

การศึกษาวิเคราะห์เชิงแสงเทคนิคสเปกโตรสโคปีคิอิลิปโซเมทรีของฟิล์มบาง
ไททานเนียมไดออกไซด์และแทนทาลัมออกไซด์เตรียมด้วยวิธีแอคทีฟแก๊ส
ว่องไวปฏิกิริยา

SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY ANALYSIS ON REACTIVE GAS-
TIMING SPUTTERED TiO_2 AND TAO THIN FILMS



दनयररन जततननन
DONYAWAN CHITTINAN

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตร
ปริญญาปริชญาคุฎฐิบัณชิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-SC-M-030-054

SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY ANALYSIS ON REACTIVE GAS-
TIMING SPUTTERED TiO_2 AND TaO THIN FILMS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-SC-M-030-054
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิเคราะห์เชิงแสงเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์และแทนทาลัมออกไซด์เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแก๊สวอวไกวปฏิบัติ
ชื่อนักศึกษา	दनयररณ จิตดินันท์
รหัสประจำตัว	59605007
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.มติ ห่อประทุม

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ฟิล์มบางเชิงแสงของโลหะออกไซด์ (metal oxide) ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบทั่วไป (Conventional reactive magnetron sputtering) และเทคนิคสปัตเตอร์แบบควบคุมเวลาของแก๊สแบบวอวปฏิบัติ (Reactive gas timing sputtering; RGT) โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี (spectroscopic ellipsometry; SE) ที่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนา โครงสร้าง และสมบัติเชิงแสง โดยทำการศึกษาฟิล์มบาง 2 ชนิดที่มีความแตกต่างกันคือ ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (Tantalum oxide; TaO) ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และ ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO₂) ที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคทั้งสองแบบมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มี ความแตกต่างในแง่ของโครงสร้างเชิงกายภาพ แต่จะพบเห็นความแตกต่างของช่วงความหนา ระหว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบเกาะ (nanoisland) จนถึงโครงสร้างแบบชั้นฟิล์มบางหนาแน่น (dense layer) ในช่วงการก่อตัวของฟิล์มบางขั้นต้น (initial growth state) ที่ขึ้นกับความถี่ในการเปิดปิดแก๊สวอวปฏิบัติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทู (in-situ spectroscopic ellipsometry : iSE) ขณะที่ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคทั้งสองแบบมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการแบ่งชั้นภายในฟิล์มบางอย่างชัดเจน โดยความถี่ในการเปิดปิดแก๊สวอวปฏิบัติส่งผลโดยตรงต่อความเป็นผลึก (crystallinity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหเชิงแสง (refractive index : n) โดยตรง ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค SE จะได้รับการยืนยันโดยเทคนิควิเคราะห์อื่น ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field-emission scanning electron microscopy; FE-SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Photoelectron spectroscopy; XPS) และ เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer)

คำสำคัญ : สปีดเตอริง เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สแบบไวปฏิกิริยา แทนทาลัมออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์ สเปกโตรสโคปีคอลลีโซเมทรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Spectroscopic Ellipsometry Analysis on Reactive Gas-Timing Sputtered TiO ₂ and TaO Thin Films
Student Name	Donyawan Chittinan
Student ID	59605007
Degree	Doctor of Philosophy (Applied physics)
Department	Physics
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Prathan Buranasiri
Thesis Co-advisor	Dr. Mati Horprathum

Abstract

The purpose of this thesis was to study the metal oxide thin films in terms of fabrication technique, surface morphology, and optical properties. The fabrication technique was done base on the use of conventional (CONV) and reactive gas-timing (RGT) reactive magnetron sputtering techniques. The characterization technique was mainly determined by using spectroscopic ellipsometry (SE) which determined film thickness, structure and optical characteristics. This thesis study on two different type of thin film: (1) tantalum oxide (TaO) thin film which was a high homogeneous film and (2) titanium dioxide (TiO₂) that was representative of inhomogeneous film. The results showed that the TaO films prepared by both CONV and RGT techniques were homogeneous films without different physical structure. However, the difference was observed in the short range of structural change from nanoisland structure to perfect dense layer along the initial growth state related to the frequency of reactive gas supplement. This change could be observed through the in-situ spectroscopic ellipsometry (iSE). The TiO₂ films prepared from both techniques were inhomogeneous films with clearly seperated layer in structure. The frequency supply of reactive gas affected directly to their crystallinity which related to the refractive index (n). The SE analysis was validated with other characterization techniques including field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), transmission electron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and UV-VIS-NIR spectrophotometry.

Keywords : sputtering, reactive gas timing, tantalum oxide, titanium dioxide, spectroscopic ellipsometry



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยช่วยชี้แนะแนวทางในการวิจัยและแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.มติ ห่อประทุม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการชี้แนะแนวทางกระบวนการคิดทางด้านงานวิจัย แนวทางการแก้ไขปัญหา ข้อเสนอแนะและความช่วยเหลือทุกๆด้านในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์ และอนุญาตให้ผู้วิจัยเข้ามาใช้อุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย ได้แก่ สเปกโตรโฟโตเมทรีและสเปกโตรสโคปีอิลิปโซเมทรี

ขอขอบคุณ ดร.ทศพร เลิศวนิชผล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้ความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอิลิปโซเมทรี

ขอขอบพระคุณ ทีมวิจัยเทคโนโลยีเซนเซอร์แสงไฟฟ้าเคมี (Opto-Electrochemical Sensing Research Team; OEC) ได้แก่ คุณวิยะพล พัฒนะเศรษฐกุล และคุณชนันธร ชนนนวรร ที่ให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษา และคอยให้ความรู้และความช่วยเหลือต่างๆระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือในการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI) ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือในการตรวจวัดธาตุและส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสงที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การแผ่ของแสง	5
2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)	5
2.1.2 ค่าดัชนีหักเห (Refractive index)	7
2.1.3 โพลาริเซชันของแสง	10
2.2 สมบัติเชิงแสงของวัสดุ	11
2.3 การสะท้อน การส่งผ่านของแสง และมุมบรีวสเตอร์	12
2.4 การแทรกสอดของแสง	14
2.5 สมการพื้นฐานของอิลิปโซเมทรี	16
2.6 โครงสร้างแบบจำลองเชิงแสง	19
2.6.1 สมการคอชีและสมการเซลมายด์ (Cauchy and Sellmeier equation)	19
2.6.2 สมการลอเรนซ์ (The Lorentz Dispersion)	20
2.6.3 ทาวส์-ลอเรนซ์ ออสซิลเลเตอร์ (Tauc-Lorentz Oscillator; TL)	22
2.6.4 คอดี้-ลอเรนซ์ (Cody – Lorentz; CL)	22
2.7 ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบสปีดเทอริง	23
2.7.1 หลักการสปีดเทอริง	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2	อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ	24
2.7.3	ค่าyieldของสปัตเตอริง (Sputtering yield; Y)	25
2.7.4	กระบวนการเกิดแก๊สดีสชาร์จ	25
2.7.5	ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง (DC magnetron sputtering)	26
2.7.6	ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (RF magnetron sputtering)	28
2.7.7	บริเวณโครงสร้างของการเกิดฟิล์ม	33
2.8	เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	34
2.9	โครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	36
2.10	โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	38
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1	การเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	40
3.2	การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	44
3.2.1	การศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ โดย เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีมิโสมเมทรี	44
3.2.2	การศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเทคนิค สเปกโตรสโคปีคอลลีมิโสมเมทรีแบบอินซิตู (in-situ Spectroscopic Ellipsometry; iSE)	47
3.2.3	การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
3.2.4	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัม- ออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	49
3.2.5	การศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเครื่องวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	50
3.2.6	การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	51
3.2.7	การวิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแทนทาลัม- ออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์	52
3.3	การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	53
3.4	การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโพลิโไซเมทรี	55
3.4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55
3.4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	55
3.4.4 การศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	55
3.4.5 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	56
3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์	56
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	57
4.1 วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	57
4.1.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโพลิโไซเมทรีแบบเอ็กซ์ทราวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	58
4.1.2 วิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญและค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	62
4.1.3 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโพลิโไซเมทรีแบบอินซิทูวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	64
4.1.4 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	72
4.1.5 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	72
4.1.6 การใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	76
4.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์	77
4.2.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโพลิโไซเมทรีแบบเอ็กซ์ทราวิเคราะห์ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์	79
4.2.2 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3	การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวิเคราะห์ฟิล์มบาง ไททาเนียม ไดออกไซด์	85
4.2.4	การใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์ ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	88
4.2.5	การใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง ไททาเนียมไดออกไซด์	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		93
5.1	สรุปผลการวิจัย	93
5.1.1	สรุปผลงานวิจัยในส่วนของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	93
5.1.2	สรุปผลงานวิจัยในส่วนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	94
5.2	ข้อเสนอแนะ	95
ภาคผนวก		110
ภาคผนวก ก		111
ภาคผนวก ข		120
ประวัติผู้เขียน		124



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของแทนทาลัมออกไซด์	37
2.2 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์	39
3.1 แสดงเงื่อนไขการเคลือบชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	43
3.2 แสดงการเคลือบชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วย 2 เทคนิค	43
3.3 แสดงเงื่อนไขการเคลือบชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	54
3.4 แสดงการเคลือบชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย 2 เทคนิค	54
4.1 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการคอดี	60
4.2 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการทาวส์-ลอเรนซ์	60
4.3 ข้อมูลอินทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการทาวส์-ลอเรนซ์	68
4.4 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางกายภาพ	81
4.5 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการคอดี-ลอเรนซ์	82
4.6 ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2 การแผ่ของแสงใน (a) ตัวกลางโปร่งใส ($k=0$) และ (b) ตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง ($k>0$)	8
2.3 ลักษณะโพลาริเซชันแบบต่างๆ	10
2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพลาริเซชันที่มีความแตกต่างของเฟสเมื่อ $E_{x0} = E_{y0}$	11
2.5 ไดโพลไฟฟ้า (ก) ทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า และ (ข) เกิดแรงกระทำต่อไดโพล	11
2.6 การสะท้อนแสงของ p- และ s-polarized	13
2.7 การพล็อตระหว่างแสงสะท้อนกับมุมตกกระทบของ (a) อากาศและแก้ว และ (b) รอยต่อระหว่างอากาศ และ c-Si จากรูปภาพยังแสดงมุมบริวสเตอร์ (θ_B) และมุม pseudo-brewster angle ($\theta_{B'}$)	14
2.8 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง	15
2.9 การแทรกสอดของแสงของ (ก) ฟิล์มหลายชั้นและ (ข) รูปแบบการลดลงในการกำหนดฟิล์มหลายชั้น	16
2.10 หลักการวัดของอิลิปโซเมทรี	16
2.11 โครงสร้างแบบจำลองเชิงแสงของ (ก) ชั้นสเตรต (ข) ฟิล์มบางบนชั้นสเตรต (c) ฟิล์มบางกับชั้นขรุขระของพื้นผิวบนชั้นสเตรตและ (ง) ฟิล์มบางหลายชั้นบนชั้นสเตรต	19
2.12 ส่วนประกอบห้องสุญญากาศของระบบสปัตเตอริง	24
2.13 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวของเป้าสารเคลือบ	25
2.14 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	27
2.15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการจัดเป้าสารเคลือบในระบบเคลือบฟิล์มบางแบบพลาสมาแมกนีตรอน สปัตเตอริง	28
2.16 ลักษณะแผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง	29
2.17 (a) – (h) แสดงขั้นตอนการเกิดฟิล์ม	30
2.18 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ	34
2.19 แสดงกราฟของอัตราการไหลของแก๊สปฏิกิริยาเทียบกับเวลา	36
2.20 โครงสร้างผลึกของแทนทาลัมเพนทอกไซด์	37
2.21 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์	38
3.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอริง ของบริษัท AJA International, Inc. รุ่น ATC 2000-F sputtering system	41
3.2 การประกอบชิ้นส่วนของหัวสปัตเตอริง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3	Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer (VASE) ที่มีตัวรับแสงเพื่อวิเคราะห์แบบหมุนรอบแกน (Rotating Analyzer Ellipsometer: RAE)	44
3.4	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปคิโพลิโพไซเมทรี	45
3.5	ภาพถ่ายของเครื่องสเปกโตรสโคปคิโพลิโพไซเมทรีแบบอินซิทู (ก) M-2000 spectrometer และ EC-400 Electronic Controller (ข) light source (Xenon Arc lamp) (ค) CCD Detector (ง) in-situ spectroscopic ellipsometer (J.A.Woollam)	47
3.6	เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น SU8030	48
3.7	เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รุ่น JEM-2100Plus	49
3.8	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รุ่น TTRAXIII ของบริษัท Rigaku	50
3.9	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Cary 7000 Universal measurement spectrophotometer (UMS) บริษัท Agilent technologies	51
3.10	เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ระบบลำแสงที่ 3.2b	52
4.1	แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์แบบหนึ่งชั้น	59
4.2	ผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV ที่มุมตกกระทบ 50 60 และ 70 องศา โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองจากสมการคอสซีและแบบจำลองจากสมการทาวส์-ลอเรนซ์ ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O ₂ 17:3 (ง) RGT O ₂ 3:3	61
4.3	ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	62
4.4	ช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O ₂ 17:3 (ง) RGT O ₂ 3:3	63
4.5	การเปลี่ยนแปลงค่า Ψ และ Δ ที่ทำการวัดด้วยเทคนิคคิโพลิโพไซเมทรีตลอดช่วงระยะเวลา 30 นาที ที่ฟิล์มทำการก่อตัวด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปีเตอริงแบบทั่วไปและแบบเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	64
4.6	วิถีโคจรเส้นโค้ง Ψ และ Δ ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ถูกเตรียมโดย (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O ₂ 17:3 (ง) RGT O ₂ 3:3 ตามลำดับ ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจำลองจากดัชนีการหักเหของแสงที่ค่าต่าง ๆ	65
4.7	(ก) แบบจำลองทางกายภาพที่เป็นไปได้สำหรับการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (ข) วิถีโคจรเส้นโค้ง Ψ และ Δ ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคสปีเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพที่เป็นไปได้ และ (ค) ช่วงข้อมูลระยะเริ่มต้นของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์	67

4.8 (ก) ค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (ข) สัดส่วนปริมาตรของช่องว่างกับความหนาของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ระยะแรกเริ่มของการเติบโตซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยอินซิทูโดยทำการร่างเส้นขึ้นเพื่อให้มองเห็นเทรนได้ชัดเจนขึ้น	69
4.9 ผลไดนามิกของความหนาฟิล์ม สัดส่วนปริมาณช่องว่าง ค่าดัชนีหักเหของแสง และค่า MSE ของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์โดยการใช้เทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ทำการวิเคราะห์โดยอินซิทู	70
4.10 (ก) ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เตรียมไว้ทั้งหมด (ข) ความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์โดยเทคนิคแบบเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ทำการวิเคราะห์โดยอินซิทูและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	71
4.11 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่เวลา 30 และ 90 วินาที	72
4.12 รูปแบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	73
4.13 สเปกตรัมที่ความละเอียดสูงของสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ทำการวิเคราะห์ห่องค์ประกอบ (ก) O1s (ข) Ta4f ของฟิล์มบาง และ (ค)-(ง) เพอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์โดยเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	75
4.14 สเปกตรัมการส่งผ่านของแสงและค่าการส่งผ่านของแสงเฉลี่ยในฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ใช้เทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา	76
4.15 แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์	80
4.16 ผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่มุมตกกระทบ 70 องศา โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง SLM DLM และ TLM	82
4.17 (ก) แบบจำลองทางกายภาพของแบบจำลอง TLM (ข) การกระจายตัวของดัชนีการหักเหของแสงของชั้นล่าง (L1) ชั้นกลาง (L2) และชั้นบน (L3) ของฟิล์ม CONV, RGT 57:3, RGT 7:3 และ RGT 3:3	83
4.18 รูปแบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยการสปีดเตอริงแบบทั่วไป (CONV) เทคนิค RGT 57:3, RGT 7:3 และ RGT 3:3	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19 ภาพตัดขวาง TEM ของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้ โดยเปรียบเทียบกับ depth profiles ของ SE	86
4.20 ภาพ HR-TEM ที่ชั้น L1, L2 และ L3 ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	87
4.21 ผลลัพธ์ของเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอน ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (a) สเปกตรัมที่สแกนแบบกว้าง (ข) C1s, (ค) Ti2p และ (ง) O1s	89
4.22 (ก) องค์ประกอบของอะตอม (b) องค์ประกอบทางเคมีของ C1 และ (c) องค์ประกอบทางเคมีของ O1 ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	90
4.23 (ก) สเปกตรัม %R ระหว่างฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ บนกระจกสไลด์และกระจกเปล่าในช่วง 250-850nm และ (ข) ความยาวคลื่นที่ต่ำสุดของการสะท้อนแสงและ %R ที่เจาะจงเฉพาะความยาวคลื่นต่ำสุด	91
4.24 ค่า Omni-T ของ (ก) กระจกเปล่า (ข) CONV (ค) RGT 57:3 (ง) RGT 7:3 และ (จ) RGT 3:3 ในช่วงความยาวคลื่น 250-850 นาโนเมตร ที่ช่วงมุมตกกระทบที่หลากหลายตั้งแต่ 0°-80°	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

ALD	เทคนิคการตกเคลือบแบบชั้นอะตอมมิก
Ar	แก๊สอาร์กอน
CL	คอดี-ลอสเลนซ์
CONV	การเคลือบด้วยเทคนิคสปัตเตอริงแบบทั่วไป
CVD	การตกเคลือบด้วยไอเชิงเคมี
DLM	แบบจำลองแบบสองชั้น
eSE	เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลิมโซเมทรีแบบเอ็กซ์ซิทู
FE-SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
GIMS	เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบฉีดแก๊ส
GIXRD	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
HR-TEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
iSE	เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลิมโซเมทรีแบบอินซิทู
L1	ฟิล์มชั้นล่าง
L2	ฟิล์มชั้นกลาง
L3	ฟิล์มชั้นบน
MBE	อีพีแทกซีใช้ลำโมเลกุล
O ₂	แก๊สออกซิเจน
PES	เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์
PLD	การทับถมของเลเซอร์พัลซิ่ง
RGP	เทคนิคควบคุมพัลส์ของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา
RGT	เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา
SE	เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลิมโซเมทรี
SiO _x N _y	ซิลิกอนออกซีไนไตรด์
SLM	แบบจำลองทางกายภาพแบบหนึ่งชั้น
Ta	แทนทาลัม
TaO	แทนทาลัมออกไซด์
TEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
Ti	ไททาเนียม
TiO ₂	ไททาเนียมไดออกไซด์
TiO _x N _y	ไททาเนียมออกซีไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL	ทาวส์-ลอเรนซ์
TLM	แบบจำลองแบบสามชั้น
XPS	เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์
XRD	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
\bar{B}	สนามแม่เหล็ก
\bar{D}	สนามการกระจัด
\bar{E}	สนามไฟฟ้า
\bar{H}	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
ρ	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า
ϵ	สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง
ϵ_0	สภาพยอมทางไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ
μ	สภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลาง
μ_0	สภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ
J	ความหนาแน่นกระแส
Ψ	แอมพลิจูด
Δ	เฟส
θ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน เทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสงมีบทบาทอย่างกว้างขวางทั้งทางตรงและทางอ้อมในการประยุกต์ใช้ด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์โทรคมนาคม ซึ่งออกมาในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) กระจกป้องกันฝ้า (anti-fog glasses) จอแสดงผลแบบสัมผัส (touch screen) ของคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือ เส้นใยแก้วนำแสง (fiber optics) หรือแม้กระทั่งการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางบนเลนส์แว่นตาเพื่อลดแสงสะท้อน (anti-reflection coating) การเคลือบฟิล์มบางบนกระจกอัจฉริยะ (smart windows) หรือฟิลเตอร์ทางแสง (optical filters) เป็นต้น [1-5] โดยฟิล์มบางเชิงแสงนั้นสามารถสังเคราะห์ได้หลายลักษณะ ทั้งโครงสร้างแบบฟิล์มบางชั้นเดียว หรือโครงสร้างแบบฟิล์มบางหลายชั้น โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าดัชนีหักเหและความหนาของชั้นฟิล์ม [6] วัสดุที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกหรือสารกึ่งตัวนำที่โปร่งแสงและทนความร้อนได้ดี เช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ (MgF_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ (TiO_xN_y) และ แทนทาลัมออกไซด์ (TaO) เป็นต้น [7-9]

ฟิล์มบางเชิงแสงนั้นสามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายเทคนิค ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) เทคนิคการเคลือบเชิงเคมี (chemical technique) ได้แก่ การตกเคลือบด้วยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition; CVD) [10-13] การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) [14-16] การเคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจล (sol-gel method) และ (2) เทคนิคการเคลือบเชิงฟิสิกส์ (physical technique) ได้แก่ เทคนิคการตกเคลือบแบบชั้นอะตอมมิก (atomic layer deposition; ALD) [17-19] เทคนิคการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) [20-22] และเทคนิคครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (reactive magnetron sputtering) [1, 2, 23-26] ซึ่งในภาคอุตสาหกรรม เทคนิคครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีอัตราการเคลือบสูง (high deposition rate) มีการยึดติดระหว่างฟิล์มบางและวัสดุฐานรองรับที่ดี (high adhesion) สามารถทำซ้ำได้ (repeatable) สามารถทำการเคลือบในพื้นที่ใหญ่ได้ (large area) และยังสามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม สำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบางของโลหะออกไซด์ (metal oxide) และโลหะออกไซด์ไนไตรด์ (metal oxynitride) ด้วยเทคนิคครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง แก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (reactive gas) ในระบบจะเกิดปฏิกิริยาการวนรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

effect) ของพารามิเตอร์ ทำให้เกิดภาวะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non linear) เมื่อทำการเทียบกับอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่งมีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการทดสอบภาวะที่เกิดขึ้น [27-29] จากผลกระทบของภาวะดังกล่าว Sproul และคณะ ได้เสนอแนวทางแก้ไขแบบดั้งเดิม [30] โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมการป้อนกลับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนโดยมวลสาร ซึ่งประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบางซิลิกอนออกไซด์ไนไตรด์ (silicon oxynitride; SiO_xN_y) และไททาเนียมออกไซด์ไนไตรด์ (titanium oxynitride; TiO_xN_y) ด้วยความเข้มข้นทางเคมีที่ปรับได้และการควบคุมกระบวนการที่ดีขึ้น หลังจากนั้น Aronson และคณะ [31] และกลุ่มวิจัยอื่นๆ [32, 33] ได้เสนอแนวทางใหม่สำหรับการสะสมของออกไซด์ของโลหะหรือไนไตรด์ซึ่งแก๊สที่เกิดปฏิกิริยาจะเปิดและปิดเป็นจังหวะ โดยในที่สุด Martin และคณะ [34-36] และกลุ่มวิจัยอื่นๆ [37, 38] ได้พัฒนากระบวนการเคลือบโดยใช้เทคนิคควบคุมพัลส์ของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (reactive gas-pulsing; RGP) หรือเทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (reactive gas-timing; RGT) สำหรับการเคลือบฟิล์มบางของโลหะออกไซด์และออกไซด์ไนไตรด์ โดยจะพบว่าฟิล์มมีอัตราการเคลือบที่สูงภายใต้สภาวะโดยรอบที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงกระบวนการรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริงแบบปกติได้สำเร็จ เนื่องจากความแตกต่างคุณสมบัติของฟิล์มขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มซึ่งจะอธิบายได้ด้วยกลไกการเติบโต (growth) ของฟิล์ม โดยลักษณะการก่อตัวของฟิล์มในระยะเริ่มต้นจะมีโครงสร้างในลักษณะที่เป็นเกาะ (island) แยกจากกัน จากนั้น โครงสร้างแบบเกาะจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนเกิดการรวมกลุ่มกัน (coalescence) และเกิดการก่อตัวกันจนทับถมมีโครงสร้างแบบชั้นฟิล์มบางขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะทำให้พลังงานของสเปคโตรอะตอม (sputtered atom) มีพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานของสเปคโตรอะตอมจะส่งผลอย่างยิ่งต่อช่วงก่อตัวเริ่มต้น (initial growth) รวมถึงโครงสร้างของเนื้อฟิล์มบาง และสมบัติต่างๆของฟิล์มบางซึ่งมีผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป [39] จากปัจจัยดังกล่าว การศึกษากระบวนการและลักษณะการก่อตัวของฟิล์มบางโลหะออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริงควบคู่กับเทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญ แต่มีงานวิจัยที่ศึกษาในประเด็นดังกล่าวนี้ค่อนข้างน้อย

การวิเคราะห์กระบวนการและลักษณะการก่อตัวของฟิล์มบางสามารถทำได้ในสองลักษณะ คือ การวิเคราะห์ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (ex-situ) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่สังเคราะห์ด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน และการวิเคราะห์ระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (in-situ) ซึ่งจะพิจารณาความเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับช่วงเวลาขณะนั้นที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม โดยเทคนิควิเคราะห์ที่สามารถทำได้ทั้งสองลักษณะและมีจุดเด่นในการพิจารณาในแง่ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบาง คือ เทคนิคสเปกโตรสโคปีอิลลิปโซเมทรี (spectroscopic ellipsometry; SE) ซึ่งอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (polarization) ของแสงที่สะท้อนจากชั้นงานฟิล์มบางที่จะสัมพันธ์กับสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง [40-42] อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันไม่สามารถแปลผลเป็นสมบัติของฟิล์มบางได้โดยตรง ต้องอาศัยการสร้างโมเดลเชิงแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(optical model) ที่ใกล้เคียงกับสมบัติของฟิล์มบางโดยเฉพาะลักษณะโครงสร้าง (structure) ความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) ความหนา (thickness) ความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) และสมบัติเชิงแสง (optical properties) ให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงจากการจำลอง (simulation) ผ่านโมเดลเชิงแสงให้ใกล้เคียงกันกับผลการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้ [40-42]

จากปัจจัยดังกล่าว การศึกษากระบวนการและลักษณะการก่อตัวของฟิล์มบางโลหะออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงควบคู่กับเทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปีออลิปีไซเมทรีจึงเป็นหัวข้อที่ท้าทายและน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบางเชิงแสง รวมถึงการพัฒนาฟิล์มบางที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมด้านต่างๆต่อไปได้อีกในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปีออลิปีไซเมทรีทั้งแบบเอ็กซ์ซิทีว และอินซิทีว
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ที่เคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปีออลิปีไซเมทรีแบบเอ็กซ์ซิทีว
- 3) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดลักษณะพิเศษของฟิล์มบางที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่ใช้เทคนิคการเคลือบแบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนเวเฟอร์และกระจกสไลด์ ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา
- 2) เตรียมฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนเวเฟอร์และกระจกสไลด์ ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา
- 3) ศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการการเกิดของฟิล์มบางและสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีออลิปีไซเมทรีทั้งแบบเอ็กซ์ซิทีว และอินซิทีว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงหลักการและเข้าใจลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์และไททานเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์แบบทั่วไปและแบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา
- 2) มีความเข้าใจในหลักการวิเคราะห์และการใช้เครื่องมือ สามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงของชั้นฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 3) สามารถนำข้อมูลการวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

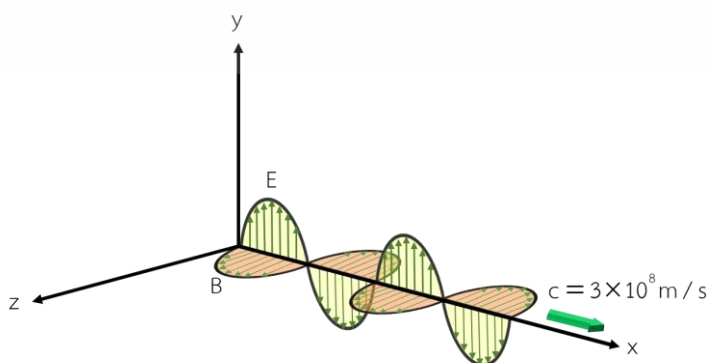
ในการศึกษากระบวนการและลักษณะการก่อตัวของฟิล์มบางโลหะออกไซด์โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปคอลลีโพรเมทรี จำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการสำคัญโดยเฉพาะ การแผ่ของแสง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบลงบนวัสดุ พื้นฐานของเทคนิคคอลลีโพรเมทรี และโครงสร้างแบบจำลองเชิงแสงสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคอลลีโพรเมทรี รวมถึงพื้นฐานเทคนิคในการสังเคราะห์ฟิล์มบางที่ใช้ในการศึกษาคือ เทคนิคครีแอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง และเทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาดังกล่าว รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญต่อการนำไปวิเคราะห์ผลและนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่อไป

2.1 การแผ่ของแสง (Propagation of light) [48]

แสง (light) มีสมบัติความเป็นคลื่น โดยภายหลังจากที่แมกซ์เวลล์ได้ค้นพบเพิ่มเติมว่าแสงมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า และถูกนิยามว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการคลื่น (wave function) และแสดงพฤติกรรมที่มีการสะท้อน หักเห เลี้ยวเบน และแทรกสอดเมื่อเกิดการแผ่ของแสงภายในตัวกลางต่างๆที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลาง สามารถพิจารณาได้ตามรายละเอียดดังนี้

2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)

ในปี ค.ศ.1849 แมกซ์เวลล์พบว่า แสงมีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการสั่นของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศการแผ่ของแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การแผ่ของแสงในตัวกลางจะสามารถพิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางของแมกซ์เวลล์ทั้ง 4 สมการคือ



รูปที่ 2.1 ลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในสถานะสุญญากาศ (Free space)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

และสำหรับตัวกลางใดๆ

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

เมื่อ

\vec{E} คือ สนามไฟฟ้า

\vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก

\vec{H} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสถานะสุญญากาศ ($8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$)

μ_0 คือ สภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N.s}^2/\text{C}^2$).

\vec{J} คือ ความหนาแน่นกระแส

\vec{D} คือ สนามการกระจัด

ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลาง

μ คือ สภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลาง

จากลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการของแมกซ์เวลล์ สนามไฟฟ้า E สามารถพิจารณาให้เป็นฟังก์ชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามเวลา และเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (หรือความหนาแน่นฟลักซ์ของแม่เหล็ก) B ในระนาบที่ตั้งฉากกัน โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีเฟสเดียวกัน (เมื่อ $E = 0$ จะทำให้ $B = 0$) ขณะที่ทิศทางของการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B โดยมีความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศคงที่เท่ากับ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของคลื่นใน 1 มิติ

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.7)$$

$$B = B_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.8)$$

รวมถึงความสัมพันธ์ $E_0 = cB_0$ ดังนั้น

$$E = cB \quad (2.8)$$

2.1.2 ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) [48]

การหักเหของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถสังเกตปรากฏการณ์นี้ได้ในชีวิตประจำวัน เช่น การเห็นหลอดหักงอในแก้วน้ำ การเห็นปลาในน้ำที่อยู่ตื้นกว่าความจริง เป็นต้น โดยทิศทางการหักเหของแสงจะเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ซึ่งจะขึ้นกับมุมตกกระทบของแสงบริเวณรอยต่อตัวกลาง และค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index; n) ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแสงในตัวกลาง ดังสมการ

$$n = c / s \quad (2.9)$$

เมื่อ s คือความเร็วของแสงในตัวกลาง ดังนั้นการแผ่ของแสงจะช้าลงในตัวกลางที่มีค่า n สูง อย่างไรก็ตาม ความเร็วของแสงในอากาศจะใกล้เคียงกับความเร็วของแสงในสุญญากาศ เนื่องจากระดับการหักเหของอากาศเท่ากับ 1.0003 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของแสงในสุญญากาศที่มีค่าเท่ากับ 1 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการแผ่ของแสงจากสุญญากาศไปยังตัวกลางโปร่งใส (ไม่มีการดูดกลืน) เมื่อให้ค่าตัวเลขของการแผ่ K ได้จากความสัมพันธ์ $s = \frac{\omega}{K}$ ควบคู่กับสมการที่ (2.9) จะได้

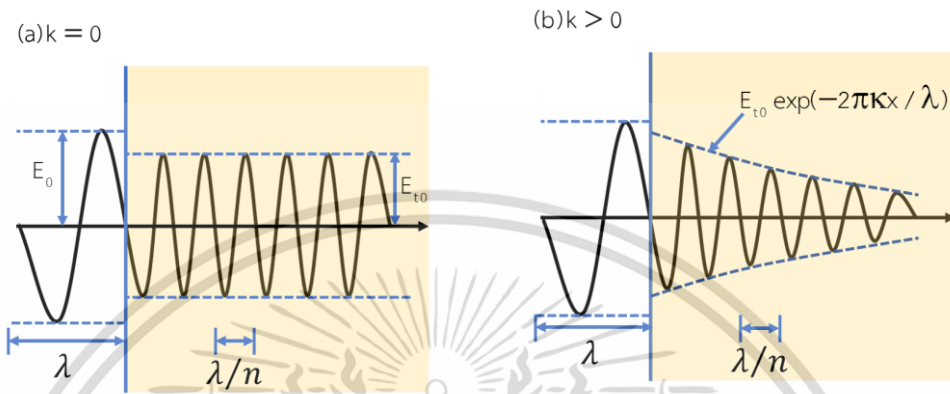
$$K = \frac{\omega n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (2.10)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของแสงในตัวกลาง ซึ่งเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.10) ในสมการที่ (2.7) จะได้สมการคลื่นแสงในตัวกลางโปร่งใสคือ

$$E = E_{i0} \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] = E_{i0} \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} x + \delta\right)\right] \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_0 คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของแสงที่แผ่เข้าไปในตัวกลางโปร่งใส ดังแสดงในรูปที่ 2.2(a) พบว่า ความยาวคลื่นของแสงในตัวกลางโปร่งใสจะลดลงเป็น λ/n เนื่องจากแสงมีความเร็วลดลงในตัวกลางโปร่งใสใดๆ นอกจากนั้น สนามไฟฟ้าของแสงจะมีแอมพลิจูดที่ลดลง ($E_0 > E_{t0}$) ซึ่งสัมพันธ์กับการสะท้อนของแสงบริเวณรอยต่อของตัวกลาง



รูปที่ 2.2 การแผ่ของแสงใน (a) ตัวกลางโปร่งใส ($k=0$) และ (b) ตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง ($k>0$)

เมื่อพิจารณาการการแผ่ของแสงจากสุญญากาศไปยังตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางจะถูกพิจารณาแทนที่ด้วยค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน (complex refractive index; N) ซึ่งประกอบด้วยค่าดัชนีหักเหของตัวกลางและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (extinction coefficient; k) ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$N = n - ik \quad (2.12)$$

โดยค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนสามารถแปลงเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ) ได้จาก

$$N^2 = \epsilon \quad (2.13)$$

โดยค่าไดอิเล็กตริกของตัวกลางสามารถเขียนเป็นปริมาณเชิงซ้อนได้คือ

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.13) เมื่อนำมายกกำลังสองจะได้ $N^2 = (n + ik)^2 = n^2 + i(2nk) - k^2$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการ (2.14) จะได้ $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ และ $\epsilon_2 = 2nk$ หากนำ N ไปแทนที่ n ในสมการที่ (2.11) จะได้สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E &= E_{t0} \exp \left[i \left(\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda} x + \delta \right) \right] \\
 &= E_{t0} \exp \left(-\frac{2\pi k}{\lambda} x \right) \exp \left[i \left(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} x + \delta \right) \right]
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.15) พบว่า ค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจะลดทอนลงตามระยะทางที่แสงเดินทางในตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) โดยทั่วไปในการพิจารณาจะวัดและวิเคราะห์ผ่านค่าความเข้มแสง (light intensity; I) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$I = |E|^2 = EE^* \tag{2.16}$$

เมื่อแทนที่สมการ (2.15) ในสมการ (2.16) จะสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น [49, 50]

$$I = \left| E_{t0} \exp \left(-\frac{2\pi k}{\lambda} x \right) \right|^2 = |E_{t0}|^2 \exp \left(-\frac{4\pi k}{\lambda} x \right) \tag{2.17}$$

โดยความเข้มแสงในตัวกลางมีความสัมพันธ์กับกฎของเบียร์ (Beer's law) ดังสมการ

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \tag{2.18}$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้น

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในตัวกลาง

d คือ ความหนาของวัตถุ

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.17) และสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{2.19}$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถนิยามระยะทางที่ทำให้ความเข้มแสงลดลงทุกๆ e^{-1} เท่า จะเรียกว่า ระยะทะลุผ่าน (penetration depth; D_p) ซึ่งโดยทั่วไปในตัวกลางแสงจะถูกดูดกลืนจนหมดเมื่อตัวกลางมีความหนาประมาณ 5 เท่าของระยะทะลุผ่าน โดยจากสมการที่ (2.18) และ (2.19) ทำให้สามารถคำนวณ D_p ได้ดังสมการ

$$D_p = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4\pi k} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

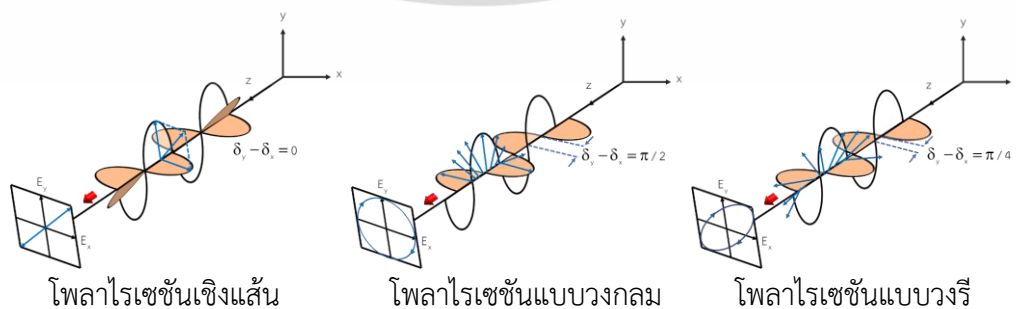
2.1.3 โพลาริเซชันของแสง [48, 51]

โพลาริเซชันของแสง (light polarization) คือปริมาณเวกเตอร์ที่บ่งบอกทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของแสงซึ่งจะมีระนาบที่ตั้งฉากกับทิศการแผ่ของแสง โดยเมื่อพิจารณาทิศการแผ่ของแสงไปตามแนวแกน z จะสามารถพิจารณาผลรวมของสนามไฟฟ้าย่อยในระนาบ x และ y ได้คือ

$$\begin{aligned} E(z, t) &= E_x(z, t) + E_y(z, t) \\ &= \{E_{x0} \exp[i(\omega t - Kz + \delta_x)]\} \hat{x} + \{E_{y0} \exp[i(\omega t - Kz + \delta_y)]\} \hat{y} \end{aligned} \quad (2.21)$$

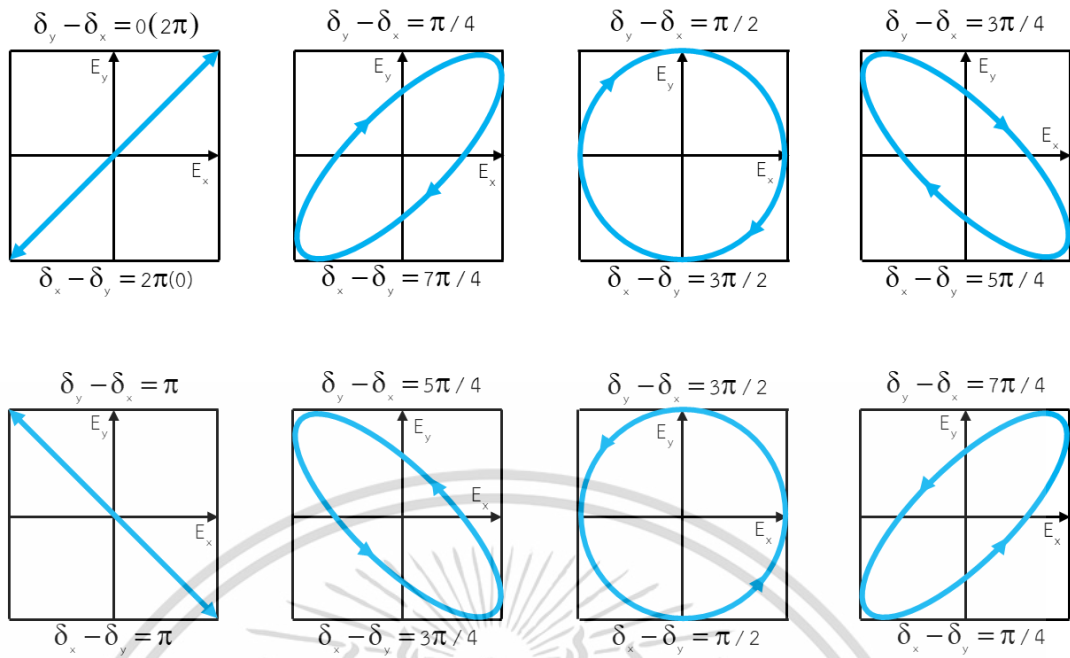
เมื่อ x และ y เป็นหน่วยเวกเตอร์ตามพิกัดแกน E_{x0} และ E_{y0} คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y และ $(\delta_x$ และ $\delta_y)$ คือเฟสเริ่มต้นของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ตามลำดับ โดยโพลาริเซชันสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ขึ้นกับแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างกันระหว่างสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ได้แก่ (1) โพลาริเซชันเชิงเส้น (linear polarization) เป็นกรณีที่สนามไฟฟ้าทั้งสองแกนไม่มีผลต่างของเฟสระหว่างสองแกน $(\delta_y - \delta_x = 0, n\pi)$ โดยแนวแกนโพลาริเซชันจะหมุนในระนาบ $x-y$ ได้ขึ้นกับสัดส่วนของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า เช่น เมื่อ $E_{x0} = E_{y0}$ จะได้โพลาริเซชันที่ทำมุม 45 องศากับแนวแกน x เป็นต้น (2) โพลาริเซชันแบบวงกลม (circular polarization) เป็นกรณีที่ $E_{x0} = E_{y0}$ แต่ $\delta_y - \delta_x = \pi/2$ และ (3) โพลาริเซชันแบบวงรี (ellipse polarization) เป็นกรณีที่แอมพลิจูดและผลต่างของเฟสระหว่างสองแกนเป็นค่าใดๆนอกเหนือจากเงื่อนไขเฉพาะข้างต้น

จากปัจจัยดังกล่าว เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้ $E_{x0} = E_{y0}$ ขณะที่ $\delta_y - \delta_x$ เป็นค่าใดๆ พบว่าโพลาริเซชันของแสงสามารถเปลี่ยนไปตามผลต่างของเฟสระหว่างสองแกน โดยเมื่อ $\delta_y - \delta_x$ มีค่าเท่ากับ 0 หรือ $n\pi$ จะได้ผลลัพธ์เป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น แต่เมื่อ $\delta_y - \delta_x$ ไม่เท่ากับ 0 หรือ $n\pi$ จะได้ผลลัพธ์เป็นโพลาริเซชันแบบวงกลมหรือวงรี ซึ่งจะมีการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา (clockwise, left circular polarization; LCP) เมื่อ $\delta_y - \delta_x$ มีค่ามากกว่า π หรือทวนเข็มนาฬิกา (counterclockwise, right circular polarization; RCP) เมื่อ $\delta_y - \delta_x$ มีค่าน้อยกว่า π ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ลักษณะโพลาริเซชันแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

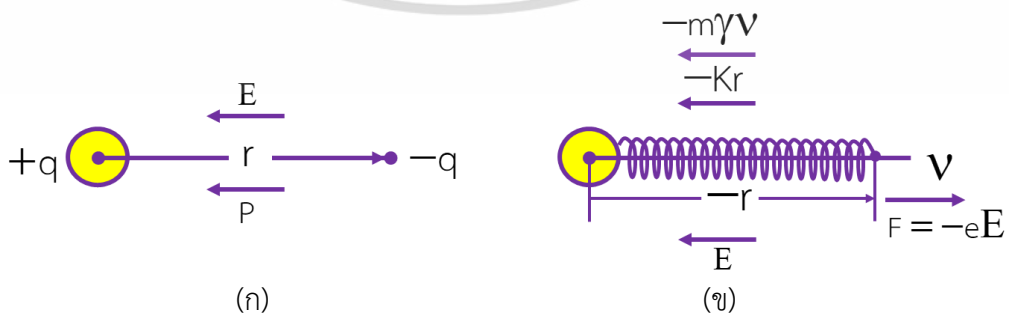


รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพลาไรเซชันที่มีความแตกต่างของเฟสเมื่อ $E_{x0} = E_{y0}$

2.2 สมบัติเชิงแสงของวัตถุ

เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำต่อวัสดุไดอิเล็กตริก อะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งมีประจุ $+q$ (นิวเคลียส) และประจุ $-q$ (กลุ่มของอิเล็กตรอน) จะแยกตัวออกจากกันเล็กน้อยเนื่องจากแรงทางไฟฟ้า $\vec{F}_E = q\vec{E}$ โดยประจุบวกจะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งที่สมดุลไปตามทิศทาง \vec{E} ขณะที่ประจุลบเคลื่อนตัวในทิศทางตรงข้าม เกิดเป็น ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment; \vec{p}) ที่มีการกระจัดจาก $-q$ ไปยัง $+q$ เท่ากับเวกเตอร์ \vec{r} ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) ซึ่งไดโพลโมเมนต์สามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{p} = -q\vec{r} \tag{2.22}$$



รูปที่ 2.5 ไดโพลไฟฟ้า (ก) ทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า และ (ข) เกิดแรงกระทำต่อไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระดับมหภาคโพลาไรเซชัน \vec{P} เป็นไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก

$$\vec{P} = N\vec{p} = -Ner = N\alpha\vec{E} \quad (2.23)$$

เมื่อ N คือ ไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
 e คือ ประจุอิเล็กตรอน
 \vec{r} คือ การกระจัดระหว่าง $-q$ กับ $+q$

ในระดับจุลภาคระยะห่างระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของสาร เรียกว่า การกระจัด (displacement field; \vec{D}) สามารถคิดจากผลรวมสนามไฟฟ้าและโพลาไรเซชันได้ตามสมการ

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} \quad (2.24)$$

นอกจากนี้ การกระจัดอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าภายนอกและการเกิดไดโพลโมเมนต์ภายใน วัสดุ สามารถพิจารณาได้เท่ากับ

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi N\alpha(\omega)\vec{E} = (1 + 4\pi N\alpha)\vec{E} \quad (2.25)$$

จากสมการดังกล่าว เมื่อแสงที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนวัสดุไดอิเล็กตริกจะทำให้เกิดการกระจัด \vec{D} ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant; ϵ) ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน (N) ดังสมการที่ (2.13)

2.3 การสะท้อน การส่งผ่านของแสง และมุมบรีวสเตอร์

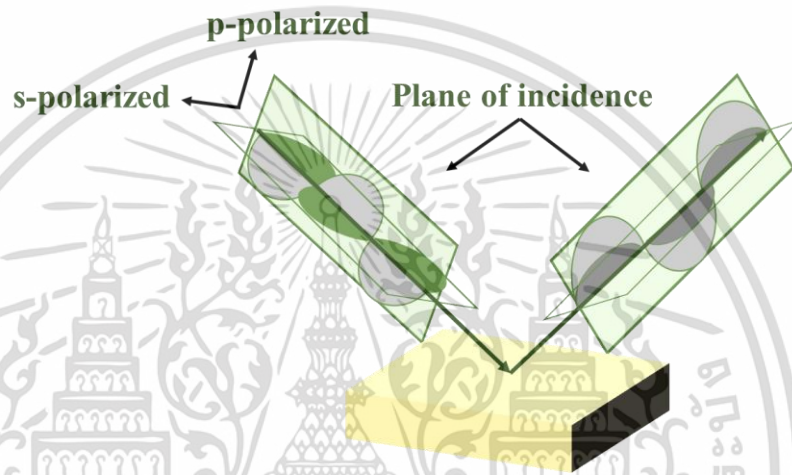
เมื่อแสงทำมุมตกกระทบบนที่รอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด แสงจะเกิดการสะท้อน (reflection) และส่งผ่าน (transmission) ตามกฎการสะท้อนของแสงและกฎของสเนลล์ดังนี้

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.31)$$

$$N_i \sin(\theta_i) = N_t \sin(\theta_t) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ θ_i คือมุมตกกระทบของแสง θ_r คือมุมสะท้อนของแสง N_i และ N_t คือดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่านขณะที่แสงตกกระทบและแสงส่องผ่าน ตามลำดับ ในการพิจารณาการสะท้อนและการส่องผ่านของแสงโพลาไรซ์สามารถจำแนกโพลาไรซ์ชั้นย่อยได้เป็นสองแกนคือโพลาไรซ์ชั้นที่ขนานกับระนาบตกกระทบ (parallel polarization หรือ p-polarization) และโพลาไรซ์ชั้นที่ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (perpendicular polarization หรือ s-polarization) โดย s- มาจากคำว่า senkrecht ในภาษาเยอรมัน โดยจะเรียกแสงที่มีโพลาไรซ์ชั้นในแนวแกนดังกล่าวว่าแสง p-polarized และแสง s-polarized ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสะท้อนแสงของ p- และ s-polarized

จากสมการเฟรสเนล (Fresnel's equation) อัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อน และส่องผ่าน ต่อแสงตกกระทบ สามารถคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{N_t \cos(\theta_i) - N_i \cos(\theta_t)}{N_t \cos(\theta_i) + N_i \cos(\theta_t)} \quad (2.33)$$

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{N_i \cos(\theta_i) - N_t \cos(\theta_t)}{N_i \cos(\theta_i) + N_t \cos(\theta_t)} \quad (2.34)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2N_i \cos(\theta_i)}{N_t \cos(\theta_i) + N_i \cos(\theta_t)} \quad (2.35)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2N_i \cos(\theta_i)}{N_i \cos(\theta_i) + N_t \cos(\theta_t)} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

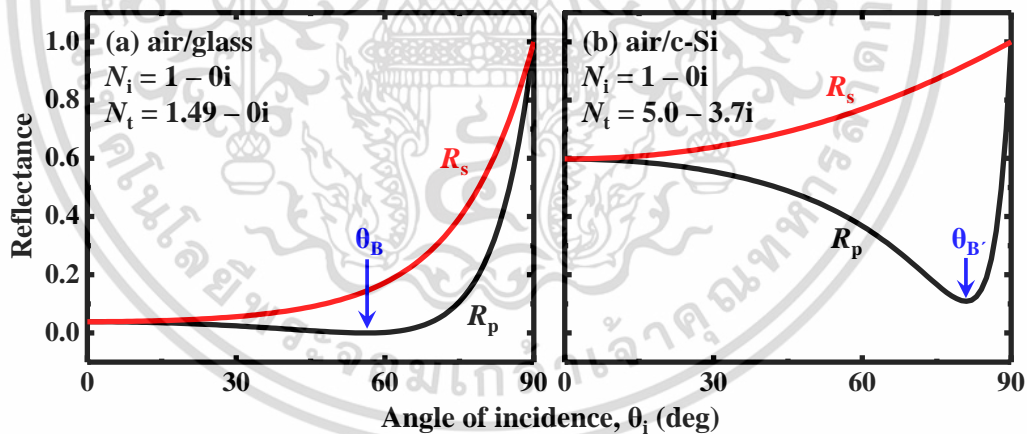
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ r_p และ r_s คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง p- และ s-polarized ขณะที่ t_p และ t_s เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง p- และ s-polarized ตามลำดับ นอกจากนี้ การสะท้อนแสงยังถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนความเข้มของการสะท้อนต่อแสงที่ตกกระทบ ($R = I_r / I_i$) การสะท้อนของแสง p- และ s-polarized คำนวณโดย

$$R_p = \frac{I_{rp}}{I_{ip}} = \left| \frac{E_{rp}}{E_{ip}} \right|^2 = |r_p|^2, \quad (2.34)$$

$$R_s = \frac{I_{rs}}{I_{is}} = \left| \frac{E_{rs}}{E_{is}} \right|^2 = |r_s|^2. \quad (2.35)$$

จากกราฟแสดงการสะท้อนของแสงโดยเทียบกับมุมตกกระทบที่มีดัชนีการหักเหของแสงเชิงซ้อนที่ต่างกันแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 สำหรับวัสดุ $k=0$ มีมุมตกกระทบที่ R_p เท่ากับ 0 มุมนี้เรียกว่ามุมบริวสเตอร์ (Brewster angle; θ_B) ในทางตรงข้าม ตัวกลางที่สมมติขึ้น $R_p=0$ แต่จะแสดงค่า R_p ต่ำสุดที่มุมตกกระทบซึ่งเรียกว่ามุม pseudo-Brewster angle ($\theta_{B'}$) โดยมุมเหล่านี้มีความสำคัญมากและมักใช้ในการวัดวงรีเนื่องจากให้ความไวสูงสุดสำหรับการวัดทางอิลิปโซเมทรี



รูปที่ 2.7 การพล็อตระหว่างแสงสะท้อนกับมุมตกกระทบของ (a) อากาศและแก้ว และ (b) รอยต่อระหว่างอากาศ และ c-Si จากรูปภาพยังแสดงมุมบริวสเตอร์ (θ_B) และมุม pseudo-brewster angle ($\theta_{B'}$) [48]

2.4 การแทรกสอดของแสง (Optical Interferences)

เทคนิคการวัดอิลิปโซเมทรีสามารถคำนวณความหนาของฟิล์มบางได้โดยพิจารณาการแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง การแทรกสอดของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงสะท้อนที่รอยต่อระหว่างบรรยากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

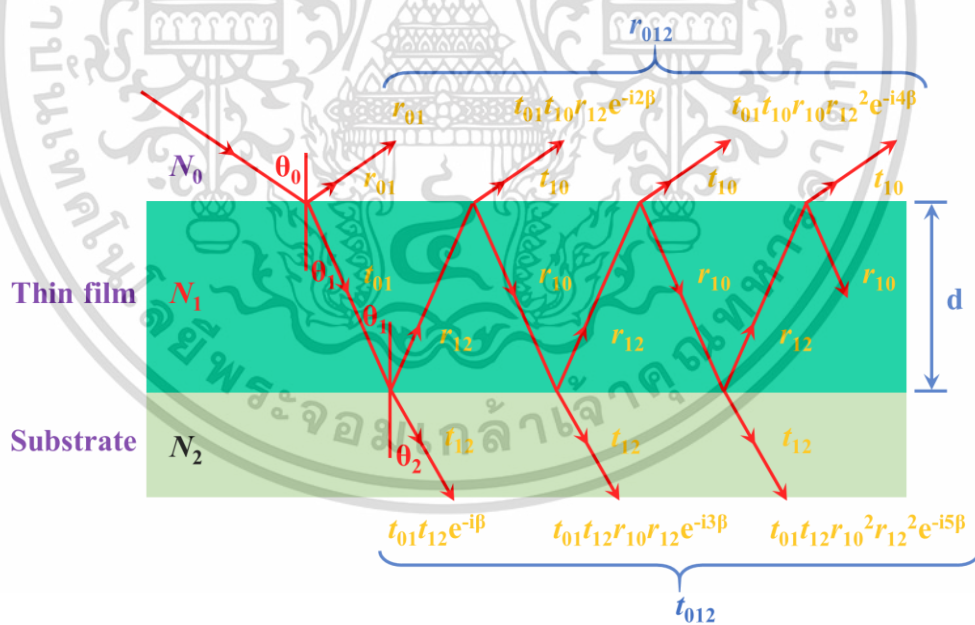
กับฟิล์มและรอยต่อระหว่างฟิล์มกับวัสดุรองรับที่ซ้อนทับกัน โดยจากข้อมูลของ Fujiwara [48] เฟสที่แตกต่างกันระหว่างแสงสะท้อนสองลำคือ

$$\alpha = 2\beta = \frac{4\pi d}{\lambda} (N_1^2 - N_0^2 \sin^2(\theta_0))^{1/2} \tag{2.36}$$

โดยที่ d คือ ความหนาของฟิล์มบาง λ คือ ความยาวคลื่นของแสง θ_0 คือมุมตกกระทบ N_0 และ N_1 คือ ดัชนีการหักเหของแสงเชิงซ้อนของบรรยากาศและฟิล์ม ตามลำดับ ซึ่งแอมพลิจูดของการสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการเฟรสนเนล ในขณะที่ตัวห้อย i และ j แสดงถึงลำดับของตัวกลางที่ส่วนรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ลำแสงสะท้อนและการส่งผ่านทั้งหมด r_{012} และ t_{012} อธิบายได้จากผลรวมของคลื่นสะท้อนทั้งหมดเป็น

$$r_{012} = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(-2i\beta)} \tag{2.37}$$

$$t_{012} = \frac{t_{01}t_{12} \exp(-i\beta)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(-2i\beta)} \tag{2.38}$$



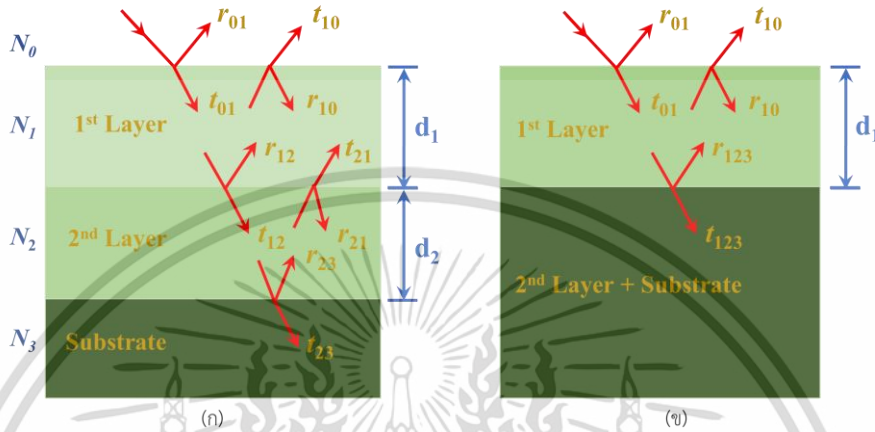
รูปที่ 2.8 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง

ในทำนองเดียวกัน สำหรับฟิล์มหลายชั้นแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยการแทรกสอดของแสงสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{0123} = \frac{r_{01} + r_{123} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01}r_{123} \exp(-2i\beta)}, \tag{2.39}$$

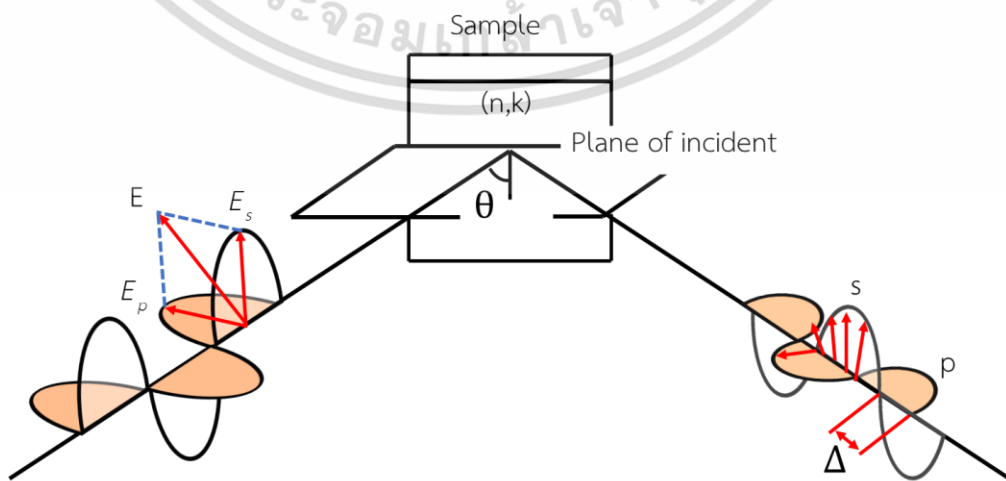
$$t_{0123} = \frac{t_{01}t_{123} \exp(-i\beta)}{1 + r_{01}r_{123} \exp(-2i\beta)}. \tag{2.40}$$



รูปที่ 2.9 การแทรกสอดของแสงของ (ก) फिल्मหลายชั้นและ (ข) รูปแบบการลดลงในการกำหนดฟิล์มหลายชั้น

2.5 สมการพื้นฐานของอิลิปโซเมทรี

อิลิปโซเมทรี (ellipsometry) คือเทคนิคที่ให้แสงโพลาไรซ์ที่มีโพลาไรเซชันย่อยในแนว p และ s ตกกระทบบนตัวอย่างด้วยมุมตกกระทบที่ใกล้เคียงกับมุมบรูสเตอร์ เมื่อทำการพิจารณาโพลาไรเซชันของแสงสะท้อน การเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปพิจารณาค่าคงที่เชิงแสงและความหนาของตัวอย่างได้ ดังแสดงหลักการในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หลักการวัดของอิลิปโซเมทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของโพลาไรเซชันจะแสดงโดยการซ้อนทับของแสงโพลาไรซ์ตามแกนตั้งฉากสองแกน ซึ่งในการวัดอิลิปโซเมทรี สถานะโพลาไรเซชันคลื่นแสงที่ตกกระทบและสะท้อนถูกอธิบายโดยพิกัดของ p และ s โพลาไรเซชัน ที่เวกเตอร์ตกกระทบ E_{ip} และ E_{is} ในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสำหรับ p และ s โพลาไรเซชันจะกลับกันทั้งตกกระทบและสะท้อน เพื่อที่จะทำความเข้าใจของอิลิปโซเมทรีให้ง่ายขึ้น เมื่อเวกเตอร์ถูกกำหนดโดยทิศทางที่แสดงในรูปที่ 2.10 สามารถสังเกตได้ว่าเวกเตอร์ที่ตกกระทบและสะท้อนซ้อนทับกันอย่างสมบูรณ์เมื่อ $\theta = 90^\circ$ ในรูปที่ 2.10 แสงตกกระทบคือโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ $+45^\circ$ สัมพันธ์กับแกน E_{ip} โดยเฉพาะอย่างยิ่ง $E_{ip} = E_{is}$ สำหรับโพลาไรเซชันนี้เนื่องจากแอมพลิจูดของ p และ s โพลาไรเซชันเหมือนกันจึงมีความแตกต่างของเฟสระหว่างโพลาไรเซชันเป็นศูนย์

ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแอมพลิจูดสำหรับ p และ s โพลาไรเซชันแตกต่างกันอย่างมากเนื่องจากความแตกต่างในการแผ่รังสีไดโพลไฟฟ้า ดังนั้นการสะท้อนของแสงบนตัวอย่าง p และ s โพลาไรเซชันแสดงการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 อิลิปโซเมทรีจะทำการวัดค่าสองค่า (Ψ, Δ) ที่แสดงอัตราส่วนแอมพลิจูดและความแตกต่างของเฟสระหว่าง p และ s โพลาไรเซชัน ตามลำดับ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของการสะท้อนแสงด้วย p และ s โพลาไรเซชัน จึงถูกวัดเป็นการเปลี่ยนแปลงในสถานะโพลาไรเซชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโครงสร้างตัวอย่างง่าย ๆ อัตราส่วนของแอมพลิจูด Ψ จะถูกกำหนดโดยดัชนีหักเห n ขณะที่ Δ จะแสดงถึงการดูดกลืนแสงซึ่งอธิบายโดยค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ k ในกรณีนี้ค่าทั้งสอง (n, k) สามารถกำหนดโดยตรงจากพารามิเตอร์อิลิปโซเมทรีสองพารามิเตอร์ (Ψ, Δ) ได้จากการวัดโดยใช้สมการเฟรสเนล (Fresnel equations) นี่คือหลักการพื้นฐานของการวัดอิลิปโซเมทรี

ค่า (Ψ, Δ) ที่ทำการวัดจากอิลิปโซเมทรีถูกกำหนดจากค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับ p และ s โพลาไรเซชัน

$$\rho = \tan \Psi \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s} \quad (2.26)$$

ถ้าเราใช้ค่าจำกัดความของแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน r_p และ r_s เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\rho = \tan \Psi \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s} = \left(\frac{E_{rp}}{E_{sp}} \right) / \left(\frac{E_{rs}}{E_{is}} \right) \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) r_p และ r_s เดิมถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าที่สะท้อนไปยังสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ และ $\tan \Psi \exp(i\Delta)$ ถูกกำหนดเพิ่มเติมโดยอัตราส่วนของ r_p ส่วนด้วย r_s ในกรณีของรูป 2.6 สมการ (2.27) สามารถทำให้เข้าใจ $\tan \Psi \exp(i\Delta) = E_{rp} / E_{sp}$ ง่ายขึ้นเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_{ip} = E_{is}$ ดังนั้นในรูปที่ 2.6 Ψ แสดงถึงมุมที่กำหนดจากอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างการสะท้อนของ p และ s โพลาริเซชัน ในขณะที่ Δ แสดงความแตกต่างของเฟสระหว่างการสะท้อนของ p และ s โพลาริเซชัน แม้ว่า Ψ ถูกกำหนดมาจากส่วนที่ 4 ของเสี้ยววงกลมในรูปที่ 2.6 ส่วนในส่วนอื่นๆ ของเสี้ยววงกลม ก็ให้ Ψ เหมือนกันเนื่องจาก Ψ ที่กำหนดจากค่าสัมบูรณ์ของอัตราส่วนแอมพลิจูด ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$)

ถ้าเราใช้พิกัดเชิงขั้วเพื่อแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแอมพลิจูดจะได้

$$\tan \Psi = |r_p|/|r_s| \quad \Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs} \quad (2.28)$$

เมื่อ $R_p = |r_p|^2$ และ $R_s = |r_s|^2$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\Psi = \tan^{-1}(|\rho|) = \tan^{-1}\left(\frac{r_p}{r_s}\right) = \tan^{-1}\left[\left(\frac{R_p}{R_s}\right)^{1/2}\right] \quad (2.29)$$

เราได้รับ Δ จาก ρ

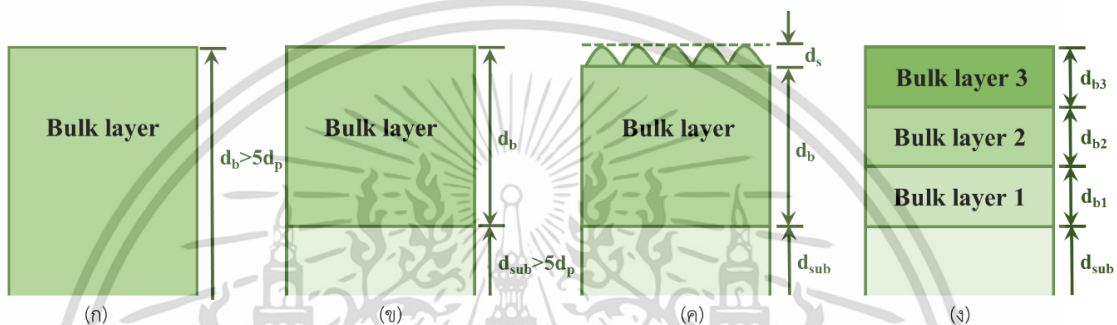
$$\Delta = \arg(\rho) = \begin{cases} \tan^{-1}[\text{Im}(\rho)/\text{Re}(\rho)] & \text{for } \text{Re}(\rho) > 0, \\ \tan^{-1}[\text{Im}(\rho)/\text{Re}(\rho)] + 180^\circ & \text{for } \text{Re}(\rho) < 0, \text{Im}(\rho) \geq 0, \\ \tan^{-1}[\text{Im}(\rho)/\text{Re}(\rho)] - 180^\circ & \text{for } \text{Re}(\rho) < 0, \text{Im}(\rho) < 0, \end{cases} \quad (2.30)$$

ในสมการที่ 2.30 ถ้า $\text{Re}(\rho) = 0$, $\Delta = 90^\circ [\text{Im}(\rho) > 0]$ และ $\Delta = -90^\circ [\text{Im}(\rho) < 0]$ โดยทั่วไปช่วงของ Δ ในอิลิปโซเมทรีจะอยู่ในช่วง $-180^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ$ หรือ $0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$ เราสามารถแปลงช่วงของ Δ จาก $-180^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ$ ถึง $0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$ เพียงแค่เพิ่ม 360° ไปยังบริเวณของ $-180^\circ \leq \Delta < 0^\circ$

สมการข้างต้นตรงกับสมการเมื่อใช้ค่าจำกัดความของ $N = n - ik$ สำหรับค่าจำกัดความของ $N = n - ik$ เราจำเป็นต้องเขียนสมการใหม่ (2.26) เป็น $\rho = \tan \Psi \exp(-i\Delta)$ ตามปกติแล้วสมการที่ (2.26) ถูกนำไปใช้กับ $N = n - ik$ ซึ่งในกรณีนี้เราต้องย้อนกลับสัญญาณของ Δ นำเสียดายที่ขั้นตอนนี้สร้างความสับสนอย่างมากและเราจะใช้ $\rho = \tan \Psi \exp(-i\Delta)$ สำหรับค่าจำกัดความของ $N = n - ik$

2.6 โครงสร้างแบบจำลองเชิงแสง

จากรูป 2.11 โครงสร้างของแบบจำลองเชิงแสงสามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชิ้นงาน โดยข้อเสียดสามารถกำหนดให้เป็นชั้นที่มีความหนามากได้ ($d_b > 5d_p$) ในขณะที่ฟิล์มสามารถกำหนดให้เป็นชั้นฟิล์มบางได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) และ 2.11(ข) ซึ่งโดยทั่วไป ฟิล์มบางส่วนใหญ่จะมีขรุขระเล็กน้อย (roughness) ที่ด้านบนของพื้นผิว ดังนั้น โครงสร้างของฟิล์มบางแบบชั้นเดียวจึงมักถูกอธิบายเป็นชั้นฟิล์มแบบ 2 ชั้นของฟิล์มและชั้นพื้นผิวขรุขระจะแสดงดังรูปที่ 2.11(ค) สำหรับชิ้นงานแบบหลายชั้น แบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นเป็นชั้นหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ง)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างแบบจำลองเชิงแสงของ (ก) ชั้นเสียด (ข) ฟิล์มบางบนชั้นเสียด (ค) ฟิล์มบางกับชั้นขรุขระของพื้นผิวบนชั้นเสียดและ (ง) ฟิล์มบางหลายชั้นบนชั้นเสียด [48]

เนื่องจากเทคนิคอิลิปโซเมทรีเป็นเทคนิคการวัดแบบโดยอ้อม (indirect technique) กล่าวคือ เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแสงเพื่อวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง ดังนั้น ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางจะต้องมีการสร้างแบบจำลองเชิงแสง (optical model) ของฟิล์มบางมาเปรียบเทียบ โดยในการสร้างแบบจำลองเชิงแสงของฟิล์มบางนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของตัวอย่างฟิล์มบาง ซึ่งอ้างอิงถึงจำนวนชั้นและความหนาของฟิล์มบางรวมถึงแผ่นรองรับ และการสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางและแผ่นรองรับกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ โดยฟังก์ชันที่สามารถนำมาใช้กับแบบจำลองเชิงแสงมีดังนี้

2.6.1 สมการคอสซีและสมการเซลเมายด์ (Cauchy and Sellmeier equation)

โดยปกติแล้วสมการคอสซีและสมการเซลเมายด์สามารถใช้ได้กับฟิล์มที่มีการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ศึกษาหรือฟิล์มที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญเป็นศูนย์ ($k = 0$) ซึ่งสามารถหาค่าดัชนีหักเหในแต่ละความยาวคลื่นในช่วงนั้นได้ โดยสมการดังกล่าวเหมาะสำหรับใช้หาค่าดัชนีหักเหในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} + \dots \quad (3.2)$$

เมื่อ n คือค่าดัชนีหักเหของความยาวคลื่นต่างๆ

A_n , B_n และ C_n คือค่าคงที่ของสมการคอซี ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์ม

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} + \dots \quad (3.3)$$

เมื่อ n คือค่าดัชนีหักเหของความยาวคลื่นต่างๆ

B_{123} และ C_{123} คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเซลมาเยต์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์ม

จากสมการคอซีและสมการเซลมาเยต์ที่ได้กล่าวไปแล้วสามารถใช้หาค่าดัชนีหักเหในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด แต่ไม่สามารถที่จะทำการอธิบายในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการดูดกลืนแสงหรือเป็นช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ($k \neq 0$) ดังนั้นจึงต้องใช้แบบจำลองทางแสงอื่นที่มีความเหมาะสม ซึ่งจะอธิบายในแบบจำลองถัดไป

2.6.2 สมการลอเรนซ์ (The Lorentz Dispersion)

สมการลอเรนซ์ ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางอิลิปโซเมตริก โดยอธิบายถึงการสั่นของกลุ่มอะตอมที่คล้ายกับการสั่นของสปริง ซึ่งสมการลอเรนซ์สามารถอธิบายค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน (Complex index of refraction) ที่เกิดจากความขรุขระพื้นผิวจากกลุ่มอะตอมในการเกิดฟิล์ม โดยจากสมการที่ (3.4) ในเทอมแรกของสมการจะแสดงแรงเนื่องมาจากอัตราเร่งของมวลอิเล็กตรอน เทอมสองได้อธิบายตัวหน่วงเนื่องจากความหนืดจากการกระเจิง เทอมที่สามได้อธิบายแรงอนุรักษ์ และเทอมสุดท้ายแสดงแรงเคลื่อนประจุไฟฟ้า สามารถหาคำตอบทั่วไปดังสมการที่ (3.5)

$$m \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} + m\Gamma \frac{d\bar{r}}{dt} + m\omega_0^2 \bar{r} = -e\bar{E} \quad (3.4)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า

m คือ มวลอิเล็กตรอน

Γ คือ ค่าคงที่ของแรงหนืด (Viscous force)

ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{r} = \frac{-e\bar{E}/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\Gamma\omega} \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.5) สามารถแก้สมการได้โดยการใช้หลักการเกิดขั้วของอะตอม โดยสามารถหา
ค่า ε ได้ และสามารถแยกส่วนจินตภาพได้ตามการที่ (3.7) และ (3.8)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (n - ik)^2 = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \\ &= 1 + \frac{4\pi Ne^2}{m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\Gamma\omega} \end{aligned} \quad (3.6)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของอะตอม

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{4\pi Ne^2}{m} \cdot \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \Gamma^2\omega^2} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4\pi Ne^2}{m} \cdot \frac{\Gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \Gamma^2\omega^2} \quad (3.8)$$

จาก $n = n - ik = \sqrt{\varepsilon(E)}$ เมื่อ $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ สามารถเขียนค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การ
ดับสูญ และสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ในเทอมของ ε_1 และ ε_2 ได้ดังนี้

$$n(E) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_1 \right]} \quad (3.9)$$

$$k(E) = \sqrt{\frac{1}{2} (\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_1} \quad (3.10)$$

$$\alpha(E) = \frac{4\pi k(E)}{\lambda} = \left[\frac{2E}{\hbar} \right] \sqrt{\frac{(\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_1}{2}} \quad (3.11)$$

จากสมการข้างต้นที่ได้จากสมการลอเรนซ์สามารถอธิบายทางคณิตศาสตร์ในช่วง
อัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ทาวส์-ลอเรนซ์ ออสซิลเลเตอร์ (Tauc-Lorentz Oscillator; TL)

จากทฤษฎีพื้นฐานของลอเรนซ์จะพบว่าจะไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของวัสดุได้ ในช่วงที่ใกล้ช่องว่างพลังงาน ดังนั้นจึงได้มีการนำทาวส์-ลอเรนซ์ มาใช้เพื่อทำการอธิบายในช่วงดังกล่าว โดยอธิบายได้จากสมการที่ (3.12)

$$\varepsilon_2(E) = \left[\frac{AE_0C(E - E_g)}{(E^2 - E_0^2) + C^2E^2} \cdot \frac{1}{E} \right], \quad E > E_g \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_2(E) = 0, \quad E \leq E_g \quad (3.13)$$

เมื่อ A คือ แอมปริจูด

E_0 คือ จุดยอดของการเปลี่ยนผ่านพลังงาน

C คือ การกระจายตัวของค่าคงที่

E_g คือ ช่องว่างพลังงาน

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_1(\infty) + \frac{2}{\pi} p \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_2(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียน ε_1 ได้ ซึ่งค่า $\varepsilon_1(\infty)$ เป็นค่าคงที่ เนื่องจาก ε_1 เมื่อมีพลังงานที่ต่ำกว่าขอบการดูดกลืนจึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และเป็นค่าที่ได้จากการอินทิกรัลสมการคอดี ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสามารถหาได้จากสมการที่ (3.9) ถึง (3.11)

2.6.4 คอดี-ลอเรนซ์ (Cody - Lorentz; CL)

คอดี-ลอเรนซ์ (Cody - Lorentz) ซึ่งถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Ferlauto et al ถูกออกแบบมาเพื่อนำมาใช้อธิบายโครงสร้างวัสดุแบบ amorphous มีลักษณะโครงสร้างของโมเดลคล้ายคลึง ทาวส์-ลอเรนซ์ กล่าวคือใช้ในการหาปริมาณ ช่องว่างของพลังงาน E_g และการดูดกลืนสูงสุดจากทฤษฎี ลอเรนซ์ (ประกอบด้วย พารามิเตอร์ Amp, En และ Br) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างของโมเดลทั้ง 2 ชนิดนี้ ปฏิบัติตัวแตกต่างกันในช่วงเริ่มต้นของการดูดกลืนที่พลังงานโฟตรอนมีค่ามากกว่า E_g โดยในย่านดังกล่าวมีสูตรสมการโครงสร้างของโมเดลทาวส์-ลอเรนซ์ ที่มีลักษณะดังนี้ $\varepsilon_2(E) \propto \left[(E - E_g)^2 / E^2 \right]$ ขณะที่โมเดลคอดี-ลอเรนซ์ มีสูตรดังนี้ $\varepsilon_2(E) \propto (E - E_g)^2$ นอกจากนี้โมเดลคอดี-ลอเรนซ์ ยังมีขอบเขตที่รวมไปถึงการดูดกลืนแบบ Urbach ด้วย สมการสำหรับสัดส่วนของค่า ε_2 ของโมเดล คอดี-ลอเรนซ์ ออสซิลเลเตอร์แสดงตามสมการด้านล่าง

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{E_1}{E} \exp\left(\frac{E - E_g - E_t}{E_\mu}\right); & 0 < E \leq (E_g + E_t) \\ G(E)L(E) = \frac{(E - E_g)^2}{(E - E_g)^2 + E_p^2} \cdot \frac{AE_0\Gamma E}{[(E^2 - E_0^2) + \Gamma^2 E^2]}; & E > (E_g + E_t) \\ E_1 = E_t G(E)L(E) & \end{cases} \quad (3.17)$$

เมื่อ $(E_g + E_t)$ คือ พลังงานการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Urbach tail และ band-to-band transition

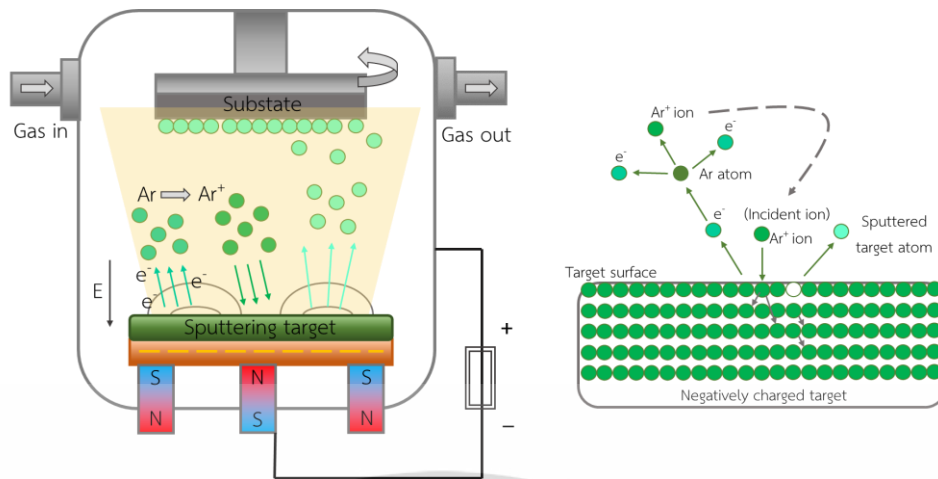
E_μ คือ ขอบเขตของการขยายตัว

$G(E)$ คือ ลักษณะความหนาแน่นของสถานะ

E_p คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เริ่มมีการดูดกลืน

2.7 ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอริง

เทคนิคสปัตเตอริงเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางซึ่งอาจจะเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวน โดยระบบเคลือบสุญญากาศ (Sputtering chamber) ของระบบสปัตเตอริง แสดงดังรูปที่ 2.12 ในระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย วัสดุฐานรองรับ (Substrate) จะถูกต่ออยู่กับขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode) และเป้าโลหะสารเคลือบ (Sputtering target) ซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบ จะถูกต่อกับขั้วแคโทด (Cathode) เมื่อทำการดูดอากาศออกจากระบบสุญญากาศจนได้ความดันที่ต้องการ (อยู่ในช่วงประมาณ 10^{-5} - 10^{-6} mBar) จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย (มักใช้อาร์กอนเนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการใช้เป็นอะตอมบอมบาร์ด) ที่จะเข้ามาในระบบให้มีความดันตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแก๊สอาร์กอนจะแตกตัวเป็นไอออน อันเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังนั้น ไอออนเหล่านี้จึงเคลื่อนตัวจากขั้วแอโนดไปยังแคโทด และปะทะกับเป้าโลหะสารเคลือบ ทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุสารเคลือบหลุดจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบมาฟอร์มตัวเป็นฟิล์มบางลงบนแผ่นวัสดุฐานรองรับ



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบห้องสุญญากาศของระบบสปัตเตอริง

2.7.1 หลักการสปัตเตอริง

การสปัตเตอริง (Sputtering) คือ ขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนจากอนุภาคที่มีพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม ระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสปัตเตอริงมีขบวนการที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. อาศัยการดีสชาร์จของแก๊สอาร์กอน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
2. จากนั้นทำการเร่งไอออนแก๊สอาร์กอน ให้วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ (Sputtering target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

3. อะตอมสารเคลือบบนผิวเป้าสารเคลือบถูกชนด้วยไอออนแก๊สอาร์กอนที่มีพลังงานสูง หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมายังวัสดุฐานรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอริงนั้นมีค่าสูง เมื่อเทียบกับอะตอมสารเคลือบจากวิธีการระเหยสาร (Evaporation technique) ดังนั้นอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบลงบนวัสดุฐานรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในผิวหน้าวัสดุฐานรองรับ

2.7.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ

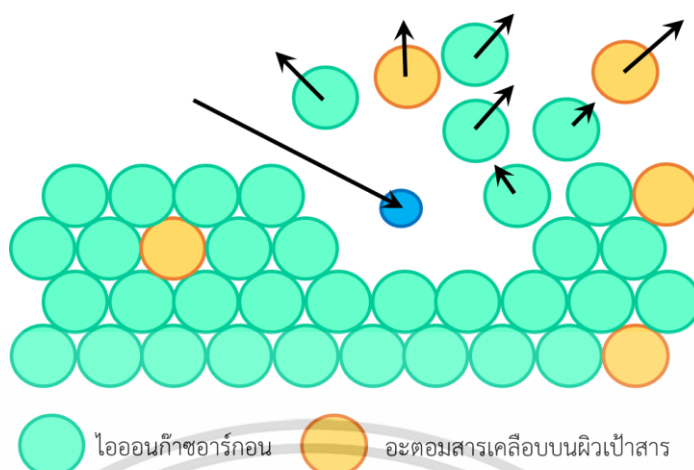
1. ไอออนแก๊สอาร์กอนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ

2. การชนของไอออนแก๊สอาร์กอนทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ ไอออนฝังตัวลงในผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ (Ion implantation)

3. การชนของไอออนแก๊สอาร์กอนบนผิวสารเคลือบ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) จะเรียกรวมการจัดเรียงตัว

ใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า “Altered surface layers”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวของเป้าสารเคลือบ

2.7.3 ค่าyield ของสปัตเตอริง (Sputtering yield; Y)

ค่าyield ของสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค (มีหน่วยเป็น อัตราต่อไอออน) ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามสถานะต่างๆ ในกระบวนการสปัตเตอริง ดังนี้

ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามค่าพลังงานของไอออน คือ ไอออนต้องมีพลังงานมากกว่าพลังงานเทอร์ชโฮลด์ (Threshold energy) พลังงานที่เริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบในสถานะที่มีการชนอย่างต่อเนื่องของไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคู่การชนอนุภาค เมื่อทำการเพิ่มพลังงานของไอออน ค่าyield จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรกๆ แล้วจะเปลี่ยนเป็นเชิงเส้น จากนั้นจะคงที่เมื่อพลังงานของไอออนมาก เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้ค่าyield ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้นค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ โดยพบว่าค่าyield สูง เมื่อไอออนชนเป้าในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบขึ้นอยู่กับมวลของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ คือ จากที่เราทราบว่าอนุภาค 2 อนุภาคที่มีมวลเท่ากันจะสามารถถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีสุดแต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียง จึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิภาพสูงกว่ามวลอะตอมเดี่ยว

2.7.4 กระบวนการเกิดแก๊สดีสชาร์จ [52]

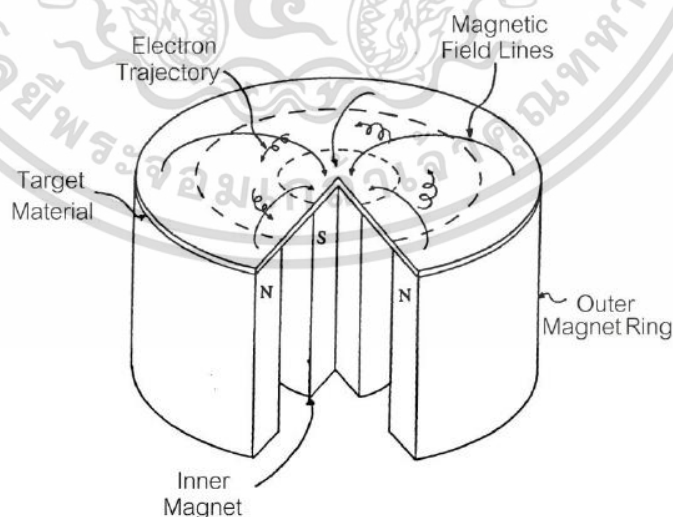
กระบวนการเกิดแก๊สดีสชาร์จ คือ การทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้สนามไฟฟ้าซึ่งมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าน้อย ๆ พบว่ากระแสไหลในวงจรน้อยมาก ซึ่งเป็นกระแสเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊ส ที่จะสามารถเกิดขึ้นตลอดเวลาในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศ ซึ่งเกิดจากการชนของรังสีคอสมิก (อัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี) เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุ ที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า จะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งไอออนเหล่านี้ก็จะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้วิ่งไปชนกับโมเลกุลของแก๊สต่อไปอีก จึงเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron) เพิ่มแรงดันจนถึงค่าแรงดันพังทลาย จะเกิดขบวนการ Avalanche ขึ้นคือ ไอออนบวกวิ่งเข้าไปชนขั้วคาโทด ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (ของเป้าสารเคลือบ) แล้วอิเล็กตรอน ก็ถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้ไปชนโมเลกุลของแก๊ส เกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น จนทำให้มีไอออนมากพอสำหรับผลิตอิเล็กตรอนได้เป็นจำนวนที่คงที่ (ช่วงนี้ระบบรักษาสภาพดีสชาร์จ ได้ด้วยตัวเองไม่ต้องพึ่งแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก) ขบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวนด์เซนต์ดีสชาร์จ (Townsend discharge) จากนั้นเมื่อกระแสดีสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆหนึ่งจึงเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขั้วมีค่าลดลง กระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงนี้ว่าการเรืองแสงปกติ (Normal glow) ค่าอิเล็กโตรดจะต่ำ ในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนบนคาโทดไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมักจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (self-sustaining) บางบริเวณเมื่อกระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้น แนวการชนไอออนจะค่อยๆขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้ เรานำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ voltage regulator tube) หลังจากที่มีการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่คาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้น การเรืองแสงจะจำขึ้นผิดปกติ เรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงผิดปกติเปล่งแสงจำขึ้น (Abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้ในระบบสปัตเตอร์ริง ช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองและขบวนการอะวาแลนซ์ ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดตกลงมาก ในขณะที่กระแสไฟฟ้ามามีค่าเพิ่มขึ้นสูง และเปล่งแสงประกายจ้าของการอาร์ค (arc discharge)

2.7.5 ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง (DC magnetron sputtering)

ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง (D.C. sputtering process) เป็นที่นิยมใช้น้อยกว่าระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (D.C. magnetron sputtering process) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง นั้นให้อัตราการสปัตเตอริงที่สูงกว่า ซึ่งในกระบวนการเพิ่มอัตราสปัตเตอริงทำได้ 2 วิธี คือ การเพิ่มอีลด์หรือการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ แต่ในระบบ ดีซี สปัตเตอริง ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความดันประมาณ 100 มิลลิทอร์ นอกจากนี้ในระบบ ดีซี สปัตเตอริงทั่วไปอะตอมของแก๊สที่เกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% และเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สแทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง จึงถูกพัฒนาขึ้นมาโดย ทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางกับผิวหน้าของเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งเข้าชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยมากเพิ่มขึ้น เมื่อแก๊สเกิดการไอออไนซ์มากขึ้นจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้น จากทฤษฎีพบว่าถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กโดยมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลม แต่ถ้าอิเล็กตรอนทำมุม θ กับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบหมุนควง อิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.14 และจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็ก ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมของแก๊ส แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศตั้งฉากกัน อำนาจของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion)



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามยาวจะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงมากนัก แต่ไม่ทำให้แนวการเกิด โกลว์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไป และยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณี สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามขวาง ส่งผลทำให้เกิดกระบวนการเพิ่มไอออน ขึ้น โดยที่หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบแล้วจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสอง ออกมา อิเล็กตรอนลำดับสองจะเคลื่อนที่ในลักษณะไซคลอยด์ (Cycloid) ทำให้ถูกกักอยู่ใน สนามแม่เหล็กใกล้ขั้วคาโทด และเคลื่อนที่ลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทดดังรูปที่ 2.14 ทำให้ อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมของแก๊สบริเวณผิวเป้าสารเคลือบได้มากขึ้น จนเพิ่มปริมาณไอออน อิเล็กตรอนที่ไม่ชนกับอะตอมของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบ และปล่อย อิเล็กตรอนลำดับสองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกปลดปล่อยเป็นปริมาณมาก กรณีใช้สนาม แม่เหล็กทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอน สปัตเตอริงทรงกระบอก และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับ ระบบ ดีซี สปัตเตอริง ที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาเนอร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ดังรูปที่ 2.15



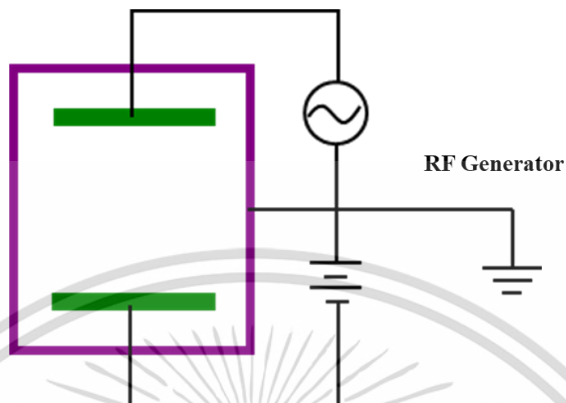
รูปที่ 2.15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการจัดเป้าสารเคลือบในระบบเคลือบฟิล์มบางแบบพลาเนอร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง

2.7.6 ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (RF magnetron sputtering)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) คือการใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 13.56 MHz เพื่อกระตุ้นให้แก๊สภายใน ระบบแตกตัวเป็นไอออนส่งผลให้สามารถเตรียมฟิล์มบางที่ความดันต่ำได้ เมื่อเทียบกับระบบ ดีซี สปัตเตอริง นอกจากนี้ยังสามารถทำการเตรียมฟิล์มบางที่มีเป้าสารเคลือบเป็นสารประเภทไดอิเล็ก

ตริก (Dielectric material) ได้ เนื่องจากระบบ ดีซี สปัตเตอริง จะเกิดการสะสมของประจุบวกที่เป้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ กรุณา ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนดจะทำให้ขบวนการสปัตเตอริงสิ้นสุด แต่ระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง อีกครั้งไ้เกิดขึ้นอีกต่อมา มีการพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวเป้าสารไดอิเล็กทริกส่งผลให้หน้าเป้าสารเคลือบเป็นกลางทางไฟฟ้าดังแสดงรูปที่ 2.16

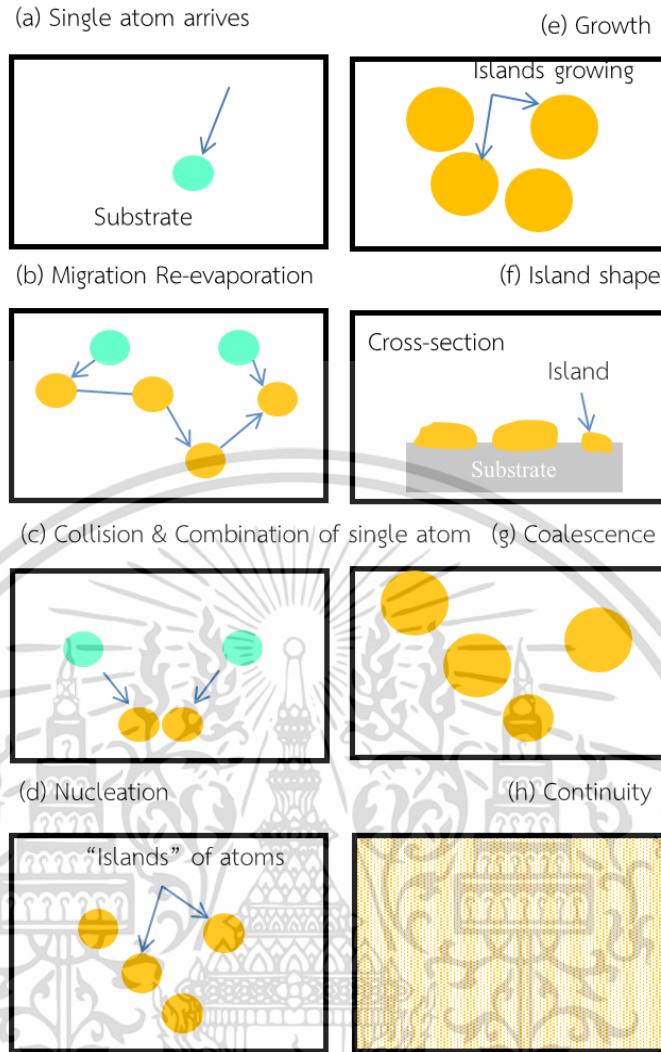


รูปที่ 2.16 ลักษณะแผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง

2.7.6.1 การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบในสุญญากาศ สารเคลือบที่ตกกระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล แสดงดังรูปที่ 2.17 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 (a) – (h) แสดงขั้นตอนการเกิดฟิล์ม[54]

โดยพลังงานพันธะ (bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดจับ (Absorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอจะมีโอกาสผ่านเข้าไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นแสดงดังรูปที่ 2.17(b) อะตอมสารเคลือบอาจถูกชนจากอะตอมที่เข้ามาใหม่หรืออาจเกิดการระเหยกกลับและรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีแพร่ออกมา เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ แสดงดังรูปที่ 2.17(c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว

ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอม ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition rate) อะตอมคู่ที่เกิดขึ้นอาจมีการรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวเกิดเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) และรูปแบบอื่นๆ การรวมตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่าการเกิดนิวเคลียส แสดงดังรูปที่ 2.17(d) ทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable islands) จากนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตขึ้นจนกลายเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands growth) แสดงดังรูปที่ 2.17(e) และ รูปที่ 2.17(f) กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นเรื่อยๆจน เกิดการแตะและชนกับกลุ่มข้างๆ จึงเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) แสดงดังรูปที่ 2.17(g) ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน พบว่าอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquidlike behavior) ในระหว่างการรวมตัวกันของกลุ่มอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic orientation) การรวมกลุ่มของอะตอมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 0.1 วินาที) หลังจากการรวมกันของกลุ่มอะตอมพบว่า พื้นที่ฉายลงมา (Projected area) มีขนาดน้อยลง แต่ความสูงมีค่ามากขึ้น

การรวมกันของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่ง ฟิล์มเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2.17(h) ในบางกรณีการเชื่อมต่อของฟิล์มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 นาโนเมตร ลักษณะผิวของฟิล์มโดยทั่วไปในขณะที่เกิดการรวมกลุ่มของอะตอมจะมีลักษณะเป็นหุบเขาและเนินเขา

การเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจจะเป็นผลึกเดี่ยว หรือมีจำนวนผลึกประกอบกันเพียง 2-3 ผลึก ถ้าเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมจะเป็นแบบสุ่ม ทำให้ฟิล์มที่ได้ที่มีโครงสร้างในรูปร่างหลายผลึก แต่ถ้าเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวเช่นกัน เรียกกระบวนการนี้ว่า อีพิแทกซี (Epitaxy)

ในขณะที่เคลือบฟิล์มอะตอมจะมีการเคลื่อนที่เพื่อเลือกไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า ด้วยความสามารถในการเคลื่อนที่มากขึ้น ถ้าอุณหภูมิบนพื้นผิวของวัสดุรองรับมีค่าสูงขึ้น และพบว่าหากอัตราการเคลือบลดลงจะทำให้การโตของผลึกเกิดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากอุณหภูมิของผิววัสดุรองรับที่มีความมากกับอัตราการเคลือบที่ต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและความบกพร่อง (Defect) ในเกรนลดลง

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงนั้นสารเคลือบที่ตกกระทบบนผิววัสดุรองรับนั้น โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล หลังจากนั้นจึงเกิดการฟอร์มตัวจนพอกพูนเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ขณะการฟอร์มตัวของฟิล์มบางมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการเกิดฟิล์ม ตัวอย่างเช่น พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบ พลังงานพันธะระหว่างอะตอมสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอะตอมสารเคลือบด้วยตัวเอง อุณหภูมิของวัสดุรองรับ (Substrate temperature) และตำแหน่งของอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบ การเกิดและการโตของฟิล์มบาง สามารถแบ่งปัจจัยต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. อะตอมจากเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยโมเมนตัมสูงของไอออนบวก จะหลุดออกและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ผ่านระบบสุญญากาศ ที่มีอนุภาคของแก๊สและพลาสมาบรรจุอยู่
2. เมื่ออะตอมตกลงมาบนพื้นผิวแผ่นรองรับ จะได้รับพลังงานจากโมเมนตัมในการชน ทำให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ (Surface mobility) ส่งผลให้อะตอมเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวของแผ่นรองรับ

เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดนิวเคลียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากอะตอมเคลื่อนที่บนพื้นผิวของแผ่นรองรับ อะตอมจะเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้

3.1 อะตอมเกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวแผ่นรองรับ โดยที่อะตอมของสารเคลือบจะสร้างพันธะเคมีกับอะตอมที่ผิวของแผ่นรองรับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับอะตอมที่พื้นผิวแผ่นรองรับมากกว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของสารเคลือบด้วยตัวเองจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบมีค่าต่ำ จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสบนพื้นผิวแผ่นรองรับโดยที่อะตอมข้างเคียงสามารถเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียสที่เกิดขึ้นนี้เพื่อลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างฟิล์มเคลือบกับแผ่นรองรับ

3.2 เมื่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับแผ่นรองรับมีค่าต่ำ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบจะมากทำให้เกิดการรวมตัวกันของอะตอมสารเคลือบ ตรงตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องของแผ่นรองรับ ความบกพร่องของระนาบบนผิวแผ่นรองรับ บริเวณที่มีประจุบนผิวแผ่นรองรับที่เป็นฉนวน พื้นผิวที่มีความแตกต่างทางเคมีหรือเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างกันออกไป รอยขีดและอะตอมแปลกปลอมบนผิวแผ่นรองรับ เป็นต้น

3.3 การเกิดนิวเคลียส จากการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบไปชนกับอนุภาคอื่นที่เคลื่อนที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นรองรับ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสที่มีความเสถียร เมื่ออะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสแล้ว ถ้าทำการเคลือบอย่างต่อเนื่องจะมีจำนวนนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือความหนาแน่นของนิวเคลียสมากขึ้น โดยที่นิวเคลียสจะเริ่มเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์ม และครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาแน่นของนิวเคลียสขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของแผ่นรองรับ และลักษณะการจัดเรียงตัวในรูปแบบผลึกของแผ่นรองรับ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียสบนแผ่นรองรับได้ด้วยวิธีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับขณะเคลือบฟิล์ม การเพิ่มอัตราการเคลือบ และการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิวแผ่นรองรับ เป็นต้น

2.7.6.2 กลไกการโตของนิวเคลียส แบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแยกตามความแตกต่างของการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสารเคลือบและแผ่นรองรับ

1. กลไกการเติบโตแบบขั้นต่อขั้น
2. กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ (Three dimension volume weber) เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานที่พื้นผิว (Surface energy) ของชิ้นงานกับวัสดุเคลือบแตกต่างกันและโตขึ้นทุกทิศทาง
3. กลไกการเกิดนิวเคลียส โดยการฟอร์มตัวกันระหว่างชั้นของแผ่นรองรับกับวัสดุเคลือบส่วนใหญ่มักเกิดกับการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นรองรับที่เป็นโลหะด้วยอุณหภูมิต่ำความสามารถในการเคลื่อนที่จึงต่ำไปด้วย ในเงื่อนไขนี้การโตของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับเทอร์โมไดนามิกกับพลังงานที่พื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ พบว่าเมื่อเกิดการสะสมของอะตอมที่แพร่ไปบนผิวแผ่นรองรับและเริ่มรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสในแนวนอนจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีกับผิว ที่เรียกว่า Wetting growth เช่นการเคลือบทองบน แผ่นคาร์บอน แผ่นอลูมินา แผ่นซิลิกอนออกไซด์และแผ่นโพลีเมอร์ การเติบโตและการรวมตัวกันของนิวเคลียสสามารถลดช่องว่างระหว่างรอยต่อหรือความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างที่รอยต่อบนแผ่นรองรับได้ เพราะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างนิวเคลียสและวัสดุของแผ่นรองรับ

กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างแผ่นรองรับกับนิวเคลียสเพียงเล็กน้อย จะมีรูปแบบการเติบโตที่แตกต่างจากกรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่มาก ซึ่งเรียกว่า ลำดับขั้นการโตของเกรนแบบ Island-channel-continuous film ก่อนจะรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส โดยที่นิวเคลียสจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว คือสามารถหมุนและจัดเรียงโครงสร้างเองได้จึงเกิดการก่อตัวกันเป็นกลุ่มของนิวเคลียสเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของนิวเคลียสมีค่าสูงพอที่จะเกิดการแพร่ของอะตอมและการจัดเรียงตัวเป็นนิวเคลียสแบบ Ball up ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด เมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเคลือบกับพื้นผิวแผ่นรองรับสูง จะมีอัตราการแพร่ต่ำหรือเกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบบนพื้นผิวแผ่นรองรับ

2.7.7 บริเวณโครงสร้างของการเกิดฟิล์ม [55]

โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของ T/T_m (อุณหภูมิเคลือบ/อุณหภูมิหลอมเหลว) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ ดังรูปที่ 2.18

1. บริเวณ 1 (Zone1) เป็นการเคลือบ ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันแก๊สขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายตัว และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยาวแหลมแบบ Tapers crystallites จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อยอังสตรอม ที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 มิลลิทอร์ ถ้าความดันแก๊สสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่นของแก๊สห้องสุญญากาศมีมากขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้้น้อย และขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็น นิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลือบที่ขรุขระมักเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจาก Ion bombardment เป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์โดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ เกิดอยู่ในช่วงระหว่างบริเวณ

1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชน

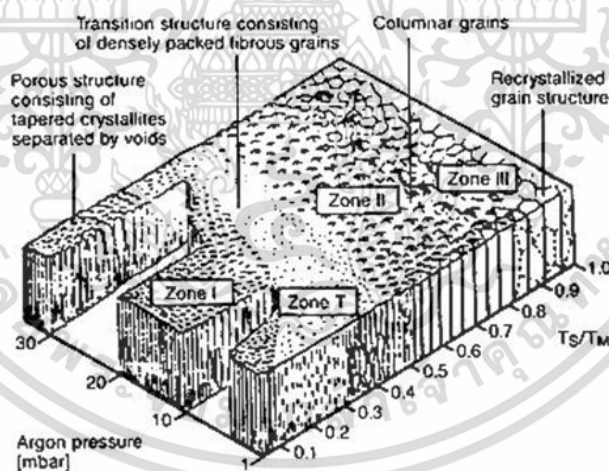
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้นค่า Surface Mobility ก็เพิ่มขึ้น และโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็เข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นมา จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็น Columnar ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างที่บริเวณขอบ

3. บริเวณ 2 (Zone II) ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้าง Columnar ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อ Surface mobility ของอะตอม) และขนาดของ Columnar จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบ Columnar

4. บริเวณ 3 (zone III) บริเวณนี้จะมีอุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ การแพร่จะมีค่าสูงและส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของ Columnar จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored strain energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบ เกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจาก Columnar เป็นผลึกเดี่ยว



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ [55]

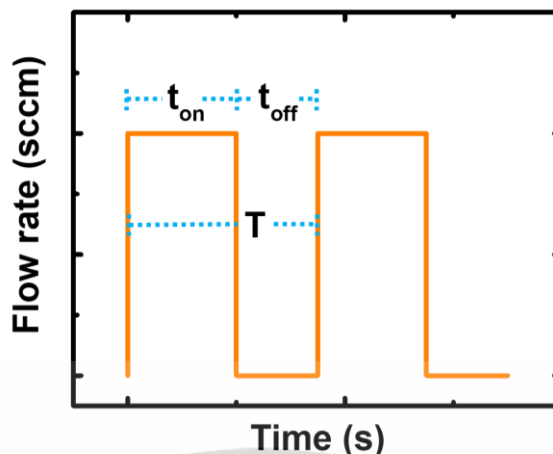
2.8 เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สแบบไวปฏิกิริยา (Reactive Gas-Timing; RGT)

กระบวนการแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปสามารถผลิตออกไซด์ไนไตรด์คาร์ไบด์หรือซัลไฟด์ของสารประกอบโลหะเดี่ยวหรือหลายชนิดได้โดยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ทั่วไปของกระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดปฏิกิริยาคือการวนรอบฮิสเทรีซิสของพารามิเตอร์ เมื่อแก๊สปฏิกิริยาถูกป้อนเข้าไปในระบบ จะเกิดภาวะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non linear) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการก่อตัวของพารามิเตอร์ โดยพบว่าเมื่อนักวิจัยมากมายที่ได้ทำการทดสอบสภาวะที่เกิดขึ้นมาแล้ว [27-29] อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลกระทบของสภาวะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเทียบกับอัตราการไหลของแก๊สดังนั้นการศึกษาส่วนใหญ่เหล่านี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับการทะลักของโหมดโลหะและโหมดสปีดเตอริงของสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับเป่าโลหะเดี่ยวและแก๊สปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียว เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน อะเซทิลีน ฯลฯ Sproul et al ได้เสนอแนวทางดั้งเดิม [30] โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมป้อนกลับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนโดยมวลสาร ซึ่งประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบางซิลิกอนและไททาเนียมออกซิไนไตรด์ด้วยความเข้มข้นทางเคมีที่ปรับได้และการควบคุมกระบวนการที่ดีขึ้น หลังจากนั้น Aronson และคณะ [31] และคนอื่น [32, 33] ได้เสนอแนวทางใหม่สำหรับการสะสมของออกไซด์ของโลหะหรือไนไตรด์ซึ่งแก๊สที่เกิดปฏิกิริยาจะเปิดและปิดเป็นจังหวะ โดยในที่สุด Martin et al. [34-36] และนักวิจัยคนอื่น ๆ [37, 38] ได้พัฒนากระบวนการรีแอคทีฟแก๊สพัลซิง (Reactive Gas Pulsing Process; RGPP) หรือ (Reactive Gas-Timing; RGT) สำหรับการสะสมของฟิล์มบางของโลหะออกซิไนไตรด์

แมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นเทคนิคการสะสมที่นิยมสำหรับการเคลือบเมทัลออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ในรีแอคทีฟสปีดเตอริงมีโหมดออกซิเดชันสามโหมดของเป่าซึ่งฟังก์ชันของการไหลของแก๊สปฏิกิริยา O_2 ได้แก่ โหมดโลหะที่มีการไหลของแก๊สปฏิกิริยา O_2 ต่ำ โหมดออกไซด์ที่มีการไหลของแก๊สปฏิกิริยา O_2 สูง และโหมดที่เกิดการเปลี่ยนจากโหมดโลหะเป็นโหมดออกไซด์ [56-58] โหมดที่แตกต่างกันเหล่านี้แสดงถึงระดับความครอบคลุมของออกไซด์บนเป่า โดยทั่วไปอัตราการไหลของแก๊สปฏิกิริยาที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะส่งผลต่ออัตราการสะสมและคุณสมบัติของฟิล์มแตกต่างกัน ถ้าฟิล์มเกิดการทับถมกันในโหมดโลหะอัตราการสปีดเตอริงจะสูง โดยฟิล์มที่ได้มานั้นจะเกิดความไม่สมบูรณ์ทางเคมี (sub-stoichiometric) แต่ในกรณีที่เกิดโหมดออกไซด์ แก๊สปฏิกิริยา O_2 จะสูง โดยฟิล์มที่ได้มานั้นจะเกิดความสมบูรณ์ทางเคมี (stoichiometric) แต่จะส่งผลให้อัตราการเคลือบลดลงเนื่องจากเกิดการฟอร์มตัวของออกไซด์หรือไนไตรด์ที่บริเวณหน้าเป่า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเป็นพิษของเป่า (poisoning effect) เพื่อให้ได้อัตราการสะสมที่สูงและฟิล์มที่เกิดความสมบูรณ์ทางเคมีต้องทำการควบคุมการสะสมของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน โหมดการเปลี่ยนแปลง (transition mode) จึงถูกเลือกในการนำมาใช้ อย่างไรก็ตามการทับถมกันของฟิล์มในโหมดการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่เสถียรมากนักเนื่องจาก “ผลของฮิสเทรีซิส”

เทคนิคควบคุมเวลาของแก๊สแบบไวปฏิกิริยาเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งเทคนิคนี้จะทำการควบคุมการเปิดและปิดของแก๊สสปีดเตอริงตามรูปที่ 2.19 โดยจะพบว่าฟิล์มมีอัตราคาเคลือบที่สูงภายใต้กระบวนการที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงกระบวนการแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบทั่วไปได้สำเร็จ



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟของอัตราการไหลของแก๊สปฏิบัติเกี่ยวกับเวลา

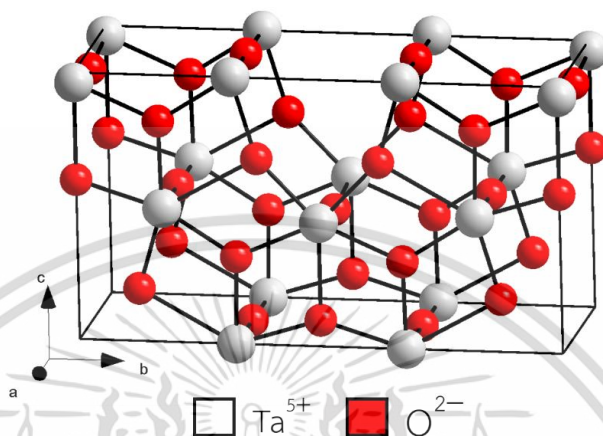
2.9 โครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

แทนทาลัมเพนออกไซด์หรือที่เรียกว่าแทนทาลัม (V) ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตร Ta_2O_5 จะมีลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.20 โดยเป็นของแข็งสีขาวที่ไม่ละลายในตัวทำละลายทุกชนิด แต่ถูกทำลายได้โดยเบสแก่และกรดไฮโดรฟลูออริก แทนทาลัมเพนออกไซด์ เป็นวัสดุเฉื่อยที่มีดัชนีหักเหสูงและการดูดซึมต่ำ (เช่นไม่มีสี) ซึ่งทำให้มีประโยชน์สำหรับการเคลือบ นอกจากนี้ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตตัวเก็บประจุเนื่องจากค่าคงที่เป็นฉนวนสูง โดยแทนทาลัมเกิดขึ้นในแร่แทนทาลิตและโคลัมบัส (columbium เป็นชื่อโบราณของไนโอเบียม) ซึ่งเกิดขึ้นในเพ็กมาไทต์ ซึ่งเป็นหินอัคนี ส่วนผสมของ columbite และ tantalite เรียกว่า coltan Tantalite ถูกค้นพบโดย Anders Gustaf Ekeberg ที่ Ytterby ประเทศสวีเดนและ Kimoto ประเทศฟินแลนด์ แร่ไมโครไลท์และไพโรคลอร์มีประมาณ 70% และ 10% Ta ตามลำดับ โครงสร้างผลึกของแทนทาลัมเพนออกไซด์ยังเป็นประเด็นที่ถกเถียงกันอยู่ เนื่องจากวัสดุจำนวนมากมีความไม่เป็นระเบียบ [59] เป็นทั้งออสซิลอนหรือโพลีคาร์บอเนต โพลีเมอร์มีอย่างน้อย 2 รูปแบบคือ รูปแบบอนุกรมต่ำเรียกว่า L- หรือ $\beta-Ta_2O_5$ และรูปแบบอนุกรมสูงที่เรียกว่า H- หรือ $\alpha-Ta_2O_5$ การเปลี่ยนแปลงระหว่างสองรูปแบบนี้เกิดขึ้นช้าและสามารถเกิดการย้อนกลับได้ เกิดขึ้นระหว่าง 1,000 ถึง 1360 °C โดยมีส่วนผสมของโครงสร้างที่อุณหภูมิปานกลาง [59] โครงสร้างของโพลีเมอร์ทั้งสองประกอบด้วยโซ่ที่สร้างขึ้นจาก TaO_6 แปดเหลี่ยมและรูปทรงห้าเหลี่ยม bipyramidal TaO_7 ที่มียอดอยู่ตรงข้ามกัน ระบบคริสตัลโดยรวมเป็นออร์โธโรโอบิกในทั้งสองกรณีโดยกลุ่มพื้นที่ของ $\beta-Ta_2O_5$ ถูกระบุว่าเป็น Pna2 โดยเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกเดี่ยว [60]

แทนทาลัมเพนออกไซด์ที่เป็นออสซิลอนมีโครงสร้างเฉพาะที่คล้ายกับโพลีเมอร์ที่เป็นผลึกซึ่งสร้างจากโพลีเฮดรา TaO_6 และ TaO_7 ในขณะที่เฟสของเหลวหลอมเหลวมีโครงสร้างที่แตกต่างจากรูปทรงหลายเหลี่ยมที่มีการยึดกันที่ต่ำ โดยส่วนใหญ่เป็น TaO_5 และ TaO_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนทาลัมเพนทอกไซด์มีลักษณะเป็นฉนวนและมีการรายงานช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 3.8 ถึง 5.3 eV ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต [61] [62] [63] โดยทั่วไปแล้วยังวัสดุมีคุณสมบัติพื้นฐานมากเท่าใดก็จะยิ่งสังเกตเห็นช่องว่างพลังงานที่มากขึ้นโดยค่าที่สังเกตได้เหล่านี้สูงกว่าค่าที่ทำนายไว้โดยการคำนวณทางเคมี (2.3 - 3.8 eV)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างผลึกของแทนทาลัมเพนทอกไซด์ [64]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแทนทาลัมออกไซด์ [64]

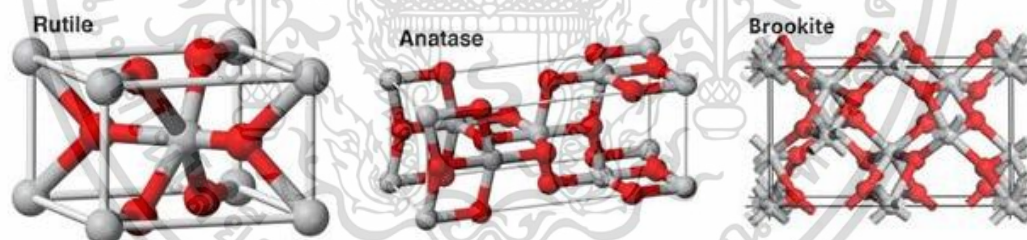
Properties	
Chemical formula	Ta ₂ O ₅
Molar mass	441.893 g/mol
Appearance	white, odorless powder
Density	β-Ta ₂ O ₅ = 8.18 g/cm ³ α-Ta ₂ O ₅ = 8.37 g/cm ³
Melting point	1,872 °C (3,402 °F; 2,145 K)
Solubility in water	negligible
Solubility	insoluble in organic solvents and most <u>mineral acids</u> , reacts with HF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band gap	3.8–5.3 eV
Magnetic susceptibility (χ)	$-32.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$
Refractive index (n_D)	2.275

2.10 โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันพบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบในธรรมชาติมีการจัดเรียงโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพลังงานในการจัดเรียงโครงสร้างซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชนิด [65] ได้แก่ เฟสอะนาเทส (Anatase phase) เฟสรูไทน์ (Rutile phase) เฟสบลูโคईน (Brookite phase) และเฟสชิรางโค (Srilankite phase) โดยที่เฟสรูไทน์และเฟสอะนาเทสจะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระกอนอล (Tetragonal) ส่วนเฟสบลูโคईนและเฟสชิรางโค จะมีโครงสร้างเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างของเฟสบลูโคईนและเฟสชิรางโค พบน้อยมาก โดยทั่วไปจึงนิยมศึกษาโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์ในเฟสอะนาเทสและเฟสรูไทน์ จากสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.2 พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของไททาเนียมออกไซด์จะมีจุดบกพร่องจำนวนมากในรูปแบบของที่ว่างตรงตำแหน่งของออกซิเจน (Oxygen vacancies) จึงมีสมบัติเป็นผู้ให้อิออน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สามารถเขียนสูตรทางเคมีในรูปแบบของ TiO_{2-x} และแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตำแหน่งของออกซิเจนที่ขาดหายไป ส่งผลให้ไททาเนียมไดออกไซด์มีความนำไฟฟ้าเกิดขึ้น บริเวณที่ส่งผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์คือเนื้อสารและพื้นผิว [66] แต่เนื่องจากการนำไฟฟ้าที่เนื้อสารจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลเซียส [67] แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของconductivity โดยส่วนใหญ่เป็นผลมาจากพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว และขอบเกรน

ตารางที่ 2.2 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ [68]

Polymorph	Rutile	Anatase	Brookite	Srilankite
Structure	Tetragonal P4 ₂ /mnm	Tetragonal I4 ₁ /amd	Orthorhombic Pcab	Orthorhombic Pbcn
Density	4.25	3.89	4.12	4.37
Refractive index	⊥ to c axis 2.60 // to c axis 2.89	⊥ to c axis 2.55 // to c axis 2.48	// to a or b axis 2.57 // to c axis 2.69	-
Dielectric Constant	⊥ to c axis 89 // to c axis 173	⊥ to c axis 31 // to c axis 48	78	-
Band gap (eV)	⊥ to c axis direct 3.04 // to c axis indirect 3.05	⊥ to c axis direct 3.42 // to c axis indirect 3.46	3.14	-
Electron mobility (10 ⁻⁴ m ² /Vs)	Crystal : 0.1-10 thin film : 0.1	Crystal: 15-550 thin film : 0.1-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

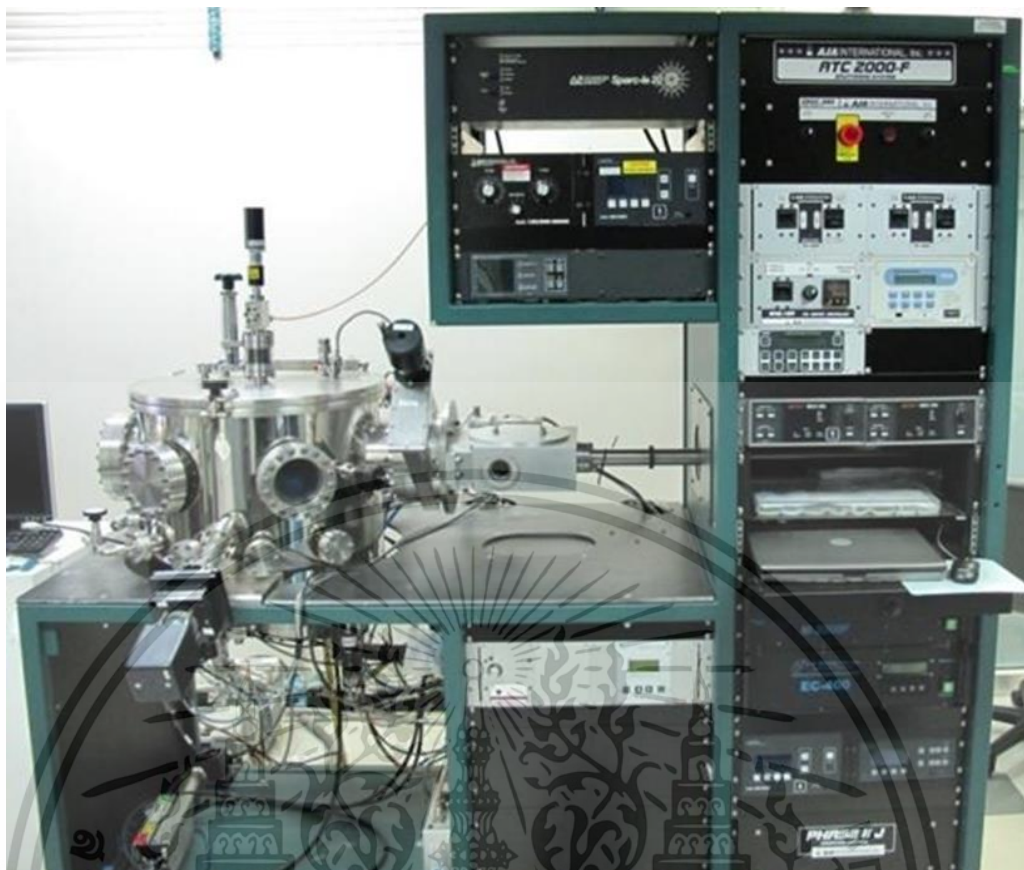
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางโลหะออกไซด์ (metal oxide) ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคสปัตเตอร์แบบทั่วไป (conventional reactive sputtering; CONV) และเทคนิคสปัตเตอร์แบบควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา (reactive gas-timing sputtering; RGT) เพื่อศึกษาผลกระทบของความถี่ในการปล่อยแก๊สไวปฏิกิริยาเข้าไปในระบบเคลือบที่มีต่อโครงสร้างเชิงกายภาพและคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง โดยจะทำการศึกษาผ่านฟิล์มบางโลหะออกไซด์ 2 ชนิดคือ แทนทาลัมออกไซด์ (tantalum oxide; TaO) และไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO₂) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคและเครื่องมือต่างๆ ได้แก่ เทคนิคสเปกโทรสโกปีอิลิปโซเมทรี (spectroscopic ellipsometry; SE) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field-emission scanning electron microscope; FE-SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (high-resolution transmission electron microscope; HR-TEM) เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) และ เครื่องสเปกโทรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Photoelectron spectroscopy; XPS)

3.1 การเตรียมฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ถูกเตรียมด้วยระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ของบริษัท AJA International, Inc. รุ่น ATC 2000-F ซึ่งติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ภายใต้ความดูแลของทีมวิจัยเทคโนโลยีเซนเซอร์แสงไฟฟ้าเคมี (Opto-Electrochemical Sensing Research Team; OEC) โดยฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์จะถูกเตรียมโดยอาศัยเทคนิคอาร์เอฟ รีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ (RF reactive magnetron sputtering) ทั้งแบบทั่วไปและแบบควบคุมกับเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ใช้เป้าสารเคลือบ (target) แทนทาลัม (tantalum; Ta) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.95%) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้วหนา 0.25 นิ้ว ของบริษัท Kurt J. Lesker ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (argon; Ar) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) และแก๊สออกซิเจน (oxygen; O₂) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) ลงบนแผ่นรองรับ (substrate) ซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) ที่มีความเป็นผลึกขนาด (100) และกระจกใสลดตามเงื่อนไขการเคลือบดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนกระบวนการเคลือบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง ของบริษัท AJA International, Inc. รุ่น ATC 2000-F sputtering system

1. วางเป้าแทนทาลัม ตรงตำแหน่งหัวสปัตเตอร์ริง (sputtering gun) และทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 3.2
2. สร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศหลัก (main chamber) ให้มีความดันพื้นฐาน (base pressure) ระดับ 10^{-6} ทอร์
3. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์วางลงบนที่ยึดแผ่นรองรับ (substrate holder) แล้วนำไปใส่ลงในห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน (load lock chamber) จากนั้นสร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงานที่ความดันระดับ 10^{-6} ทอร์
4. เปิดประตูวาล์วที่เชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศหลักกับห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน แล้วทำการเลื่อนที่ยึดแผ่นรองรับเข้าไปในห้องสุญญากาศหลักแล้วยึดติดกับแกนหมุน จากนั้นปิดประตูวาล์วที่เชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศหลักกับห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน
5. ปรับตำแหน่งของที่ยึดแผ่นฐานรองให้ห่างจากหัวสปัตเตอร์ริงเป็นระยะ 8 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับการวัดสมบัติของฟิล์มบางระหว่างทำการเคลือบด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีบไซเมทรีแบบอินซิตู จากนั้นเปิดมอเตอร์เพื่อทำการหมุนที่ยึดแผ่นรองรับและทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสะอาดพื้นผิวของแผ่นรองรับด้วยพลาสมา (plasma cleaning) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน

6. ทำการปล่อยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนเข้าไปในห้องเคลือบหลักและทำการปรับความดันด้วยประตูล้อเชิงกล (mechanical pressure valve) ตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นให้ความต่างศักย์แก่หัวสปัตเตอร์เพื่อให้แก๊สในระบบแตกตัวเป็นพลาสมาที่บริเวณหัวสปัตเตอร์

7. ทำการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยเทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาโดยอาศัยเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยระหว่างทำการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์จะทำการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลิมโซเมทรีแบบอินซิทิวควบคู่ไปด้วย ซึ่งรายละเอียดจะชี้แจงในหัวข้อถัดไป

8. เมื่อทำการเคลือบเสร็จจะทำการหยุดจ่ายความต่างศักย์ให้แก่หัวสปัตเตอร์ และหยุดปล่อยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนเข้าไปในห้องเคลือบหลัก จากนั้นเมื่อความดันในห้องเคลือบหลักกลับมาอยู่ที่ระดับ 10^{-6} ทอร์ จะทำการนำชิ้นงานที่เคลือบออกมาผ่านห้องสุญญากาศรองรับใส่ชิ้นงาน

9. นำชิ้นงานเคลือบไปวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ซึ่งรายละเอียดจะชี้แจงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.2 การประกอบชิ้นส่วนของหัวสปัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขการเคลือบชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

เงื่อนไข	รายละเอียด
ความดันก่อนการเคลือบ	5.0×10^{-6} ทอร์
ความดันขณะเคลือบ	3×10^{-3} ทอร์
กำลังไฟฟ้า	200 วัตต์
แก๊สอาร์กอนที่ทำการป้อน	10 sccm
แก๊สออกซิเจนทำการป้อน	12 sccm
เวลา	30 นาที

ตารางที่ 3.2 แสดงการเคลือบชั้นฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วย 2 เทคนิค

เทคนิค	จังหวะการเปิด-ปิด ของแก๊ส				ความดันย่อยของแก๊ส (มิลลิทอร์)	
	แก๊สอาร์กอน		แก๊สออกซิเจน		P _{Ar}	P _{O₂}
	เปิด (วินาที)	ปิด (วินาที)	เปิด (วินาที)	ปิด (วินาที)		
เทคนิคแบบทั่วไป	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง				1.25	1.25
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไว	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง				1.25	1.25
ปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3	17	3				
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไว	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง				1.25	1.25
ปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 17:3			17	3		
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไว	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง				1.25	1.25
ปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 3:3			3	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟ รีแอกทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ทั้งแบบทั่วไปและแบบควบคู่กับเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาในหัวข้อที่ 3.1 จะถูกนำมาศึกษา และวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

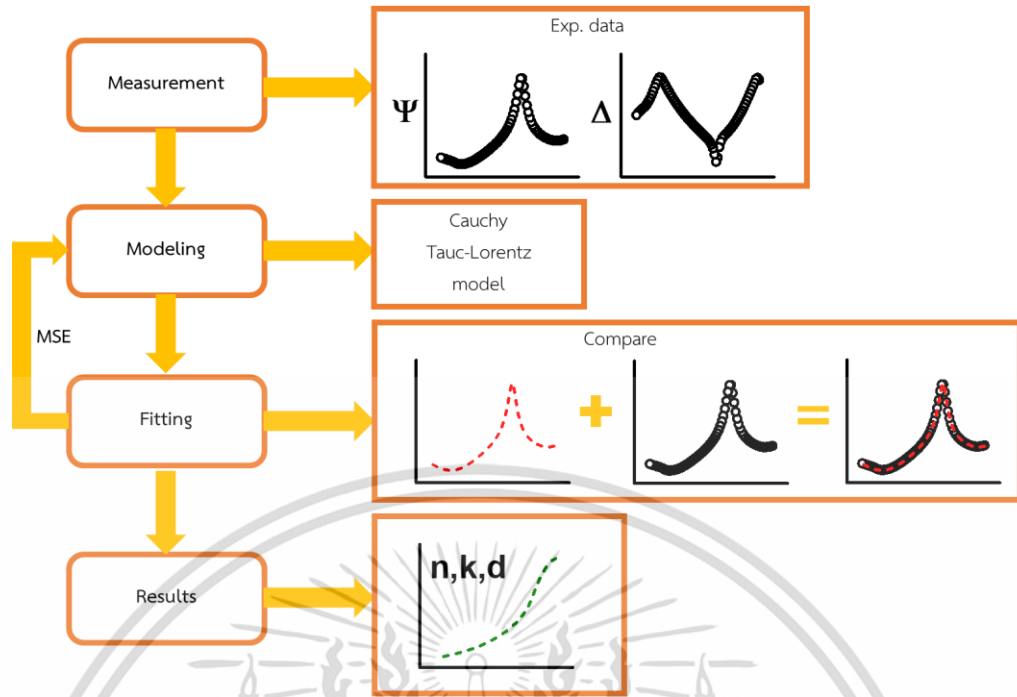
3.2.1 การศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี

ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมขึ้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี แบบปรับมุมตกกระทบของลำแสงได้ (variable angle spectroscopic ellipsometer; VASE) ที่มีตัวรับแสงเพื่อนำไปวิเคราะห์แบบหมุนรอบแกน (rotating analyzer ellipsometer; RAE) ของบริษัท J.A. Woollam, Co. รุ่น VASE2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ภายใต้ความดูแลของทีมนิวิจัยเทคโนโลยีเซนเซอร์ แสงไฟฟ้าเคมี โดยในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีจะมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงเมื่อสะท้อนผิวฟิล์มบาง ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงแสงของฟิล์มบาง ขั้นตอนการปรับค่าตัวแปรเพื่อเทียบผลจากการวัดและผลจากแบบจำลองเชิงแสง และขั้นตอนการพิจารณาสมบัติของฟิล์มบางผ่านแบบจำลองเชิงแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer (VASE) ที่มีตัวรับแสงเพื่อวิเคราะห์แบบหมุนรอบแกน (Rotating Analyzer Ellipsometer; RAE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปคิอิลิปโซเมทรี

1. ขั้นตอนการวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงที่สะท้อนผิวฟิล์มบาง

เทคนิคสเปกโตรสโคปคิอิลิปโซเมทรีจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนแอมพลิจูด (Ψ) และเฟส (Δ) ระหว่างโพลาไรเซชันในแนวขนาน (p-polarization) และแนวตั้งฉาก (s-polarization) กับระนาบตกกระทบของแสงสะท้อนที่ออกมาโดยอาศัยการวัดความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปตามแกนหมุนของโพลาไรเซอร์ (polarizer) ที่อยู่หน้าตัววัดความเข้มแสง (detector) โดยในการศึกษานี้จะทำการวัดในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6.0 eV ที่ความละเอียด 0.025 eV โดยกำหนดให้มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 50° , 60° และ 70° กับเส้นตั้งฉากผิวฟิล์ม (normal line) ซึ่งเป็นมุมเหมาะสมกับการวัดฟิล์มบางบนซิลิกอนเวเฟอร์และกระจกสไลด์

2. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงแสงของฟิล์มบาง

การสร้างแบบจำลองเชิงแสงของฟิล์มบางนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือทำการสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์ม โดยทำการสร้างจำนวนชั้น รวมถึงความหนาของชั้นฟิล์มบางและแผ่นรองรับให้ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงที่สุด และทำการนิยามสมบัติเชิงแสงของทุกชั้นโดยใช้ฐานข้อมูลของโปรแกรมวิเคราะห์และฟังก์ชันหรือสมการพื้นฐานสำหรับนิยามสมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติของแต่ละชนิดฟิล์มบาง เช่น ฟังก์ชันคอซี สมการเซลมาเยต์ สมการทาวส์-ลอเรนซ์ สมการคอตี ลอเรนซ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นตอนการปรับค่าตัวแปรเพื่อเทียบผลจากการวัดและผลจากแบบจำลองเชิงแสง

จากแบบจำลองเชิงแสงที่สร้างขึ้นจะสามารถจำลองสัญญาณการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างชิ้นงานที่มีสมบัติเป็นไปตามแบบจำลองเชิงแสงได้ โดยจะเรียกว่าเป็นข้อมูลจำลอง (generated data) ซึ่งจะต้องทำการปรับตัวแปรต่างๆในแบบจำลองเชิงแสงเพื่อให้ข้อมูลจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการวัดหรือข้อมูลจากการทดลอง (experimental data) ให้มากที่สุด เพื่อบอกปริมาณความเหมือนหรือแตกต่างได้อย่างมีนัยยะ ค่า mean square error (MSE) ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$MSE^2 = \frac{1}{2N - M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\Psi_i^{\text{mod}} - \Psi_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\Psi,i}^{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{\text{mod}} - \Delta_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\Delta,i}^{\text{exp}}} \right)^2 \right] = \frac{1}{2N - M} \chi^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนคู่ของสัดส่วนแอมพลิจูด (Ψ) และเฟส (Δ)
 M คือ จำนวนตัวแปรที่ทำการปรับของแบบจำลอง
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด

จากสมการดังกล่าว เมื่อข้อมูลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจำลอง ค่า MSE จะมีค่าน้อย อย่างไรก็ตาม หากมีค่าข้อมูลจากการทดลองมีความแตกต่างจากกับข้อมูลจำลองที่มากขึ้น ค่า MSE จะมีค่าสูงขึ้นตาม โดยทั่วไป ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิลิปโซเมทรีจะต้องปรับค่าตัวแปรให้มีค่า MSE ที่ต่ำระดับหนึ่ง ขึ้นกับจำนวนข้อมูลที่วัด เช่น ในกรณีของงานวิจัยนี้ ค่า MSE ควรจะมีค่าต่ำกว่า 50 จึงจะถือว่าค่าตัวแปรนั้นเหมาะสมสำหรับแบบจำลองเชิงแสงของตัวอย่างฟิล์มบางที่ทำการวิเคราะห์ หากทำการปรับตัวแปรแล้วค่า MSE ยังมีค่าสูงกว่า 50 ควรต้องกลับไปแก้ไขโครงสร้างทางกายภาพของแบบจำลองเชิงแสงหรือเปลี่ยนฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางและแผ่นรองรับกับความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ แล้วทำการปรับค่าตัวแปรใหม่อีกครั้งจนกว่าค่า MSE จะมีค่าต่ำกว่า 50

4. ขั้นตอนการพิจารณาสมบัติของฟิล์มบางผ่านแบบจำลองเชิงแสง

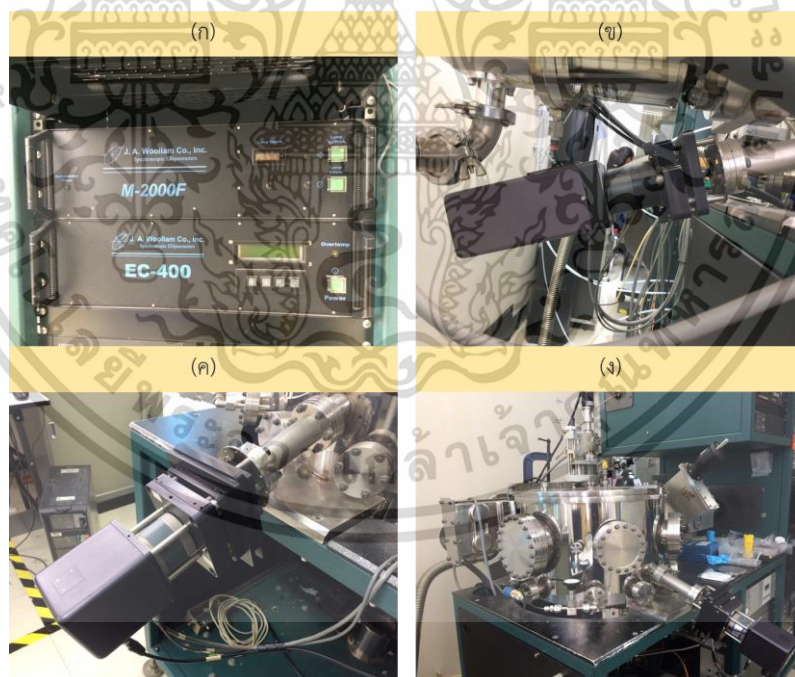
เมื่อทำการปรับโครงสร้างทางกายภาพและค่าตัวแปรของแบบจำลองเชิงแสงจนกระทั่งค่า MSE มีค่าต่ำกว่า 50 ได้แล้ว สมบัติต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเชิงแสงจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับการวัดจากเทคนิคอื่น เช่น การพิจารณาลักษณะโครงสร้างและความหนาของฟิล์มบางเทียบกับผลการพิจารณาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การพิจารณาสมบัติเชิงแสงที่ได้กับการพิจารณาการส่องผ่านเชิงแสงที่ได้จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเทคนิคสเปกโตรสโคป

โคปิคอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทู (in-situ Spectroscopic Ellipsometry; iSE)

เทคนิคสเปกโตรสโคปโคปิคอิลิปโซเมทรีเป็นเทคนิคการวัดซึ่งสามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อใช้หัววัดที่เป็น CCD (Charge-coupled device) จะทำให้สามารถรับสัญญาณได้ตลอดช่วงคลื่นแสงพร้อมกันในเวลาสั้นๆ ทำให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของสเปกตรัมแสงได้ในระดับช่วงเวลาสั้นกว่า 0.5 วินาทีต่อสเปกตรัม ซึ่งสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มบางในขณะที่เคลือบได้ ซึ่งจะเรียกว่าเป็นเทคนิคสเปกโตรสโคปิกแบบอินซิทู โดยในการศึกษาฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์จะถูกพิจารณาด้วยชุดวัดสเปกโตรสโคปิกแบบอินซิทูของบริษัท J.A. Woollam, Co. รุ่น M-2000 ที่ติดตั้งไว้กับระบบสเปกโตรริงที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 250-1000 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 70° กับเส้นตั้งฉากผิวฟิล์ม ซึ่งจากหลักการของ iSE ทำให้สามารถศึกษาการก่อตัวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ในช่วงไม่กี่นาทีแรกของการเคลือบ ใช้หาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีความหนาน้อยกว่า 10 นาโนเมตรได้ ตลอดจนใช้ควบคุมความหนาของการเคลือบฟิล์มบางได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายของเครื่องสเปกโตรสโคปโคปิคอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทู (ก) M-2000 spectrometer และ EC-400 Electronic Controller (ข) light source (Xenon Arc lamp) (ค) CCD Detector (ง) in-situ spectroscopic ellipsometer (J.A.Woollam)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของบริษัท Hitachi รุ่น SU8030 ซึ่งติดตั้ง ณ ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สวทช. (NSTDA Characterization and Testing Service Center; NCTC) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางในมุมมองภาพตัดขวาง (cross section view) และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในมุมมองด้านบน (top view) ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ โดยหลักการทำงาน คือ อิเล็กตรอนที่ถูกผลิตออกมาจากแหล่งกำเนิดชนิดฟیلด์อิมิชชัน (field-emission source) จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและกำหนดทิศทางด้วยชุดเลนส์แม่เหล็กเกิดเป็นลำอิเล็กตรอนที่จะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งจะถูกตรวจจับและแปลผลเป็นสัญญาณภาพที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะของตัวอย่างฟิล์มบางในตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจง โดยสามารถเพิ่มกำลังขยายได้ในช่วง 30 - 500,000 เท่า จากขนาดปกติ

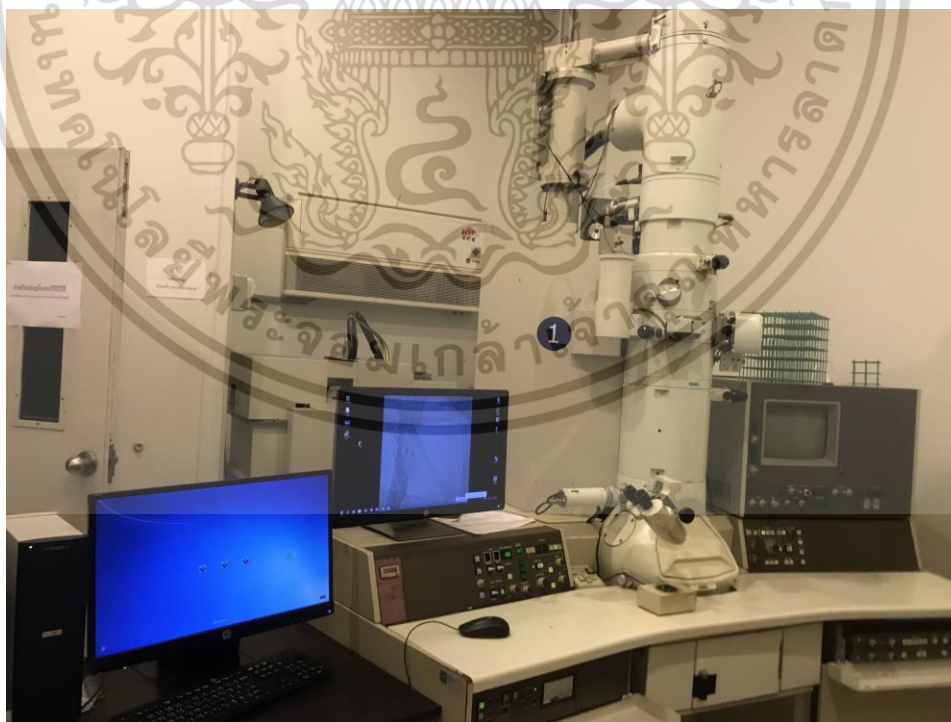


รูปที่ 3.6 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น SU8030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ในการศึกษาช่วงต้นของการเติบโต (initial growth) ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 10 นาโนเมตร จะไม่สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์ได้เนื่องจากขีดจำกัดของกำลังขยาย จึงทำให้ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านในการวิเคราะห์ช่วงต้นของการเติบโตของฟิล์มบางแทน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของบริษัท JEOL รุ่น JEM-2100Plus ที่ติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งจะใช้อิเล็กตรอนในการส่องผ่านวัตถุ และใช้เลนส์แม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่เบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนให้ไปยังตำแหน่งต่างๆ โดยทั่วไปเลนส์แม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดทองแดงขดตัวเป็นวงกลมล้อมรอบบริเวณแกนกลางของเครื่องTEM ที่ลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน ซึ่งภายในเครื่อง TEM จะประกอบด้วยเลนส์แม่เหล็กจำนวนมาก เมื่อจ่ายกระแสค่าต่างๆ เข้าไปภายในขดลวดทองแดงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ทางผ่านของลำอิเล็กตรอน โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเลนส์แม่เหล็กแต่ละตัวจะควบคุมทิศทางลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบน หรือโฟกัสในตำแหน่งที่เหมาะสมได้ ภาพที่ได้จาก TEM โดยทั่วไปมักเป็นภาพไบรต์ฟิลด์ (bright field) ซึ่งเป็นภาพถ่ายกำลังขยายสูงที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานและเลี้ยวเบน โดยลำอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างลงมาจะถูกโฟกัสและขยายด้วยเลนส์แม่เหล็ก และฉายลงบนฉากรับเพื่อแสดงภาพบนจออิเล็กตรอนเพื่อขยายขนาดวัตถุเข้าสู่จอรับภาพ



รูปที่ 3.7 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รุ่น JEM-2100Plus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การหาโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของบริษัท Rigaku รุ่น TTRAXIII ที่ติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบบนโครงสร้างผลึกซึ่งจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ ดังสมการที่ (3.15)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.15)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (หน่วย นาโนเมตร)

n คือ ลำดับของการสะท้อน

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl)

θ คือ มุมตกกระทบบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

ซึ่งผลที่ได้จะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของหัววัดรังสีที่กวาดไปขณะวัด โดยปกติแล้วการตรวจวัดฟิล์มบางส่วนใหญ่มักจะใช้โหมด Grazing incidence diffraction ซึ่งทำการกำหนดมุมของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ประมาณ 0.4 องศา ทำให้สามารถวิเคราะห์ความเป็นผลึกของบริเวณพื้นผิวฟิล์มบางเท่านั้น โดยสารประกอบและโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน สำหรับฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการศึกษาจะกำหนดมุมกวาดของหัววัดรังสีเอ็กซ์ในช่วง 20 – 60 องศา โดยค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม ซึ่งใช้ทองแดง (Cu) เป็นเป้าในการให้กำเนิดรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รุ่น TTRAXIII ของบริษัท Rigaku

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สมบัติการส่องผ่านของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของ บริษัท Agilent technologies รุ่น Cary 7000 ที่ติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ภายใต้ความดูแลของทีมนักวิจัยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ (PHT) โดยจะทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ โดยทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-2000 นาโนเมตร ผลของค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงจะถูกนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงโดยอาศัยสมการดังสมการ (3.16)

$$\%T_{\text{AVG}} = \frac{\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} T(\lambda) E(\lambda)}{\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} E(\lambda)} \quad (3.16)$$

เมื่อ $T(\lambda)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน

$E(\lambda)$ คือ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์สัมพันธ์ (Relative Solar Energy) โดย $\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} E(\lambda) = 100$

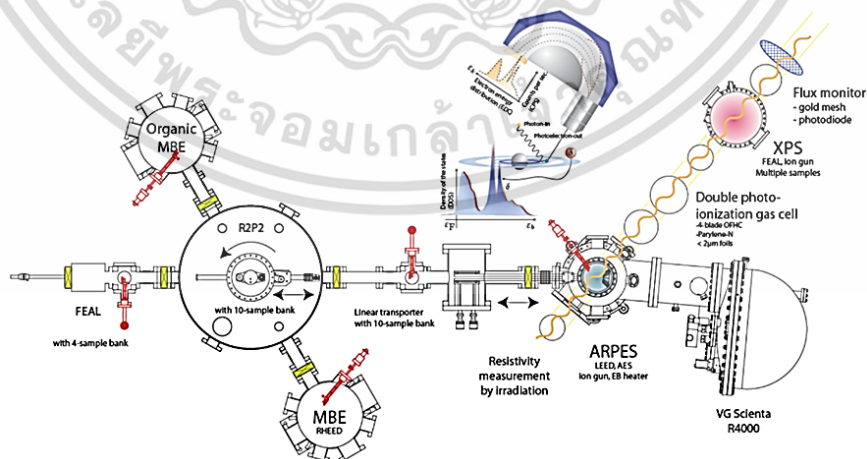


รูปที่ 3.9 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Cary 7000 Universal measurement spectrophotometer (UMS) บริษัท Agilent technologies

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การวิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์

องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ ที่ติดตั้ง ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Research Institute; SLRI) ระบบลำแสงที่ 3.2b (beamline 3.2b) โดยมีหลักการคือเมื่อลำแสงโฟตอน (Photon; $h\nu$) เข้าไปในอะตอม อะตอมจะดูดกลืนพลังงานจนทำให้ อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดออกมาเรียกว่า photoelectric absorption ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์ โดยเทคนิค XPS นี้จะวัดจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจะมีอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ เรียกว่า Relaxation อิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่นั้นจะคายพลังงานออกมาในรูปของ X-ray Fluorescence ถ้าพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้ไปชนกับอิเล็กตรอนวงนอกจนทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา จะเรียกว่า Auger electron โดยเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่วัดสเปกตรัมจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่า Binding energy ของธาตุที่เราวัด โดยทั่วไปแล้วพีคของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นต่างๆ ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กตรอนของแต่ละธาตุจะไม่เหมือนกันทำให้สามารถแยกธาตุแต่ละชนิดได้ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำได้โดยฉายแสงที่มีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นค่าเดียวในย่านของรังสีเอ็กซ์ (X-ray) จากปืนรังสีเอ็กซ์ (ในค่าพลังงานของ AlKa หรือ MgKa) หรือแสงซินโครตรอนลงบนพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ภายในระบบสุญญากาศ แล้วทำการตรวจจับและวัดค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกมาเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ค่าพลังงานจลน์ที่วัดได้นี้สามารถนำมาคำนวณกลับหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding Energy) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะเจาะจง ทำให้สามารถระบุธาตุองค์ประกอบและสถานะทางเคมีบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ได้



รูปที่ 3.10 เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ระบบลำแสงที่ 3.2b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ถูกเตรียมด้วยระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริงของบริษัท AJA International, Inc. รุ่น ATC 2000-F ซึ่งติดตั้ง ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ภายใต้ความดูแลของทีมวิจัยเทคโนโลยีเซนเซอร์แสงไฟฟ้าเคมีฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกเตรียมโดยอาศัยเทคนิคดีซี รีแอกทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC reactive magnetron sputtering) ทั้งแบบทั่วไปและแบบควบคุมกับเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไฮปฏิกิริยา ใช้เป้าสารเคลือบไททาเนียม (Titanium; Ti) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.95%) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว ของบริษัท Kurt J. Lesker ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) และแก๊สออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีความเป็นผลึกระนาบ (100) และกระจกใสลดตามเงื่อนไขการเคลือบดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนกระบวนการเคลือบดังนี้

1. วางเป้าไททาเนียม ตรงตำแหน่งหัวสปัตเตอร์ริง และทำการประกอบชิ้นส่วนดังภาพที่ 3.2
2. สร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศหลัก ที่ความดันระดับ 10^{-6} ทอร์
3. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์วางลงบนที่ยึดแผ่นรองรับแล้วนำไปใส่ลงในห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน จากนั้นสร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงานที่ความดันระดับ 10^{-6} ทอร์
4. เปิดประตูวาล์วที่เชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศหลักกับห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน แล้วทำการเลื่อนที่ยึดแผ่นรองรับเข้าไปในห้องสุญญากาศหลักแล้วยึดติดกับแกนหมุน จากนั้นปิดประตูวาล์วที่เชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศหลักกับห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน
5. ปรับตำแหน่งของที่ยึดแผ่นฐานรองให้ห่างจากหัวสปัตเตอร์ริงเป็นระยะ 8 เซนติเมตร จากนั้นเปิดมอเตอร์เพื่อทำการหมุนที่ยึดแผ่นรองรับและทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นรองรับด้วยพลาสมา ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน
6. ทำการปล่อยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนเข้าไปในห้องเคลือบหลักและทำการปรับความดันด้วยประตูวาล์วเชิงกล ตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นให้ความต่างศักย์แก่หัวสปัตเตอร์ริงเพื่อให้แก๊สในระบบแตกตัวเป็นพลาสมาที่บริเวณหัวสปัตเตอร์ริง
7. ทำการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไฮปฏิกิริยาโดยอาศัยเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.4
8. เมื่อทำการเคลือบเสร็จจะทำการหยุดจ่ายความต่างศักย์ให้แก่หัวสปัตเตอร์ริง และหยุดปล่อยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนเข้าไปในห้องเคลือบหลัก จากนั้นเมื่อความดันในห้องเคลือบหลักกลับมาอยู่ที่ระดับ 10^{-6} ทอร์ จะทำการนำชิ้นงานที่เคลือบออกมาผ่านห้องสุญญากาศรองสำหรับใส่ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำชิ้นงานเคลือบไปวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งรายละเอียดจะชี้แจงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการเคลือบชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

เงื่อนไข	รายละเอียด
ความดันก่อนการเคลือบ	5.0×10^{-6} ทอร์
ความดันขณะเคลือบ	10×10^{-3} ทอร์
กำลังไฟฟ้า	400 วัตต์
แก๊สอาร์กอนที่ทำการป้อน	10 sccm
แก๊สออกซิเจนทำการป้อน	20 sccm
เวลา	2 ชั่วโมง 15 นาที

ตารางที่ 3.4 แสดงการเคลือบชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย 2 เทคนิค

เทคนิค	จังหวะการเปิด-ปิด ของแก๊ส				ความดันย่อยของแก๊ส (มิลลิทอร์)	
	แก๊สอาร์กอน		แก๊สออกซิเจน		P_{Ar}	P_{O_2}
	เปิด (วินาที)	ปิด (วินาที)	เปิด (วินาที)	ปิด (วินาที)		
เทคนิคแบบทั่วไป	ทำการการป้อนแก๊สต่อเนื่อง				3.46	5.06
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไพบูลิกรรมที่ความถี่เปิด-ปิด แก๊สอาร์กอน 57:3	57	3	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง		3.46	5.06
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไพบูลิกรรมที่ความถี่เปิด-ปิด แก๊สออกซิเจน 7:3	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง		7	3	3.46	5.06
เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไพบูลิกรรมที่ความถี่เปิด-ปิด แก๊สออกซิเจน 3:3	ทำการป้อนแก๊สต่อเนื่อง		3	3	3.46	5.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงในหัวข้อที่ 3.3 จะถูกนำมาศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโชมเมทรี

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1 ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโชมเมทรี จะทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร มุมตกกระทบ $50, 60, 70^\circ$ กับเส้นตั้งฉากผิวฟิล์ม ซึ่งการสร้างแบบจำลองเชิงแสงของฟิล์มได้ทำการกล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.1 โดยฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์กับความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบจะใช้ฟังก์ชันคอดี-ลอสเลนซ์

3.4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การหาลักษณะของฟิล์มและความหนาของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ทำการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องไว้ในหัวข้อ 3.2.3

3.4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เนื่องจากฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์มีลักษณะของฟิล์มที่ซับซ้อนและฟิล์มมีลักษณะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม (inhomogeneity) เกิดการแยกชั้นระหว่างฟิล์ม จึงต้องทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ในแต่ละชั้นโดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งหลักการของเครื่องที่ทำการใช้ ได้ทำการอธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2.4

3.4.4 การศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การหาโครงสร้างของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของหัววัดรังสีที่กวาดไปขณะวัด ซึ่งทำการกำหนดมุมของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ประมาณ 0.4 องศา โดยกำหนดช่วงในการเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ทงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญัตินี้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กวาดของหัววัดรังสีเอ็กซ์สำหรับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทำการวัดในช่วง 20 – 60 องศา ซึ่งหลักการของเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทำการอธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2.5

3.4.5 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งทำการหาสมบัติการส่องผ่านของฟิล์ม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของแสง (%R) ของฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจก โดยทำการวัดในช่วงความยาวคลื่นแสง 200-2000 นาโนเมตร ซึ่งในส่วนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ได้ทำการแปรรูปแบบการวัดเป็น 2 รูปแบบ คือ เมื่อแสงตกกระทบขนานกับเส้นปกติของชิ้นงาน (0 องศา) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง และการปรับมุมของชิ้นงานตั้งแต่ (0- 80 องศา) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทาง โดยผลของค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงได้ดังสมการ (3.16)

3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้ทำการกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2.7

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง สมบัติเชิงแสง รวมถึงความหนาของฟิล์มบางฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ และฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์โดยที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไป และเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิบัติการ โดยอาศัยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคิอิลิปโซเมทรี (SE) พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแม่นยำของผลที่วิเคราะห์ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์

4.1 วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

แทนทาลัมออกไซด์ ได้รับความศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น มีความเสถียรทางเคมี มีความเสถียรต่อความร้อน มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง มีแถบช่องว่างทางแสงกว้าง มีการส่องผ่านเชิงแสงที่สูงในช่วงความยาวคลื่น 300 นาโนเมตรถึง 2 ไมโครเมตร และมีดัชนีการหักเหของแสงสูง โดยฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีต่างๆ เช่น การเคลือบป้องกันแสงสะท้อน (anti-reflection coating) ตัวเก็บประจุ (capacitor) ท่อนำคลื่นแสง (optical waveguides) อิเล็กโตรโครมิก (electrochromic) และทรานซิสเตอร์ (transistors)

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์มีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง [1, 2, 69, 70] การระเหยด้วยลำแสงอิเล็กตรอน [71, 72] วิธีโซลเจล (sol-gel) [73, 74] และวิธีตกเคลือบแบบอะตอมมิกเลเยอร์ (atomic layer deposition; ALD) [75-77] เนื่องจากตามข้อกำหนดในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์โลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductor; MOS) และกระบวนการเคลือบด้วยแสง (optical coating process) เมื่อฟิล์มมีอัตราการเคลือบที่ต่ำและอุณหภูมิสะสมที่สูงฟิล์มที่ได้ จะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งควรใช้ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีคุณสมบัติการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง มีอัตราการสะสมสูง และฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากเหตุผลที่กล่าวมานี้ เราจึงสนใจวิธีการเคลือบด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเตรียมฟิล์มบางแบบการรวมกันของสารประกอบ (compound thin films) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเทคนิคนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือสามารถเคลือบฟิล์มในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากโหมดออกไซด์ชั้นแบ่งเป็นสามโหมดด้วยกันคือ โหมดโลหะ โหมดออกไซด์ และโหมดที่เกิดการเปลี่ยนจากโหมดโลหะเป็นโหมดออกไซด์ ซึ่งพบว่ากรณีที่เกิดโหมดออกไซด์จะส่งผลให้อัตราการเคลือบลดลงเนื่องจากเกิดการฟอรัมตัวของออกไซด์ที่บริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าเป้า ปราบปรามการนี้เรียกว่า การเป็นพิษของเป้า โดยจากปัญหาเหล่านี้เทคนิคควบคุมเวลาของ แก๊สแบบไวปฏิกิริยาเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งเทคนิคนี้จะทำการควบคุมการเปิด และปิดของแก๊สสปัตเตอร์ริง โดยจะพบว่าฟิล์มมีอัตราภาเคลือบที่สูงภายใต้กระบวนการเคลือบที่ อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงกระบวนการแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบทั่วไปได้สำเร็จ

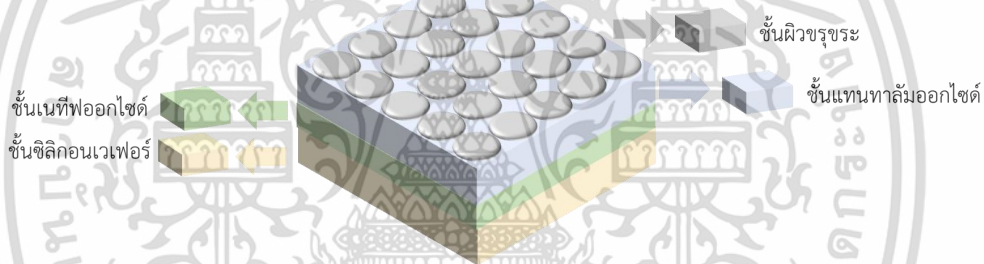
เทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทรู (iSE) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับใน การวัดคุณสมบัติเชิงแสงและความหนาของฟิล์มบางโลหะออกไซด์แบบเรียลไทม์ [44-46] โดย iSE เป็นกระบวนการวัดที่ใช้การสแกนที่ไม่ทำลายชิ้นงาน มีความรวดเร็วในการวัด และให้ข้อมูลเกี่ยวกับ กระบวนการเติบโตของฟิล์มได้ แม้ว่าการตรวจสอบการเติบโตของฟิล์มสำหรับ iSE จะถูกนำมาใช้กับ เทคนิคการเคลือบหลากหลาย เช่น การตกเคลือบด้วยไอเคมี [44, 45, 78, 79], อีพีแทกซีโดยใช้ ลำโม่เลกุล (molecular beam epitaxy; MBE) [80-82] และการเคลือบแบบอะตอมมิกเลเยอร์ [83-87] แต่มีรายงานการวิจัยที่ค่อนข้างน้อยที่ทำการศึกษาระบบการทับถมของฟิล์มในระหว่าง การสปัตเตอร์ [47, 88, 89] ซึ่งก่อนหน้านี้ ในงานวิจัยของ M. Horprathum และคณะ ใช้ Dynamic iSE เพื่อตรวจสอบกระบวนการเจริญเติบโตของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบทั่วไป [47] มีการ รายงานข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับการเติบโตของฟิล์มที่ระยะนิวเคลียสเริ่มต้น ซึ่งมีการนำ แบบจำลองของฟิล์มที่มีการเติบโตแบบกลุ่มก้อน (island film) มาทำการตรวจสอบได้ และเมื่อฟิล์ม มีการเติบโตขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฟสในโครงสร้างจุลภาคจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเติบโตของฟิล์มที่มี ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้จะทำการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีแบบเอ็กซ์ซิทรู (eSE) เพื่อทำ การสร้างโมเดลวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัม ออกไซด์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วย iSE เพื่อศึกษาระยะเริ่มต้นของการเติบโตของฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์ บนซิลิกอนเวเฟอร์โดยใช้รีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงควบคู่กับเทคนิคควบคุม แก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งตัวแปรหลักขึ้นอยู่กับความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สปฏิกิริยาหลัก และนำมา เปรียบเทียบกับฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ที่เตรียมโดยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบ ทั่วไป ผลลัพธ์ในการติดตั้ง iSE แบบไดนามิกได้รับการยืนยันผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด นอกจากนี้ เราสามารถตรวจสอบการเติบโตของกลุ่มก้อนของฟิล์มเพิ่มเติมโดยการวัดด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เปรียบเทียบผลกับการทดลอง iSE ก่อนหน้านี้ และอภิปราย ลักษณะของการเติบโตของกลุ่มก้อนฟิล์มที่ใช้เทคนิค RGT

4.1.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีแบบเอ็กซ์ซิทรูวิเคราะห์ฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ โดยนำ ตัวอย่างฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไป (CONV) และเทคนิค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคควบคุมแก๊สแบบวอล์กเกอร์ ที่กำหนดความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 วินาที (RGT Ar 17:3) และความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 17:3 (RGT O₂ 17:3) และ 3:3 (RGT O₂ 3:3) วินาที มาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงแสง ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-5.5 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้แบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการคอสี่เปรียบเทียบกับสมการทาวส์-ลอเรนซ์ในการนิยามสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ และกำหนดโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำการใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบหนึ่งชั้น (single layer model; SLM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ที่ประกอบไปด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์ (C-Si) ซึ่งเป็นแผ่นรองรับ ชั้นเนทีฟออกไซด์ (native oxide) ที่เป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศทั่วไปและมีความหนาประมาณ 2 นาโนเมตร ชั้นฟิล์มแทนทาลัมออกไซด์ และชั้นผิวขรุขระ (surface roughness: Srough) ซึ่งนิยามให้มีสัดส่วนระหว่างแทนทาลัมออกไซด์และช่องว่าง (void) ในอัตราส่วน 50:50 โดยสมบัติเชิงแสงของชั้น Srough จะพิจารณาจากการเฉลี่ยสมบัติเชิงแสงของวัสดุทั้งสองด้วย EMA ของ Bruggeman



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์แบบหนึ่งชั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณ โดยโปรแกรม WVASE 32 พบว่า แบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการคอสี่ให้ค่า MSE เท่ากับ 106.60, 66.72, 148.20 และ 232.70 สำหรับการพิจารณาตัวอย่าง CONV, RGT Ar 17:3, RGT O₂ 17:3 และ RGT O₂ 3:3 ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของผลการวัด และผลการคำนวณจากกราฟในรูปที่ 4.2 พบว่า แบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการคอสี่ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในช่วงพลังงานโฟตอนต่ำกว่า 4 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากในช่วงนี้ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์มีค่า $k=0$ ขณะที่ในช่วงพลังงานโฟตอนสูงกว่า 4 อิเล็กตรอนโวลต์ แบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการคอสี่จะให้ผลที่ต่างออกไปอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากในช่วงนี้ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์จะเริ่มมีการดูดกลืนแสง ซึ่งสมการคอสี่ไม่เหมาะกับการพิจารณาตัวอย่างในลักษณะนี้ได้ ในขณะที่แบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการทาวส์-ลอเรนซ์ให้ค่า MSE เท่ากับ 17.74, 24.89, 23.59 และ 30.78 สำหรับการพิจารณาตัวอย่าง CONV, RGT Ar 17:3, RGT O₂ 17:3 และ RGT O₂ 3:3 ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการพิจารณาโดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จากเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคอซีจะเห็นได้ว่าแบบจำลองจากสมการทาวส์-ลอเรนซ์มีค่า MSE ที่น้อยกว่ามากๆ เนื่องจากแบบจำลองจากสมการทาวส์-ลอเรนซ์เป็นการใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่กล่าวถึงการสั่นของกลุ่มอะตอมที่คล้ายกับการสั่นของสปริงเพื่อทำการอธิบายค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน ซึ่งสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุที่ใกล้กับช่องว่างพลังงาน ดังนั้นแบบจำลองทางแสงที่อาศัยสมการทาวส์-ลอเรนซ์จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาความหนาและค่าคงที่ทางแสงสำหรับฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ตลอดทั้งช่วงที่ฟิล์มบางโปร่งใสและมีการดูดกลืน

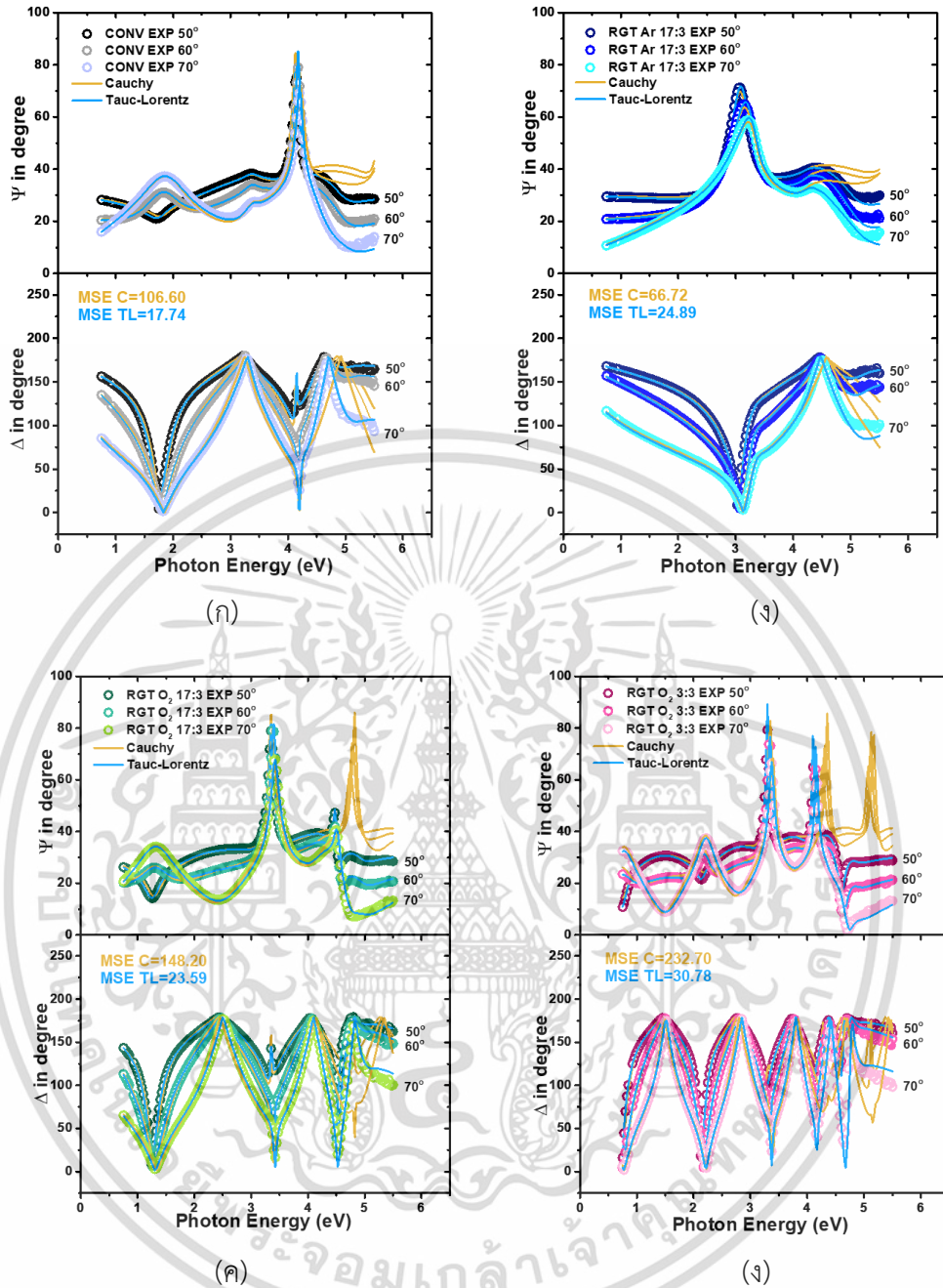
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการคอซี

Sample	Fitting parameter				MSE
	Cauchy oscillator		Physical layer		
	An	Bn	Thickness (nm)	Srough (nm)	
CONV	1.99 ± 0.01	0.05 ± 0.01	87.59 ± 0.45	0 ± 0.78	106.60
RGT Ar 17:3	1.90 ± 0.01	0.05 ± 0.01	47.64 ± 0.43	0 ± 0.86	66.72
RGT O ₂ 17:3	2.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	121.06 ± 0.68	5.41 ± 0.97	148.20
RGT O ₂ 3:3	2.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	213.76 ± 1.33	8.74 ± 1.58	232.70

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเอ็กซ์ทราแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการทาวส์-ลอเรนซ์

Sample	Fitting parameter						MSE
	TL oscillator				Physical layer		
	Amp (eV)	Br (eV)	E ₀ (eV)	E _g (eV)	Thickness (nm)	srough (%)	
CONV	302.82 ± 1.08	3.65 ± 0.03	5.38 ± 0.02	4.17 ± 0.01	88.85 ± 0.07	0 ± 0.12	17.74
RGT Ar 17:3	263.79 ± 1.68	3.57 ± 0.15	5.58 ± 0.15	4.16 ± 0.02	47.64 ± 0.14	0 ± 0.29	24.89
RGT O ₂ 17:3	416.88 ± 1.60	3.72 ± 0.03	4.85 ± 0.05	4.23 ± 0.02	124.80 ± 0.10	0.19 ± 0.21	23.59
RGT O ₂ 3:3	429.77 ± 2.37	3.36 ± 0.01	4.85 ± 0.01	4.24 ± 0.01	214.64 ± 0.21	0.03 ± 0.36	30.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



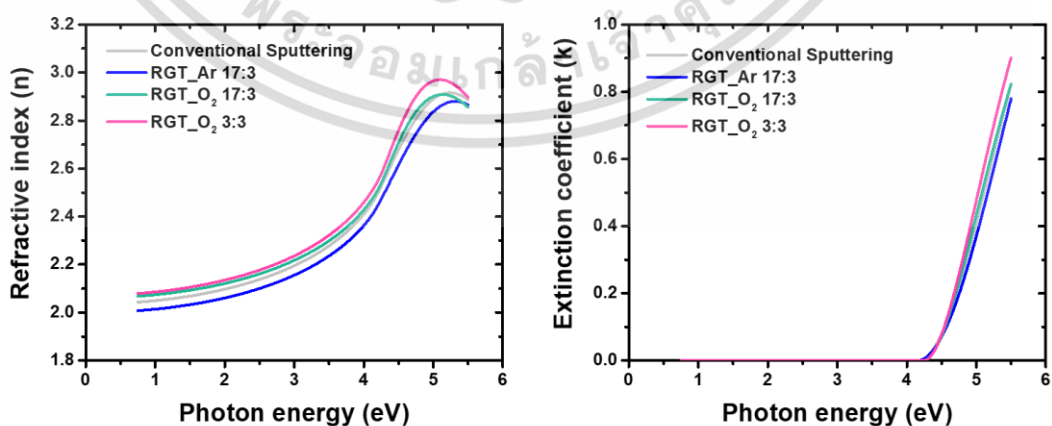
รูปที่ 4.2 ผลการวัด (Ψ , Δ) กับผลการคำนวณในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV ที่มุมตกกระทบ 50 60 และ 70 องศา โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองจากสมการคอสซีและแบบจำลองจากสมการทาวส์-ลอเรนซ์ ของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O₂ 17:3 (ง) RGT O₂ 3:3

เมื่อทำการวัดและใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์แล้ว พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์แบบทั่วไปและฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 แก๊สออกซิเจน 17:3 และ 3:3 ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 มีความหนาที่น้อยที่สุด และฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน มีความหนาที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการเปิด-ปิดมากขึ้น

4.1.2 วิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสลายและค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

จากการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์สำหรับการวิเคราะห์ความหนาและสมบัติเชิงแสงดังที่กล่าวมาแล้วนั้น สามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสลายได้ โดยเมื่อนำค่าดัชนีหักเหที่ใช้เทคนิคที่แตกต่างกันมาทำการเปรียบเทียบจะพบว่าค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาเมื่อความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มที่เกิดการเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมีความหนาแน่นในการรวมตัว (Packing density) ที่สูงกว่าและเกิดช่องว่างที่เป็นข้อบกพร่องที่เกิดในกระบวนการเคลือบฟิล์มน้อย เนื่องจากว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาเป็นเทคนิคที่ทำการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน ซึ่งเมื่อทำการเปิดแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ระบบจะทำให้เกิดความดันที่สูงขึ้น จากนั้นเมื่อทำการปิดแก๊สออกซิเจน ความดันในระบบจะต่ำลงในระยะสั้นๆ ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว สปัดเตอร์อะตอมที่หลุดออกมายังคงรักษาระยะทางเฉลี่ยที่ยาวในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊ส แต่ขณะนั้นจะเกิดการชนกันของโมเลกุลที่น้อยลง ดังนั้นจึงมีการรักษาพลังงานของอนุภาคที่ค่อนข้างสูงเพื่อไปถึงพื้นผิว และนอกจากนั้นที่บริเวณหน้าเป้าจะเกิดการทำความสะอาดด้วยอะตอมอาร์กอนบริสุทธิ์ด้วยการนำชั้นออกไซด์ที่อยู่บริเวณหน้าเป้าออกไป ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของเป้าสารเคลือบเปลี่ยนไป



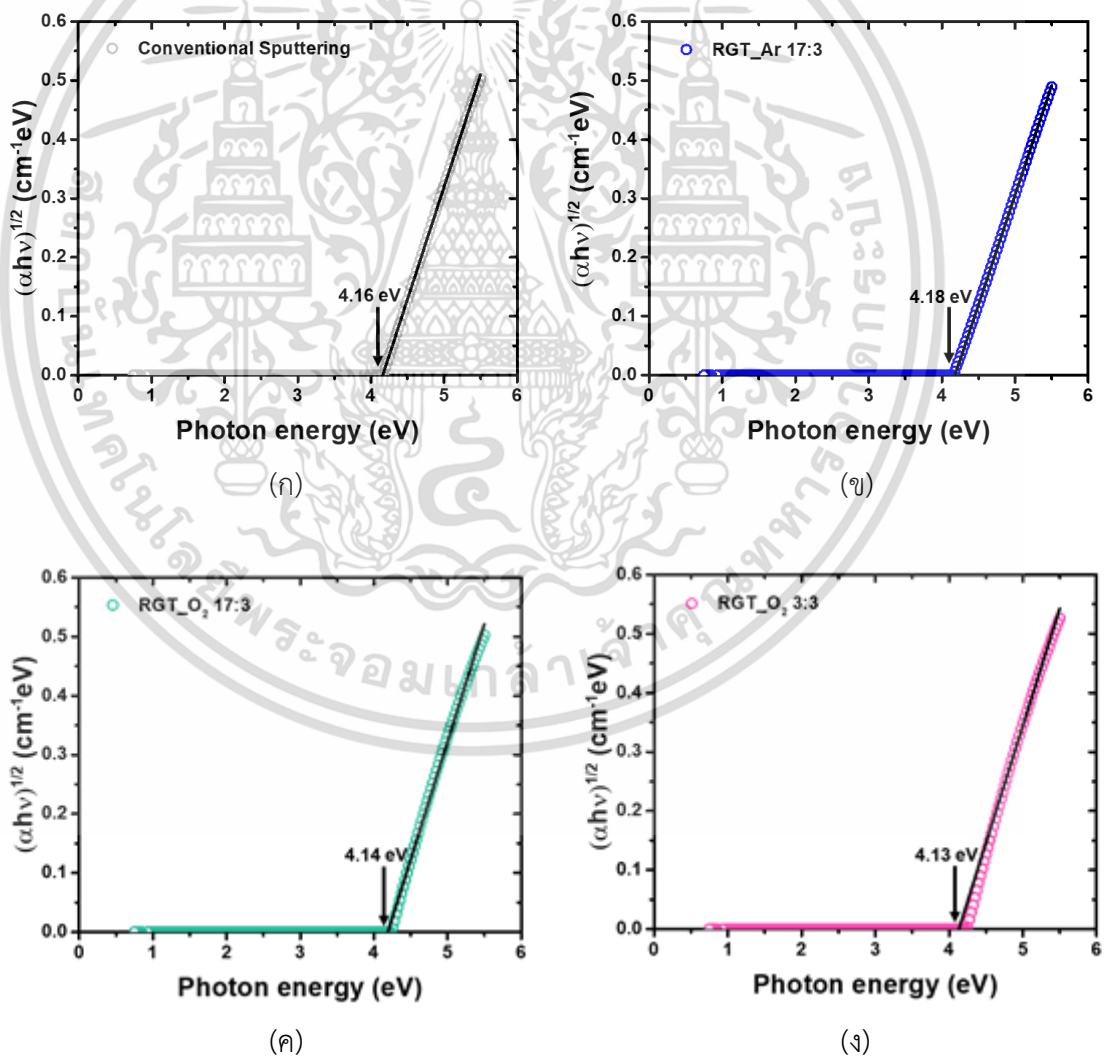
รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสลายของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วย

เทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ สามารถทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทริวโปแทนในสมการ (2.19) และคำนวณหาช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับ hv ดังแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยพบว่าฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันจะมีค่าประมาณ 4.13-4.18 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมีค่าที่ต่ำกว่าเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอนเนื่องจากมีพลังงานของอนุภาคในระหว่างการเคลือบฟิล์มที่ค่อนข้างสูงและช่วยลดการเกิดพิษที่บริเวณหน้าเป้าทำให้ช่วยลดความบกพร่องจึงทำให้มีค่าช่องว่างพลังงานที่สูงกว่า

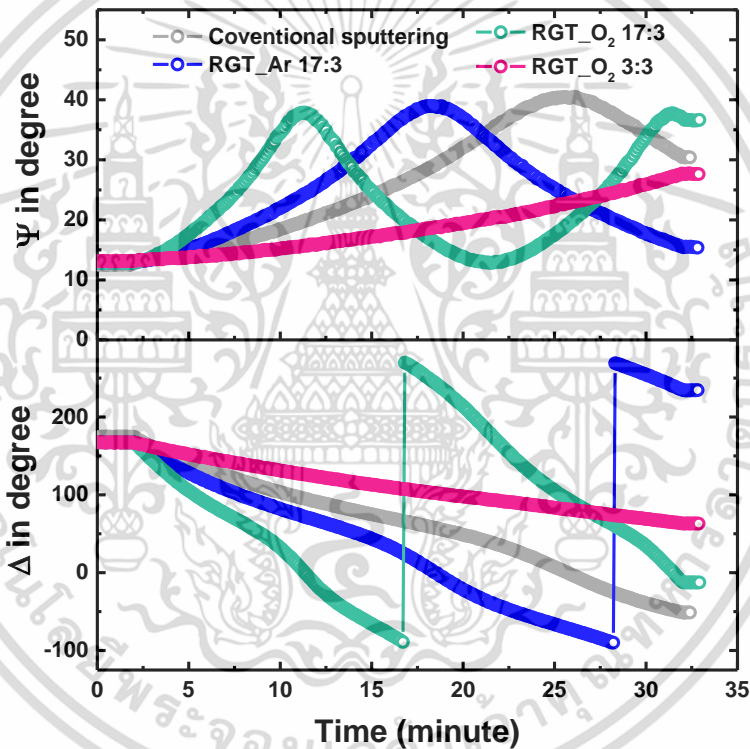


รูปที่ 4.4 ช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O₂ 17:3 (ง) RGT O₂ 3:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลิปโซเมทรีแบบอินซิทริววิเคราะห์ฟิล์มบาง แทนทาล์มออกไซด์

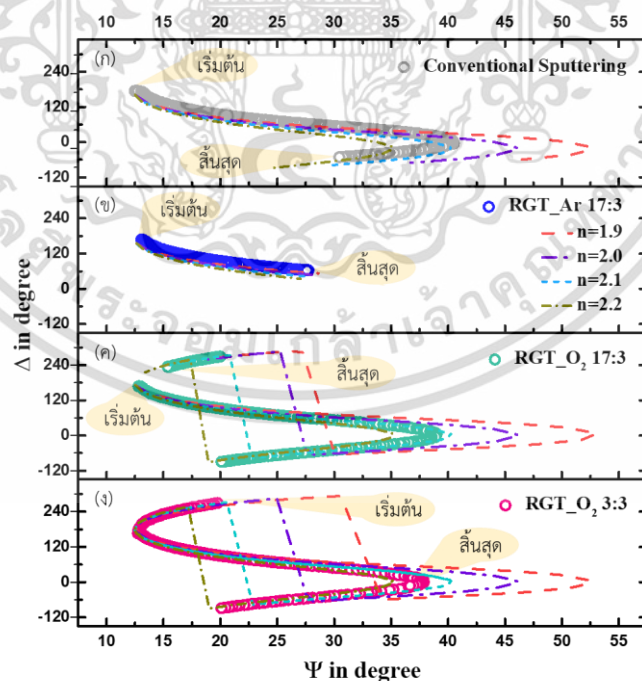
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) โดยทำการสังเกตการก่อตัวของฟิล์มบาง แทนทาล์มออกไซด์บนซิลิกอนเวเฟอร์ตลอดช่วงระยะเวลาการเคลือบฟิล์ม 30 นาที ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ด้วยเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรริงแบบทั่วไปและแบบเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 แก๊สออกซิเจน 17:3 และ 3:3 วินาที โดยแสดงผลการวัดดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าจากข้อมูล Ψ และ Δ มีความเปลี่ยนแปลงเมื่อเงื่อนไขการเคลือบที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงคาดว่าคุณสมบัติเชิงแสงและความหนาของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง [51, 90]



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า Ψ และ Δ ที่ทำการวัดด้วยเทคนิคคอลลิปโซเมทรีตลอดช่วงระยะเวลา 30 นาที ที่ฟิล์มทำการก่อตัวด้วยเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรริงแบบทั่วไปและแบบเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดสามารถทำการสังเกตแนวโน้มของค่าดัชนีหักเหได้เบื้องต้นจากการจำลองวิถีการโคจร (trajectories) ของค่าดัชนีหักเหแบบเรียลไทม์ (real-time) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้กับแบบจำลองของค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันที่ทำการสร้างขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยจะสังเกตเห็นว่าวิถีการเคลื่อนที่ที่ออกจากจุดเริ่มต้นจะเกิดความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางแสง จากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไปจะมีวิธีการโคจรใกล้เคียงกับเส้นโค้งของค่าดัชนีหักเหที่เท่ากับ 2.1 ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และในรูปที่ 4.6 (ข)-(ง) แสดงวิธีการโคจรของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง แทนทาล์มออกไซด์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 มีวิธีการโคจรที่สั้นที่สุดและสอดคล้องกับกับเส้นโค้งของค่าดัชนีหักเหที่เท่ากับ 1.9-2.0 ดังรูปที่ 4.6 (ข) และฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊ส ออกซิเจน 17:3 และ 3:3 มีวิถีโคจรที่มีลักษณะใกล้เคียงกันจึงสอดคล้องกับกับเส้นโค้งของค่าดัชนีหักเหที่เท่ากับ 2.2 เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.6 (ค)-(ง) ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนจะมีแนวโน้มของค่าดัชนีหักเหของแสงที่สูงกว่าเทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน เนื่องจากเป็นผลมาจากการเป็นพิษของเป้า ซึ่งเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ทำการเปิดแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของออกซิเจนจะเกิดการจ่ายเข้าไปในระบบอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นกระบวนการที่อยู่ในโหมดออกไซด์ แต่เมื่อทำการปิดแก๊สออกซิเจน ออกซิเจนในระบบจะถูกหยุดจ่ายและกระบวนการจะสามารถกลับเข้าสู่โหมดโลหะได้ ซึ่งในระหว่างนั้นแก๊สอาร์กอนจะช่วยทำการขจัดชั้นออกไซด์ออกไปจากบริเวณหน้าเป้า ในทางกลับกันเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ทำการเปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน จะมีค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ต่ำกว่าและมีวิถีเส้นโค้งที่สั้นกว่าฟิล์มทั้งหมดที่ทำการเตรียมมานั้นคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ที่รวดเร็วของอะตอมออกซิเจนบริเวณหน้าเป้าจึงเกิดการฟอร์มตัวบริเวณหน้าเป้า ซึ่งส่งผลให้อัตราการเคลือบและความหนาแน่นของฟิล์มต่ำ [91]



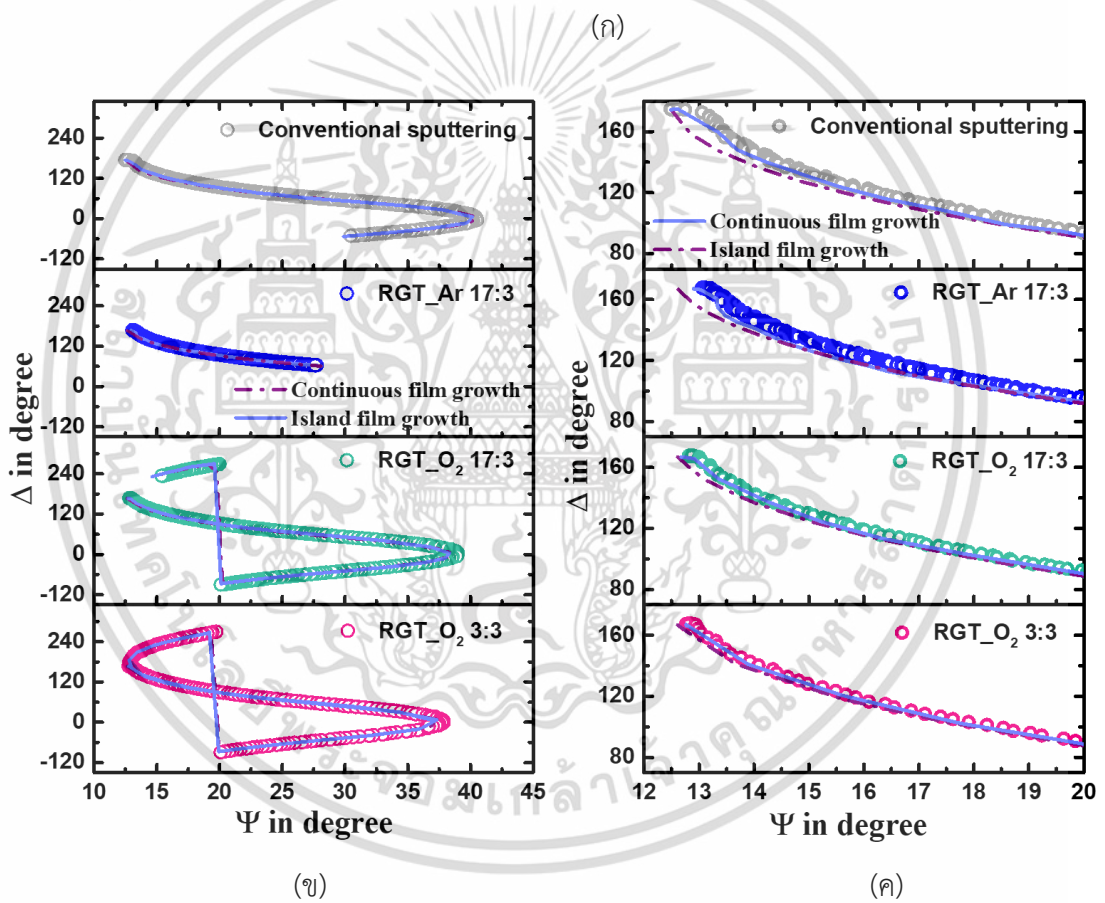
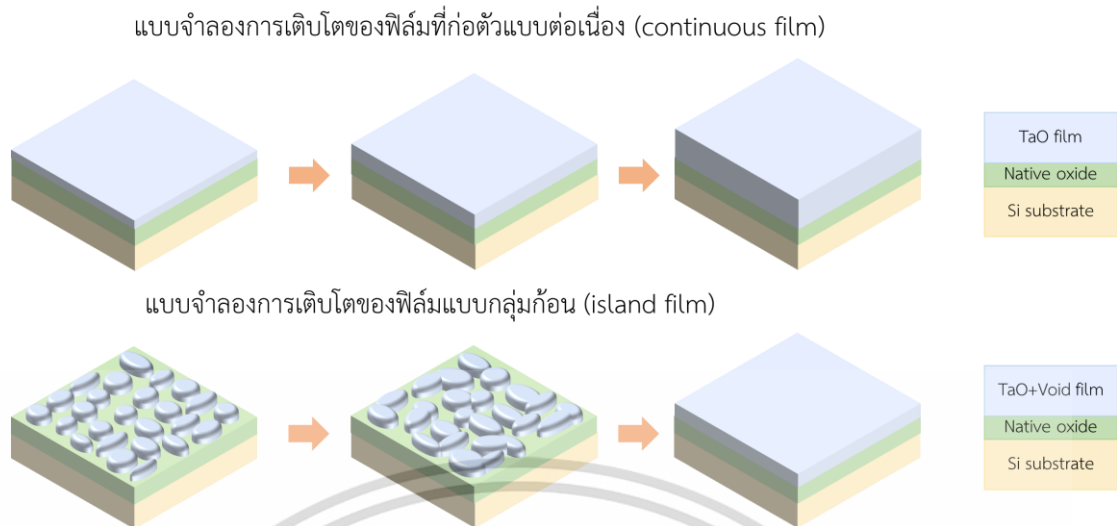
รูปที่ 4.6 วิถีโคจรเส้นโค้ง Ψ และ Δ ของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ถูกเตรียมโดย (ก) CONV (ข) RGT Ar 17:3 (ค) RGT O₂ 17:3 (ง) RGT O₂ 3:3 ตามลำดับ ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับข้อมูล

จำลองจากดัชนีการหักเหของแสงที่ค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกตค่าดัชนีหักเหของแสงเบื้องต้นแบบอย่างง่าย วิถีโคจรเส้นโค้งของข้อมูลที่ทำให้การวัดได้ยังไม่ค่อยตรงกับข้อมูลของแบบจำลองเบื้องต้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจากฟิล์มที่เป็น bulk ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจากฟิล์มที่เป็น bulk มีข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ทำให้การวัดได้โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลของ iSE ตามกลไกพฤติกรรมการเจริญเติบโตของฟิล์มที่เตรียมไว้ (ภาคผนวก ก) โดยทำการพิจารณาการใช้แบบจำลองทางแสงของสมการทาวส์-ลอเรนซ์ตามตารางที่ 4.3 และใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 แบบด้วยกัน ซึ่งพิจารณาจากการเติบโตของฟิล์มในช่วงเริ่มต้นสำหรับฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบไดนามิก โดยประกอบไปด้วยการเติบโตของฟิล์มที่ก่อตัวแบบต่อเนื่อง (continuous film) และการเติบโตของฟิล์มแบบกลุ่มก้อน (island film) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ซึ่งแบบจำลองที่แสดงการเติบโตของฟิล์มที่ก่อตัวแบบต่อเนื่องจะสอดคล้องกับการเติบโตที่สม่ำเสมอของฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีดัชนีหักเหที่คงที่ สำหรับแบบจำลองการเติบโตของฟิล์มแบบกลุ่มก้อน เป็นแบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นที่มีช่องว่าง ซึ่งมาจากการใส่ EMA ของ Bruggeman โดยมี %Void ผสมอยู่ที่เนื้อฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ ซึ่งแบบจำลองนี้เราทำการสมมติว่าฟิล์มอยู่ในช่วงการเติบโตในระยะแรกเริ่ม (initial growth) โดยเริ่มต้นก่อตัวเป็นนิวเคลียสที่บริเวณพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ และหลังจากนั้นฟิล์มจะเริ่มก่อตัวมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน และเกิดการรวมกันเป็นชั้นฟิล์มที่ก่อตัวแบบต่อเนื่องซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเมื่อฟิล์มมีการเติบโตได้จากช่องว่างที่ขึ้น EMA [47] ซึ่งเราจะทราบได้ว่าปริมาณของช่องว่างในแบบจำลองการเติบโตแบบกลุ่มก้อนนั้นจะแสดงค่าเฉลี่ยตลอดความหนาของฟิล์มและจำลองความไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่ก่อตัวเป็นนิวเคลียสและกระบวนการรวมตัวกันของฟิล์ม โดยจากรูปที่ 4.7 (ข) แสดงการเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณจากแบบจำลองที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร จะพบว่าจากข้อมูลที่ได้จากการวัดกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพทั้งสองมีผลลัพธ์ที่ดีโดยมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ทำการวัด นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าลักษณะการเติบโตของฟิล์มแบบกลุ่มก้อนจะมีค่าที่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้ในระยะเริ่มแรกอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการเติบโตของฟิล์มแบบกลุ่มก้อนนั้นใช้ได้ดีเป็นอย่างมากในช่วงการเติบโตในระยะเริ่มต้น นอกจากนี้แบบจำลองการเติบโตของฟิล์มที่ก่อตัวแบบต่อเนื่องสามารถใช้ได้ดีกับการเติบโตในระยะเริ่มต้นของฟิล์มบางแทนทาล์มออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบวาล์วปฏิบัติการที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน ซึ่งในกรณีนี้เราคิดว่าเป็นเหตุจากการที่มีอัตราการเติบโตของเทคนิคควบคุมแก๊สแบบวาล์วปฏิบัติการที่มีความถี่เวลาเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนนั้นเร็วมาก



รูปที่ 4.7 (ก) แบบจำลองทางกายภาพที่เป็นไปได้สำหรับการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์
 (ข) วิธีโคจรเส้นโค้ง Ψ และ Δ ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคสputteringแบบ
 ทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบวอล์กวิเรีย โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพที่เป็นไปได้
 และ (ค) ช่วงข้อมูลระยะเริ่มต้นของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

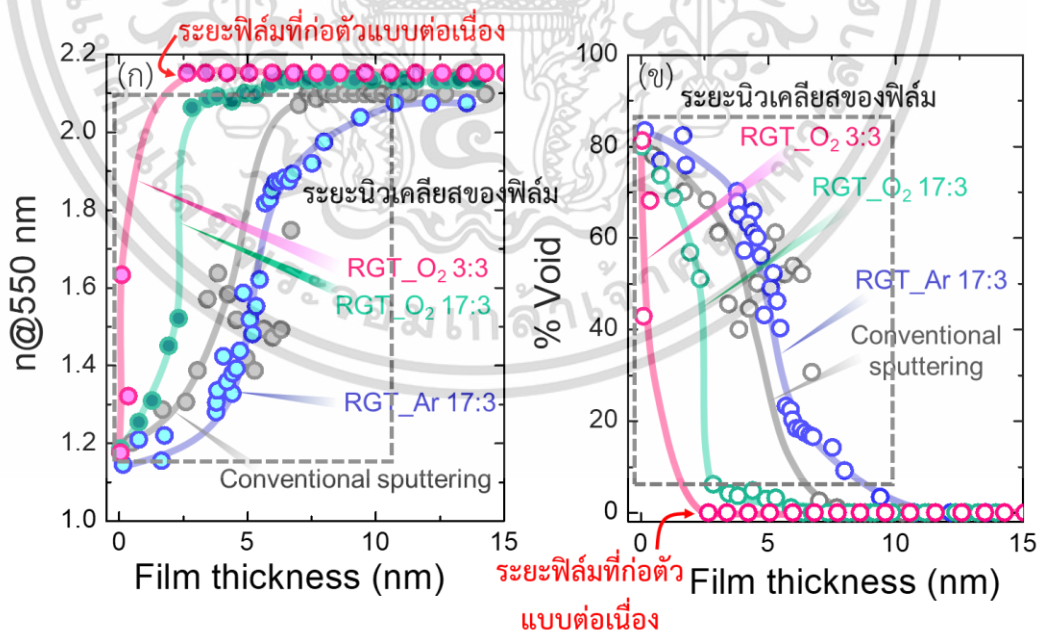
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลอินซิทูแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการทาวส์-ลอเรนซ์

Sample	Fitting parameter						MSE
	TL oscillator				Physical layer		
	Amp (eV)	Br (eV)	E_0 (eV)	E_g (eV)	Thickness (nm)	Void (%)	
CONV	602.84 ± 1.55	5.92 ±0.05	4.05 ±0.01	4.19 ±0.01	91.30 ±0.12	0 ±0.98	0.48
RGT Ar 17:3	595.26 ± 1.55	6.07 ±0.23	4.08 ±0.01	4.15 ±0.02	47.88 ±0.06	0 ±0.80	0.86
RGT O ₂ 17:3	641.34 ± 2.17	5.67 ±0.02	4.16 ±0.14	4.20 ±0.01	123.96 ±0.09	0 ±0.21	1.57
RGT O ₂ 3:3	654.37 ± 1.86	5.79 ±0.01	4.17 ±0.01	4.21 ±0.01	213.28 ±0.02	0 ±0.36	0.87

การวิเคราะห์เพิ่มเติมในช่วงระยะแรกเริ่มการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยการพล็อตข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และปริมาณช่องว่างต่อความหนาของฟิล์ม ซึ่งข้อมูลที่สังเกตได้จากผลของไดนามิกที่ทำการใช้แบบจำลองการเติบโตของฟิล์มแบบกลุ่มก้อน สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.8 โดยจากรูปจะแสดงให้เห็นถึงช่วงระยะการเติบโตของฟิล์มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงฟิล์มที่ก่อตัวแบบต่อเนื่องจากกราฟปริมาณช่องว่างต่อความหนาของฟิล์มนั้นจะมีค่าที่ลดลงเรื่อยๆจนเกิดการรวมกันของกลุ่มก้อนและเติมเต็มบริเวณรูพรุนของฟิล์มจนไม่มีช่องว่าง จากนั้นความหนาของชั้นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตลอดจนครบเวลาที่ทำการเคลือบ ผลที่ได้จากการวัดและแบบจำลองมีผลที่สอดคล้องกันอย่างดีของค่าดัชนีหักเหของแสงและปริมาณช่องว่าง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ทำการวิเคราะห์กับเงื่อนไขที่ทำการการเคลือบพบว่าฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่มีความถี่เวลาเปิด-ปิดแก๊สอาร์กอนจะมีรูพรุนที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากเกิดจากอัตราการเติบโตของฟิล์มที่ช้า โดยพฤติกรรมเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากในจังหวะที่ทำการเปิด-ปิดอาร์กอน ชั้นออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นได้ง่ายที่บริเวณเป้า ในทางตรงข้ามกัน ถ้าฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่มีความถี่เวลาเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนฟิล์มจะมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าดัชนีหักเหที่สูงในช่วงแรกเริ่มของฟิล์มอาจเกิดกระบวนการนิวเคลียส นอกจากนี้ ในการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่มีความถี่เวลาเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 17:3 วินาที และ 3:3 วินาที ค่าปริมาณช่องว่างลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่าระหว่าง 80-0% ในช่วงเวลาการเคลือบที่ 18 วินาที และ 84 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเวลาการเติบโตของฟิล์มในช่วงการรวมตัวของฟิล์มที่รวดเร็วและการก่อตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

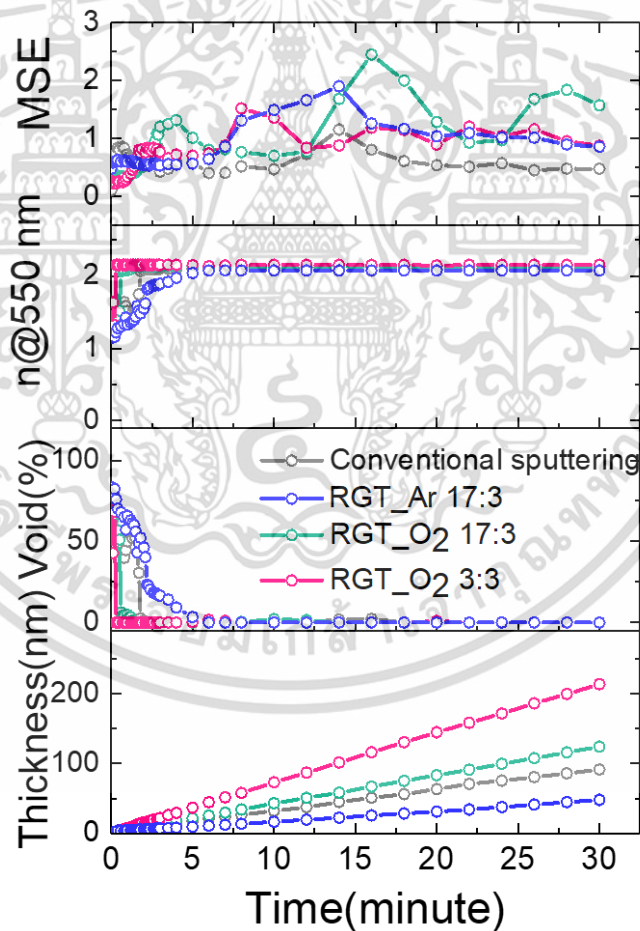
ของฟิล์มแบบต่อเนื่อง โดยอัตราการเคลือบที่สูงที่เกิดจากเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่มีความถี่เวลาเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน สามารถทำการอธิบายได้ว่าเป็นพื้นฐานกลไกที่เกิดจากความดันขณะที่ทำการเคลือบที่สูงและต่ำ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างมากของอัตราการเติบโตในระยะแรกเริ่มและช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการพิษของเป้าได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการสเปตเตอร์แบบทั่วไป ซึ่งโดยปกติแล้ว อัตราการเคลือบจะแปรผกผันกับแรงดันขณะที่ทำการเคลือบและสัมพันธ์กับระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สของอนุภาคสเปตเตอร์และความเป็นพิษของเป้าที่บริเวณพื้นผิว โดยเริ่มแรกเมื่อทำการเริ่มเคลือบฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ แก๊สอาร์กอนและออกซิเจนจะถูกจ่ายเข้าสู่ระบบเคลือบสุญญากาศทำให้เกิดความดันที่สูงขึ้น จากนั้นเมื่อทำการหยุดจ่ายแก๊สออกซิเจน ความดันในระบบจะต่ำลงในระยะสั้นๆ ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว สเปตเตอร์อะตอมที่หลุดออกมา ยังคงรักษาระยะทางเฉลี่ยที่ยาวในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊ส แต่ขณะนั้นจะเกิดการชนกันของโมเลกุลที่น้อยลง ดังนั้นจึงมีการรักษาพลังงานของอนุภาคที่ค่อนข้างสูงเพื่อไปถึงพื้นผิวและทำให้อัตราการเคลือบเพิ่มขึ้น [92] นอกจากนี้ที่บริเวณหน้าเป้าจะเกิดการทำความสะอาดด้วยอะตอมอาร์กอนบริสุทธิ์ด้วยการนำชั้นออกไซด์ที่อยู่บริเวณหน้าเป้าออกไปและสามารถกลับคืนสู่กระบวนการของโหมดโลหะได้ ต่อมาค่าอีลด์สเปตเตอร์ของผิวออกไซด์จะต่ำมากกว่าโลหะและอัตราการเคลือบของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 17:3 วินาที จะต่ำกว่าที่ 3:3 วินาที อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จะต้องทำการยืนยันเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิจารณาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มไดอิเล็กทริกที่บางมากๆผ่านไดนามิกพิท [47]



รูปที่ 4.8 (ก) ค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (ข) สัดส่วนปริมาตรของช่องว่างกับความหนาของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ระยะแรกเริ่มของการเติบโตซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยอินซิทรูโดยทำการร่างเส้นขึ้นเพื่อทำให้มองเห็นเทรนได้ชัดเจนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลรวมทั้งหมดของไดนามิกจากแบบจำลองของการเติบโตแบบกลุ่มก้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมไว้ทั้งหมดมีการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับเวลาในการเคลือบที่มีผลของแบบจำลองที่ดีโดยมีค่า MSE ที่น้อยกว่า 3 โดยจะเห็นได้ว่าค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มที่เตรียมไว้ทั้งหมดคือ 2.07-2.15 (ดัชนีหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (ภาคผนวก ก) ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องกับงานวิจัยของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ [93] โดยในผลการวิจัยจะพบว่าเวลาเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 3:3 วินาที มีอัตราการเคลือบสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.12 นาโนเมตร/วินาที ซึ่งมีค่าสูงกว่าประมาณ 2.4 และ 6 เท่าของเทคนิครีแอคทีฟสเปตเตอร์แบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน ตามลำดับ โดยผลลัพธ์จากความหนาที่เวลาสุดท้ายของการเคลือบฟิล์มทำการยืนยันผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่ใช้สำหรับอินซิทริวสำหรับแบบไดนามิกนั้นมีผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

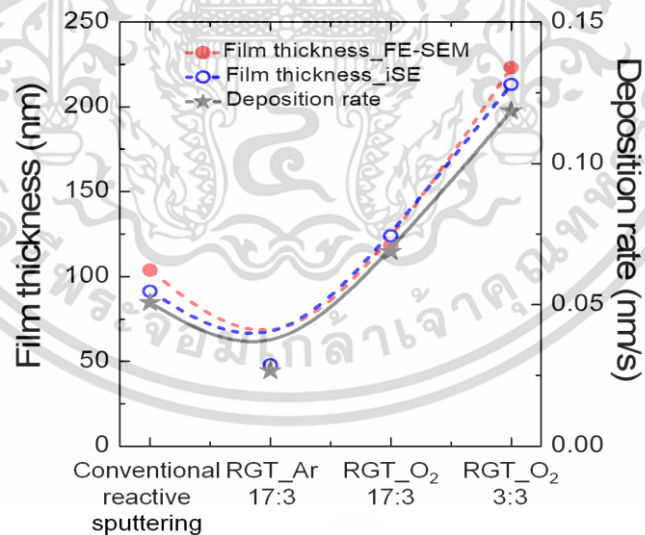
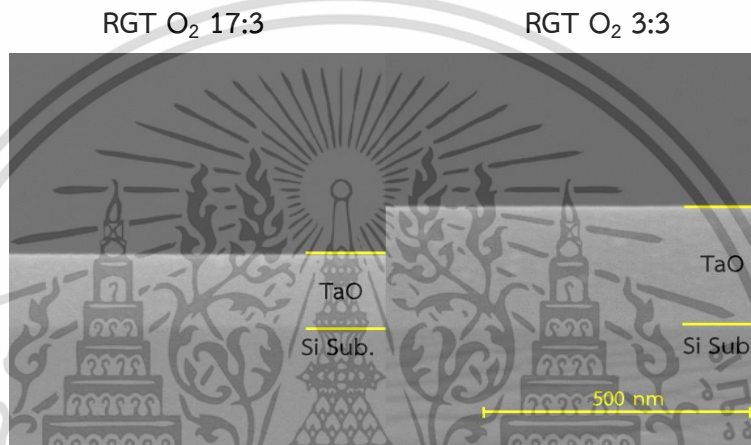
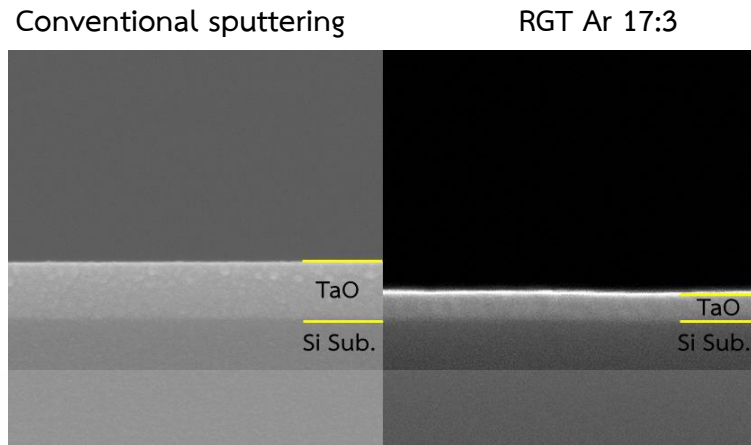


รูปที่ 4.9 ผลไดนามิกของความหนาฟิล์ม สัดส่วนปริมาณช่องว่าง ค่าดัชนีหักเหของแสง และค่า MSE ของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยใช้เทคนิครีแอคทีฟสเปตเตอร์แบบทั่วไปและ

เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ทำการวิเคราะห์โดยอินซิทริว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



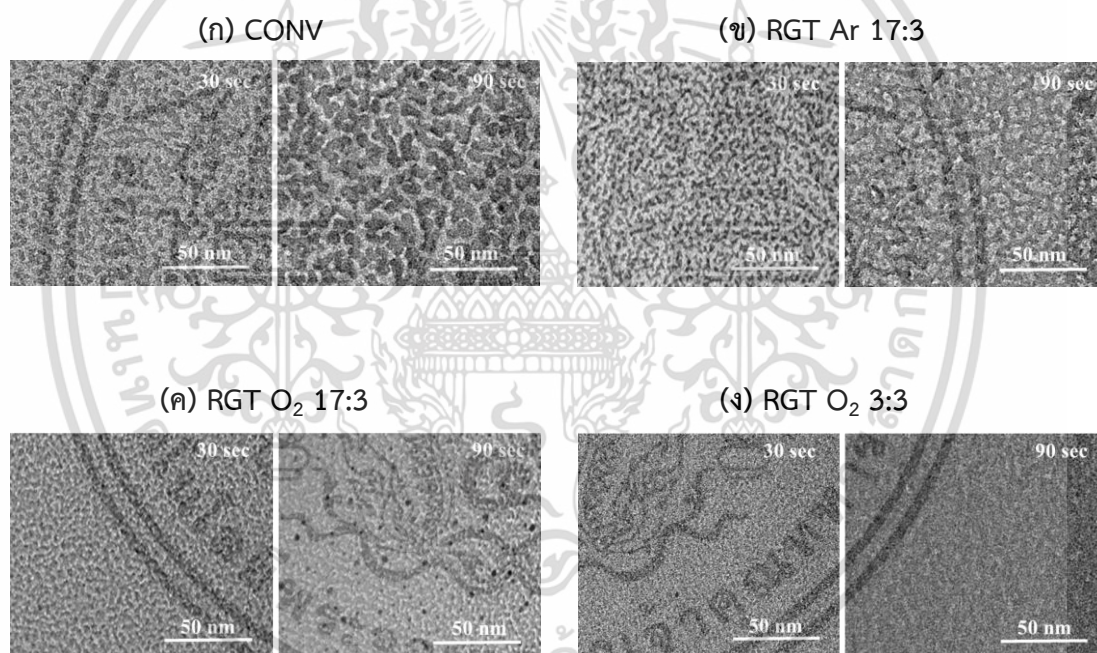
(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมไว้ทั้งหมด (ข) ความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบของการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเทคนิคแบบเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรอโรและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวพริกิริยาที่ทำกรวิเคราะห์โดยอินซิทูและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

รูปที่ 4.11 (ก)-(ง) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบบนคอปเปอร์กริด (copper grid) ที่เวลา 30 และ 90 วินาที ด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปัตเตอร์แบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบและยืนยันผลในช่วงการเติบโตแบบแรกเริ่ม โดยในช่วงการเติบโตแบบกลุ่มก้อนของฟิล์มจะเห็นได้ชัดเจนมากที่เวลาการเคลือบ 30 และ 90 วินาที ของฟิล์มที่เคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิบัติการที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน และจะเห็นช่วงการเติบโตแบบต่อเนื่องได้ชัดเจนที่ตั้งแต่เวลาการเคลือบ 30 วินาที ของฟิล์มที่เคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิบัติการที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน ซึ่งผลที่ได้มีค่อนข้างตรงเป็นอย่างมากกับแบบจำลองในช่วงการเติบโตแบบแรกเริ่มดังแสดงในรูปที่ 4.9

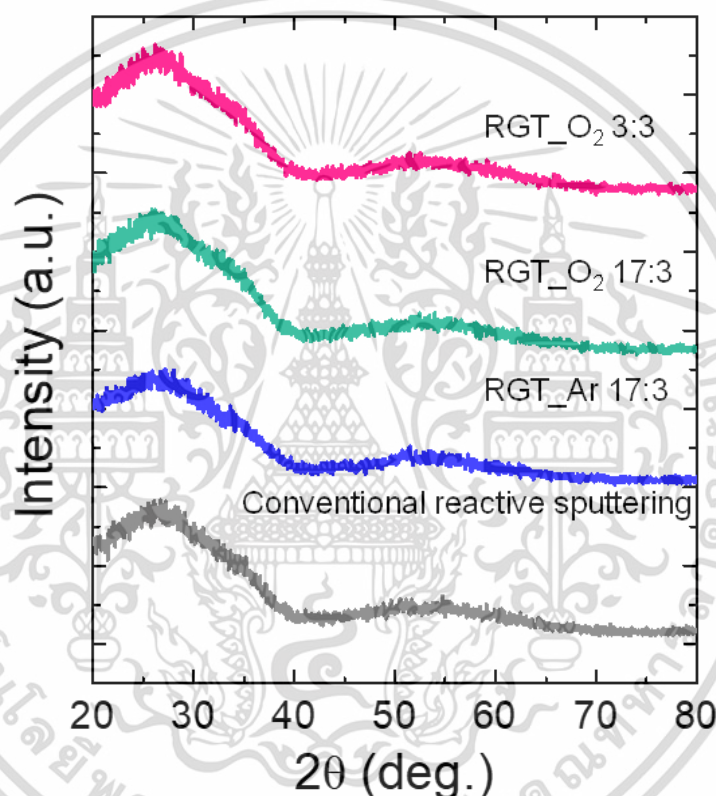


รูปที่ 4.11 (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปัตเตอร์แบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิบัติการที่เวลา 30 และ 90 วินาที

4.1.5 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถวิเคราะห์เทคนิคอินซิทรูได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสำหรับลักษณะเฉพาะของฟิล์มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางแทนทาลัมออกไซด์ ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบความเป็นผลึกและองค์ประกอบได้ โดยจากรูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งสามารถระบุได้ว่าฟิล์มที่เคลือบมานั้นมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous structure) โดยจากผลที่วัดได้ของ GIXRD มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลที่ทำการวัดก่อนหน้านี้ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทราและอินซิทรูสเปกโตรสโคปีคอลลีซิโชมเทรี ซึ่งฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเตรียมไว้ทั้งหมดมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่ต่ำกว่าผลึกของแทนทาลัมออกไซด์ที่เป็น bulk [1] นอกจากนี้ค่าดัชนีหักเหของแสงยังสัมพันธ์กับปริมาณความสมบูรณ์ทางเคมีของฟิล์มอีกด้วย [94]



รูปที่ 4.12 รูปแบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา

4.1.5 การใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

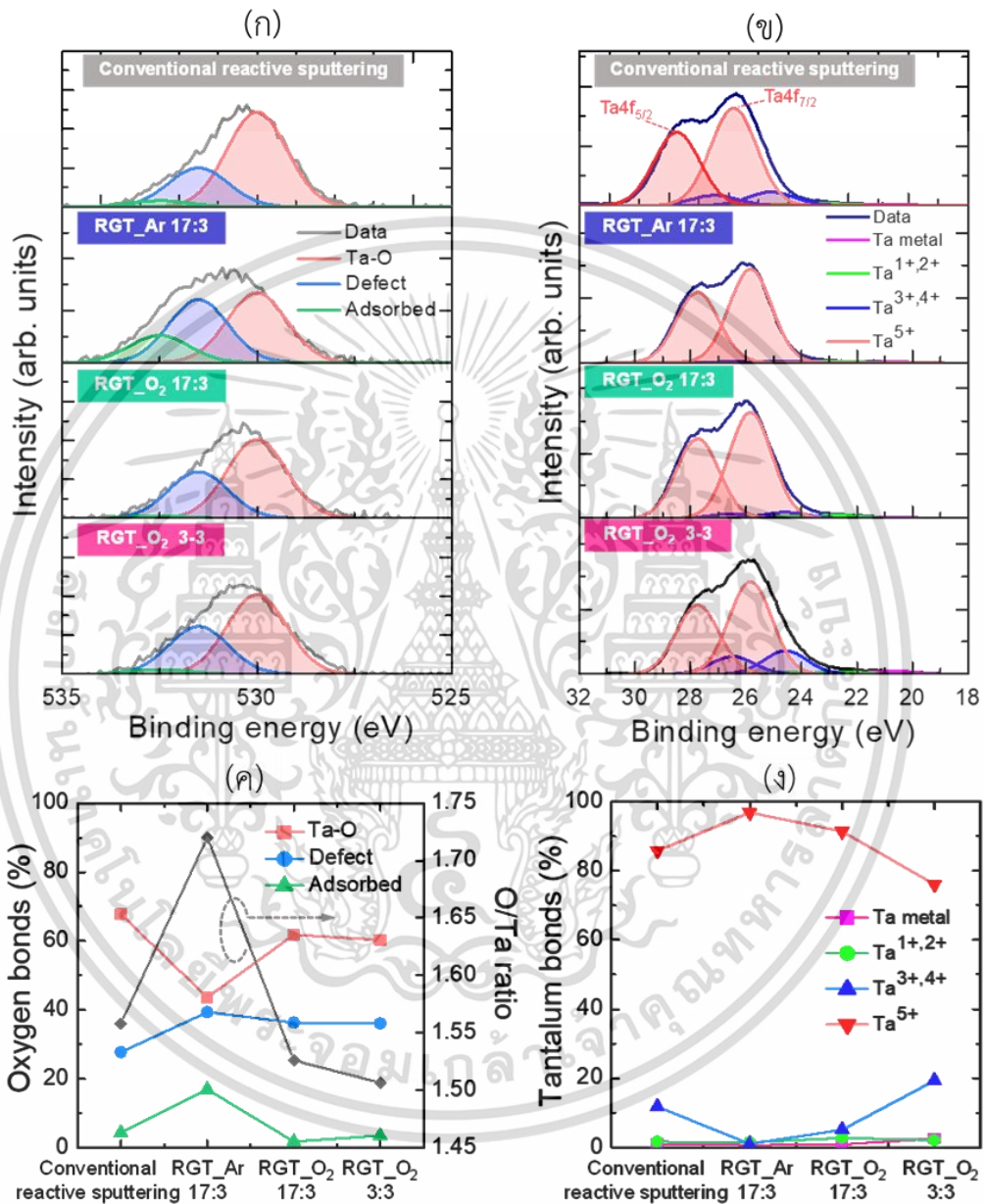
การวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบอัตราส่วนองค์ประกอบและสถานะทางเคมีของพื้นผิวฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ซึ่งพีคของ O1s และ Ta4f ถูกวัดที่พลังงานโฟตอน 600 eV และทำการวิเคราะห์จากการปรับพีคแบบเกาส์เซียน (Gaussian peak) โดยกระบวนการแก้ไขภาพพื้นหลังในระบบ (background subtraction) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของพีค ณ ความสูงครึ่งหนึ่ง (full-width at half-maximum) ได้ทำการเทียบกับทองที่สเปกตรัม 4f และจำกัดที่ 1.8 eV เพื่อแยกแยะสถานะทางเคมีของแทนทาลัมและออกซิเจน โดยพลังงานยึดเหนี่ยวของสเปกตรัมถูกปรับเทียบในจุดสูงสุดของ C1 ที่ 284.6 eV ซึ่งโพรบ (probes) ถูกกดลงไปที่ 1-2 นาโนเมตร บนพื้นผิว ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือนี้จึงจำกัดลักษณะเฉพาะของที่พื้นผิวฟิล์มเท่านั้น โดยที่ O1s ทั่วไปแล้วสามารถแยกออกได้เป็นสามสถานะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก) [95] พีคแรกอยู่ที่ 530 eV แทนสถานะพันธะคู่จากเฟสโลหะออกไซด์ของ Ta-O พีคที่สองจะอยู่ที่ 531.5 eV พันธะเดี่ยวอันเนื่องมาจากการขาดออกซิเจนหรือข้อบกพร่อง (defects) และพีคที่สามจะอยู่ที่ 532.5 eV คือออกซิเจนที่มีการดูดซับเล็กน้อยหรือ H₂O และที่ Ta4f จะประกอบด้วยสี่องค์ประกอบด้วยกันคือพีคคู่ที่เกิดจากสถานะออกซิเดชันที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.13(ข) พีคคู่ของ Ta4f มีการแยกพลังงาน 1.9 eV ระหว่างจุดสูงสุด 7/2 และ 5/2 เนื่องจากการแยกของอันตรกิริยาระหว่างสปินของอนุภาค (the spin-orbit splitting) โดยพีคหลักที่สังเกตได้จะอยู่ที่ 25.8 eV ซึ่งสอดคล้องกับ Ta4f_{7/2} ของ Ta⁵⁺ ของ Ta₂O₅ และ Ta4f_{5/2} ที่ 23.9 eV ด้วยอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ 3/4 ของ 7/2 เนื่องมาจากค่าคงที่ FWHM ในพีคที่วิเคราะห์ [96, 97] นอกจากนี้เรายังพบส่วนประกอบอย่างอื่นของพีค เช่น โลหะ Ta Ta^{1+/2+} Ta^{3+/4+} พีคคู่ Ta⁵⁺ ในด้านที่พลังงานต่ำ นอกจากนี้ยังพบอัตราส่วนของ O/Ta อยู่ในช่วงระหว่าง 1.50 ถึง 1.75 ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ค) โดยอัตราส่วนของ O/Ta มีอัตราส่วนที่สูงขึ้นเมื่อฟิล์มเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอนและจะมีค่าที่ลดลงเมื่อใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน เหตุผลเกิดจากปริมาณออกซิเจนในฟิล์มขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลของออกซิเจน อย่างไรก็ตาม เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนมากกว่าเทคนิครีแอคทีฟสเปคโตรสโกปีแบบทั่วไป ที่มีการไหลออกซิเจนอย่างต่อเนื่องเหมือนกัน อาจเป็นเพราะเป็นการเพิ่มพลังงานของอะตอมที่สเปคโตรสโกปีในระหว่างกระบวนการเปิด-ปิดแก๊ส ซึ่งเป็นการสร้างช่องว่างในช่วงการเติบโตแรกเริ่มและข้อบกพร่องจากออกซิเจนในฟิล์ม โดยสมมติฐานนี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางเคมีที่ว่า O1s จะเกิดข้อบกพร่องที่สูงที่เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน จะแสดงให้เห็นถึงข้อบกพร่องสูงสุดและมีการดูดซับออกซิเจนเล็กน้อยในฟิล์ม ซึ่งในการวิเคราะห์ทางเคมีของ Ta4f บ่งชี้ว่าอะตอมของ Ta ควรจะมีรูปแบบ Ta₂O₅ มากกว่าออกไซด์อื่นๆ ที่มีสถานะออกซิเดชันต่ำ เช่น Ta₂O (Ta¹⁺), TaO (Ta²⁺), Ta₂O₃ (Ta³⁺) และ TaO₂ (Ta⁴⁺) ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ง) โดยอัตราส่วน Ta⁵⁺ จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน และเทคนิคอื่นๆจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราส่วน Ta^{3+/4+} เพิ่มขึ้น โดยโลหะ Ta และ Ta^{1+/2+} นั้นมีค่าที่น้อยมาก เนื่องจากมีอัตราส่วนที่น้อยกว่า 3% นอกจากนั้นแนวโน้มของอัตราส่วน Ta⁵⁺ นั้นคล้ายคลึงกับอัตราส่วนของ O/Ta ซึ่งต้นกำเนิดของอัตราส่วนนี้มาจากปริมาณการไหลของออกซิเจนในระหว่างการเคลือบเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม

ตาม อัตราส่วน Ta⁵⁺ ในเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 17:3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที นั้นสูงกว่าเทคนิครีแอคทีฟสเปตเตอร์แบบทั่วไปอาจเป็นเพราะอัตราส่วนออกซิเจนที่ต่ำมีการดูดซับออกซิเจนที่น้อยในฟิล์มที่เคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน ซึ่งสามารถช่วยลดการเป็นพิษของเป้าที่เป็นผลกระทบจากการสเปตเตอร์ได้

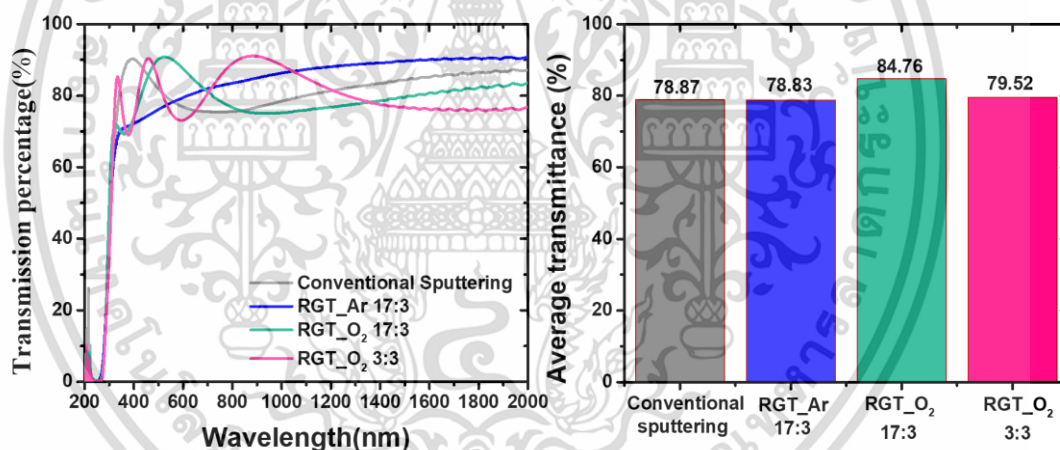


รูปที่ 4.13 สเปกตรัมที่ความละเอียดสูงของสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบ (ก) O 1s (ข) Ta 4f ของฟิล์มบาง และ (ค)-(ง) เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์โดยเทคนิครีแอคทีฟสเปตเตอร์แบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อทำการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง ดังภาพที่ 4.14 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ใช้เทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมากขึ้นอัตราการเคลือบมีค่าที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดรู้ว่าการแทรกสอดของคลื่นแสงมากขึ้น เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสของแสงและความหนาของชั้นฟิล์ม นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยพบว่าฟิล์ม CONV RGT Ar 17:3 RGT O₂ 17:3 และ RGT O₂ 3:3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 78.87 78.83 84.76 และ 79.52 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะพบว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยามีการส่งผ่านทางแสงที่ดีกว่าเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและยังพบว่ายังมีผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์อีกด้วย



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการส่งผ่านของแสงและค่าการส่งผ่านของแสงเฉลี่ยในฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ใช้เทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา

4.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ในช่วงที่ผ่านมาฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ถือว่าได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีความเสถียรทางกายภาพและทางเคมี มีคุณสมบัติความชอบน้ำที่เกิดจากการถ่ายโอนทางแสง ไม่เป็นพิษ และมีคุณสมบัติเชิงแสงที่ดี [25, 58, 98] คุณสมบัติดังกล่าวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพและผลึกศาสตร์ ด้วยเหตุนี้ ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผลึกจึงได้รับการวิจัยอย่างกว้างขวางและมีการปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมสำหรับวัสดุนาโนเพื่อนำไปใช้ในงานในอุตสาหกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ถูกใช้เป็นเซ็นเซอร์เชิงแสง อุปกรณ์โฟโตนิก และการเคลือบเพื่อทำเป็นอุปกรณ์ทางแสง เนื่องจากมีค่าดัชนีการหักเหสูงและมีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (3.02 eV: rutile, 3.2 eV: anatase) [99, 100] มีการส่งผ่านสูงในบริเวณย่านแสงที่ตามองเห็นรวมถึงย่านใกล้อินฟราเรด และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง [25, 58, 98, 99]

กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผลึกสามารถเคลือบได้หลากหลายวิธี เช่น การระเหยของลำแสงอิเล็กตรอน [101, 102] เทคนิคโซลเจล [103, 104] การตกเคลือบด้วยไอเคมี [105, 106] การพัลซของเลเซอร์พัลซิ่ง (pulsed laser deposition; PLD) [107, 108] และการสปัตเตอริง [98, 109, 110] ซึ่งในบรรดาเทคนิคเหล่านี้ เทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงถือได้ว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการผลิตฟิล์มด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความสามารถในการทำซ้ำได้สูง มีการยึดเกาะของฟิล์มที่ดี สามารถเคลือบฟิล์มในพื้นที่ขนาดใหญ่ๆ ให้มีความสม่ำเสมอได้ และยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างด้านจุลภาคของฟิล์ม เฟสของผลึก และองค์ประกอบทางเคมีสามารถควบคุมและปรับให้เหมาะสมได้โดยการปรับเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม เช่น อุณหภูมิของพื้นผิว ความดันขณะเคลือบ กำลังไฟฟ้าในการเคลือบด้วยสปัตเตอริง และบรรยากาศของแก๊สภายในระบบ นอกจากนี้ แก๊สรีแอคทีฟออกซิเจนที่ถูกจ่ายเข้าไปในระบบสปัตเตอริงก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่สามารถควบคุมอัตราการเคลือบของฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อเฟสของผลึก ระดับความไม่แน่นอนเนื้อเดียวกันของฟิล์ม และปริมาณความสมบูรณ์ทางเคมีของฟิล์มบางออกไซด์ [40, 57, 58] โดยทั่วไปเทคนิครีแอคทีฟสปัตเตอริงมักประกอบไปด้วยสามโหมดด้วยกัน คือ โหมดโลหะ โหมดออกไซด์ และโหมดที่เกิดการเปลี่ยนจากโหมดโลหะเป็นโหมดออกไซด์หรือโหมดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับการปกคลุมของออกไซด์บนเป้าสปัตเตอริง เมื่อฟิล์มถูกสปัตเตอริงโดยโหมดโลหะหรือโหมดการเปลี่ยนแปลง อัตราการสปัตเตอริงมักจะสูงกว่าโหมดออกไซด์ และฟิล์มที่ได้จะประกอบไปด้วยโลหะ หรือจะเกิดความไม่สมบูรณ์ทางเคมี เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่ำภายในห้องเคลือบสปัตเตอริง ซึ่งฟิล์มที่มีความสมบูรณ์ทางเคมี และมีอัตราการเคลือบสูงนั้นสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการไหลของออกซิเจนให้เหมาะสมที่โหมดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม “ผลของปฏิกิริยาการวนรอบฮิสเทอรีซิส” ที่ไม่เสถียรนั้นพบว่าเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่ง [30, 56, 57] ในกรณีของการ

เคลือบฟิล์มที่มีแก๊สออกซิเจนสูงในโหมดยกออกไซด์จะได้ฟิล์มที่มีความสมบูรณ์ทางเคมี แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการสะสมโดยทั่วไปจะต่ำมากเนื่องจากความเป็นพิษของเป้า [56, 57]

จากที่กล่าวมาแทนที่จะทำการจ่ายแก๊สแบบคงที่ เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาได้รับการเสนอให้เป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเคลือบฟิล์มโลหะออกไซด์ ไนไตรด์ และฟิล์มบางออกไซด์ ไนไตรด์ [32, 111-113] ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพพัลส์ของแหล่งจ่ายแก๊ส เช่น ควบคุมการเปิด-ปิดแก๊สในระหว่างการเคลือบ ทำให้สามารถควบคุมพลังงานต่ออะตอมและปฏิกิริยาของแก๊สที่เกิดปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้ฟิล์มบางมีความเป็นผลึกสูงและสามารถควบคุมองค์ประกอบได้อย่างแม่นยำที่กระบวนการที่อุณหภูมิต่ำ [37, 91, 111] นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาได้โดยการใช้โหมดยกออกไซด์เพื่อยับยั้งผลกระทบที่เกิดจากการเป็นพิษของเป้าสเปคโตรริง [35, 111] ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะมีความสมบูรณ์ทางเคมีที่มีอัตราการเคลือบที่สูงและสภาวะการเคลือบที่เสถียร โดยยังมีรายละเอียดและกลไกอีกมากมายของเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ยังไม่เป็นที่เข้าใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแก๊สในระหว่างเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลาต่างกันของฟิล์มที่มีความไม่แน่นอนเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนี้วารสารที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยานั้นมีจำกัด โดยมีรายงานบางส่วนจาก N. Martin และคณะ [112, 114] โดยพวกเขาพบว่ากระบวนการปรับเปลี่ยนระหว่างโหมดยกออกไซด์และโหมดยกออกไซด์ประกอบอาจทำให้เกิดการเพิ่มของอัตราการเคลือบและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี นอกจากนี้พวกเขายังทำการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของผลึกของฟิล์มเนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สปฏิกิริยาแบบพัลส์อีกด้วย โดยนอกจากที่กล่าวมายังมีผลงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจัดทำโดย R. Chodun และคณะ [115-117] ถึงแม้ว่าผู้วิจัยไม่ได้ใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามพวกเขาใช้เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบฉีดแก๊ส (GIMS) แทนเพื่อควบคุมการสั่นของแรงดันสำหรับการสร้างพลาสมาโดยการควบคุมพัลส์ของวาล์วแก๊สเป็นเวลาสองสามมิลลิวินาที โดยวัตถุประสงค์ของเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบฉีดแก๊สนั้นคล้ายคลึงกับเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาเนื่องจากการเพิ่มอนุภาคแก๊สพลังงานสูงโดยการลดการกระจายของพลังงานจลน์ของพลาสมาผ่านการกระจายแก๊สแบบพัลส์ไปยังแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบของเฟส และระดับของผลึกของฟิล์มสามารถปรับให้เหมาะสมโดยพัลส์แก๊ส [117]

โดยทั่วไปแล้วฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทั่วไป ฟิล์มที่ได้มักมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [40, 47, 118, 119] โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงแสงโดยวิธีสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งมีการเปิดเผยว่าระดับของผลึกและความไม่แน่นอนเนื้อเดียวกันของฟิล์มนั้นขึ้นอยู่กับความดันที่เราทำการใช้

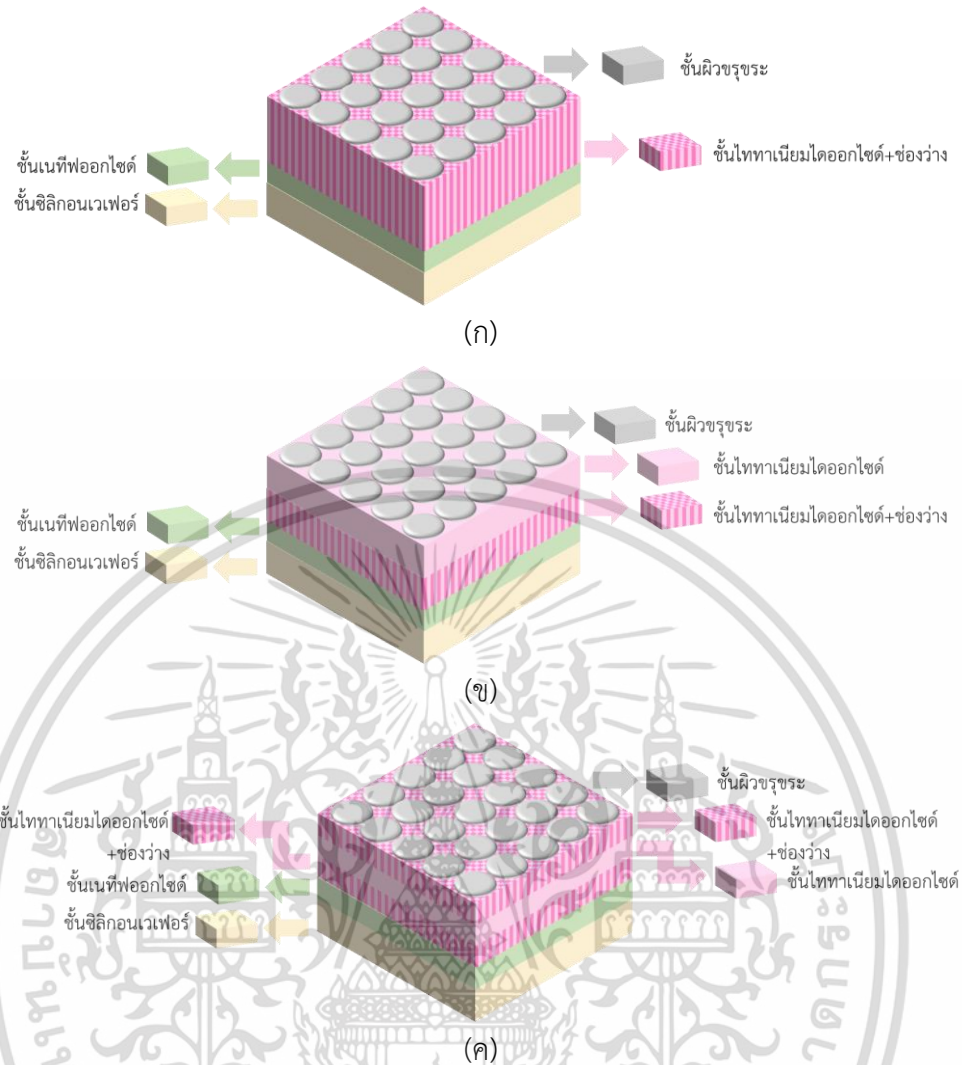
งาน (operating pressure) ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซโครนโครงสร้างของ Thornton [40, 118] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นได้ด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในด้านออปติก โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพิจารณาฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนของพัลส์แก๊สออกซิเจนมีอิทธิพลต่อความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม ซึ่งครอบคลุมทั้งความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยจะทำการวิเคราะห์ รวมถึงอภิปรายความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงแสง

4.1.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคิอิลิปโซเมทรีแบบเอ็กซ์ทริวูวิเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยนำตัวอย่างฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไป (CONV) และเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 57:3(RGT 57:3) 7:3(RGT 7:3) และ 3:3(RGT 3:3) วินาที มาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงแสง ในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร โดยทำการใช้แบบจำลองทางแสงจากสมการคอดี-ลอเลนซ์ เนื่องจากสมการคอดี-ลอเลนซ์สามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของวัตถุได้ในช่วงที่ใกล้ช่องว่างพลังงานและสามารถอธิบายการดูดกลืนแบบ Urbach ได้อีกด้วยจึงเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นทำการใช้แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มที่แตกต่างกัน 3 แบบตามรูปที่ 4.15 ซึ่งประกอบไปด้วย (1) แบบจำลอง ก แบบจำลองแบบหนึ่งชั้น (Single Layer Model; SLM) ที่ประกอบด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์ ซึ่งเป็นแผ่นรองรับ/ชั้นเนทีฟออกไซด์ (native oxide) ที่เป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศทั่วไป/ชั้นของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์อยู่บนชั้นเนทีฟออกไซด์/ชั้นผิวขรุขระ บนชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งชั้นผิวขรุขระนี้ คือชั้นที่มีช่องว่าง ซึ่งมาจากการใช้ฟังก์ชัน EMA ของ Bruggeman ในการเฉลี่ยค่าสมบัติเชิงแสง โดยมี %Void อยู่ที่ 50% ของเนื้อฟิล์ม (2) แบบจำลอง ข แบบจำลองแบบสองชั้น (Double Layer Model; DLM) ที่ประกอบด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์/ชั้นเนทีฟออกไซด์/ชั้นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีการเพิ่มช่องว่างของฟิล์ม/ชั้นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์/และชั้นผิวขรุขระ) และ (3) แบบจำลอง ค แบบจำลองแบบสามชั้น (Triple Layer Model; TLM) ที่ประกอบด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์/ชั้นเนทีฟออกไซด์/ชั้นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีการเพิ่มช่องว่างของฟิล์ม/ชั้นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์/ชั้นฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีการเพิ่มช่องว่างของฟิล์ม/และชั้นผิวขรุขระ)



รูปที่ 4.15 แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณ โดยโปรแกรม WVASE 32 (ภาคผนวก ข) พบว่าแบบจำลอง SLM และ DLM มีค่าความผิดพลาดที่สูงมาก ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4 ค่า MSE ของแบบจำลอง SLM ของฟิล์มตัวอย่าง CONV RGT 57:3 RGT 7:3 และ RGT 3:3 มีค่าเท่ากับ 267.7, 285.7 273.3 และ 187.5 ตามลำดับ ขณะที่ค่า MSE ของแบบจำลอง DLM มีค่าเท่ากับ 293.9, 347.9, 293.2 และ 197.6 ตามลำดับ โดยเมื่อเราทำการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.16 พบว่าแบบจำลอง SLM และ DLM ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นจึงทำการทดลองใช้แบบจำลอง TLM พบว่า ค่า MSE มีค่าเท่ากับ 9.5, 12.36, 15.88 และ 15.35 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลอง SLM และ DLM จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง TLM มีค่า MSE ที่น้อยกว่ามากๆ เนื่องจากฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์นั้นมีลักษณะโครงสร้างแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นแบบจำลองแบบ TLM จึงเหมาะสมในการวิเคราะห์หา

ความหนาและค่าคงที่ทางแสงสำหรับฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

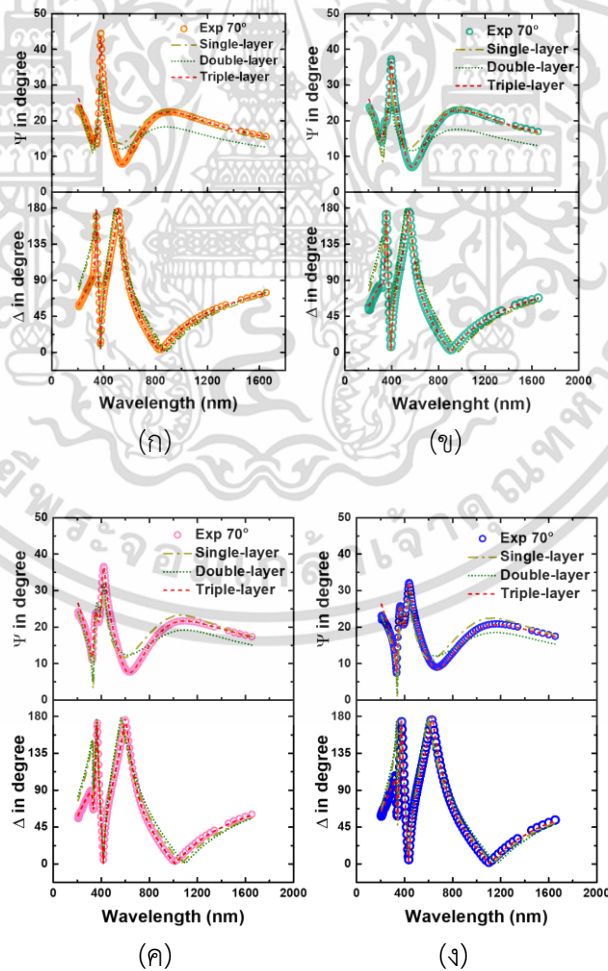
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลเอ็กซ์ทริกซ์ที่แสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางกายภาพ

Fitting physical layer parameters							
Sample	Void TiO ₂ layer (nm)		Dense layer thickness (nm)	Void TiO ₂ layer (nm)		Surface roughness (nm)	MSE
	Thick-ness (nm)	%Void		Thick-ness (nm)	%Void		
	CONV	100.91	7.10	-	-	-	
Single-layer	±0.57	±0.64	-	-	-	-	
Double-layer	49.79	3.18	44.71	-	-	-	293.9
	±10.6	±0.91	±10.6	-	-	-	
Triple-layer	13.28	26.91	57.2	22.96	11.99	10.94	9.5
	±0.09	±0.42	±0.13	±0.31	±0.64	±0.68	
RGT 57:3	112.52	10.73	-	-	-	-	285.7
Single-layer	±0.67	±0.65	-	-	-	-	
Double-layer	51.09	1.50	52.01	-	-	-	347.9
	±25.3	±1.06	±25.4	-	-	-	
Triple-layer	17.45	13.09	58.97	28.77	13.8	10.81	12.36
	±0.29	±0.59	±0.40	±0.42	±0.61	±0.07	
RGT 7:3	123.47	9.19	-	-	-	-	273.3
Single-layer	±0.67	±0.61	-	-	-	-	
Double-layer	13.07	6.21	103.75	-	-	-	293.2
	±0.88	±0.94	±0.79	-	-	-	
Triple-layer	24.99	10.63	63.32	26.68	8.65	8.09	15.88
	±0.25	±0.45	±0.89	±0.75	±0.70	±0.15	
RGT 3:3	130.38	9.21	-	-	-	-	187.5
Single-layer	±0.48	±0.4	-	-	-	-	
Double-layer	14.56	19.77	108.31	-	-	-	197.6
	±0.69	±6.79	±0.90	-	-	-	
Triple-layer	33.89	12.29	63.90	22.72	9.61	11.35	15.35
	±0.49	±0.42	±0.46	±0.85	±0.62	±0.25	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลเอ็กซ์ทริมแสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางแสงของสมการคอดี-ลอเรนซ์

Fitting Optical model: CL oscillator parameters								
Sample	Amp (eV)	Br (eV)	E_o (eV)	E_g (eV)	E_p (eV)	E_t (eV)	E_μ (eV)	MSE
CONV	1026.5 ±1.9	1.41 ±0.01	4.04 ±0.01	3.17 ±0.01	9.29 ±0.04	0.03 ±0.01	1.20 ±0.17	9.5
RGT 57:3	932.67 ±1.32	1.24 ±0.01	4.07 ±0.01	3.15 ±0.01	9.24 ±0.04	0.02 ±0.01	1.12 ±0.32	12.36
RGT 7:3	1092.1 ±2.1	1.21 ±0.01	4.03 ±0.01	3.19 ±0.01	9.32 ±0.09	0.04 ±0.01	1.23 ±0.26	15.88
RGT 3:3	924.98 ±1.82	1.07 ±0.01	3.97 ±0.01	3.13 ±0.01	8.85 ±0.03	0.03 ±0.01	1.36 ±0.25	15.35



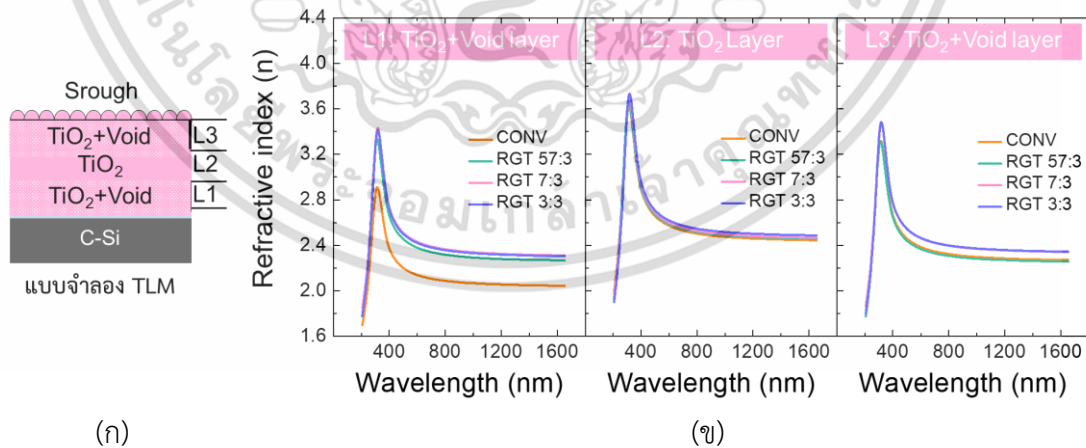
รูปที่ 4.16 ผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่มุม

ตกกระทบ 70 องศา โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง SLM DLM และ TLM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของดัชนีการหักเหของแสง (n) ตามฟังก์ชันของความยาวคลื่นของแต่ละชั้น โดยทำการดึงข้อมูลที่ได้มาจากแบบจำลอง TLM ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดตามที่แสดงในรูปที่ 4.17 การกระจายตัวของดัชนีการหักเหของแสงของแต่ละชั้นแสดงข้อมูลที่คล้ายคลึงกันโดยมีความแตกต่างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดัชนีการหักเหของแสงของชั้นกลาง (L2) มากกว่าชั้นบน (L3) และชั้นล่าง (L1) ซึ่งโดยปกติแล้วค่าดัชนีการหักเหของแสงของวัสดุมักจะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของวัสดุ [120] นอกจากนี้ เฟสไททาเนียมไดออกไซด์แบบออสซิลลูชัน เฟสไททาเนียมไดออกไซด์ของอะนาเทส และเฟสไททาเนียมไดออกไซด์ของรูไทน์ มีค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรเท่ากับ 2.05-2.35, 2.54-2.63 และ 2.75-2.87 ตามลำดับ [40, 118, 119, 121, 122] ดังนั้นความแตกต่างของดัชนีการหักเหของแสงระหว่างชั้นไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละชั้นอาจเป็นผลมาจากระดับของความเป็นผลึกและลักษณะของผลึก [120] โดยที่เฟสของชั้นล่างและชั้นบนสุดอาจมีการเติบโตเป็นผลึกอสซิลลูชันที่มีความหนาแน่นสูงหรือมีรูพรุนสูง ในขณะที่เฟสของชั้นกลางมีการเติบโตเป็นผลึกสูง นอกจากนี้ในแต่ละตัวอย่างยังสามารถสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของดัชนีการหักเหของแสงของชั้น L2 ได้ โดยค่าดัชนีหักเหของแสงที่แตกต่างกันนั้นน่าจะเกิดจากความแตกต่างของระดับของผลึกระหว่างชั้น L2 ซึ่งการคาดการณ์นี้ยังต้องการข้อมูลเชิงผลึกศาสตร์เพิ่มเติมในแต่ละชั้น เพื่อเป็นการยืนยันโดยการวิเคราะห์ HRTEM ซึ่งจะทำการกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป นอกจากนี้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของแต่ละชั้นยังเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยดัชนีการหักเหของแสงที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกโดยการเพิ่มพลังงาน bombardment เช่นเดียวกับพลังงานจลน์ของอนุภาค ซึ่งผลลัพธ์นี้จะกล่าวเพิ่มเติมในส่วนของ GIXRD



รูปที่ 4.17 (ก) แบบจำลองทางกายภาพของแบบจำลอง TLM (ข) การกระจายตัวของดัชนีการหักเหของแสงของชั้นล่าง (L1) ชั้นกลาง (L2) และชั้นบน (L3) ของฟิล์ม CONV, RGT 57:3, RGT 7:3 และ RGT 3:3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

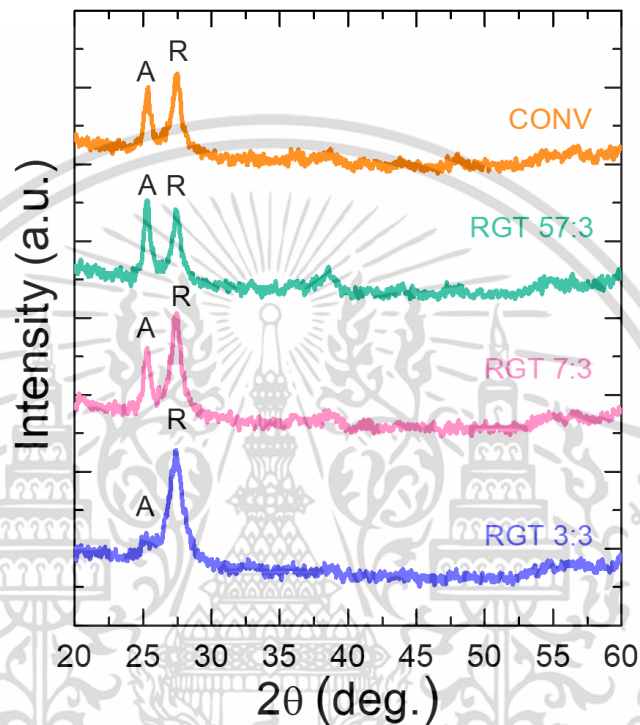
Sample	n@550nm		
	Layer 1	Layer 2	Layer 3
Conventional	2.16	2.60	2.41
RGT 57:3	2.41	2.61	2.39
RGT 7:3	2.46	2.63	2.49
RGT3:3	2.45	2.65	2.49

4.2.2 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.18 ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่ต่างกัน โดยฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้ทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีเฟสผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทน์ ซึ่งสังเกตพบพีคสองพีคที่ 25.3° และ 27.5° ที่ 2θ ซึ่งสอดคล้องกับเฟสอะนาเทส (101) และรูไทน์ (110) ที่ถูกอ้างใน JCPDS No. 21-1272 และ 21-1276 ตามลำดับ [123] จากผลที่ได้จะสังเกตได้ว่าเฟสรูไทน์ สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเพิ่มพลังงานระหว่างการเคลือบฟิล์ม [117] โดยอัตราส่วนรูไทน์ ต่ออะนาเทส (R/A) มาจากการรวมกันระหว่างความเข้มของพีคเหล่านั้น [124] ซึ่งในงานวิจัยพบว่าอัตราส่วน R/A จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมากขึ้น โดยจากผลชี้ให้เห็นว่าความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึก ซึ่งโดยปกติแล้ว จะเกิดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงได้นั้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการให้ความร้อนแก่พื้นผิวหรือการนำฟิล์มไปอบภายหลังการเคลือบฟิล์ม [109, 118] อย่างไรก็ตามในการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าความดันที่เราทำการใช้งานยังคงเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการเคลือบที่อาจส่งผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ แม้ไม่ได้ทำการให้ความร้อนกับวัสดุรองรับ [40] ดังนั้นการเกิดผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนในเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาจึงสามารถอธิบายได้จากพลังงาน bombardment ที่ควบคุมด้วยความดันที่สูงและต่ำสลับกัน ซึ่งในระหว่างการเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนและแก๊สอาร์กอนถูกจ่ายเข้าไปยังห้องเคลือบสปัตเตอร์ริงซึ่งทำให้เกิดความดันในระบบสูงขึ้น จากนั้นเมื่อทำการปิดการจ่ายแก๊สออกซิเจนความดันในระบบจะลดลงในระยะสั้น ๆ ไม่กี่วินาทีที่ทำการปิดแก๊ส ซึ่งส่งผลให้การชนกันของสปัตเตอร์อะตอมน้อยลงขณะที่สปัตเตอร์อะตอมที่หลุดออกมายังคงรักษาระยะทางเฉลี่ยที่ยาวในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สได้ [111] เพราะฉะนั้นอนุภาคของแก๊สที่พลังงานสูงสามารถเข้าถึงวัสดุรองรับได้โดยที่ไม่เกิดการชนกันและส่งผลให้อุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูงขึ้นและมีอนุภาคที่พลังงานสูงกระทบกับพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มที่กำลังเติบโต จนส่งผลให้เกิดการสร้างผลึกได้ และยิ่งไปกว่านั้น จากผลการวิเคราะห์ชิ้นงาน ตัวอย่าง RGT 3:3 พบว่าเกิดเฟสรูไทน์สูง เนื่องจากอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มความถี่ในการเปิด-ปิด แก๊สออกซิเจนทำให้พลังงาน bombardment สูงขึ้น และเมื่อทำการสังเกตจะพบว่าระดับของเฟสผลึกจากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้นจะสอดคล้องกับผลของค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ได้จาก SE



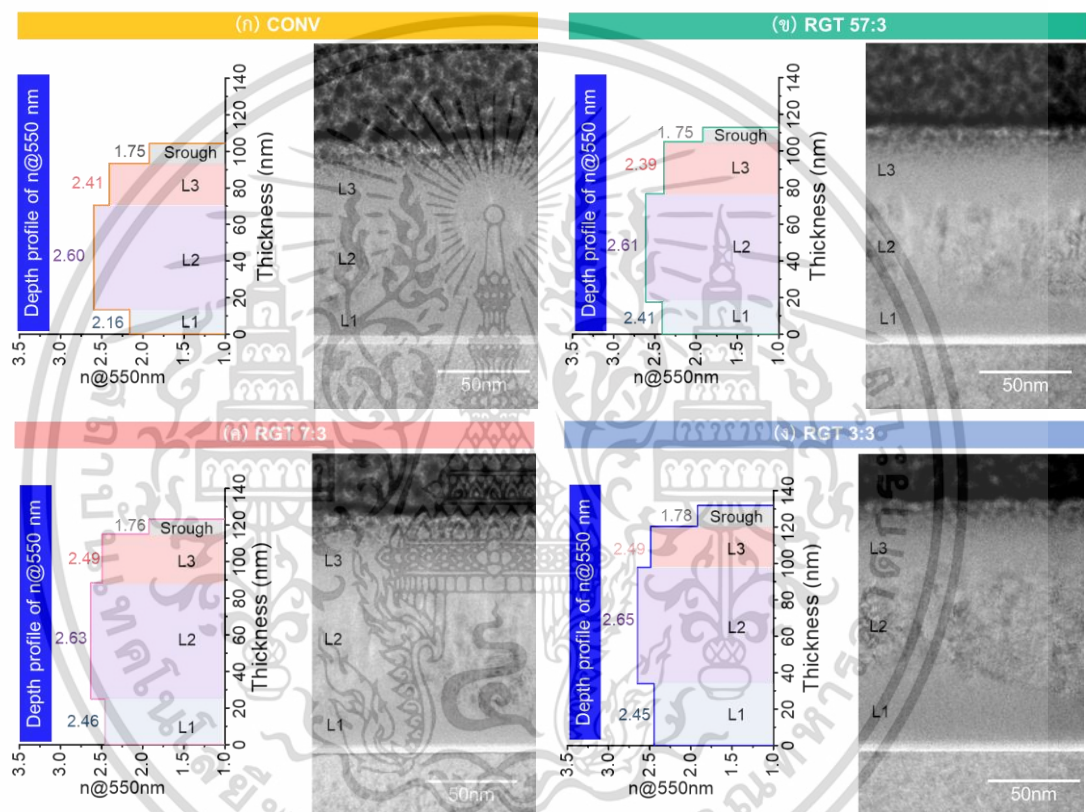
รูปที่ 4.18 รูปแบบการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยการสปัตเตอร์แบบทั่วไป (CONV) เทคนิค RGT 57:3, RGT 7:3 และ RGT 3:3

4.2.3 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านวิเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

จากภาพตัดขวางที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดังที่รูปที่ 4.19 ความหนาของตัวอย่าง CONV คือประมาณ 105.19 นาโนเมตร ความหนาของ RGT 57:3, RGT 7:3 และ RGT 3:3 เพิ่มขึ้นเป็น 114.28 นาโนเมตร, 126.12 นาโนเมตร และ 132.09 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่กล่าวมานี้สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเคลือบของฟิล์มตามทีอธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ [35, 111, 113, 125] นอกจากนี้ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้ทำการเตรียมมาทั้งหมดนั้นมีลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างสามชั้นที่มีระดับความเป็นผลึกและความขรุขระของพื้นผิวที่ต่างกัน ความหนาของชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านล่างเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเกิดพลังงานการ bombardment ในระหว่างการเคลือบของเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา เมื่อนำผลของ SE มาแสดงผลแบบ depth profiles ที่แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ 550 นาโนเมตร โดยสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในแต่ละชั้นของฟิล์มได้ (แบบจำลอง TLM) จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพตัดขวาง HR-TEM พบว่ามีความสอดคล้องกับความหนาของชั้นด้วย นอกจากนี้ คุณสมบัติของค่าดัชนีการหักเหของแสงที่แตกต่างกันนี้อาจเกี่ยวข้องกับระดับความเป็นผลึกของฟิล์มในแต่ละชั้นอีกด้วย

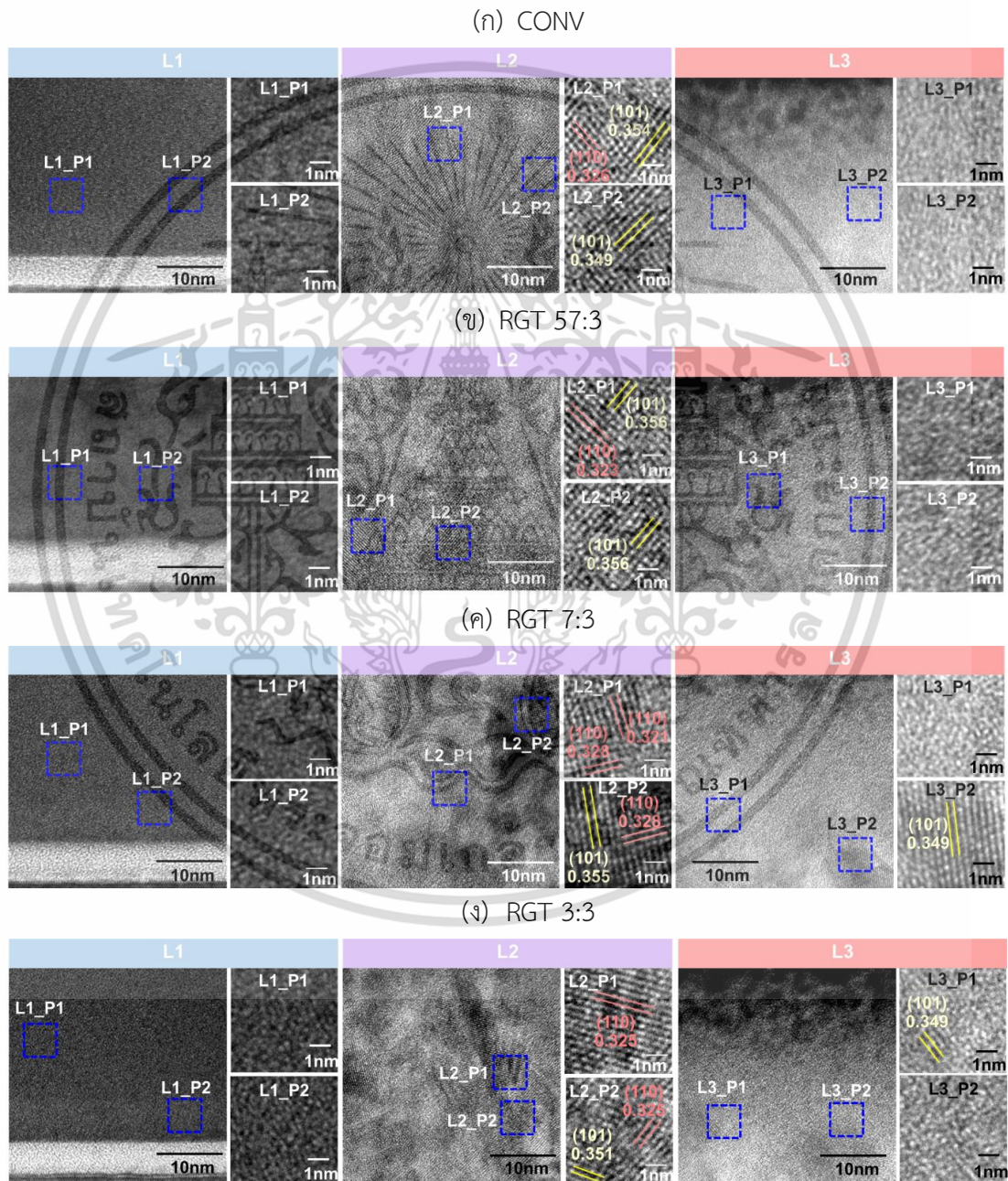


รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวาง TEM ของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้ โดยเปรียบเทียบกับ depth profiles ของ SE

ภาพ HR-TEM ที่รวบรวมผลมาจากบริเวณ L1, L2 และ L3 ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 โดยแลตทิซที่สังเกตได้ชัดเจนในภาพ HR-TEM นั้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมมาทั้งหมดมีลักษณะเป็นอสัณฐานและโพลีคริสตัลไลน์ที่มีเกรนขนาดนาโนของอะนาเทสและรูไทน์ ซึ่งฟิล์มที่เตรียมมาทั้งหมดนั้นมีโซนโครงสร้างผลึกสองโซนตามทิศทางการเติบโต [117] โดยโครงสร้างอสัณฐานจะอยู่ที่ชั้นล่างสุด (L1) ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบผสมอยู่ที่ชั้นบนสุด (ชั้น L2 และ L3) โดยจากรูปจะทำการขยายภาพแลตทิซที่ตำแหน่ง P1 และ P2 ของแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างแลตทิซที่ต่างกันสามารถบอกระดับของการเกิดผลึกได้ ซึ่งสามารถทำการแยก ระหว่างอะนาเทส (เส้นสีเหลือง) และรูไทน์ (เส้นสีแดง) ได้ โดยเมื่อทำการสังเกตผลที่ได้พบว่ามีความ สอดคล้องกับผล XRD ที่กล่าวไว้ว่าฟิล์มประกอบด้วยเฟสอะนาเทสและรูไทน์ ซึ่งฟิล์มบางไททาเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมไว้มีความเป็นผลึกมากขึ้น โดยเฉพาะในชั้น L2 เมื่อความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊ส ออกซิเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งนี้สามารถยืนยันได้ว่าผลดชนีการหักเหของแสงที่ชั้น L2 ของ SE นั้นเกิดจาก ระดับการเกิดของผลึกนั่นเอง

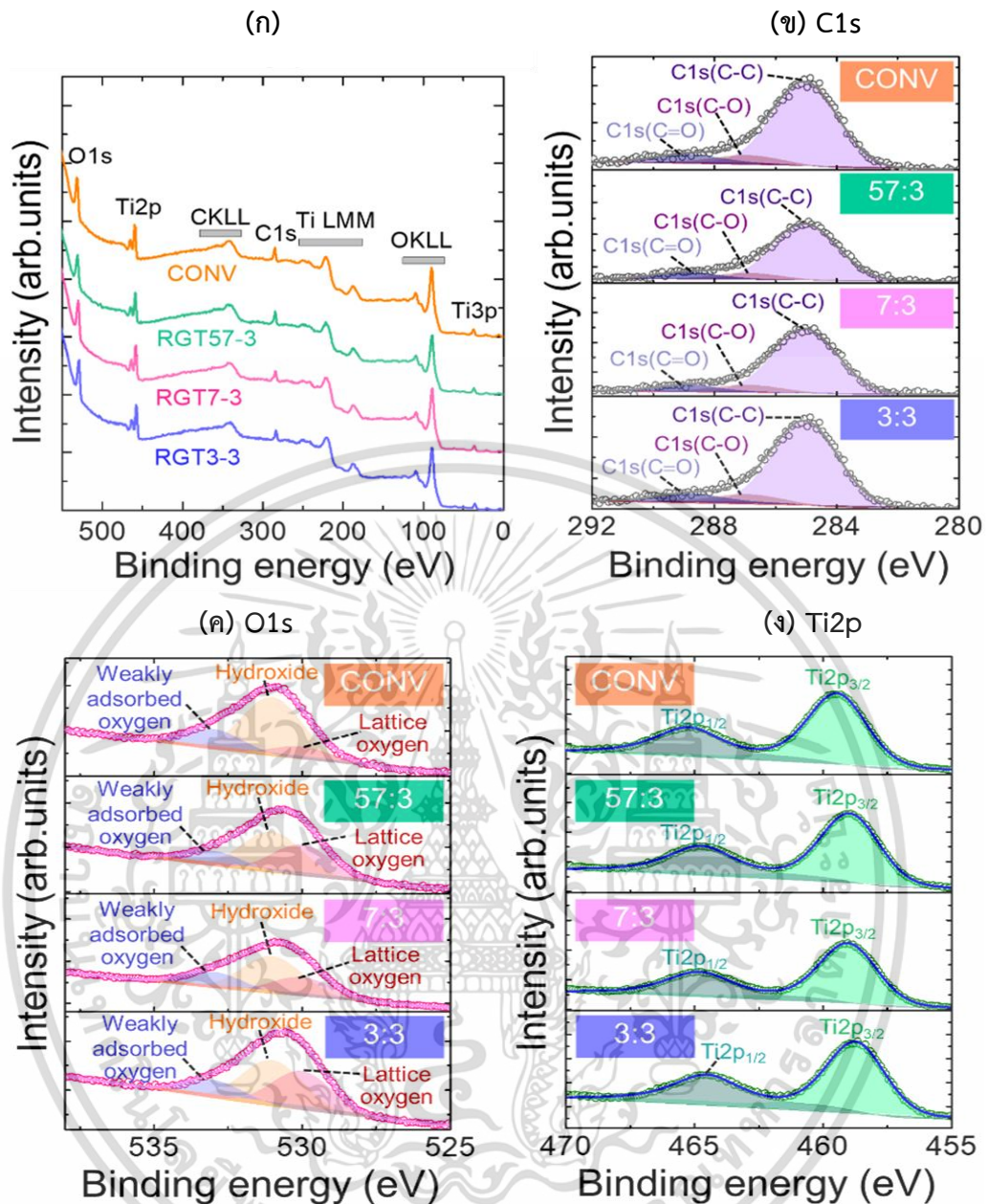


รูปที่ 4.20 ภาพ HR-TEM ที่ชั้น L1, L2 และ L3 ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์วิเคราะห์ธาตุและส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์

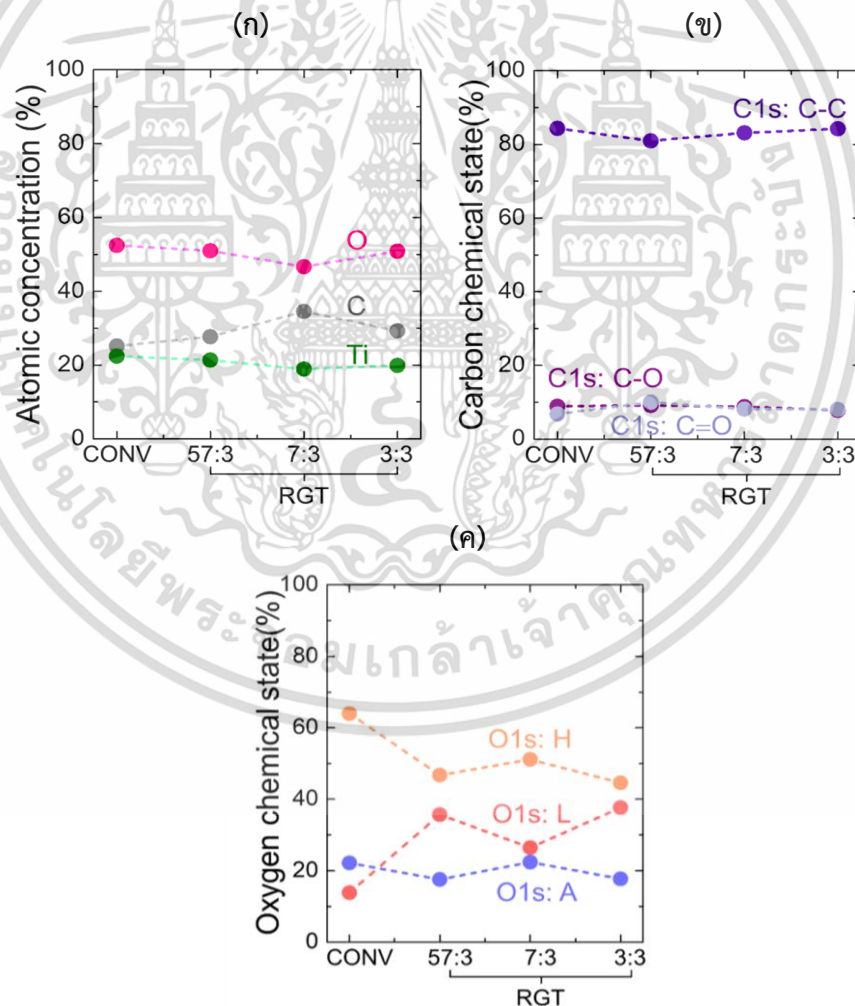
การวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบอัตราส่วนองค์ประกอบและสถานะทางเคมีของคาร์บอน ไททานเนียม และออกซิเจนของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยความลึกในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์อยู่ที่ประมาณ 1.2-3.3 นาโนเมตร ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงเป็นตัวแทนของธาตุและสารเคมี ส่วนประกอบด้านบนของชั้น Srough ที่ใช้ในแบบจำลอง TLM สำหรับการจำลองการกระจายตัวของดัชนีการหักเหของแสงของฟิล์ม [126] จากการสังเกตการสแกนแบบกว้างในรูปที่ 4.20(ก) ค่าพีค C1s C-C/C-H ถูกอ้างอิงที่พลังงานยึดเหนี่ยว 285.01 eV จากฟังก์ชันงาน [127, 128] สเปกตรัมที่ความละเอียดสูงของ C1s, Ti2p และ O1 ได้ทำการวิเคราะห์ผ่านจุดพีคแบบเกาส์เซียน/โลเรนเซียน (Gaussian/Lorentzian peak) ด้วยการลบพื้นหลังหลังจากการลบพื้นหลังในวิธีเซอร์ลีย์ (Shirley) และสไปลน์ (spline) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.20(ข), (ค) และ (ง) ที่ความกว้างของพีค ความสูงครึ่งหนึ่ง ได้รับการเทียบกับทองที่สเปกตรัม 4f และจำกัดที่ 2.0-2.5 eV เพื่อแยกแยะสถานะทางเคมีของคาร์บอน ไททานเนียม และออกซิเจน ซึ่งในส่วนของสเปกตรัม C1s ถูกระบุในรูปที่ 4.20(ข) ค่าพีคของ CC/C-H (285.01 eV) มีค่าพีคที่สูง และค่าพีคของ C-O (286.91 eV) และ C=O (288.91 eV) มีค่าเล็กน้อย [129] โดยเศษส่วนของ C-O มีค่าคงที่ในตัวอย่างทุกตัว ส่วนเศษส่วนของ C=O ในตัวอย่าง RGT นั้นสูงกว่าในตัวอย่าง CONV เล็กน้อย โดยในตระกูลคาร์บอนเหล่านี้มีต้นกำเนิดมาจากไฮโดรคาร์บอนในแก๊สที่เหลือในห้องสุญญากาศและคาร์บอนเกิดการดูดซับในระหว่างการถ่ายโอนตัวอย่างไปยังการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้ในส่วนของสเปกตรัม Ti2p พบพีคที่เด่นชัดสองจุดด้วยกันซึ่งก็คือ $Ti2p_{3/2}$ และ $Ti2p_{1/2}$ โดยพีคอยู่ที่ตำแหน่ง 458.7-459.4 eV และ 464.5-465.2 eV ตามลำดับ [130, 131] ซึ่งพลังงานยึดเหนี่ยวของพีค Ti2p ในตัวอย่าง RGT นั้นต่ำกว่าในตัวอย่าง CONV ดังแสดงในรูปที่ 4.20(ค) ถัดมาในส่วนของ O1s สามารถทำการสังเคราะห์สเปกตรัมออกมาได้พีคที่แตกต่างกัน 3 พีค ดังแสดงในรูปที่ 4.20(ง) โดยทั่วไปแล้วสเปกตรัม O1s จะมีพีคอยู่ที่ 530 eV ที่มีความเกี่ยวข้องกับออกซิเจนในแลตทิซ TiO_2 ในเฟสของโลหะออกไซด์ ซึ่งแสดงใน (Ti-O-Ti) โดยในทางตรงกันข้าม strong peak จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 531 eV ซึ่งก็คือ C-O/O-H ที่บ่งชี้ถึงไฮดรอกไซด์ที่ผิวฟิล์ม ซึ่งจากการปรับสเปกตรัมของ O1s ไฮดรอกไซด์ (531 eV) จะมีค่าที่ลดลงอย่างมากในพื้นผิวฟิล์ม RGT ในขณะที่ออกซิเจนแลตทิซ (530 eV) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CONV [95] ส่วนออกซิเจนที่ดูดซับเล็กน้อย (533 eV) มีค่าเกือบจะคงที่



รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์ของเครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอน ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (a) สเปกตรัมที่สแกนแบบกว้าง (ข) C1s, (ค) Ti2p และ (ง) O1s

รูปที่ 4.22(ก) แสดงความเข้มข้นของอะตอมของแต่ละธาตุในเงื่อนไขการเคลือบ RGT ที่แตกต่างกัน โดยปริมาณออกซิเจนที่ลดลงทั้งหมดนั้นอาจเกิดจากการรวมตัวหรือการดูดซับของไฮโดรคาร์บอนในพื้นผิวฟิล์ม RGT ในลักษณะที่อะตอมและโมเลกุลที่ถูกเร่งทำให้แตกตัวเป็นไอออนหรือสลายไฮโดรคาร์บอนในห้องสุญญากาศ ซึ่งสร้าง C=O บางส่วนในพื้นผิวฟิล์ม ซึ่งอย่างไรก็ตามอัตราส่วนไททาเนียม (Ti+O) อยู่ที่ประมาณ 28-30% ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับเงื่อนไขของ CONV และ RGT โดยปริมาณความสมบูรณ์ทางเคมีของ TiO₂ มีอัตราส่วนอยู่ที่ 33.3% ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไททาเนียม ดังนั้นในตัวอย่างของเราจึงมีไททาเนียมน้อยกว่าในปริมาณความสมบูรณ์ทางเคมีของ TiO_2 โดยกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าอัตราส่วนอะตอมของออกซิเจนสูงกว่าที่คาดไว้ในปริมาณความสมบูรณ์ทางเคมีของ TiO_2 เนื่องจากอะตอมของออกซิเจนถูกสะสมเพิ่มเติมในฟิล์มและพื้นผิวด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาพลังงานภายใต้สภาพแวดล้อมของ RGT โดยการลดลงของไฮดรอกไซด์ในตัวอย่าง RGT เกิดจากพลังงานที่จ่ายเข้าไปในสภาพแวดล้อมของ RGT เพื่อสร้างแลตทิซออกซิเจนแทนที่จะเป็นไฮดรอกไซด์ใน TiO_2 ซึ่งการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนในแก๊สที่เหลืออาจเกิดจากเฟส Ti^{3+} ที่ประกอบกับไฮโดรเจนโดยสังเกตได้จากการเลื่อนของ $\text{Ti}2p$ ในตัวอย่าง RGT [132-134] ซึ่งผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบการเปลี่ยนแปลงของพีค $\text{Ti}2p$ ที่อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของเฟสรูไทน์ในฟิล์ม RGT ซึ่งเท่าที่เป็นไปได้น่าจะเกี่ยวข้องกับพื้นผิวของฟิล์ม โดยการเลื่อนที่สังเกตได้ใน PES ที่วัดต่อพื้นผิวนั้นไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของอัตราส่วนของรูไทน์ต่อเฟสอะนาเทสที่สังเกตได้ใน GIXRD ที่วัดต่อ bulk มากในรูปที่ 4.18

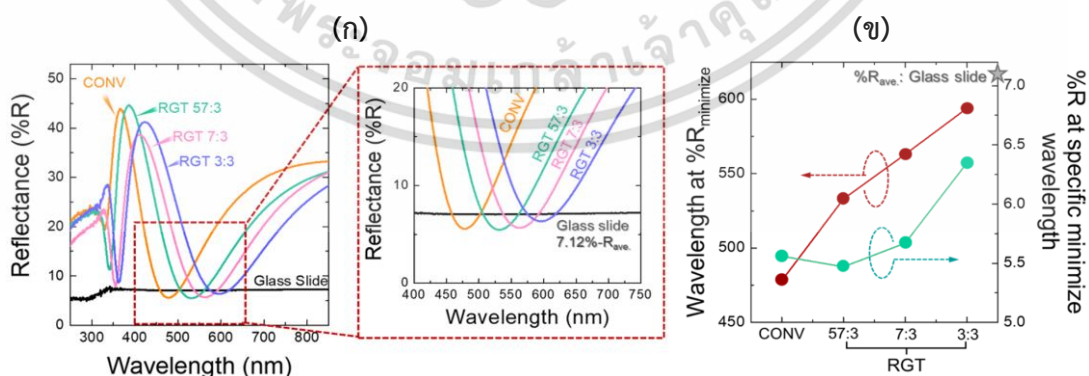


รูปที่ 4.22 (ก) องค์ประกอบของอะตอม (b) องค์ประกอบทางเคมีของ C1 และ (c) องค์ประกอบทางเคมีของ O1 ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ถูกนำมาอธิบายลักษณะเฉพาะด้วยสเปกตรัมการสะท้อนแสง (%R) เมื่อเทียบกับกระจกเปล่าในช่วง 250-850 นาโนเมตร ที่มุมตกกระทบ 8° ดังแสดงในรูปที่ 4.23(ก) ซึ่งกระจกสไลด์เปล่ามีค่าการสะท้อนแสงเฉลี่ย 7.12% ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ ส่วนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์นั้นทำให้การสะท้อนแสงลดลงในบริเวณแคบ ๆ ที่ 460-500, 505-600, 540-590 และ 575-620 nm สำหรับ CONV, RGT 57:3, RGT 7:3, และ RGT 3:3 ตามลำดับ ที่พื้นที่แคบของฟิล์มบางฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้จะแสดงค่าการสะท้อนแสงต่ำสุดที่ 5.56, 5.45, 5.67 และ 6.35% ที่ความยาวคลื่น 478, 533, 563 และ 595 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22(ค) โดยฟิล์มที่เตรียมไว้มีลักษณะสเปกตรัมเป็นรูปตัว V ที่พื้นที่แคบ ๆ ซึ่งในช่วงของการสะท้อนแสงต่ำสุดของสเปกตรัมรูปตัว V นั้นขึ้นอยู่กับดัชนีการหักเหของแสงและความหนาของแต่ละชั้น [135, 136] โดยสิ่งเหล่านี้จะสัมพันธ์กับโครงสร้างของฟิล์มฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเตรียมไว้ ซึ่งความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนนั้นทำให้เกิดฟิล์มหลายชั้นและเกิดความเป็นผลึกที่แยกตัวได้เองโดยการเคลือบเพียงชั้นตอนเดียวตามที่ระบุจากการวิเคราะห์ SE และ TEM ซึ่งความแตกต่างของความหนาและดัชนีของแต่ละชั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นที่พื้นที่แคบของการสะท้อนแสงต่ำสุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้ว เทคนิค RGT สามารถปรับความยาวคลื่นของการสะท้อนที่ต่ำสุดได้ โดยสังเกตได้จากกรอบเส้นประสีแดงว่าที่ความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจะเกิดการเคลื่อนความยาวคลื่นที่พื้นที่แคบของการสะท้อนแสงไปยังความยาวคลื่นที่มีสีแดง โดยในการปรับความยาวคลื่นของการสะท้อนที่ต่ำสุดนั้นสามารถนำไปออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ออปติคัลและการใช้งานที่ใกล้เคียงกับ monochromatic ได้ [137]

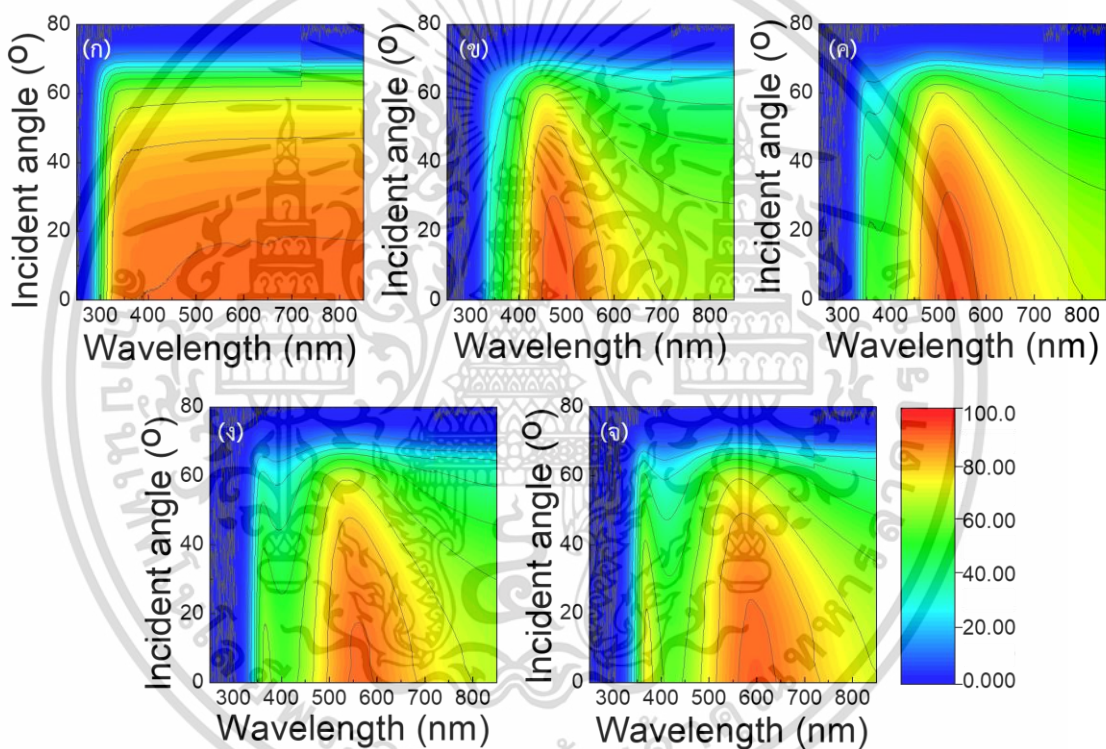


รูปที่ 4.23 (ก) สเปกตรัม %R ระหว่างฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ บนกระจกสไลด์และกระจกเปล่าในช่วง 250-850nm และ (ข) ความยาวคลื่นที่ต่ำสุดของการสะท้อนแสงและ %R ที่เจาะจง

เฉพาะความยาวคลื่นต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีการเติบโตของฟิล์มที่มีดัชนีการหักเหของแสงแบบหลายชั้นด้วยตัวของมันเอง ซึ่งจะมีลักษณะสเปกตรัมในพื้นที่แคบๆเป็นรูปตัว v โดยเมื่อทำการวัดการส่องผ่านแสงรอบทิศทาง (Omni-T) ในช่วงความยาวคลื่น 250 -850 นาโนเมตร ที่ช่วงมุมตกกระทบที่หลากหลายตั้งแต่ 0° - 80° และนำค่า Omni-T ทั้งหมดไปเปรียบเทียบกับผลของกระจกเปล่าที่แสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าการส่องผ่าน (%T) สำหรับตัวอย่างฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด ที่ความยาวคลื่นเฉพาะนั้นสูงกว่ากระจกสไลด์ที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0° ถึงมุม 40° โดย %T ในอีกช่วงหนึ่งที่มีค่าที่ต่ำกว่ากระจกเปล่าเป็นผลมาจากการแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง [138] ดังนั้นจากผลที่ได้เหล่านี้ ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบไว้สามารถนำไปใช้เป็นตัวกรองแสงที่มุมตกกระทบที่กว้างได้



รูปที่ 4.24 ค่า Omni-T ของ (ก) กระจกเปล่า (ข) CONV (ค) RGT 57:3 (ง) RGT 7:3 และ (จ) RGT 3:3 ในช่วงความยาวคลื่น 250-850 นาโนเมตร ที่ช่วงมุมตกกระทบที่หลากหลายตั้งแต่ 0° - 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์โดยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีคอลลีโชนเมทรี (SE) ที่ทำการแบ่งเป็น 2 หัวข้อด้วยกันคือ วิเคราะห์ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ และฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธี สเปกโตรริงแบบทั่วไป และเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแม่นยำของ ผลที่วิเคราะห์ได้และศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อวิเคราะห์ ความเป็นผลึกของฟิล์ม เครื่องสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อวิเคราะห์ องค์ประกอบของธาตุ และเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสง สามารถทำการ สรุปได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลงานวิจัยในส่วนของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์

ในงานวิจัยนี้เราทำการใช้เอ็กซ์ทราเพื่อทำการสร้างแบบจำลองในวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง และศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ ซึ่งเราพบว่าแบบจำลองจากสมการ ทาวส์-ลอเรนซ์เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาความหนาและค่าคงที่ทางแสงสำหรับ ฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ และเราทำการใช้อินซิทูซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษา ทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่มีการเคลือบด้วยเทคนิค รีแอคทีฟสเปกโตรริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา โดยข้อมูลที่วัดได้จะอยู่ในรูป ของเรียลไทม์ (Ψ, Δ) ซึ่งพบความแตกต่างของวิถีการโคจรที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เนื่องจากพารามิเตอร์ของความถี่ในการเปิดและปิดแก๊สเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเงื่อนไขใน การเติบโตของการเคลือบนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาภายใต้ค่าดัชนีหักเหของแสงและปริมาตรช่องว่าง ที่ได้มาจากข้อมูลที่ฟิตได้โดยการใช้แบบจำลองจากสมการทาวส์-ลอเรนซ์ ซึ่งทำการสรุปได้ว่าลักษณะ การเติบโตของฟิล์มจะประกอบไปด้วยฟิล์มแบบกลุ่มก้อน ฟิล์มมีการรวมตัวกัน และฟิล์มที่ก่อตัว แบบต่อเนื่อง โดยในผลงานวิจัยระบุว่าอัตราการเคลือบและดัชนีการหักเหของแสงสำหรับฟิล์มบาง แทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทคนิคที่ทำการเคลือบด้วยรีแอคทีฟสเปกโตรริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊ส แบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน นอกจากนี้ยังอัตราการเคลือบของฟิล์มมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อ ทำการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่ความถี่ที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความดันขณะที่ทำการเคลือบและ สถานะออกซิเดชันที่บริเวณผิวเป้า นอกจากนี้ยังทำการยืนยันได้ว่าที่ความหนาของฟิล์มและระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรกเริ่มในการเติบโตของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินซิทูนั้น มีผลที่สอดคล้องกับผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และในส่วนของวิเคราะห์ทางเคมีของสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นจะพบว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาทำให้เกิดการขาดออกซิเจนหรือข้อบกพร่องในฟิล์มอันเนื่องมาจากการเพิ่มพลังงานของอะตอมที่สเปกโตรในระหว่างกระบวนการเปิด-ปิดแก๊ส โดยเกิดจากปริมาณการจ่ายแก๊สออกซิเจนที่น้อยลงในขณะการเคลือบ ซึ่งเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยากับเวลาที่ทำการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนจะส่งผลให้สถานะออกซิเดชันต่ำกว่า Ta₂O₅ (Ta⁵⁺) นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาที่ความถี่เปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนจะช่วยลดการดูดซับออกซิเจนซึ่งช่วยลดการเกิดพิษที่บริเวณหน้าเป้าได้

5.1.2 สรุปผลงานวิจัยในส่วนของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ถูกเตรียมขึ้นเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปกโตรริงแบบทั่วไปและเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งมีการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนแตกต่างกันที่ 100%, 95%, 75% และ 50% จากนั้นทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ด้วย SE ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีลักษณะทางกายภาพเป็นฟิล์มบางสามชั้นที่มีโครงสร้างความขรุขระของพื้นผิวอยู่ด้านบน และนอกจากนั้นค่าดัชนีการหักเหของแสงยังบ่งชี้ว่าชั้นบนและชั้นล่างของฟิล์มมีลักษณะเป็นอสัณฐานที่มีความหนาแน่นสูง ในขณะที่ชั้นกลางของฟิล์มมีความผลึกสูง โดยมีภาพตัดขวาง TEM และผลจากการวัด GIXRD มาช่วยยืนยันโครงสร้างและความหนาที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยจากผลที่ทำการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มมีลักษณะการเกิดผลึกแบบผสมระหว่างเฟสอะนาเทส (101) และรูไทน์ (101) และจากผลการวิเคราะห์ของ PES ระบุว่าบนพื้นผิวฟิล์ม RGT แลตทิซของออกซิเจนมีการก่อตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะที่การสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นจนเกิดกระบวนการเติมไฮโดรเจนบางส่วน นอกจากนี้ TiO₂ ยังมีอัตราส่วนของรูไทน์ต่ออะนาเทสที่เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเพิ่มพลังงานจลน์ของอนุภาคนั้นเอง จากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัม %R ที่วัดได้พบว่าฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ มีคุณสมบัติในการป้องกันการสะท้อนแสงได้ดี ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงต่ำสุดในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะที่ 479-595 นาโนเมตร ความยาวคลื่น %R ที่มีค่าต่ำสุดจะเคลื่อนไปเป็นความยาวคลื่นช่วงสีแดง ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ในการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ Omni-T เพื่อบ่งชี้ว่าตัวอย่างฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ มีค่า %T ที่ความยาวคลื่นเฉพาะสูงกว่ากระจกเปล่าที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0° ถึงมุม 40° ซึ่งในจุดนี้ ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาอาจเป็นโอกาสที่เปิดกว้างในการปรับปรุงและพัฒนาส่วนประกอบรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบแบบรอบทิศทาง (omnidirectional narrow-bandpass filter) นอกจากนี้ เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยายังเป็นแนวทางสำหรับการ

เคลือบฟิล์มเพียงชั้นตอนเดียวที่มีศักยภาพสูงในการผลิตตัวกรองแสงขนาดใหญ่สำหรับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์แสงอาทิตย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ทำการใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยาโดยการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนเพิ่มเข้ามา
2. สำหรับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบที่โครงสร้างอื่น ๆ เพิ่ม เช่น ลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแท่งตรง และแท่งเอียง เพื่อเพิ่มการส่องผ่านที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ด้าน omnidirectional filter ได้
3. ทำการเพิ่มเงื่อนไขสำหรับแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่ค่าที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ผลของลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์และไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อมีเงื่อนไขของแก๊สที่แตกต่างกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Wei, Z. Ge, X. Zhao, J. Liu, Y. Zhao. 2011. “Electrical and optical properties of tantalum oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering.” *Journal of alloys and compounds*. 509(41) : 9758-9763.
- [2] K. Tajima, H. Hotta, Y. Yamada, M. Okada, K. Yoshimura. 2011. “Fabrication of solid electrolyte Ta₂O₅ thin film by reactive dc magnetron sputtering suitable for electrochromic all-solid-state switchable mirror glass” *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 119(1385) : 76-80.
- [3] S. Boonruang, N. Srisuai, R. Charlermroj, M. Makornwattana, A. Somboonkaew, M. Horprathum, N. Karoonuthaisiri. 2018. “Excitation of multi-order guided mode resonance for multiple color fluorescence enhancement” *Optics & Laser Technology*. 106 : 410-416.
- [4] Y. He, F. Zhang, Q. Zhang, G. Dong, X. Zhong, X. Diao. 2018. “High capacity and performance lithium based electrochromic device via amorphous tantalum oxide protective layer” *Electrochimica Acta*. 280 : 163-170.
- [5] T. Sertel, N.A. Sonmez, S.S. Cetin, S. Ozelik. 2019. “Influences of annealing temperature on anti-reflective performance of amorphous Ta₂O₅ thin films.” *Ceramics International*. 45(1) : 11-18.
- [6] D. Lesnic, G. Wakefield, B. Sleeman, J. Ockendon. 2010. “Determination of the index of refraction of anti-reflection coatings” *Mathematics-in-Industry Case Studies Journal*. 2 : 155-173.
- [7] S. Bruynooghe, M. Schulze, M. Helgert, M. Challier, D. Tonova, M. Sundermann, T. Koch, A. Gatto, E.-B. Kley. 2016. “Broadband and wide-angle hybrid antireflection coatings prepared by combining interference multilayers with subwavelength structures” *Journal of Nanophotonics*. 10(3) : 033002-033002.
- [8] M.Q. Hovish. 2018. “Atmospheric Plasma Deposition of Optical and Optoelectronic Materials for Photovoltaic Applications” Stanford University.
- [9] L. Dobrzański, M. Szindler, A. Drygała, M. Szindler. 2014. “Silicon solar cells with Al₂O₃ antireflection coating” *Open Physics*. 12(9) : 666-670.
- [10] Y. Matamura, T. Ikenoue, M. Miyake, T. Hirato. 2020. “Mist chemical vapor deposition of MoO₂ thin films.” *Journal of Crystal Growth*. 548 : 125862.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] A. Mondal, M.K. Yadav, A. Bag. 2020. "Transition from thin film to nanostructure in low pressure chemical vapor deposition growth of β -Ga₂O₃: Impact of metal gallium source." *Thin Solid Films*. 709 : 138234.
- [12] T. Sakai, T. Kato, H. Katsui, Y. Tanaka, T. Goto. 2020. "Preparation of Y-doped BaZrO₃ thin film electrolyte by laser chemical vapor deposition." *Materials Today Communications*. 101184.
- [13] Q. Zhang, C. Li. 2020. "Effects of water-to-methanol ratio on the structural, optical and photocatalytic properties of titanium dioxide thin films prepared by mist chemical vapor deposition." *Catalysis Today*. 358 : 172-176.
- [14] M. Hassen, R. Riahi, F. Laatar, H. Ezzaouia. 2020. "Optical and surface properties of CdSe thin films prepared by sol-gel spin coating method." *Surfaces and Interfaces*. 18 : 100408.
- [15] H. San Lee, S.S. Ng, F.K. Yam. 2018. "Sol-gel spin coating growth of magnesium-doped indium nitride thin films." *Vacuum*. 155 : 16-22.
- [16] A. Yahia, A. Attaf, H. Saidi, M. Dahnoun, C. Khelifi, A. Bouhdjer, A. Saadi, H. Ezzaouia. 2019. "Structural, optical, morphological and electrical properties of indium oxide thin films prepared by sol gel spin coating process." *Surfaces and Interfaces*. 14 : 158-165.
- [17] A. Kaźmierczak-Bałata, J. Bodzenta, M. Guzewicz. 2020. "Microscopic investigations of morphology and thermal properties of ZnO thin films grown by atomic layer deposition method." *Ultramicroscopy*. 210 : 112923.
- [18] T. Nguyen, N. Adjeroud, M. Guennou, J. Guillot, Y. Fleming, A.-M. Papon, D. Arl, K. Menguelti, R. Joly, N. Gambacorti. 2020. "Controlling electrical and optical properties of zinc oxide thin films grown by thermal atomic layer deposition with oxygen gas." *Results in Materials*. 100088.
- [19] I.J. Badovinac, R. Peter, A. Omerzu, K. Salamon, I. Šarić, A. Samaržija, M. Perčić, I.K. Piltaver, G. Ambrožič, M. Petravić. 2020. "Grain size effect on photocatalytic activity of TiO₂ thin films grown by atomic layer deposition." *Thin Solid Films*. 709 : 138215.
- [20] J. Reuna, V. Polojärvi, P. Pääkkönen, K. Lahtonen, M. Raappana, T. Aho, R. Isoaho, A. Aho, M. Valden, M. Guina. 2019. "Influence of ex-situ annealing on the properties of MgF₂ thin films deposited by electron beam evaporation." *Optical Materials*. 96 : 109326.

- [21] S. Dam, A. Thakur, G. Amarendra, S. Hussain. 2019. "Synthesis and characterisation of MoS₂ thin films by electron beam evaporation." *Thin Solid Films*. 681 : 78-85.
- [22] H. Liu, S. Li, D. Chen, X. Yang, J. He, Y. Jiang, L. Wang, D. Liu, Y. Ji. 2020. "Study on broadband optical constants of yttrium fluoride thin films deposited by electron beam evaporation." *Optik*. 205 : 163548.
- [23] M. Horprathum, P. Eiamchai, P. Chindaudom, A. Pokaipisit, P. Limsuwan. 2012. "Oxygen partial pressure dependence of the properties of TiO₂ thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering." *Procedia Engineering* 32 : 676-682.
- [24] M. Pérez-González, S. Tomás, J. Santoyo-Salazar, M. Morales-Luna. 2017. "Enhanced photocatalytic activity of TiO₂-ZnO thin films deposited by dc reactive magnetron sputtering." *Ceramics International*. 43(12) : 8831-8838.
- [25] S. Nezar, N. Saoula, S. Sali, M. Faiz, M. Mekki, N.A. Laoufi, N. Tabet. 2017. "Properties of TiO₂ thin films deposited by rf reactive magnetron sputtering on biased substrates." *Applied Surface Science*. 395 : 172-179.
- [26] D. Casotti, V. Orsini, A. di Bona, S. Gardonio, M. Fanetti, M. Valant, S. Valeri. 2018. "Ageing effects on electrical resistivity of Nb-doped TiO₂ thin films deposited at a high rate by reactive DC magnetron sputtering." *Applied Surface Science*. 455 : 267-275.
- [27] S. Berg, H.O. Blom, T. Larsson, C. Nender. 1987. "Modeling of reactive sputtering of compound materials" *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 5(2) : 202-207.
- [28] L. Pekker. 1998. "Plasma chemistry model of DC magnetron reactive sputtering in ArO₂ gas mixtures." *Thin Solid Films*. 312(1-2) : 341-347.
- [29] D. Depla, R. De Gryse. 2004. "Target poisoning during reactive magnetron sputtering: Part I: the influence of ion implantation." *Surface and Coatings Technology* 183(2-3) : 184-189.
- [30] W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C. Carter. 2005. "Control of reactive sputtering processes" *Thin solid films*. 491(1-2) : 1-17.
- [31] A. Aronson, D. Chen, W. Class. 1980. "Preparation of titanium nitride by a pulsed dc magnetron reactive deposition techniques using the moving mode of deposition." *Thin Solid Films*. 72(3) : 535-540.

- [32] N. Martin, J. Lintymer, J. Gavoille, J. Takadoum. 2002. "Nitrogen pulsing to modify the properties of titanium nitride thin films sputter deposited." *Journal of materials science*. 37(20) : 4327-4332.
- [33] N. Parreira, T. Polcar, A. Cavaleiro. 2007. "Characterization of W-O coatings deposited by magnetron sputtering with reactive gas pulsing." *Surface and Coatings Technology*. 201(9-11) : 5481-5486.
- [34] N. Martin, J. Lintymer, J. Gavoille, J.-M. Chappé, F. Sthal, J. Takadoum, F. Vaz, L. Rebouta. 2007. "Reactive sputtering of TiO_xN_y coatings by the reactive gas pulsing process. Part I: Pattern and period of pulses." *Surface and Coatings technology*. 201(18) () 7720-7726.
- [35] N. Martin, J. Lintymer, J. Gavoille, J.-M. Chappé, F. Sthal, J. Takadoum, F. Vaz, L. Rebouta. 2007. "Reactive sputtering of TiO_xN_y coatings by the reactive gas pulsing process: Part II: The role of the duty cycle." *Surface and Coatings Technology*. 201(18) : 7727-7732.
- [36] N. Martin, J. Lintymer, J. Gavoille, J.-M. Chappé, F. Sthal, J. Takadoum, F. Vaz, L. Rebouta. 2007. "Reactive sputtering of TiO_xN_y coatings by the reactive gas pulsing process: Part III: The particular case of exponential pulses." *Surface and Coatings Technology*. 201(18) : 7733-7738.
- [37] P. Carvalho, L. Cunha, E. Alves, N. Martin, E. Le Bourhis, F. Vaz. 2009. " ZrO_xN_y decorative thin films prepared by the reactive gas pulsing process." *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42(19) : 195501.
- [38] E. Aubry, S. Weber, A. Billard, N. Martin. 2011. "Silicon oxynitride thin films synthesised by the reactive gas pulsing process using rectangular pulses." *Applied surface science*. 257(23) : 10065-10071.
- [39] N. Khemasiri, N. Paleeya, D.S.-t. Phromyothin, M. Horprathum, S. Porntheeraphat, A. Sungthong, J. Nukeaw, S. Pratontep. 2015. "Silicon nitride thin films deposited by reactive gas-timing magnetron sputtering for protective coating applications." *Adv. Mater. Lett.* 6(6) : 554-559.
- [40] M. Horprathum, P. Eiamchai, P. Chindaudom, N. Nuntawong, V. Patthanasettakul, P. Limnonthakul, P. Limsuwan. 2011. "Characterization of inhomogeneity in TiO_2 thin films prepared by pulsed dc reactive magnetron sputtering." *Thin Solid Films*. 520(1) : 272-279.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] P. Eiamchai, P. Chindaudom, A. Pokaipisit, P. Limsuwan. 2009. "A spectroscopic ellipsometry study of TiO₂ thin films prepared by ion-assisted electron-beam evaporation." *Current Applied Physics*. 9(3) : 707-712.
- [42] T. Lertvanithphol, P. Limnonthakul, C. Hom-on, P. Jaroenapibal, C. Chananonawathorn, S. Limwichean, P. Eiamchai, V. Patthanasettakul, K. Tantiwanichapan. 2020. "A. Sathukarn, Facile fabrication and optical characterization of nanoflake aluminum oxide film with high broadband and omnidirectional transmittance enhancement." *Optical Materials*. 110567.
- [43] M. Vergöhl, N. Malkomes, T. Staedler, T. Matthée, U. Richter. 1999. "Ex situ and in situ spectroscopic ellipsometry of MF and DC-sputtered TiO₂ and SiO₂ films for process control." *Thin Solid Films*. 351(1-2) : 42-47.
- [44] A. Amassian, P. Desjardins, L. Martinu. 2004. "Study of TiO₂ film growth mechanisms in low-pressure plasma by in situ real-time spectroscopic ellipsometry." *Thin Solid Films*. 447 : 40-45.
- [45] I. Volintiru, M. Creatore, M. Van De Sanden. 2008. "In situ spectroscopic ellipsometry growth studies on the Al-doped ZnO films deposited by remote plasma-enhanced metalorganic chemical vapor deposition." *Journal of applied physics*. 103(3) : 033704.
- [46] C. Koidis, S. Logothetidis, S. Kassavetis, A. Laskarakis, N.A. Hastas, O. Valassiades. 2010. "Growth mechanisms and thickness effect on the properties of Al-doped ZnO thin films grown on polymeric substrates." *physica status solidi (a)*. 207(7) : 1581-1585.
- [47] M. Horprathum, P. Chindaudom, P. Limnonthakul, P. Eiamchai, N. Nuntawong, V. Patthanasettakul, A. Pokaipisit, P. Limsuwan. 2010. "Dynamic in situ spectroscopic ellipsometric study in inhomogeneous TiO₂ thin-film growth." *Journal of Applied Physics*. 108(1) : 013522.
- [48] H. Fujiwara. 2007. "Spectroscopic ellipsometry: principles and applications." John Wiley & Sons.
- [49] F. Wooten. 2013. "Optical properties of solids." Academic press.
- [50] J.D. Jackson. 1999. "Classical electrodynamics." American Association of Physics Teachers.
- [51] H.G. Tompkins, W.A. McGahan. 1999. "Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide."

- [52] R.E. Hummel, K.H. Guenther. 1995. "Handbook of optical properties: thin films for optical coatings." Crc Press.
- [53] J. Thornton, A. Penfold, J. Vossen, W. Kern. 1978. "Thin film processes." JA Thronton, AS Penfold-NY: Academic.
- [54] P. Asanithi, S. Chaiyakun, P. Limsuwan. 2012. "Growth of silver nanoparticles by DC magnetron sputtering." *Journal of Nanomaterials*. 2012 : 79-79.
- [55] R. Bunsha. 1982. "Deposition technologies for films and coatings-developments and applications." R. F. Bunsha, et al., 585 pages, hard cover, Noyes Publications, Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, 1982,\$ 69.
- [56] S. Berg, T. Nyberg. 2005. "Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes." *Thin solid films*. 476(2) : 215-230.
- [57] P. Baroch, J. Musil, J. Vlcek, K. Nam, J. Han. 2005. "Reactive magnetron sputtering of TiO_x films." *Surface and Coatings Technology*. 193(1-3) : 107-111.
- [58] J. Xiong, S.N. Das, S. Kim, J. Lim, H. Choi, J.-M. Myoung. 2010. "Photo-induced hydrophilic properties of reactive RF magnetron sputtered TiO₂ thin films." *Surface and Coatings Technology*. 204(21-22) () 3436-3442.
- [59] C. Askeljung, B.-O. Marinder, M. Sundberg. 2003. "Effect of heat treatment on the structure of L-Ta₂O₅: a study by XRPD and HRTEM methods." *Journal of Solid State Chemistry*. 176(1) : 250-258.
- [60] G. Wolten, A. Chase. 1969. "Single-crystal data for β Ta₂O₅ and A KPO₃." *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. 129(5-6) : 365-368.
- [61] K. Kukli, J. Aarik, A. Aidla, O. Kohan, T. Uustare, V. Sammelselg. 1995. "Properties of tantalum oxide thin films grown by atomic layer deposition." *Thin Solid Films*. 260(2) : 135-142.
- [62] R. Fleming, D. Lang, C. Jones, M. Steigerwald, D. Murphy, G. Alers, Y.-H. Wong, R. Van Dover, J. Kwo, A. Sergent. 2000. "Defect dominated charge transport in amorphous Ta₂O₅ thin films." *Journal of Applied Physics*. 88(2) : 850-862.
- [63] P.A. Murawala, M. Sawai, T. Tatsuta, O. Tsuji, S. Fujita, S. Fujita. 1993. "Structural and Electrical Properties of Ta₂O₅ grown by the plasma-enhanced liquid source CVD using penta ethoxy tantalum source." *Japanese journal of applied physics*. 32(1S) : 368.
- [64] Wikipedia. 2021. Tantalum pentoxide. [Online].

Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_pentoxide.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [65] ชำนาญ พร้อมจันทิก. 2549. “ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนสำหรับใช้เป็นหัววัดแก๊ส.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [66] D.E. Williams. 1999. “Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 57(1-3) : 1-16.
- [67] G. Sberveglieri. 1995. “Recent developments in semiconducting thin-film gas sensors.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 23(2-3) : 103-109.
- [68] กนกวรรณ กอบกุลธนชัย. 2552. “การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [69] F. Miao, W. Yi, I. Goldfarb, J.J. Yang, M.-X. Zhang, M.D. Pickett, J.P. Strachan, G. Medeiros-Ribeiro, R.S. Williams. 2012. “Continuous electrical tuning of the chemical composition of TaO_x-based memristors.” *ACS nano*. 6(3) : 2312-2318.
- [70] M.-J. Lee, C.B. Lee, D. Lee, S.R. Lee, M. Chang, J.H. Hur, Y.-B. Kim, C.-J. Kim, D.H. Seo, S. Seo. 2011. “A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta₂O₅-_x/TaO_{2-x} bilayer structures.” *Nature materials*. 10(8) : 625-630.
- [71] R. Prachachet, P. Buranasiri, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, N. Nuntawong, P. Chindaudom, B. Samransuksamer, T. Lertvanithphol. 2017. “Investigation of optical characteristics of the evaporated Ta₂O₅ thin films based on ellipsometry and spectroscopy.” *Materials Today: Proceedings*. 4(5) : 6365-6371.
- [72] C. Mannequin, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, M. Aono. 2016. “Identification and roles of nonstoichiometric oxygen in amorphous Ta₂O₅ thin films deposited by electron beam and sputtering processes.” *Applied Surface Science*. 385 : 426-435.
- [73] M. Wolf, S. Roitsch, J. Mayer, A. Nijmeijer, H.J. Bouwmeester. 2013. “Fabrication of ultrathin films of Ta₂O₅ by a sol-gel method.” *Thin solid films*. 527 : 354-357.
- [74] K. Koç, F. Tepehan, G. Tepehan. 2005. “Antireflecting coating from Ta₂O₅ and SiO₂ multilayer films.” *Journal of materials science*. 40 : 1363-1366.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [75] A. Lintanf-Salaün, A. Mantoux, E. Djurado, E. Blanquet. 2010. “Atomic layer deposition of tantalum oxide thin films for their use as diffusion barriers in microelectronic devices.” *Microelectronic Engineering*. 87(3) : 373-378.
- [76] V. Sammelselg, I. Netsipailo, A. Aidla, A. Tarre, L. Aarik, J. Asari, P. Ritslaid, J. Aarik. 2013. “Chemical resistance of thin film materials based on metal oxides grown by atomic layer deposition.” *Thin Solid Films*. 542 : 219-224.
- [77] E. Härkönen, S. Tervakangas, J. Kolehmainen, B. Díaz, J. Światowska, V. Maurice, A. Seyeux, P. Marcus, M. Fenker, L. Tóth. 2014. “Interface control of atomic layer deposited oxide coatings by filtered cathodic arc deposited sublayers for improved corrosion protection.” *Materials Chemistry and Physics*. 147(3) : 895-907.
- [78] T. Sasaki, Y. Tamegai, T. Ueno, M. Watanabe, L. Jin, E. Kondoh. 2012. “In-situ spectroscopic ellipsometry of the Cu deposition process from supercritical fluids: evidence of an abnormal surface layer formation.” *Japanese Journal of Applied Physics*. 51(5S) : 05EA02.
- [79] E.L. Thomas, S. Mandal, J.E. Macdonald, T.G. Dane, J. Rawle, C.-L. Cheng, O.A. Williams. 2017. “Spectroscopic ellipsometry of nanocrystalline diamond film growth.” *ACS omega*. 2(10) : 6715-6727.
- [80] V. Shvets, S. Rykhliiski, E. Spesivtsev, N. Aulchenko, N. Mikhailov, S. Dvoretzky, Y.G. Sidorov, R. Smirnov. 2004. “In situ ellipsometry for control of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ nanolayer structures and inhomogeneous layers during MBE growth.” *Thin Solid Films*. 455 : 688-694.
- [81] M. Losurdo, G. Bruno, T. Kim, S. Choi, A. Brown, A. Moto. 2005. “Nucleation and growth mode of the molecular beam epitaxy of GaN on 4H-SiC exploiting real time spectroscopic ellipsometry.” *Journal of crystal growth*. 284(1-2) : 156-165.
- [82] G. Badano, P. Ballet, X. Baudry, J. Zanatta, A. Million. 2006. “In situ real-time analysis of the MBE growth of CdTe on Ge: A comparison of ellipsometry data analysis techniques.” *Journal of crystal growth*. 296(2) : 129-134.
- [83] E. Langereis, S. Heil, H. Knoops, W. Keuning, M. Van de Sanden, W. Kessels. 2009. “In situ spectroscopic ellipsometry as a versatile tool for studying atomic layer deposition.” *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42(7) : 073001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [84] H. Van Bui, A. Groenland, A.A. Aarnink, R.A. Wolters, J. Schmitz, A.Y. Kovalgin. 2011. "Growth kinetics and oxidation mechanism of ALD TiN thin films monitored by in situ spectroscopic ellipsometry." *Journal of the Electrochemical Society*. 158(3) : H214.
- [85] D. Schmidt, S. Strehle, M. Albert, W. Hentsch, J. Bartha. 2008. "Top injection reactor tool with in situ spectroscopic ellipsometry for growth and characterization of ALD thin films." *Microelectronic engineering*. 85(3) : 527-533.
- [86] T. Muneshwar, K. Cadien. 2015. "Probing initial-stages of ALD growth with dynamic in situ spectroscopic ellipsometry." *Applied Surface Science*. 328 : 344-348.
- [87] X. Jiang, H. Wang, J. Qi, B.G. Willis. 2014. "In-situ spectroscopic ellipsometry study of copper selective-area atomic layer deposition on palladium." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 32(4) : 041513.
- [88] S. Aouadi, T. Gorishnyy, D. Schultze, S. Rohde. 2002. "Control and monitoring of growth of chromium nitride coatings using in-situ spectroscopic ellipsometry." *Surface and Coatings Technology*. 153(1) : 1-9.
- [89] A. Cantas, G. Aygun, D.K. Basa. 2014. "In-situ spectroscopic ellipsometry and structural study of HfO₂ thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering." *Journal of Applied Physics*. 116(8) : 083517.
- [90] J.A. Woollam, B.D. Johs, C.M. Herzinger, J.N. Hilfiker, R.A. Synowicki, C.L. Bungay. 1999. "Overview of variable-angle spectroscopic ellipsometry (VASE): I. Basic theory and typical applications." *Optical Metrology: A Critical Review*. SPIE. pp. 3-28.
- [91] T. Kubart, T. Polcar, O. Kappertz, N. Parreira, T. Nyberg, S. Berg, A. Cavaleiro. 2007. "Modelling of magnetron sputtering of tungsten oxide with reactive gas pulsing." *Plasma Processes and Polymers*. 4(S1) : S522-S526.
- [92] N. Khemasiri, N. Paleeya, S.-t. Phromyothin, M. Horprathum, A. Sungthong, J. Nukeaw, S. Pratontep. 2015. "Silicon nitride thin films deposited by reactive gas-timing magnetron sputtering for protective coating applications." *Advanced Materials Letters*. 6(6) : 554-559.

- [93] J. Ngaruiya, S. Venkataraj, R. Drese, O. Kappertz, T. Leervad Pedersen, M. Wuttig. 2003. "Preparation and characterization of tantalum oxide films produced by reactive DC magnetron sputtering." *physica status solidi (a)*. 198(1) : 99-110.
- [94] H. Demiryont, J.R. Sites, K. Geib. 1985. "Effects of oxygen content on the optical properties of tantalum oxide films deposited by ion-beam sputtering." *Applied optics*. 24(4) : 490-495.
- [95] J.-C. Dupin, D. Gonbeau, P. Vinatier, A. Levasseur. 2000. "Systematic XPS studies of metal oxides, hydroxides and peroxides." *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2(6) : 1319-1324.
- [96] R.V. Gonçalves, R. Wojcieszak, P.M. Uberman, S.R. Teixeira, L.M. Rossi. 2014. "Insights into the active surface species formed on Ta₂O₅ nanotubes in the catalytic oxidation of CO." *Physical Chemistry Chemical Physics*. 16(12) : 5755-5762.
- [97] R. Grilli, R. Simpson, C.F. Mallinson, M.A. Baker. 2014. "Comparison of Ar+ Monoatomic and cluster ion sputtering of Ta₂O₅ at different ion energies, by XPS: Part 1-Monoatomic Ions." *Surface Science Spectra*. 21(1) : 50-67.
- [98] H. Doghmane, T. Touam, A. Chelouche, F. Challali, B. Bordji. 2020. "Investigation of the influences of post-thermal annealing on physical properties of TiO₂ thin films deposited by RF sputtering." *Semiconductors*. 54(2) : 268-273.
- [99] D. Saha, R. Ajimsha, K. Rajiv, C. Mukherjee, M. Gupta, P. Misra, L. Kukreja. 2014. "Spectroscopic ellipsometry characterization of amorphous and crystalline TiO₂ thin films grown by atomic layer deposition at different temperatures." *Applied surface science*. 315 : 116-123.
- [100] H. Li, Y. Guo, J. Robertson. 2015. "Calculation of TiO₂ surface and subsurface oxygen vacancy by the screened exchange functional." *The Journal of Physical Chemistry C*. 119(32) : 18160-18166.
- [101] A. Taherniya, D. Raoufi. 2016. "The annealing temperature dependence of anatase TiO₂ thin films prepared by the electron-beam evaporation method." *Semiconductor Science and Technology*. 31(12) : 125012.
- [102] M.W. Pyun, E.J. Kim, D.-H. Yoo, S.H. Hahn. 2010. "Oblique angle deposition of TiO₂ thin films prepared by electron-beam evaporation." *Applied Surface Science*. 257(4) : 1149-1153.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [103] U. Akpan, B. Hameed. 2010. “The advancements in sol–gel method of doped-TiO₂ photocatalysts.” *Applied Catalysis A: General*. 375(1) : 1-11.
- [104] A.A. Haidry, J. Puskelova, T. Plecenik, P. Durina, J. Gregus, M. Truchly, T. Roch, M. Zahoran, M. Vargova, P. Kus. 2012. “Characterization and hydrogen gas sensing properties of TiO₂ thin films prepared by sol–gel method.” *Applied surface science*. 259 : 270-275.
- [105] A.M. Alotaibi, S. Sathasivam, B.A. Williamson, A. Kafizas, C. Sotelo-Vazquez, A. Taylor, D.O. Scanlon, I.P. Parkin. 2018. “Chemical vapor deposition of photocatalytically active pure brookite TiO₂ thin films.” *Chemistry of Materials*. 30(4) : 1353-1361.
- [106] J. Hou, X. Yang, X. Lv, M. Huang, Q. Wang, J. Wang. 2012. “Controlled synthesis of TiO₂ mesoporous microspheres via chemical vapor deposition.” *Journal of alloys and compounds*. 511(1) : 202-208.
- [107] A. Ishii, Y. Nakamura, I. Oikawa, A. Kamegawa, H. Takamura. 2015. “Low-temperature preparation of high-n TiO₂ thin film on glass by pulsed laser deposition.” *Applied Surface Science*. 347 : 528-534.
- [108] M.M. Shirolkar, D. Phase, V. Sathe, J. Rodríguez-Carvajal, R.J. Choudhary, S.K. Kulkarni. 2011. “Relation between crystallinity and chemical nature of surface on wettability: A study on pulsed laser deposited TiO₂ thin films.” *Journal of Applied Physics*. 109(12) : 123512.
- [109] Z. Wang, N. Yao, X. Hu. 2014. “Single material TiO₂ double layers antireflection coating with photocatalytic property prepared by magnetron sputtering technique.” *Vacuum*. 108 : 20-26.
- [110] J. Singh, S.A. Khan, J. Shah, R. Kotnala, S. Mohapatra. 2017. “Nanostructured TiO₂ thin films prepared by RF magnetron sputtering for photocatalytic applications.” *Applied Surface Science*. 422 : 953-961.
- [111] D. Chittinan, P. Buranasiri, T. Lertvanithphol, P. Eiamchai, V. Patthanasettakul, C. Chananonawathorn, S. Limwichean, N. Nuntawong, A. Klamchuen, P. Muthitamongkol. 2019. “Observations of the initial stages on reactive gas-timing sputtered TaO thin films by dynamic in situ spectroscopic ellipsometry.” *Optical Materials*. 92 : 223-232.

- [112] N. Martin, A.R. Bally, P. Hones, R. Sanjinés, F. Lévy. 2000. “High rate and process control of reactive sputtering by gas pulsing: the Ti–O system.” *Thin Solid Films*. 377 : 550-556.
- [113] N. Khemasiri, S. Jessadaluk, C. Chananonnawathorn, S. Vuttivong, T. Lertvanithphol, M. Horprathum, P. Eiamchai, V. Patthanasettakul, A. Klamchuen, A. Pankiew. 2016. “Optical band engineering of metal-oxynitride based on tantalum oxide thin film fabricated via reactive gas-timing RF magnetron sputtering.” *Surface and Coatings Technology*. 306 : 346-350.
- [114] N. Martin, R. Sanjines, J. Takadoum, F. Lévy. 2001. “Enhanced sputtering of titanium oxide, nitride and oxynitride thin films by the reactive gas pulsing technique.” *Surface and Coatings Technology*. 142 : 615-620.
- [115] R. Chodun, L. Skowronski, S. Okrasa, B. Wicher, K. Nowakowska-Langier, K. Zdunek. 2019. “Optical TiO₂ layers deposited on polymer substrates by the Gas Injection Magnetron Sputtering technique.” *Applied Surface Science*. 466 : 12-18.
- [116] R. Chodun, K. Nowakowska-Langier, B. Wicher, S. Okrasa, R. Kwiatkowski, D. Zaloga, M. Dypa, K. Zdunek. 2020. “The state of coating–substrate interfacial region formed during TiO₂ coating deposition by Gas Injection Magnetron Sputtering technique.” *Surface and Coatings Technology*. 398 : 126092.
- [117] R. Chodun, K. Nowakowska-Langier, B. Wicher, S. Okrasa, R. Minikayev, M. Dypa, K. Zdunek. 2021. “TiO₂ coating fabrication using gas injection magnetron sputtering technique by independently controlling the gas and power pulses.” *Thin Solid Films*. 728 : 138695.
- [118] L. Miao, P. Jin, K. Kaneko, A. Terai, N. Nabatova-Gabain, S. Tanemura. 2003. “Preparation and characterization of polycrystalline anatase and rutile TiO₂ thin films by rf magnetron sputtering.” *Applied Surface Science*. 212 : 255-263.
- [119] L.-J. Meng, M.P. dos Santos. 1993. “Investigations of titanium oxide films deposited by dc reactive magnetron sputtering in different sputtering pressures.” *Thin Solid Films*. 226(1) : 22-29.
- [120] M. Kang, S.W. Kim, H.Y. Park. 2018. “Optical properties of TiO₂ thin films with crystal structure.” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 123 : 266-270.

- [121] P. Löbl, M. Huppertz, D. Mergel. 1994. "Nucleation and growth in TiO₂ films prepared by sputtering and evaporation." *Thin solid films*. 251(1) : 72-79.
- [122] C.-C. Ting, S.-Y. Chen, D.-M. Liu. 2000. "Structural evolution and optical properties of TiO₂ thin films prepared by thermal oxidation of sputtered Ti films." *Journal of Applied Physics*. 88(8) : 4628-4633.
- [123] D. Yang. 2018. "Titanium Dioxide: Material for a Sustainable Environment." BoD–Books on Demand.
- [124] W. Promnopas, S. Promnopas, T. Phonkhokkong, T. Thongtem, D. Boonyawan, L. Yu, O. Wiranwetchayan, A. Phuruangrat, S. Thongtem. 2016. "Crystalline phases and optical properties of titanium dioxide films deposited on glass substrates by microwave method." *Surface and Coatings Technology*. 306 : 69-74.
- [125] T. Lertvanithphol, W. Rakreungdet, C. Chananonwathorn, P. Eiamchai, S. Limwicchan, N. Nuntawong, V. Patthanasettakul, A. Klamchuen, N. Khemasiri, J. Nukeaw. 2019. "Spectroscopic study on amorphous tantalum oxynitride thin films prepared by reactive gas-timing RF magnetron sputtering." *Applied Surface Science*. 492 : 99-107.
- [126] H. Shinotsuka, S. Tanuma, C. Powell, D. Penn. 2015. "Calculations of electron inelastic mean free paths. X. Data for 41 elemental solids over the 50 eV to 200 keV range with the relativistic full Penn algorithm." *Surface and Interface Analysis*. 47(9) : 871-888.
- [127] G. Greczynski, L. Hultman. 2020. "X-ray photoelectron spectroscopy: towards reliable binding energy referencing." *Progress in Materials Science*. 107 : 100591.
- [128] G. Greczynski, L. Hultman. 2017. "C 1s peak of adventitious carbon aligns to the vacuum level: dire consequences for material's bonding assignment by photoelectron spectroscopy." *ChemPhysChem*. 18(12) : 1507-1512.
- [129] K. Haubner, J. Murawski, P. Olk, L.M. Eng, C. Ziegler, B. Adolphi, E. Jaehne. 2010. "The route to functional graphene oxide." *ChemPhysChem*. 11(10) : 2131-2139.
- [130] P.B. Nair, V. Justinictor, G.P. Daniel, K. Joy, V. Ramakrishnan, P. Thomas. 2011. "Effect of RF power and sputtering pressure on the structural and optical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- properties of TiO₂ thin films prepared by RF magnetron sputtering.” *Applied Surface Science*. 257(24) : 10869-10875.
- [131] D. Barreca, A. Gasparotto, C. Maccato, C. Maragno, E. Tondello. 2007. “TiO₂ thin films by chemical vapor deposition: An XPS characterization.” *Surface Science Spectra*. 14(1) : 27-33.
- [132] X. Yan, L. Tian, X. Chen. 2016. “Synthesis and Properties of Hydrogenated Black TiO₂ Nanomaterials.” *Black TiO₂ Nanomaterials For Energy Applications*.
- [133] Y. Yan, M. Han, A. Konkin, T. Koppe, D. Wang, T. Andreu, G. Chen, U. Vetter, J.R. Morante, P. Schaaf. 2014. “Slightly hydrogenated TiO₂ with enhanced photocatalytic performance.” *Journal of Materials Chemistry A*. 2(32) : 12708-12716.
- [134] R. Shvab, E. Hryha, L. Nyborg. 2017. “Surface chemistry of the titanium powder studied by XPS using internal standard reference.” *Powder Metallurgy*. 60(1) : 42-48.
- [135] S.-H. Jeong, J.-K. Kim, B.-S. Kim, S.-H. Shim, B.-T. Lee. 2004. “Characterization of SiO₂ and TiO₂ films prepared using rf magnetron sputtering and their application to anti-reflection coating.” *Vacuum*. 76(4) : 507-515.
- [136] W. Zhou, M. Tao, L. Chen, H. Yang. 2007. “Microstructured surface design for omnidirectional antireflection coatings on solar cells.” *Journal of Applied Physics*. 102(10) : 103105.
- [137] R. Patel, N. Patel, N. Bazzanella, A. Miotello. 2020. “Fabricating multilayer antireflective coating for near complete transmittance in broadband visible light spectrum.” *Optical Materials*. 108 : 110415.
- [138] E. Hecht. 2002. “Optics.” Addison-Wesley. 10: 0133977226.



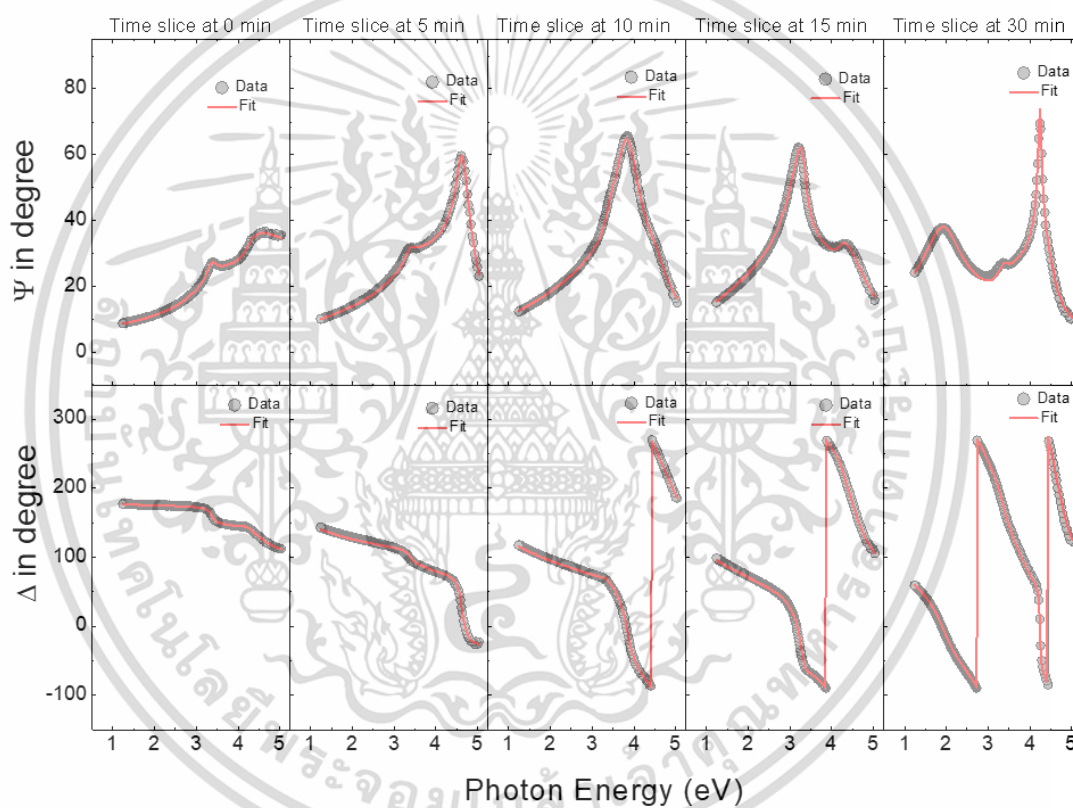
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวัดฟิล์มบางแทนทาลัมออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทรู

ข้อมูลจากการวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทรู ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ที่เวลาต่างกันและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของการเคลือบฟิล์มบาง TaO บนซิลิคอนเวเฟอร์โดยใช้เทคนิครีแอกทีฟสปีดเตอร์ริงแบบทั่วไป

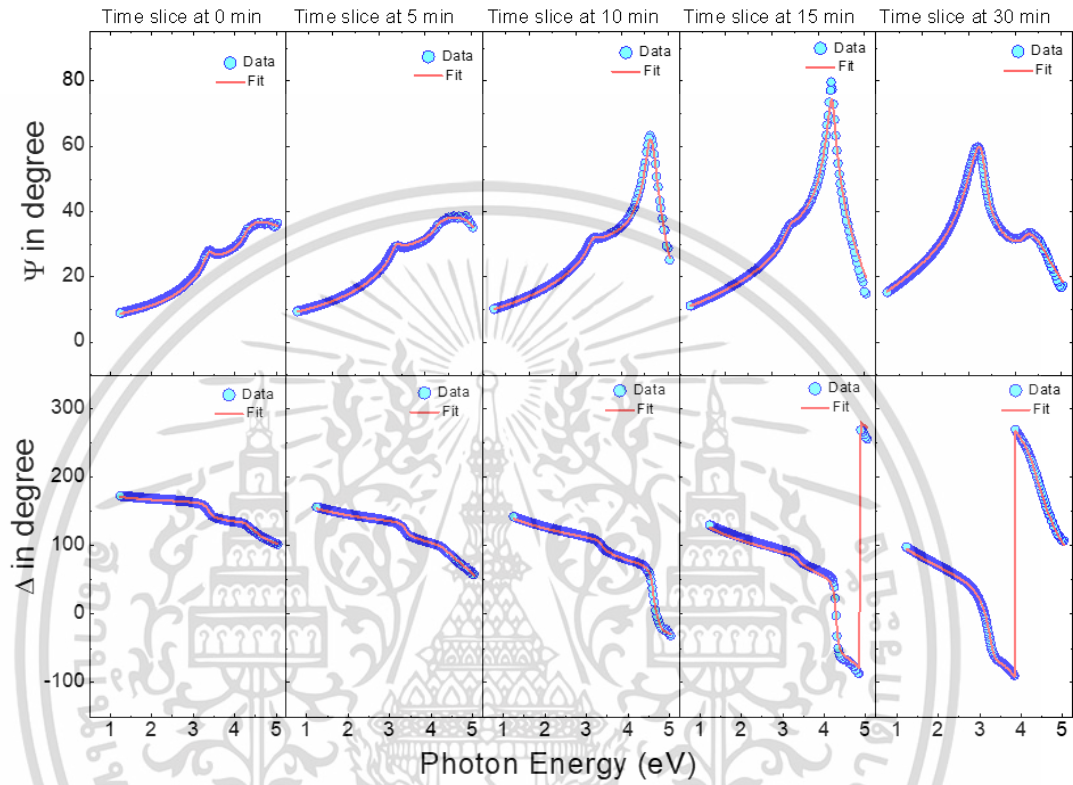


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fitting parameters							
Time Slice	Optical Model: TL oscillator				Physical layer		MSE
(min)	Amp	Br	E_0	E_g	Thickness	Void	
	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm)	(%)	
0	-	-	-	-	-	-	-
5	594.81 ±2.74	5.94 ±0.04	4.02 ±0.03	4.12 ±0.01	17.59 ±0.09	0 ±0.48	0.59
10	596.61 ±2.70	5.94 ±0.03	4.04 ±0.02	4.18 ±0.01	32.22 ±0.04	0 ±0.91	0.47
15	598.89 ±1.86	5.98 ±0.02	4.03 ±0.01	4.18 ±0.01	47.33 ±0.04	0 ±0.80	0.59
30	602.84 ±1.55	5.92 ±0.05	4.05 ±0.01	4.19 ±0.01	91.30 ±0.12	0 ±0.98	0.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากการวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอปิโพลิไซเมทรีแบบอินซิทู ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ที่เวลาต่างกันและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของการเคลือบฟิล์มบาง TaO บนซิลิคอนเวเฟอร์โดยการใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งมีการเปิด-ปิดแก๊สอาร์กอน 17:3 วินาที

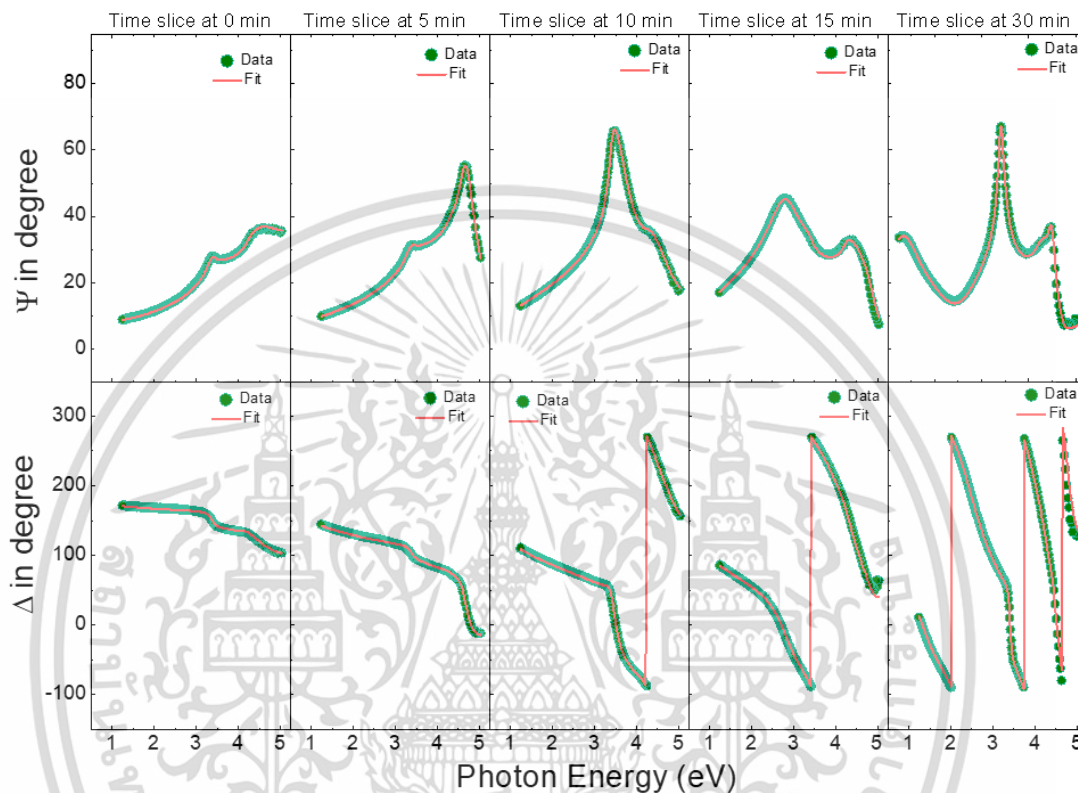


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fitting parameters							
Time Slice	Optical Model: TL oscillator				Physical layer		MSE
(min)	Amp	Br	E_0	E_g	Thickness	Void	
	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm)	(%)	
0	-	-	-	-	-	-	-
5	559.42 ±2.49	5.87 ±0.42	4.03 ±0.02	4.01 ±0.13	9.39 ±0.06	3.4 ±0.73	0.57
10	591.85 ±1.88	5.86 ±0.17	4.06 ±0.01	4.15 ±0.01	16.45 ±0.06	0 ±0.80	1.49
15	591.85 ±1.52	5.94 ±0.52	4.06 ±0.01	4.15 ±0.01	24.15 ±0.06	0 ±0.51	1.47
30	595.26 ±1.55	6.07 ±0.23	4.08 ±0.01	4.15 ±0.02	47.88 ±0.06	0 ±0.80	0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากการวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีโคอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทู ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ที่เวลาต่างกันและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของการเคลือบฟิล์มบาง TaO บนซิลิคอนเวเฟอร์โดยการใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งมีการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 17:3 วินาที

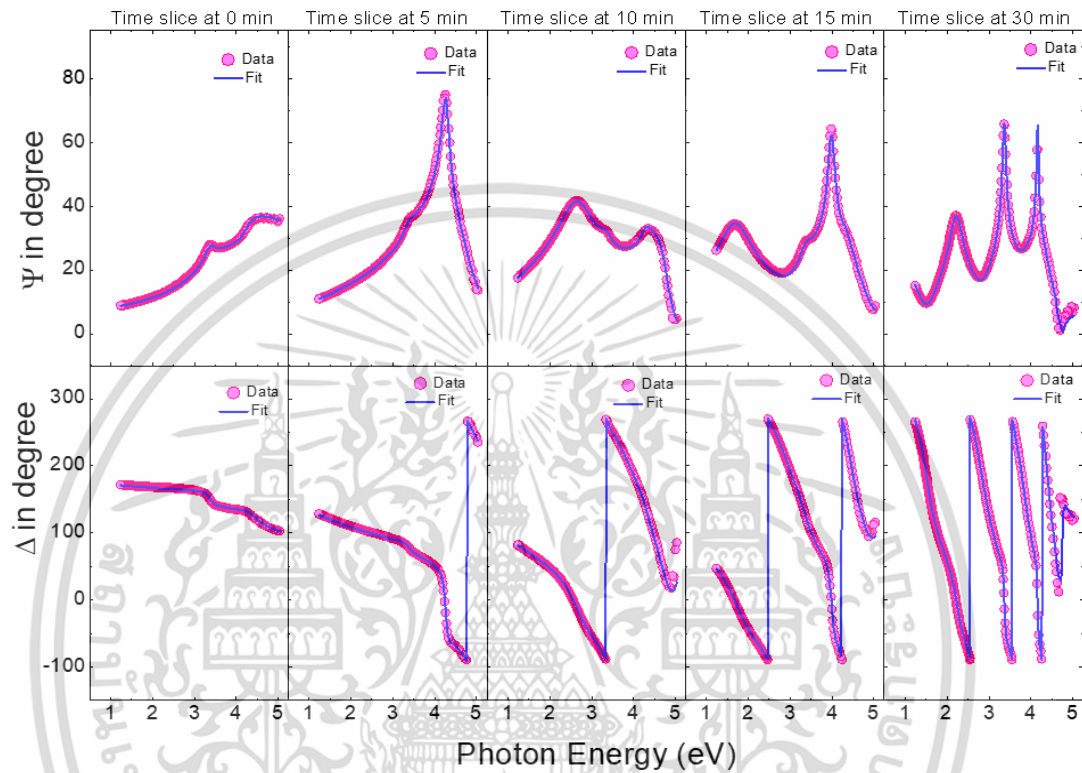


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fitting parameters							
Time Slice	Optical Model: TL oscillator				Physical layer		MSE
(min)	Amp	Br	E_0	E_g	Thickness	Void	
	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm)	(%)	
0	-	-	-	-	-	-	-
5	634.68 ±2.84	5.52 ±0.09	4.12 ±0.12	4.18 ±0.18	21.7 ±0.03	0.2 ±0.83	1.01
10	638.02 ±1.62	5.54 ±0.07	4.15 ±0.13	4.20 ±0.03	43.78 ±0.03	0 ±0.80	0.70
15	639.87 ±1.74	5.64 ±0.02	4.15 ±0.16	4.20 ±0.02	59.94 ±0.05	0 ±0.67	0.70
30	641.34 ±2.17	5.67 ±0.02	4.16 ±0.14	4.20 ±0.01	123.96 ±0.09	0 ±0.21	1.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากการวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีคอปอิลิปโซเมทรีแบบอินซิทู ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ที่เวลาต่างกันและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลองค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของการเคลือบฟิล์มบาง TaO บนซิลิคอนเวเฟอร์โดยการใช้เทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ซึ่งมีการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 3:3 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fitting parameters							
Time Slice	Optical Model: TL oscillator				Physical layer		MSE
(min)	Amp	Br	E_0	E_g	Thickness	Void	
	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm)	(%)	
0	-	-	-	-	-	-	-
5	649.66 ±1.65	5.64 ±0.17	4.15 ±0.03	4.20 ±0.01	36.71 ±0.03	0.4 ±0.73	0.70
10	652.91 ±1.76	5.68 ±0.11	4.16 ±0.11	4.20 ±0.02	73.03 ±0.04	0 ±0.54	1.46
15	654.55 ±1.01	5.72 ±0.14	4.17 ±0.13	4.21 ±0.01	108.84 ±0.09	0 ±0.27	1.36
30	654.37 ±1.86	5.79 ±0.01	4.17 ±0.01	4.21 ±0.01	213.28 ±0.02	0 ±0.36	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

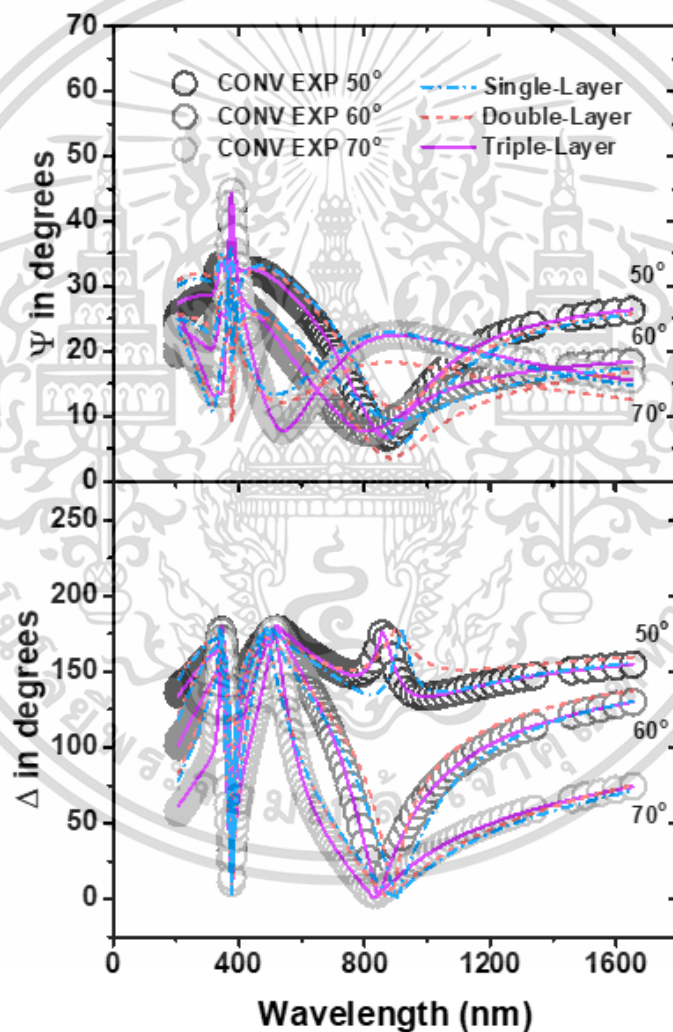
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

n@550 nm				
Time slice (min)	Conventional			
	reactive	RGT_Ar 17:3	RGT_O ₂ 17:3	RGT_O ₂ 3:3
sputtering				
5	2.09	2.00	2.12	2.14
10	2.09	2.07	2.13	2.15
15	2.09	2.07	2.13	2.15
30	2.09	2.07	2.13	2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

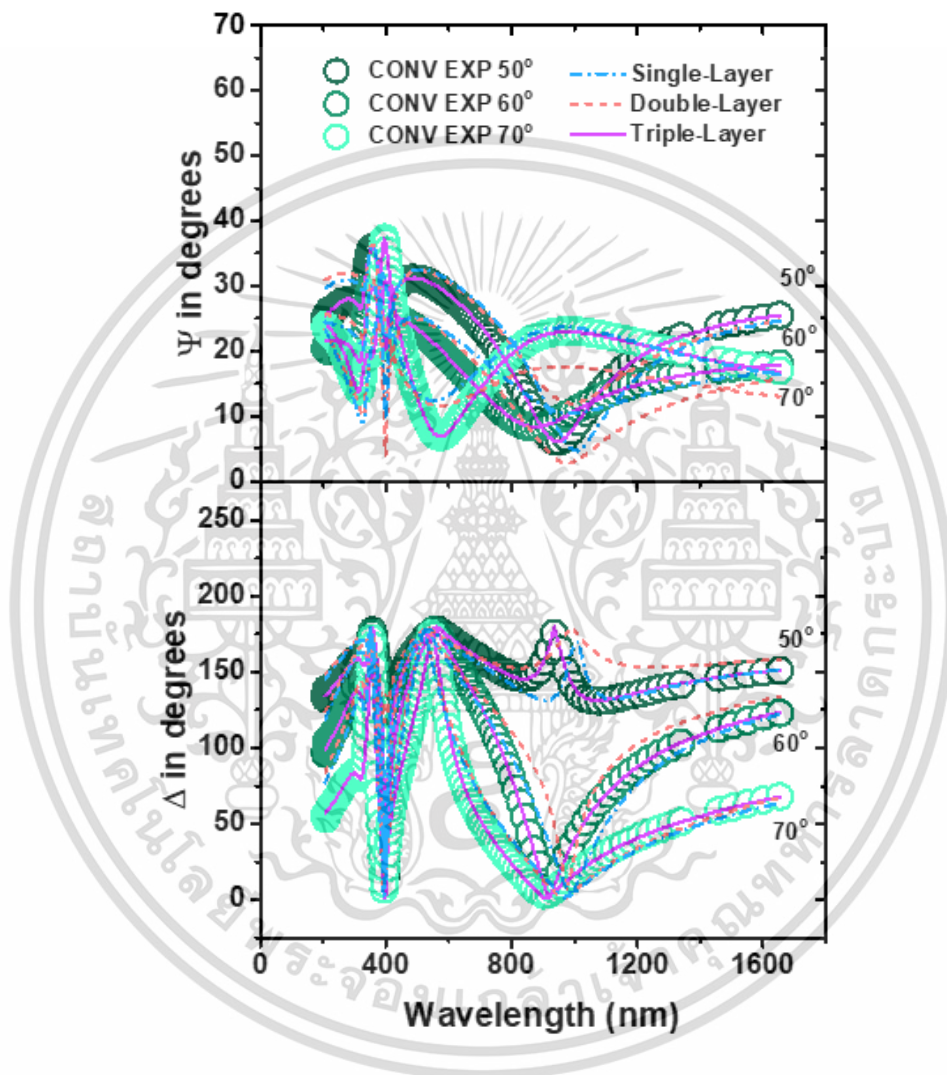
ภาคผนวก ข
การวัดฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค
สเปกโตรสโคปีคิอิลิปโซเมทรี

ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคแบบทั่วไป โดยทำการวัดด้วย SE ในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 50° 60° และ 70°



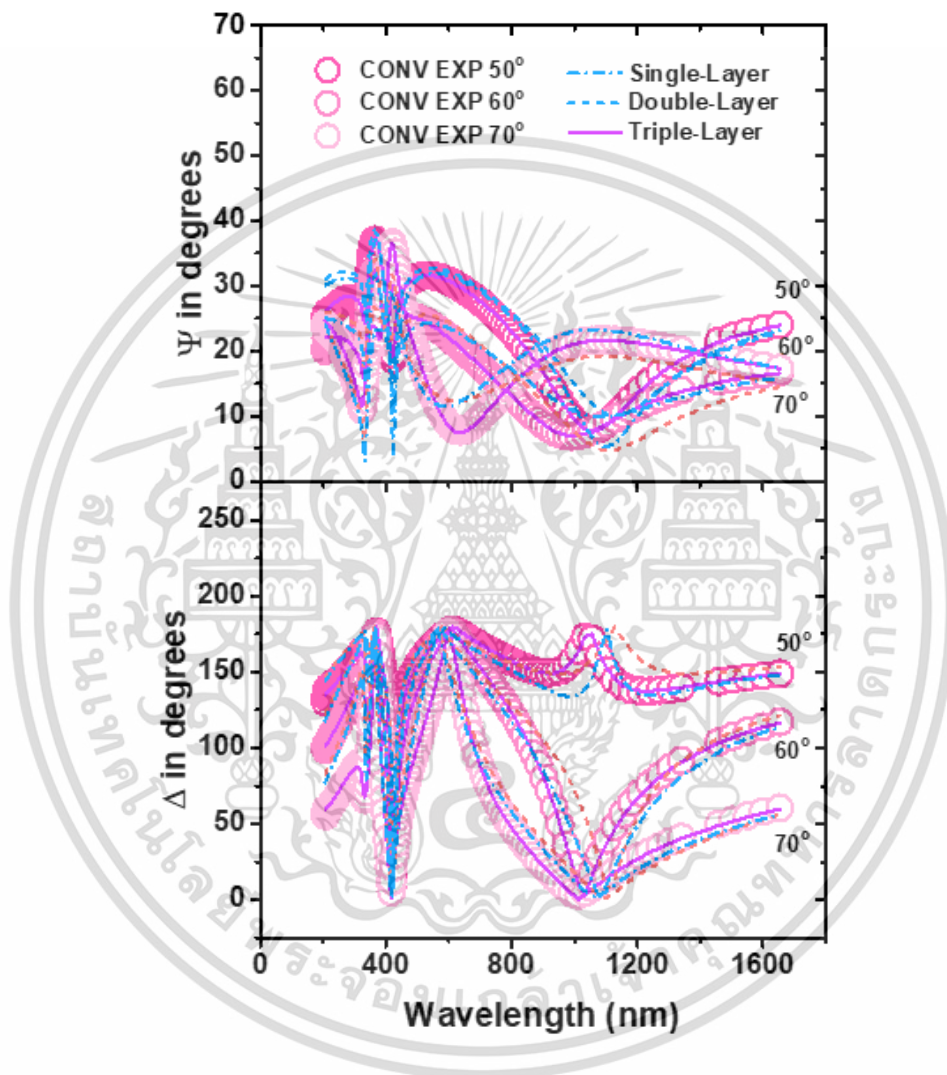
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคควบคุมแก๊สแบบไวปฏิกิริยา ที่ความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจน 57:3 วินาที (RGT O₂ 57:3) โดยทำการวัดด้วย SE ในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 50° 60° และ 70°



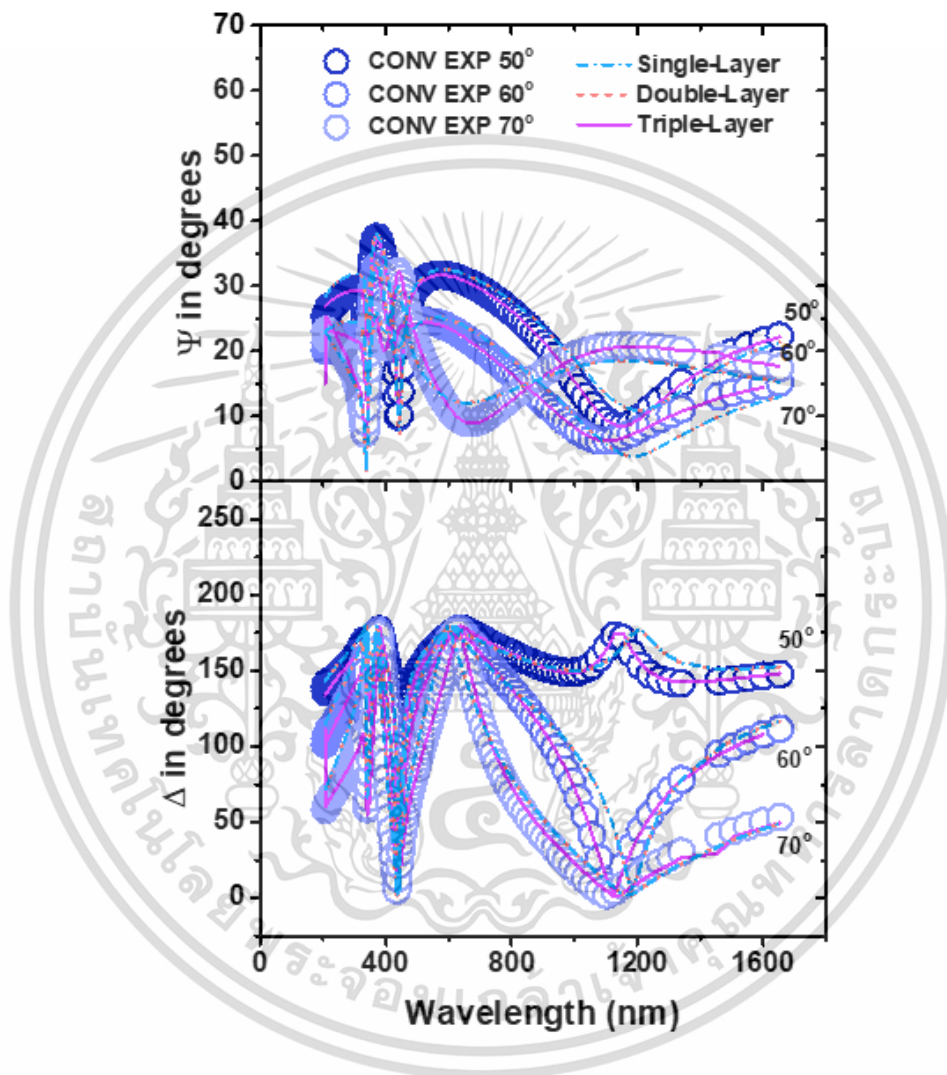
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคเทคนิคควบคุมแก๊สแบบวาล์วปฏิกิริยา ที่ความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 17:3(RGT O₂ 17:3) โดยทำการวัดด้วย SE ในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 50° 60° และ 70°



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคเทคนิคควบคุมแก๊สแบบวอ
ปฏิกิริยา ที่ความถี่ของการเปิด-ปิดแก๊สออกซิเจนที่เวลา 3:3(RGT O₂ 3:3) โดยทำการวัดด้วย SE
ในช่วงความยาวคลื่น 250-1650 นาโนเมตร ที่ความละเอียด 5 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มุมตก
กระทบมีค่าเท่ากับ 50° 60° และ 70°



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์
วัน เดือน ปีเกิด	17 กุมภาพันธ์ 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	หมู่บ้านพฤษชลดา ประชาอุทิศ 90 899/459 ม.2 ต.บ้านคลองสวน จ.สมุทรปราการ 10290
ประวัติการศึกษา	2557 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.06 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2559 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.62 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร- ลาดกระบัง ทุนโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology Engineering, and Mathematics) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
ผลงานทางวิชาการ	1. D. Chittinan, S. Kamoldilok, S. Lekchaum. 2016. "Investigation on Loss of Hexagonal Arrangement in Holey Fiber." The 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS), Kyoto, Japan, March 29-31,. (Poster presentation) 2. D. Chittinan, T. Lertvanithphol, K. Seawsakul, P. Songsiriritthigul, P. Poolcharuansin, M. Horprathum and P. Buranasiri, 2019. "Spectroscopic Ellipsometry Study on Aluminium-Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared via DC Magnetron Sputtering and HiPIMS." Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 11142, Article No. OPTM-6-03. 3. D. Chittinan, P. Buranasiri, T. Lertvanithphol, P. Eiamchai, V. Patthanasettakul, C. Chananonnawathorn, S. Limwichean, N. Nuntawong, A. Klamchuen, P. Muthitamongkol, P. Limsuwan, P. Chindaudom, J. Nukeaw, H. Nakajima and M. Horprathum. 2019. "Observations of the Initial Stages on Reactive Gas-Timing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sputtered TaO Thin Films by Dynamic in situ Spectroscopic Ellipsometry.” *Optical Materials*, Vol. 92, pp. 223-232.

4. D. Chittinan, P. Buranasiri, T. Lertvanithphol, P. Eiamchai, K. Tantiwanichapan, A. Sathukarn, S. Limwichean, A. Klamchuen, T. Wutikhun, P. Limsuwan, H. Nakajima, W. Phae-ngam, N. Triamnak, M. Horprathum. 2023. “Tailoring the structural and optical properties of fabricated TiO₂ thin films by O₂ duty cycle in reactive gas-timing magnetron sputtering” *Vacuum*, Vol. 214, 11225.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้