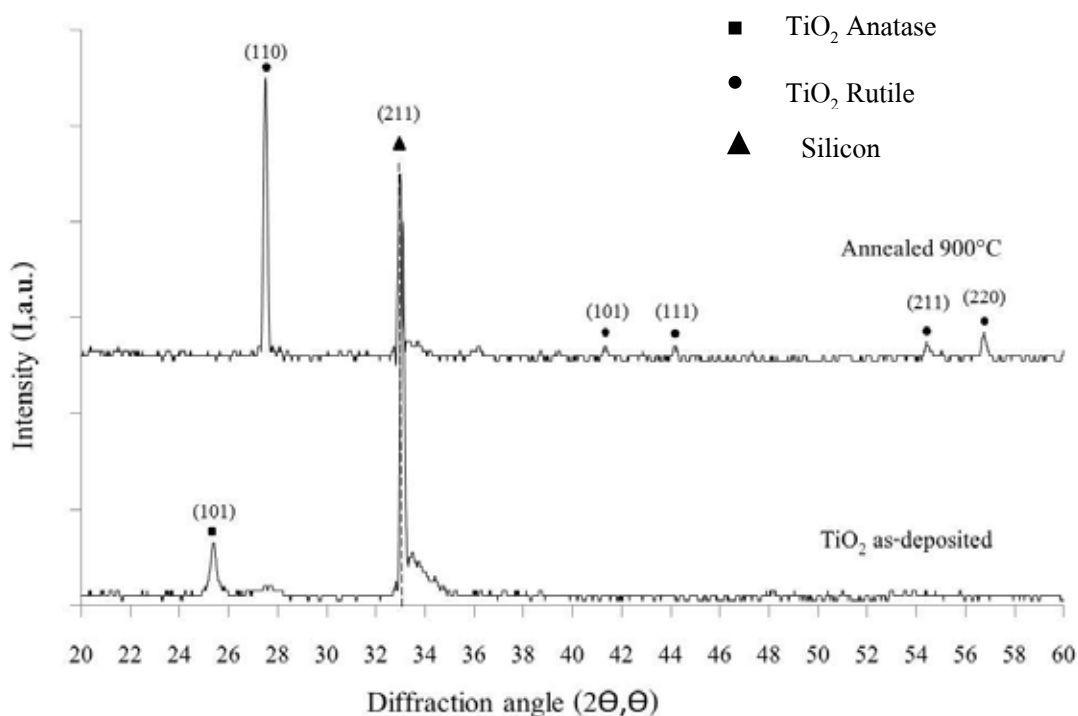
ภาพที่ 4.28 แผนภาพความดันและอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [46]

#### 4.4.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อน

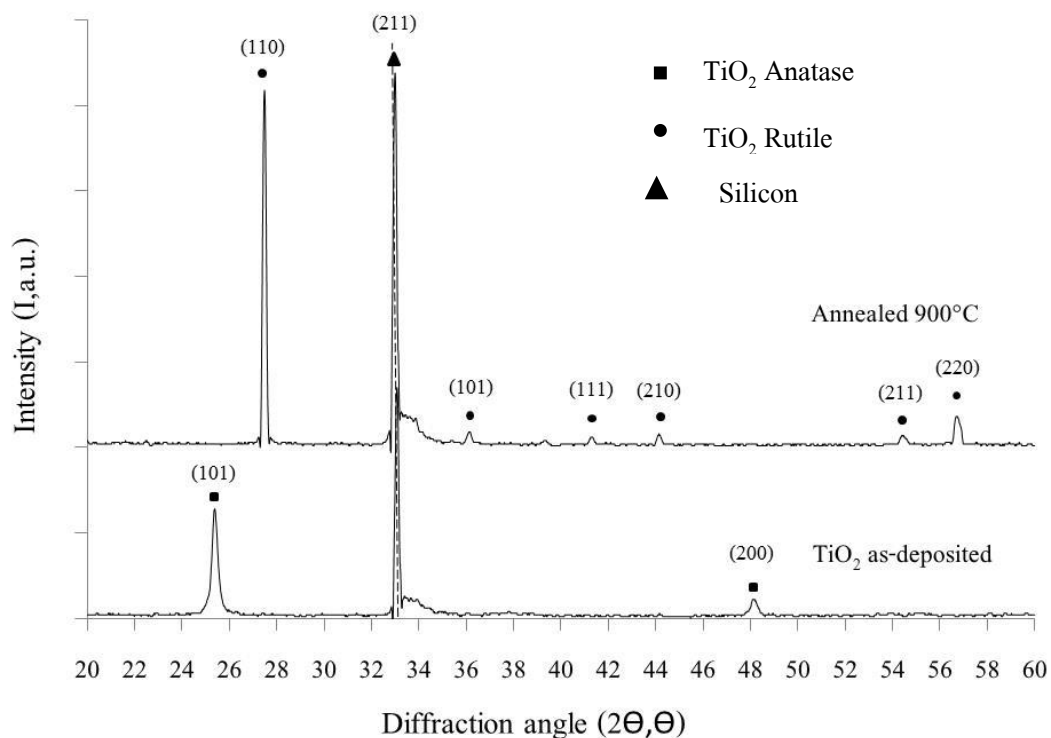


ภาพที่ 4.29 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.30 พบพีคที่ตำแหน่ง 27.434, 41.237, 44.04, 54.317, 56.622 องศา ตามลำดับ เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ตามมาตรฐาน JCPDS No.87-0920 ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ระนาบ (110), (101), (111), (211), (220) ตามลำดับ แต่จากข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้นี้สามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อน ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากชนิดอนาเทสเป็นชนิดรูไทล์ได้ทั้งหมด ดังภาพที่ 4.31 สำหรับพีคที่มุม 33.038 องศา เปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนตามมาตรฐาน JCPDS No.72-1088 พบว่าตรงกับธาตุซิลิกอนซึ่งคือวัสดุพื้น



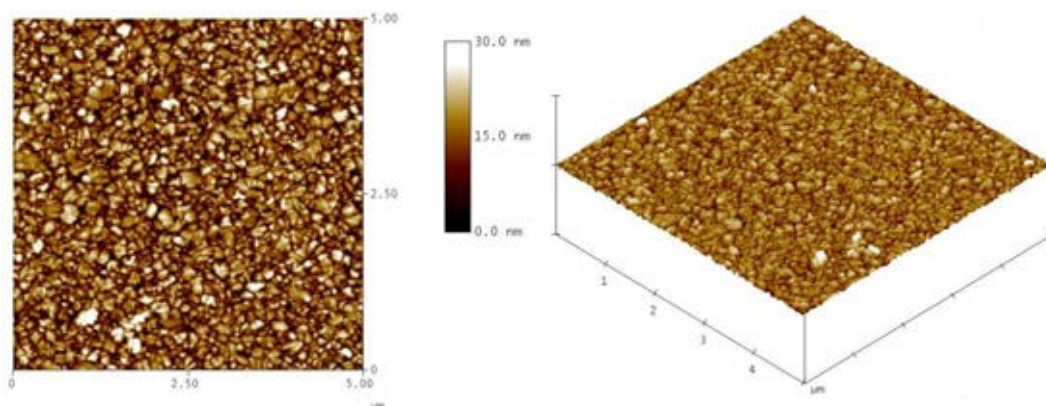
ภาพที่ 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร



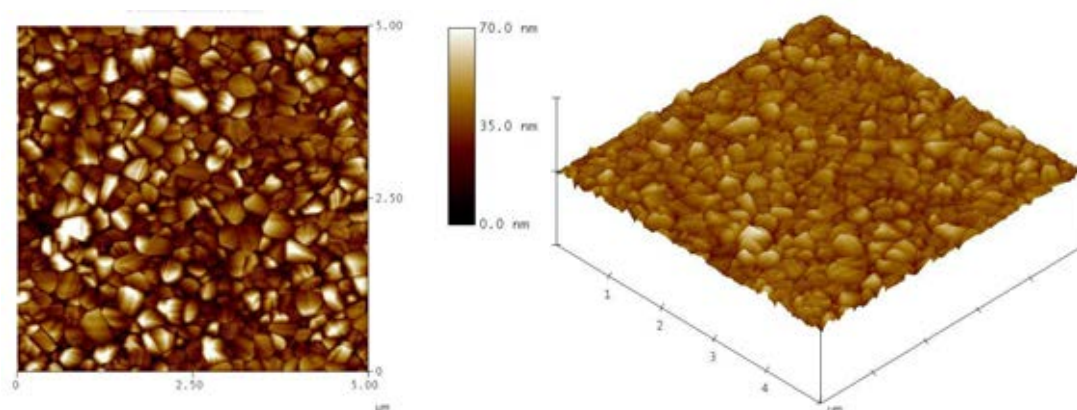
ภาพที่ 4.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.30 พบพีคที่ตำแหน่ง 27.434, 36.077, 41.237, 44.04, 54.317, 56.622 องศา ตามลำดับ เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ตามมาตรฐาน JCPDS No.87-0920 ตรงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ระนาบ (110), (101), (111), (210), (211), (220) ตามลำดับ แต่จากข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้นี้ก็สามารยืนยันได้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อนมีโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์เท่านั้น ดังภาพที่ 4.32 ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 33.038 องศา เปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนตามมาตรฐาน JCPDS No. 72-1088 พบว่าตรงกับธาตุซิลิกอนซึ่งคือวัสดุพื้น

#### 4.4.3 ความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูโพลี



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.32 ความหยาบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อน

ภายหลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร และ 4 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากชนิดอนาเทสเป็นชนิดรูโพลี พบว่าฟิล์มสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกชนิดรูโพลีได้สมบูรณ์ จึงทำการวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) โดยใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 5x5 ตารางไมครอน ลักษณะผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนมีลักษณะเปลี่ยนไปดังภาพที่ 4.33 (ก) แสดงความหยาบผิวของฟิล์มที่มีความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังผ่านกระบวนการอบอ่อน เกรนมีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมแต่มุมโค้งมนกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ส่วนภาพที่ 4.33 (ข) แสดงความหยาบผิวของฟิล์มที่มีความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มที่ได้เกรนมีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมแต่มุมโค้งมนและขนาดใหญ่กว่าความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวระหว่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึก



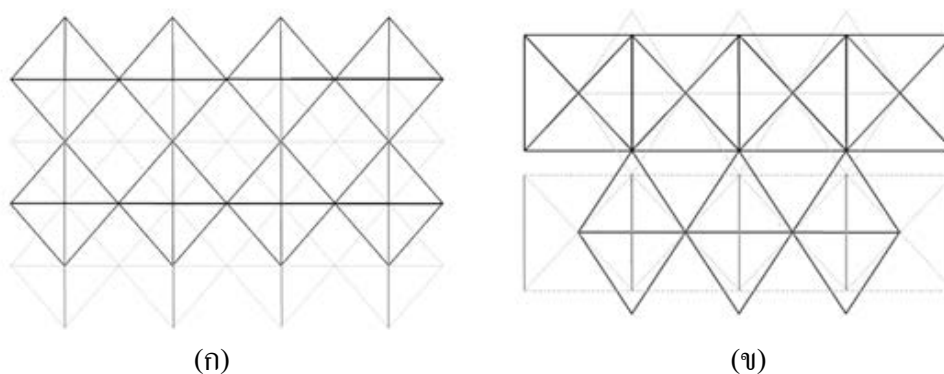
ชนิดอนาเทสและโครงสร้างผลึกซนิครูไทล์ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกซนิครูไทล์มีค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะเกรนที่หยาบขึ้น

ตารางที่ 4.5 ความหยาบผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกซนิครูไทล์

	ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร	ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร
$R_{rms}$ (nm.)	5.809	13.585
$R_a$ (nm.)	4.590	10.351
$R_{max}$	61.955	127.20
%Surface area diff	6.994	11.698

#### 4.4.4 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกซนิครูไทล์

ภายหลังกระบวนการอบอ่อนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากชนิดอนาเทสเป็นรูไทล์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม เนื่องจากการจัดเรียงพันธะของโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสที่มีลักษณะ  $TiO_6$  ออกตะฮีดรัล ใช้ 4 ขอบร่วมกัน (octahedra, sharing four edges) แต่เมื่อมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นซนิครูไทล์จะทำให้  $Ti-O$  2 พันธะแตกออกและเกิดการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่และมีลักษณะใหม่เป็น  $TiO_6$  ออกตะฮีดรัล ใช้ 2 ขอบร่วมกัน (octahedra, sharing two edges) ดังภาพที่ 4.34 ซึ่งโดยปกติแล้วการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากชนิดอนาเทสเป็นรูไทล์ จะเกิดการหดตัวของปริมาตรทั้งหมดประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ [47] และจากการคำนวณ ดังภาคผนวก ข ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นซนิครูไทล์แล้วความหนาลดลงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือได้ว่าความหนาไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.33 ภาพสองมิติของโครงสร้าง  $TiO_6$  ออกตะฮีดรัลของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามแนวแกน C [47] ; (ก) โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส, (จ) โครงสร้างผลึกซนิครูไทล์

#### 4.4.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูโถ่

ก่อนกระบวนการกัดผิว

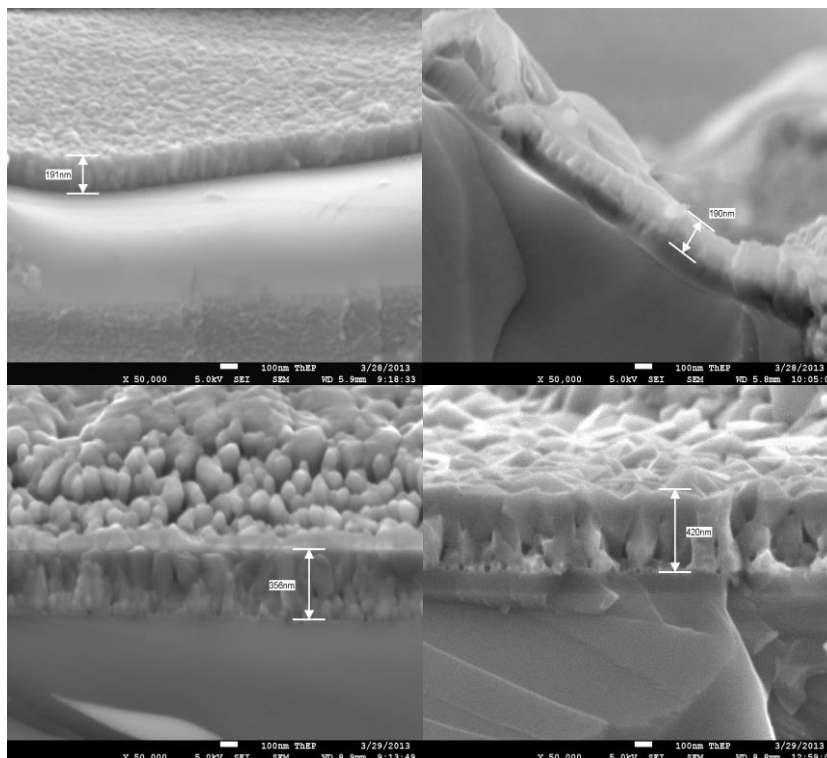
หลังกระบวนการกัดผิว

ด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

ด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

(ก)

190 นาโนเมตร



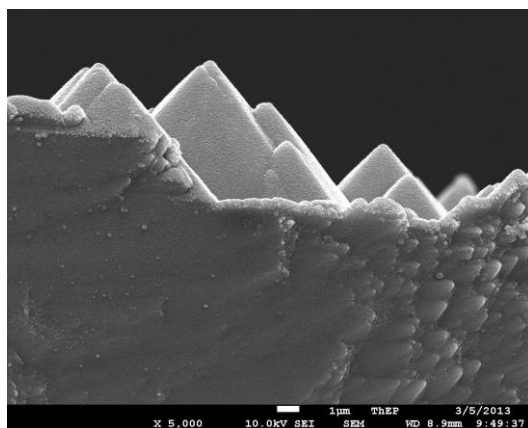
(ข)

420 นาโนเมตร

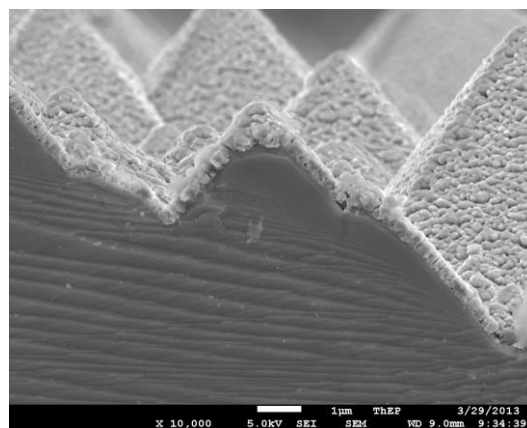
ภาพที่ 4.34 ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้นซิลิกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูโถ่

จากลักษณะภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาคของของวัสดุพื้นซิลิกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูโถ่ พบว่าภายหลังกระบวนการอบอ่อนเพื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็นชนิดรูโถ่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตรดังภาพที่ 4.35(ก) และ 4 ชั่วโมงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.35(ข) พบว่าความหนาชั้นเคลือบลดลงแต่ยังคงใกล้เคียงฟิล์มเดิม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะฟิล์มที่หนาแน่นมากขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของวัสดุพื้นสูงเพียงพอที่เกิดการแพร่ทั้งที่ผิวและภายในชิ้นงาน การแพร่นี้จะทำให้ความหนาแน่นของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลทำให้เกรนคอลลิมาร์เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร พบว่ายังเหลือรูพรุนระหว่างเกรนคอลลิมาร์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนอาจยังไม่เพียงพอที่ทำให้รูพรุนระหว่างเกรนหายไป ซึ่งสัมพันธ์กับพิกที่สามารพบตำแหน่งของโครงสร้างผลึกชนิดรูโถ่ได้แต่ความเข้มยังไม่มากโดยพิกที่พบในตำแหน่งโครงสร้างผลึกชนิดรูโถ่ อาจเนื่องจากการสลาย subgrain ที่อยู่ภายในเกรนหลักของฟิล์มบางไทเทเนียมได

ออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการอบอ่อนมากขึ้นก็อาจจะทำให้รูพรุนหายไปและเกรนคอลลัมน์าร์กลายเป็นเกรนเดี่ยวในลักษณะ equiaxed ได้ ก็จะสามารถพบฟิล์มที่ตำแหน่งของโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการเกิดนิวเคลียสและการโตของชั้นเคลือบได้ เนื่องจาก ลักษณะวัสดุพื้นที่แตกต่างกัน จะทำให้ความสม่ำเสมอของเฟสที่กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคต่างกัน ความสามารถในการเกิดการแพร่ของวัสดุเคลือบบนวัสดุพื้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียส ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นแตกต่างกันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะรูปร่างของผิววัสดุพื้นมีผลต่อความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบอย่างมาก [44,45]



(ก)

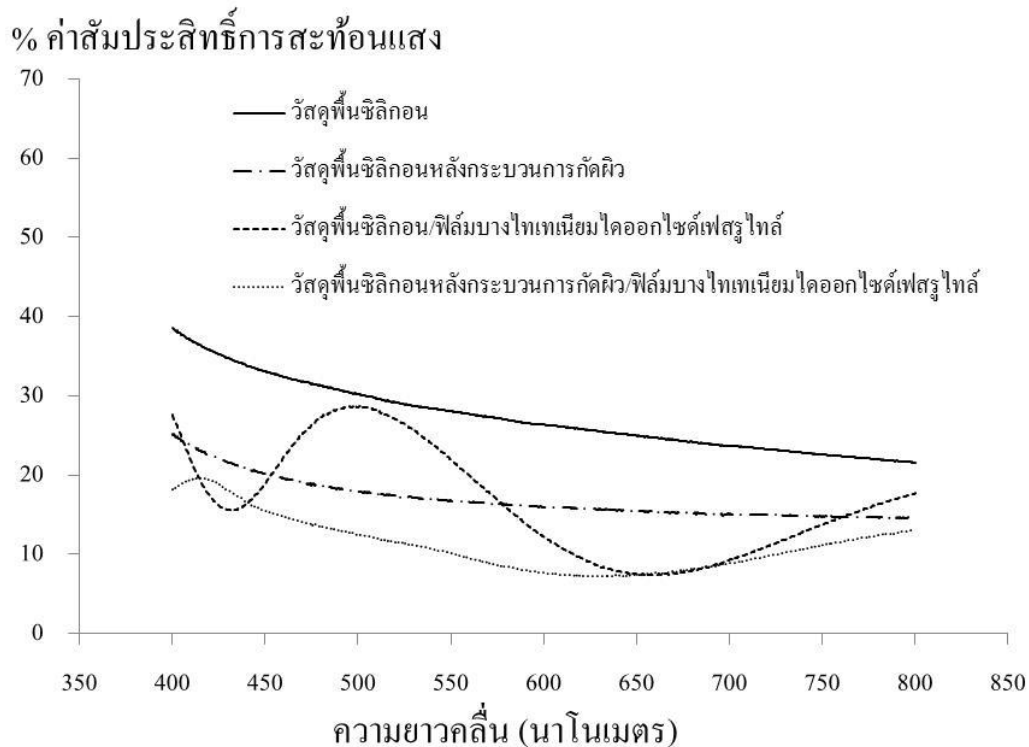


(ข)

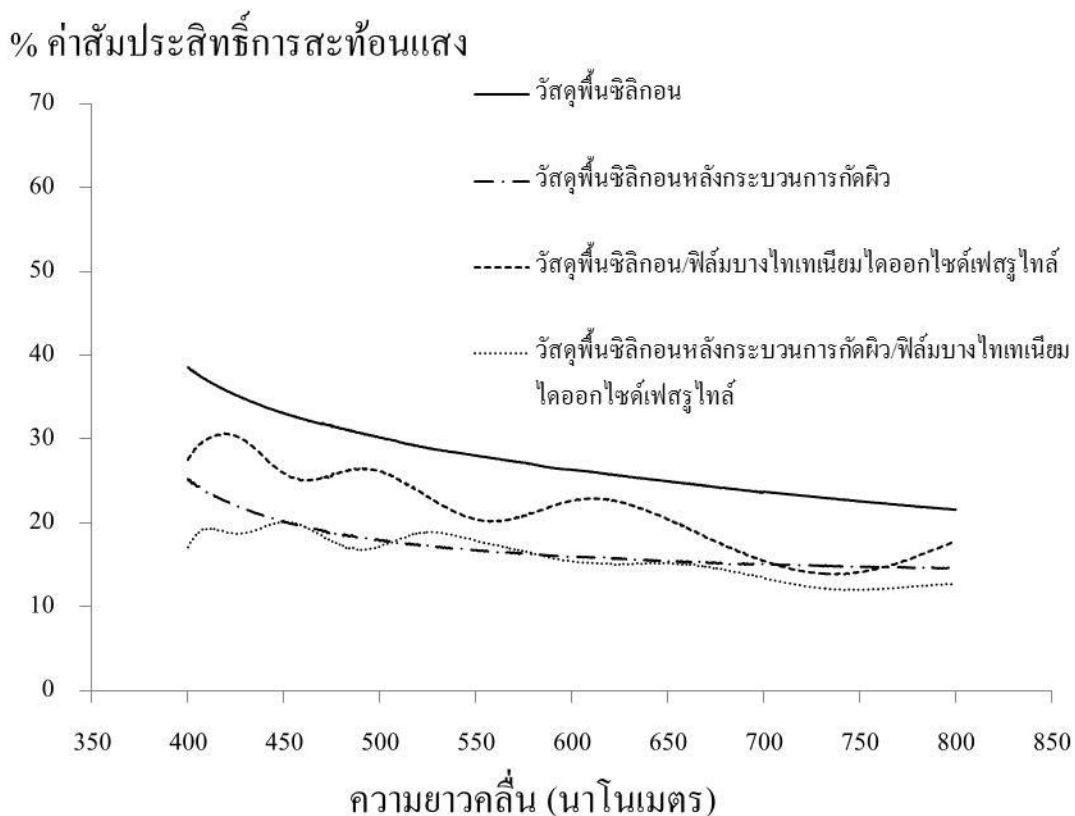
ภาพที่ 4.35 ภาคตัดขวาง โครงสร้างจุลภาควัสดุพื้นซิลิกอนและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ; (ก) หลังกระบวนการเคลือบด้วยวิธีดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริง, (ข) หลังกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวพบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะเคลือบปกคลุมตามลักษณะเนื้อพื้น ดังภาพที่ 4.36(ก) ส่วนภาคตัดขวางโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในภาพที่ 4.36(ข) พบว่าโครงสร้างผิวขรุขระที่มีลักษณะผลึกรูปพีระมิดยังสามารถคงรูปร่างเดิมได้หลังผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผิวขรุขระของวัสดุพื้นซิลิกอนที่สร้างจากกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกจะไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

#### 4.4.6 สมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดรูโกล์



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกชนิดอานาเทส ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับ ความหนา 190 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงสำหรับ ความหนา 420 นาโนเมตร

สำหรับความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 190 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ในภาพที่ 4.37 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว เท่ากับ 21.92 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 10.07 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร ในภาพที่ 4.38 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว เท่ากับ 20.42 เปอร์เซ็นต์ และเท่ากับ 17.86 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้วัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิว จะเห็นว่าการใช้วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงลดลงสำหรับทั้งความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาตลอดความยาวคลื่นในช่วง 400-800 นาโนเมตร พบว่าหลังกระบวนการอบอ่อนเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอน

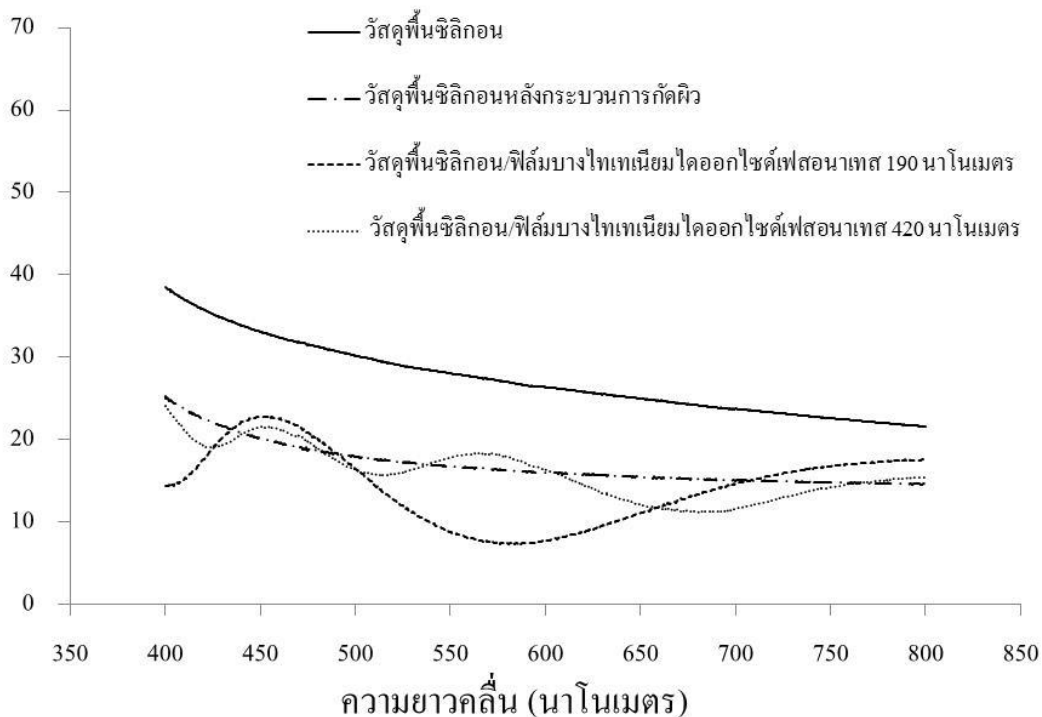
หลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตรค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น 450-650 นาโนเมตร พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร พบว่าภายหลังกระบวนการอบอ่อนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าการเคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวอย่างชัดเจนตลอดช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เนื่องจากวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกจะมีโครงสร้างลักษณะผลึกรูปพีระมิดซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสง (light trapping) ทำให้แสงเดินทางเข้ามาสู่วัสดุพื้นในแนวเฉียงสะท้อนที่ผิวของพีระมิดและเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้นทำให้เกิดการสะท้อนแสงในวัสดุพื้นหลายครั้ง ดังนั้นระยะทางเดินของแสงในวัสดุพื้นจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดกลืนแสงในวัสดุพื้นมากขึ้น [1,6]

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงระหว่างโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสและโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ จะเห็นว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ เนื่องจากฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์มีความหนาแน่นมากกว่าโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสจากลักษณะการจัดเรียงพันธะ โดยโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสมีการจัดเรียงพันธะในลักษณะ  $\text{TiO}_6$  ออกตะฮีดรัล ใช้ 4 ขอบร่วมกัน (octahedra, sharing four edges) แต่เมื่อมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นชนิดรูไทล์จะทำให้ Ti-O แยกออก 2 พันธะและเกิดการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่มีลักษณะเป็น  $\text{TiO}_6$  ออกตะฮีดรัล ใช้ 2 ขอบร่วมกัน (octahedra, sharing two edges) [47] จึงทำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์หนาแน่นกว่าชนิดอนาเทส และส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ ( $n=2.903$ ) [56] สูงกว่าชนิดอนาเทส ( $n=2.49$ ) [56] สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ไม่สามารถลดลงหรือเทียบเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เนื่องจากความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตรไม่เหมาะสมสำหรับค่าดัชนีหักเหแสงของโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ นอกจากนี้แม้ว่าค่าดัชนีหักเหแสงของโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์จะเหมาะสมสำหรับงานแต่ด้านแสง อาทิ เช่นการเคลือบบนผิวเลนส์เนื่องจากมีความเสถียรของโครงสร้างผลึกที่ดีและมีค่าดัชนีหักเหสูงแต่ถ้าพิจารณาด้านการตอบสนองต่อโฟตรอนในรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าค่า Band gap ของโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส (3.20 eV) มีความกว้างมากกว่าโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ (3.02 eV) จึงทำให้โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสนั้นตอบสนองต่อโฟตรอนในรังสี

อัลตราไวโอเล็ตมากกว่า ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสจึงเหมาะสมมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในเซลล์สุริยะ [49,53,54]

#### 4.5 ผลของความหนาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติการสะท้อนแสง

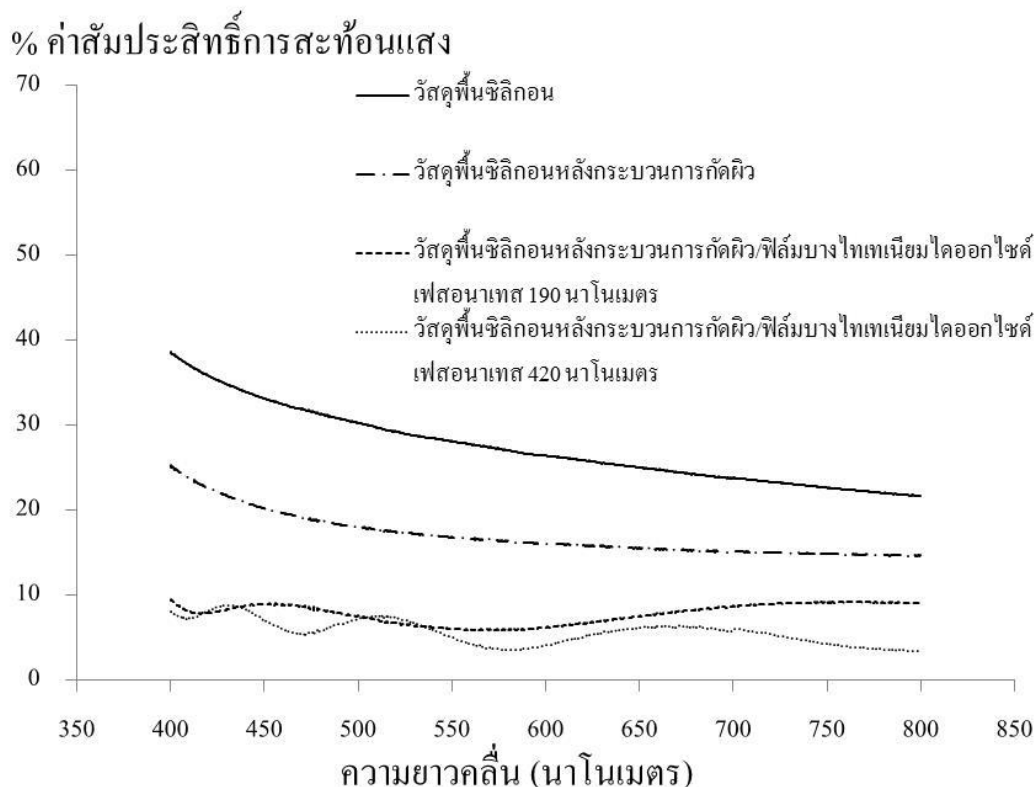
% ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง



ภาพที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

เมื่อพิจารณาที่ค่าความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส พบว่าสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.39 เท่ากับ 8.82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร เท่ากับ 17.85 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการใช้วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร และเมื่อพิจารณาตลอดช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร พบว่าการใช้วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตรมีความใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตรแต่ในช่วงความยาวคลื่น 500-650 นาโนเมตร ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นา

โนเมตรอย่างชัดเจน ดังนั้นสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก เหมาะสมที่จะเคลือบด้วยความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตรมากกว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร



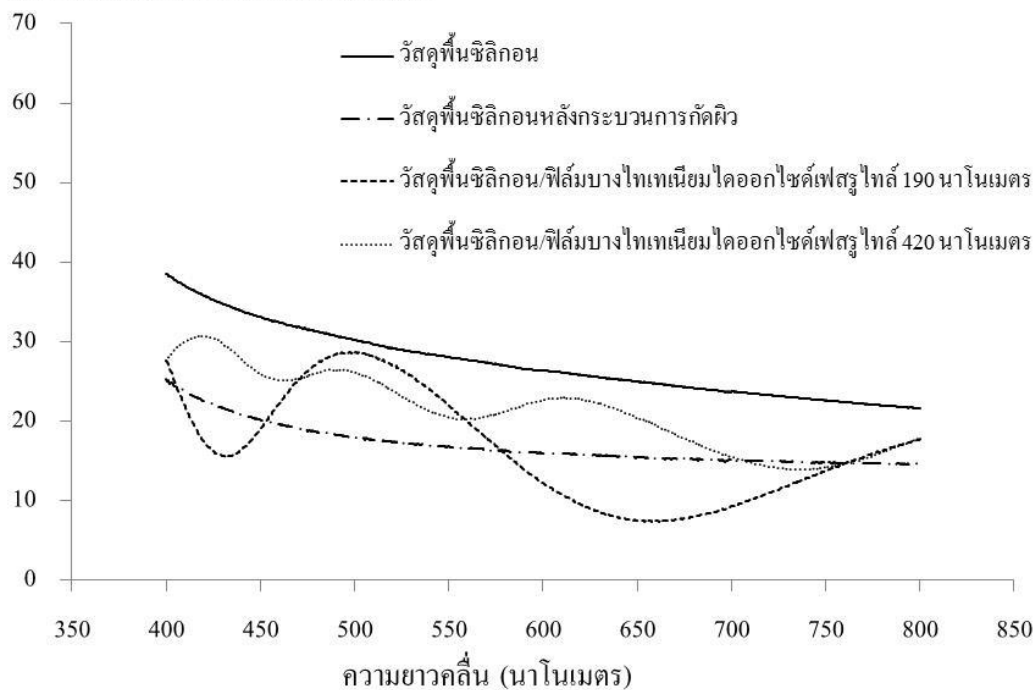
ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

เมื่อเปลี่ยนวัสดุพื้นเป็นวัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ดังภาพที่ 4.40 พิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร เท่ากับ 5.97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร เท่ากับ 4.90 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเมื่อใช้วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงระหว่างการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตรกับความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร พบว่าตลอดความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนา 420 นาโนเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนา 190 นาโนเมตรอย่างชัดเจน อาจเนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมได



ออกไซด์ความหนา 190 นาโนเมตร ฟิล์มไม่มีความไม่สม่ำเสมอเพียงพอที่จะปกคลุมทั่วทุกบริเวณของเนื้อพื้นที่มีความขรุขระสูง เพราะเมื่อวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกแล้ววัสดุพื้นซิลิกอนมีความหยาบผิวสูงทำให้พื้นที่ผิว (surface area) สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอม (mobility) เท่าเดิม จึงทำให้การดูดซับอะตอมที่ผิววัสดุพื้นสูงขึ้น การเคลื่อนที่ของอะตอมจึงลำบาก [44,45] ส่วนการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตร นอกจากลักษณะกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีลักษณะกราฟไซน์ชัดเจนแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงยังลดต่ำลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบผิว อาจเพราะความหนาของชั้นเคลือบยังเพียงพอที่จะทำฟิล์มเกิดครอบคลุมวัสดุพื้นที่มีความหยาบผิวสูง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากผลของโครงสร้างผิวขรุขระของวัสดุพื้นซิลิกอนและผลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อน

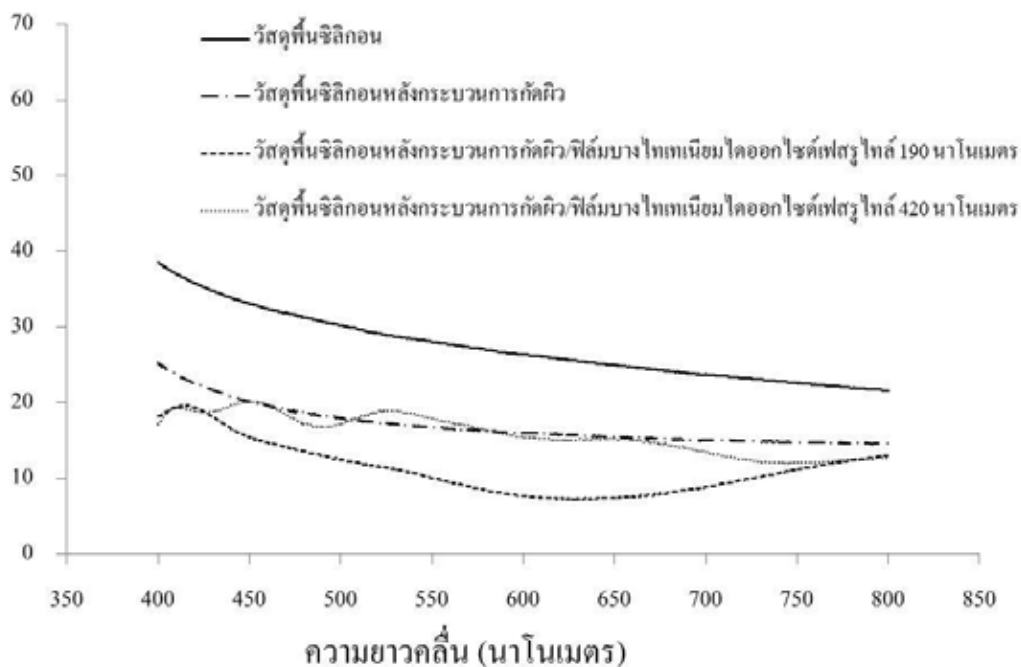
### % ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง



ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนเคลือบฟิล์มบางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ดังภาพที่ 4.41 ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสเคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร เท่ากับ 21.29 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงของฟิล์มบางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว สำหรับความหนาฟิล์ม 420 นาโนเมตร เท่ากับ 20.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกับความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร แต่เมื่อพิจารณาตลอดความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร พบว่าความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าฟิล์มบางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตรอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความยาวคลื่น 400-450 นาโนเมตร และ 550-750 นาโนเมตร

### % ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง



ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับความยาวคลื่นของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ภายหลังจากกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร ตามลำดับ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสที่เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว ดังภาพที่ 4.42 ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร เท่ากับ 10.07 และ 17.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความหนาชั้นเคลือบ 190 นาโนเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำกว่าความหนาชั้นเคลือบ 420 นาโนเมตรอย่างชัดเจน แต่จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิกเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังกระบวนการอบอ่อนพบว่า ลักษณะกราฟไซน์ไม่ชัดเจนทั้งความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร อาจเนื่องจากผลของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหลือรูพรุนระหว่างเกรนคอลลัมน์ ดังภาพที่ 4.35 ทำให้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูโพลีที่ได้ไม่สมบูรณ์ จากเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนไม่เพียงพอ แต่ถ้าใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อนมากขึ้นให้เพียงพอที่สามารถทำให้รูพรุนระหว่างเกรนคอลลัมน์หายไปได้ ลักษณะกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงอาจเกิดลักษณะกราฟไซน์ที่ชัดเจนมากขึ้นรวมถึงพิกก็อาจจะชัดเจนมากขึ้นด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว	28.04
วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว	16.78
วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 190 นาโนเมตร	8.82
วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 420 นาโนเมตร	17.85
วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 190 นาโนเมตร	5.97
วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 420 นาโนเมตร	4.9
วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 190 นาโนเมตร หลังกระบวนการอบอ่อน	21.92
วัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 420 นาโนเมตร หลังกระบวนการอบอ่อน	20.42
วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 190 นาโนเมตร หลังกระบวนการอบอ่อน	10.07
วัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิว/TiO <sub>2</sub> 420 นาโนเมตร หลังกระบวนการอบอ่อน	17.86

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกันสะท้อนด้วยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตเตอร์ริง จากการใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 500 มิลลิแอมแปร์ โดยมีเงื่อนไขการเคลือบดังนี้ อัตราการไหล Ar:O<sub>2</sub> เท่ากับ 5:15 sccm. , ระยะระหว่างเป้าถึงวัสดุพื้น 8 เซนติเมตร และ ความดันรวม  $7 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ พบว่าสามารถเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นกันสะท้อนโดยมีโครงสร้างผลึกชนิดออร์โธโรโมนาเทสได้ ที่อัตราเคลือบเท่ากับ 2.60 นาโนเมตรต่ออนาที พบว่าการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เวลาเคลือบ 1 ชั่วโมง 12 นาที ได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 190 นาโนเมตร ส่วนการใช้เวลาเคลือบ 2 ชั่วโมง 35 นาที ได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 420 นาโนเมตร ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวนี้ช่วยลดการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร ลงเหลือ 8.82 และ 17.85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร ตามลำดับ

ในกระบวนการกัดผิวซิลิกอนเพื่อเพิ่มความหยาบผิวด้วยสารละลาย NaOH พบว่าภายหลังกระบวนการกัดผิว  $R_{max}$  เพิ่มขึ้นจาก 6.836 เป็น 8.842 และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 10.744 เป็น 32.430 เปอร์เซ็นต์ โดยผลึกรูปพีระมิดกระจายทั่ววัสดุพื้นจากการกัดผิวในระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการกัดผิวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มีการกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็วรอบการกวนสารละลาย 150 รอบต่ออนาที กระบวนการกัดผิวในช่วงเพิ่มอุณหภูมิแก่สารละลายจนถึง 60 องศาเซลเซียส โดยการใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปและอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้การกัดผิวรุนแรงในทุกะนาบรวมทั้งระนาบ (111) ด้วย ส่งผลให้ผลที่ได้ไม่เกิดผลึกรูปพีระมิด ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดผิวให้เกิดผลึกรูปพีระมิดลดลงทุกความยาวคลื่นแสงและมีค่าลดลงจาก 28.04 เหลือ 16.78 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เนื่องจากรูปพีระมิดที่ได้ช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ของผิววัสดุพื้นซิลิกอนทำให้แสงที่เดินทางเข้ามาสามารถสะท้อนในทิศทางในแนวเฉียงเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้น แสงจะสะท้อนที่ผิววัสดุพื้นซิลิกอนที่มีผลึกรูปพีระมิดจึงเบี่ยงเบนเข้าสู่เนื้อวัสดุพื้น ได้มากขึ้น

เมื่อผนวกสองเทคนิคพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสำหรับการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการกัดผิวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก พบว่าการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 420 นาโนเมตรจะเหมาะสมกว่าการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 190 นาโนเมตร โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ได้สามารถลดลงต่ำเหลือ 4.9 เปอร์เซ็นต์

ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และเมื่อพิจารณาตลอดช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์สุริยะดูดกลืนได้จริง 400-800 นาโนเมตร ก็พบว่า วัสดุพื้นซิลิกอนหลังกระบวนการกัดผิวให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิวตลอดช่วงเช่นกัน

หลังกระบวนการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุพื้นซิลิกอนและตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ชิ้นงานที่ได้จะนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 4 ชั่วโมงสำหรับ ความหนา 190 และ 420 นาโนเมตร ตามลำดับ พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากชนิดอนาเทสเป็นรูไทล์ นอกจากนี้พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกโครงสร้างชนิดรูไทล์ให้ค่าการสะท้อนแสงสูงกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส คือ 21.92 และ 20.42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มบนวัสดุพื้นซิลิกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดผิว ความหนาชั้นเคลือบ 190 และ 420 นาโนเมตร ตามลำดับ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับฟิล์มกันสะท้อน เนื่องจากค่าดัชนีหักเหแสงของโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์มีค่าประมาณ 2.903 ซึ่งมากกว่าโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส

## รายการอ้างอิง

- [1] ดุสิต เครื่องาม. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา : <http://www.thaisolarfuture.com/news.php?id=3> [5 มกราคม 2553]
- [2] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรมสำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์. การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ : พัฒนาพานิชย์, 2550.
- [3] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับ โครงการสำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์ สำนักปลัดกระทรวงพลังงาน กระทรวงพลังงาน. พลังงานจากแสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา : <http://www.erdj.or.th/index.php> [4 ธันวาคม 2550]
- [4] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร. โลหะวิทยาฟิสิกส์. [ออนไลน์]. 2540. แหล่งที่มา : <http://www.neutron.rmutphysics.com> [1 พฤษภาคม 2540]
- [5] Jung Kim, M. and Young Kim, M. The enhancement of homogeneity in the textured structure of silicon crystal by using ultrasonic wave in the caustic etching process. Solar Energy Materials & Solar Cells 81 (2004) : 239–247.
- [6] Thipwan Fangsuwannarak. Reduction of reflection loss by using anisotropic texture etching for a boost in the conversion efficiency of mono crystalline silicon. [online]. 2010. Available from: [http://ird.sut.ac.th/ird\\_engine/view\\_detail.php?mode=research&id=1226](http://ird.sut.ac.th/ird_engine/view_detail.php?mode=research&id=1226) [2010, August]
- [7] Bryce Sydney Richards. Novel uses of titanium dioxide for silicon solar cells. Doctoral's Thesis, Centre for Photovoltaic and Engineering School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of New South Wales, 2002.
- [8] Toshihiro, M., Satoshi, T. and Tadatsugu, M. Preparation of anatase TiO<sub>2</sub> thin films by vacuum arc plasma evaporation. Thin Solid Films 496 (2006) : 136-140.
- [9] Satoshi, T., Susumu, S. and Hideo, O. Photocatalytic TiO<sub>2</sub> thin films deposited onto glass by DC magnetron sputtering. Thin Solid Films 393 (2001) : 338-344.
- [10] Löbl, P., Huppertz, M. and Mergel, D. Nucleation and growth in TiO<sub>2</sub> films prepared by sputtering and evaporation. Thin Solid Films 251 (1994) : 72-79

- [11] Pungboon Pansila. Effect of substrate radial position on structure of TiO<sub>2</sub> thin film deposited by DC reactive magnetron sputtering. *Thaksin.J.*, Vol.12 (3) October 2009 - January 2010.
- [12] สุพัฒน์พงษ์ คำรงค์รัตน์. รายงานการวิจัยและพัฒนากาเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2531.
- [13] Bunshah, R. F. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. 2nd edition. New Jersey : Noyes Publications, 1994.
- [14] Yamagishi, M., Kuriki, S., Song, P.K. and Shigesato Y. Thin film TiO<sub>2</sub> photocatalyst deposited by reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films* 422 (2003) : 277-231.
- [15] Zhou, W., Zhong, X., Wu, X., Yuan, L., Zhao, Z., Wang, H., Xai, Y., Feng, Y., He, J. and Chen W. The effect of surface roughness and wettability of nanostructured TiO<sub>2</sub> film on TCA-8113 epithelial-like cells. *Surface and Coatings Technology* 200 (2006) : 6155-6160.
- [16] Ogawa, H., Nakamura, A., Tokita, S., Miyazaki, D., Hattori, T. and Takamoto T. Growth of TiO<sub>2</sub> thin film by reactive RF magnetron sputtering using oxygen radical. *Journal of Alloys and Compounds* 499 (2008) : 375-378.
- [17] Okimura, K., Shibata, A., Maeda, N. and Tachibana K. Preparation of rutile TiO<sub>2</sub> film by RF magnetron sputtering. *Jpn. J. Appl. Phys* 34 (1995) : 4950-4955.
- [20] ชีระวิทย์ ดิลิเศ. โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี สปัตเตอร์ริง. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2550.
- [21] มติ ห่อประทุม. การศึกษาฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548
- [22] Hossain, M.F., Biswas, S., Takahashi, T., Kubota, Y., Fujishim, A. Influence of direct current power on the photocatalytic activity of facing target sputtered TiO<sub>2</sub> thin films. *Thin Solid Films* 517 (2008) : 1091–1095.
- [23] Horprathum, M., Eiamchai, P., Chindaudom, P., Pokaipisit, A. and Limsuwan, P. oxygen



- partial pressure dependence of the properties of TiO<sub>2</sub> thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering. Procedia Engineering 32 (2012) : 676–682.
- [24] Baoshun Liu, Xiujian Zhao, Qingnan Zhao, Chunling Li and Xin He. The effect of O<sub>2</sub> partial pressure on the structure and photocatalytic property of TiO<sub>2</sub> films prepared by sputtering. Materials Chemistry and Physics 90 (2005) : 207–212.
- [25] อศิธร นูรณวงศ์. สภาพขอบนน้ำของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี สเปคเตอริง. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551.
- [26] NRL Public Affairs. Lattice of Titaniumdioxide. 1923. Available from:  
<http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/struk.picts/c4.s.png> [1923, July 2]
- [27] Milton Ohring. The Materials Science of Thin Films. United Kingdom, London : Academic Press, 1997.
- [28] Patrick Campbell and Martin Green, A. High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells 65 (2001) : 369-375.
- [29] Mitsuhiro Shikida, Kazuo Sato, Kenji Tokoro, Daisuke Uchikawa .Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions. Sensors and Actuators A 80 (2000) : 179-188.
- [30] Chii-Rong Yanga, Po-Ying Chenb, Yuang-Cherng Chioub and Rong-Tsong Leeb. Effects of mechanical agitation and surfactant additive on silicon anisotropic etching in alkaline KOH solution. Sensors and Actuators A 119 (2005) : 263-270.
- [31] Zubel, I., Kramkowska, M. Etch rates and morphology of silicon (h k l) surfaces etched in KOH and KOH saturated with isopropanol solutions. Sensors and Actuators A 115 (2004) : 549-556.
- [32] Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger, A. and BaumgSrtel, H. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers. The Electrochemical Society 137 (1990) : 3612-3626.
- [33] Matt Moynihan, Corey O’Connor, Bob Barr, Scott Tiffany, Wolfgang Braun, George

- Allardyce, Jochen Rentsch, Katrin Birmann. IPA free texturing of mono-crystalline solar cells. EU PVSEC Proceedings (2009)
- [34] Zubel, I., Kramkowska, M. Development of etch hillocks on different Si (hkl) planes in silicon anisotropic etching. Surface Science 602 (2008) : 1712-1721.
- [35] Zubel, I., Barycka, I., Kotowska, K. and Kramkowska, M. Silicon anisotropic etching in alkaline solutions IV The effect of organic and inorganic agents on silicon anisotropic etching process. Sensors and Actuators A 87 (2001) : 163-171.
- [36] Zubel, I., Barycka, I. Silicon anisotropic etching in KOH-Isopropanol etchant. Sensors and Actuators A 87 (1995) : 229-238.
- [37] Zubel, I., Kramkowska, M. The effect of alcohol additives on etching characteristics in KOH solutions. Sensors and Actuators A 101 (2002) : 255–261.
- [38] Zubel, I., Rola, K. and Kramkowska, M. The effect of isopropyl alcohol concentration on the etching process of Si-substrates in KOH solutions. Sensors and Actuators A 171 (2011) : 436– 445
- [39] Jeehwan Kim , Daniel Inns, Keith Fogel, Devendra K. Sadana. Surface texturing of single-crystalline silicon solar cells using low density SiO<sub>2</sub> films as an anisotropic etch mask. Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) : 2091–2093.
- [40] Gos á lvez, M.A., Zubel, I. and Viinikka, E. Wet etching of silicon. In Jeremy Ramsden, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies pp.375-407. United States of America : William Andrew, 2010.
- [41] Malgorzata Kramkowska and Irena Zubel. Silicon anisotropic etching in KOH and TMAH with modified surface tension. Procedia Chemistry 1 (2009) : 774–777.
- [42] พัชรีย์ ภัคดิเสนาหา. ผลของระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าสารเคลือบต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีดีซีรีแอคทีฟสปีดเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [43] วรณิศา ชะงัดรัมย์. ผลของความดันรวมต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [44] ASM International. ASM Handbook Volumn 4 Surface Engineering. USA :

ASMInternational, 1995

- [45] George Krauss. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. Materials Park, Ohio : ASM International, 1989.
- [46] Baoxing Zhao, Jicheng Zhou, Yu Chen, Yinqiao Peng. Effect of annealing temperature on the structure and optical properties of sputtered TiO<sub>2</sub> films. Journal of Alloys and Compounds 509 (2011) : 4060-4064.
- [47] Dorian A. H. Hanaor, Charles C. Sorrell. Review of the anatase to rutile phase transformation. J Mater Sci 46 (2011) : 855-874.
- [48] Kimberly A. Farrell. Synthesis effects on grain size and phase content in the anatase-rutile TiO<sub>2</sub> system. Master's Thesis, Faculty of Materials Science and Engineering , Worcester Polytechnic Institute, 2001.
- [49] Xiu-Tian Zhaoa, Kenji Sakkaa, Naoto Kiharaa, Yasuyuki Takadab, Makoto Aritaa, Masataka Masuda. Structure and photo-induced features of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by RF magnetron sputtering. Microelectronics Journal 36 (2005) : 549-551.
- [50] Mark C. Barnes, Andrea R. Gersona, Sunil Kumara, Nong-Moon Hwang. The mechanism of TiO<sub>2</sub> deposition by direct current magnetron reactive sputtering. Thin Solid Films 446 (2004) : 29-36.
- [51] Makiko Yamagishia, Sina Kurikib, Songa, P.K., Yuzo Shigesato. Thin film TiO<sub>2</sub> photocatalyst deposited by reactive magnetron sputtering. Thin Solid Films 442 (2003) : 227-231.
- [52] Li, G.K., Shen, J.J., Mi, W.B., Li, Z.Q., Wu, P., Jiang, E.Y. and Bai, H.L. Fabrication and characterization of facing-target reactive sputtered polycrystalline TiO<sub>2</sub> films. Applied Surface Science 253 (2006) : 425-431.
- [53] Takikawa, H., Matsui, T., Sakakibara, T., Bendavid, A., Martin, P.J. Properties of titanium oxide film prepared by reactive cathodic vacuum arc deposition. Thin Solid Films 348 (1999) : 145–151.
- [54] Sir ghi, L., Aoki, T., Hatanaka, Y. Hydrophilicity of TiO<sub>2</sub> thin films obtained by radio frequency magnetron sputtering deposition. Thin Solid Films 422 (2002) : 55–61.

- [55] Yu, J., Zhao, X., Zhao, Q. Photocatalytic activity of nanometer TiO<sub>2</sub> thin films prepared by the sol-gel method. Materials Chemistry and Physics 69 (2001) : 25–29.
- [56] Kah-Yoong Chan, Teck-Yong Tou, Bee-San Teo. Thickness dependence of the structural and electrical properties of copper films deposited by dc magnetron sputtering technique. Microelectronics Journal 37 (2006) : 608-612.

ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

#### วิธีคำนวณส่วนผสมในกระบวนการกักตัวด้วยวิธีแอนไอโซทรอปิก

เนื่องจากใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเม็ดความเข้มข้น 99% โดยน้ำหนัก  
 ต้องการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์  
 หมายความว่า ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ อยู่ 5 โมล  
 จากมวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 40 กรัม/โมล

การเทียบบัญญัติไตรยางศ์

โซเดียมไฮดรอกไซด์	1 โมล	คิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์	40	กรัม
โซเดียมไฮดรอกไซด์	5 โมล	คิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์	200	กรัม

ดังนั้น

ในสารละลาย	1000 มิลลิลิตร	จะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์	200	กรัม
ถ้าใช้สารละลาย	100 มิลลิลิตร	ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์	20	กรัม

เตรียมสารละลายจากโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเม็ดความเข้มข้น 99% โดยน้ำหนัก  
 มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 99 กรัม จากสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 กรัม  
 ถ้าต้องการโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20.20 กรัม  
 เพราะฉะนั้นต้องนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20.20 กรัม มาละลายในสารละลาย 100 มิลลิลิตร  
 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ส่วนผสมคือ  
 Deionized – Water 37.5 มิลลิลิตร, IPA 12.5 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม

### ภาคผนวก ข

วิธีคำนวณการหดตัวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกระบวนการอบอ่อน

จากการเปลี่ยนโครงสร้างหลังกระบวนการอบอ่อน ได้ดังนี้

ปริมาตรของฟิล์มลดลงตามสมการที่

$$m = D \times V$$

ความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส 190 นาโนเมตร

ความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ( $D_A$ ) คือ 3.84 กรัมต่อเซนติเมตร<sup>3</sup> [7]

สมมติ

ความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส การขยายตัวหรือการหดตัวของฟิล์ม เท่ากันทุกทิศทางใน 3 มิติ

กำหนด

ความกว้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $19.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ความยาวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $19.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $19.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ปริมาตรฟิล์ม =  $19.0 \times 10^{-6} \times 19.0 \times 10^{-6} \times 19.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร<sup>3</sup> เท่ากับ  $6,859 \times 10^{-18}$  เซนติเมตร<sup>3</sup>

จากสมการที่

$$m_A = (3.84 \text{ กรัม/เซนติเมตร}^3) \times (6,859 \times 10^{-18} \text{ เซนติเมตร}^3)$$

$$m_A = (26,338.56 \times 10^{-18} \text{ กรัม})$$

สมมติ

มวลของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส = มวลของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์

ความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ ( $D_R$ ) คือ 4.10 กรัมต่อเซนติเมตร<sup>3</sup> [7]

$$V_R = m_R / D_R$$

$$V_R = (26,338.56 \times 10^{-18} \text{ กรัม}) / (4.10 \text{ กรัม/เซนติเมตร}^3) \quad \text{เท่ากับ } 6,424.04 \times 10^{-18} \text{ เซนติเมตร}^3$$

การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เป็นรูไทล์ คือ หดตัวเหลือ 185.89 นาโนเมตร

ฉะนั้น การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส เป็นรูไทล์ เกิดการหดตัว 2.16 %

ความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส 420 นาโนเมตร

ความหนาแน่นของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส ( $D_A$ ) 3.84 กรัมต่อเซนติเมตร<sup>3</sup> [7]

สมมติ

ความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส การขยายตัวหรือการหดตัวของฟิล์ม เท่ากันทุกทิศทางใน 3 มิติ

กำหนด

ความกว้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $42.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ความยาวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $42.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส  $42.0 \times 10^{-6}$  เซนติเมตร

ปริมาตรฟิล์ม เท่ากับ  $79,088 \times 10^{-18}$  เซนติเมตร<sup>3</sup>

จากสมการที่

$$m_A = (3.84 \text{ กรัม/เซนติเมตร}^3) (79,088 \times 10^{-18} \text{ เซนติเมตร}^3)$$

$$m_A = 284,497.92 \times 10^{-18} \text{ กรัม}$$

สมมติ

มวลของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดอนาเทส = มวลของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์

ความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ ( $D_R$ ) เท่ากับ 4.10 กรัมต่อเซนติเมตร<sup>3</sup> [7]

$$V_R = m_R / D_R$$

$$V_R = (284,497.92 \times 10^{-18} \text{ กรัม}) / (4.10 \text{ กรัม/เซนติเมตร}^3) \quad \text{เท่ากับ } 69,389.74 \text{ เซนติเมตร}^3$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเป็นรูไทล์ คือ หดตัวเหลือ 410.9 นาโนเมตร

การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จากโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเป็นรูไทล์ เกิดการหดตัว 2.17 %



### ภาคผนวก ค

#### วิธีการคำนวณการแทรกสอดแบบเสริม

สมการการแทรกสอดแบบเสริมสำหรับความหนาชั้นเคลือบค่าดัชนีหักเหแสง  $n_1$

$$2d = \frac{m\lambda_0}{n_1}$$

ความหนาชั้นเคลือบสำหรับการแทรกสอดที่ความยาวคลื่น  $\lambda_0$

$$d = \frac{m\lambda_0}{2n_1}$$

ความหนาชั้นเคลือบสำหรับการแทรกสอดที่ความยาวคลื่น  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  และ  $\lambda_L$  ตามลำดับ

$$d = \frac{(m+1)\lambda_1}{2n_1}$$

$$d = \frac{(m+2)\lambda_2}{2n_1}$$

$$d = \frac{(m+L)\lambda_L}{2n_1}$$

คิดความยาวคลื่น  $\lambda_0$  และ  $\lambda_1$  ที่อยู่ติดกัน

$$\frac{m\lambda_0}{2n_1} = \frac{(m+1)\lambda_1}{2n_1}$$

$$m\lambda_0 = (m+1)\lambda_1$$

$$m\lambda_0 = m\lambda_1 + \lambda_1$$

$$m\lambda_0 - m\lambda_1 = \lambda_1$$

$$m(\lambda_0 - \lambda_1) = \lambda_1$$

$$m = \frac{\lambda_1}{(\lambda_0 - \lambda_1)}$$

$$m = \frac{1}{\frac{(\lambda_0 - \lambda_1)}{\lambda_1}}$$

$$d = \left[ \frac{\lambda_1}{(\lambda_0 - \lambda_1)} \right] \left( \frac{\lambda_0}{2n_1} \right)$$

$$d = \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_0}{(\lambda_0 - \lambda_1)} \right] \left( \frac{1}{2n_1} \right)$$

$$d = \left[ \frac{1}{\frac{(\lambda_0 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_0}} \right] \left( \frac{1}{2n_1} \right)$$

$$d = \left[ \frac{1}{\frac{\lambda_0}{\lambda_1 \lambda_0} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_0}} \right] \left( \frac{1}{2n_1} \right)$$

$$d = \left[ \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0}} \right] \left( \frac{1}{2n_1} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0} = \Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right)$$

$$d = \left[ \frac{1}{\Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right)} \right] \left( \frac{1}{2n_1} \right)$$

$$d \propto \left[ \frac{1}{\Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right)} \right]$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าความหนาชั้นเคลือบจะแปรผันกับความต่างของความยาวคลื่น โดยเมื่อความหนาชั้นเคลือบมาก จะทำให้  $\Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right)$  ลดลง  $\rightarrow \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_0}$  ลดลงดังนั้น  $\frac{1}{\lambda_1}$  ต้องน้อยลง ฉะนั้น  $\lambda_1$  ต้องมากขึ้น แสดงว่า  $\lambda_1$  ขยับ เข้าใกล้ค่า  $\lambda_0$  มากขึ้น จึงทำให้กราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล : นางสาว กิ่งเพชร อัจฉมาภินันท์
- วัน - เดือน - ปีเกิด : วันจันทร์ที่ 14 พฤศจิกายน 2531
- ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 70/221 ซอยร่มเกล้า 2 หมู่บ้านพิเชษฐ ถนนร่มเกล้า  
เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
- วุฒิการศึกษา : เข้าศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง  
ปีการศึกษา 2544
- : เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550
- : เข้าศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา  
2554