

การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมด้วย
กระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการ
เคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ

A COMPARATIVE STUDY OF OMNIDIRECTIONAL ANTI-REFLECTION
SiO₂ NANOSTRUCTURES PREPARED BY ELECTRON-BEAM
EVAPORATION WITH GLANCING ANGLE DEPOSITION TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-030-028

การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมด้วย
กระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการ
เคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ

A COMPARATIVE STUDY OF OMNIDIRECTIONAL ANTI-REFLECTION
SiO₂ NANOSTRUCTURES PREPARED BY ELECTRON-BEAM
EVAPORATION WITH GLANCING ANGLE DEPOSITION TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A COMPARATIVE STUDY OF OMNIDIRECTIONAL ANTI-REFLECTION
SiO₂ NANOSTRUCTURES PREPARED BY ELECTRON-BEAM
EVAPORATION WITH GLANCING ANGLE DEPOSITION TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMUTL-2018-SC-M-030-028 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ

A comparative study of omnidirectional anti-reflection SiO₂ nanostructures prepared by electron-beam evaporation with glancing angle deposition technique

ชื่อนักศึกษา

นางสาวรัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์

รหัสประจำตัว

58605070

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

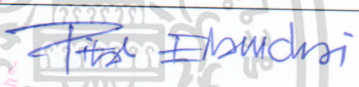


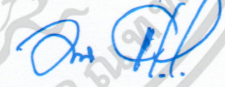
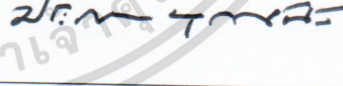
ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.มติ ห่อประทุม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
ดร.มติ ห่อประทุม กรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 20 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์
รหัสประจำตัว	58605070
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.มติ ห่อประทุม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพื่อเพิ่มสมบัติการส่องผ่านความยาวคลื่นแสงของกระจกในช่วงตามองเห็น โดยเริ่มจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1.22 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) จากการจำลองพบว่าโครงสร้างนาโนจะต้องมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 50 และ 60 นาโนเมตรตามลำดับ และทำการเคลือบที่ความหนาเท่ากับ 112 นาโนเมตร จากนั้นทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนโดยใช้กระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD) และเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) โดยทำการปรับเวลาในการเคลือบเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาทีเพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีความหนาแตกต่างกัน หลังจากนั้นตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) และ สเปกโตรสโกปีอิลิปโซเมทรี (Spectroscopic ellipsometry) จากผลการวิเคราะห์พบว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นสูงสุด เท่ากับ 94.4% และมีสมบัติป้องกันการสะท้อนรอบทิศทาง (Omnidirectional anti-reflection properties) ที่ดีที่สุดเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง

คำสำคัญ : การเคลือบแบบเอียงมุม การเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ เทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis สมบัติป้องกันการสะท้อนรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Comparative Study of Omnidirectional Anti-Reflection SiO ₂ Nanostructures Prepared by Electron-Beam Evaporation with Glancing Angle Deposition Technique
Student Name	Rattagan Prachachet
Student ID	58605070
Degree	Master of Science (Applied physics)
Department	Physics
Year	2018
Thesis Advisor	Asst Prof. Dr. Prathan Buranasiri
Thesis Co-advisor	Dr. Mati Horprathum

Abstract

In this research, we aim to develop a thin film of silicon dioxide (SiO₂) on a glass slide to increase light transmission of the glass slide in visible light region. We have first determined the refractive index and thickness of SiO₂ nanostructure performance using Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA). The results showed that the optimum refractive index and thickness are 1.22 and 112 nm, respectively. The diameter of the nanostructure and spacing between each individual nanostructure are 50 and 60 nm, respectively. Subsequently, the SiO₂ nanostructures with different morphologies including vertical align, slant, spiral and thin film were fabricated by electron beam evaporation with oblique angle deposition (OAD) and glancing angle deposition (GLAD) technique on the glass slide and silicon wafer substrate. The deposition time is varied from 9 to 42 min. The morphologies of the prepared samples were characterized by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM). The transmission and omnidirectional properties of the samples were investigated by UV-Vis-NIR spectrophotometer and variable angle spectroscopic ellipsometer (VASE). The results showed that the SiO₂ nanostructure with spiral-shape has the highest average luminous transmission and omnidirectional transmittance properties.

Keywords : oblique angle deposition, glancing angle deposition, silicon dioxide rigorous coupled-wave analysis, omnidirectional anti-reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุณศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยช่วยชี้แนะแนวทางในการวิจัยและแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.มติ ห่อประทุม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการชี้แนะแนวทางกระบวนการคิดทางด้านงานวิจัย แนวทางการแก้ไขปัญหา ข้อเสนอแนะและความช่วยเหลือทุกๆด้านในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.พิทักษ์ เอี่ยมชัย หัวหน้าห้องปฏิบัติการวิจัยฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจรูปลักษณ์วิทยานิพนธ์ และอนุญาตให้ผู้วิจัยเข้ามาใช้อุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย ได้แก่ กระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุน แผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) สเปกโตรโฟโตเมทรีและสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต

ขอขอบพระคุณ ดร.สกุลกานต์ บุญเรือง สำหรับการให้ความรู้และให้คำปรึกษาในการใช้เทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA)

ขอขอบพระคุณนักวิจัยภายในห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสง (Optical thin films laboratory) ได้แก่ คุณวิยะพล พัฒนะเศรษฐกุล คุณศักดิ์ศรีณ ลีวิเชียร และคุณชนันธร ชนนนวรรที่ ให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษา และคอยให้ความรู้และความช่วยเหลือต่างๆระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

ขอขอบคุณนางสาวเบญจรงค์ สำราญสุขเสมอ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้กระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

ขอขอบคุณ ดร.ทศพร เลิศวนิชผล ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจวัดสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเทคนิค สเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสงที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวประชาเชษฐ์ ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

นางสาวรัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการของแสง.....	4
2.1.1 ธรรมชาติของแสง.....	4
2.1.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.1.3 ค่าดัชนีเชิงซ้อนของวัสดุ	8
2.1.4 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านรอยต่อของวัสดุ ...	10
2.1.5 การแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางเดี่ยว	14
2.1.6 โพลาริเซชันของแสง	16
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน	18
2.2.1 เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณฟิล์มป้องกันการสะท้อน	21
2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์	23
2.4 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	24
2.5 การเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	25
2.6 การเคลือบฟิล์มบางแบบใช้ไอออนช่วย	26
2.7 การก่อเกิดฟิล์ม	26
2.7.1 การเคลือบฟิล์มแบบเอียงมุม	28
2.7.2 การเคลือบฟิล์มแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 การเตรียมสารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง	32
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33

3.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่องผ่านแสงของกระจก ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	33
3.3.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์.....	35
3.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	49
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่องผ่านแสงของกระจก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
4.1.1 การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน .	50
4.1.2 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม.....	53
4.2 การศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน	55
4.2.1 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอน.....	57
4.2.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD).....	63
4.2.3 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและ หมุนแผ่นรองรับ (GLAD).....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่องผ่านแสงของกระจก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	87
5.1.1 การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน .	87
5.1.2 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม.....	87
5.2 การศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน	88
4.2.1 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอน.....	87
5.2.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD).....	88
5.2.3 การเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและ หมุนแผ่นรองรับ (GLAD).....	88
5.3 ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก..... 95
 ประวัติผู้เขียน..... 97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงเงื่อนไขในการทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยลำโพงของก๊าซอาร์กอน.....	41
3.2 แสดงการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์โดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสาร ด้วยลำอิเล็กตรอน.....	42
4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ย ในช่วงตามองเห็น และค่าดัชนีหักเหของผลเฉลี่ยในปริมาตรของชั้นฟิล์ม ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ทำการปรับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน	52
4.2 แสดงสภาวะในการเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีเงื่อนไขต่างกัน.....	57
4.3 แสดงการกำหนดชื่อเงื่อนไขการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและ การตอบสนองต่อโพลาไรเซชันของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียง	67
4.4 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็นของโพลาไรเซชัน ชนิด S และ P	69
4.5 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็นของโพลาไรเซชัน ชนิด S และ P เมื่อทำการหมุนตัวอย่าง 90 องศา.....	69
4.6 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น ที่มุมตกกระทบต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 80 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.3 แสดงแสงตกกระทบพื้นผิวรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน	8
2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน ก) ตัวกลางโปร่งแสง $k = 0$ และ ข) ตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง $k > 0$	9
2.5 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน	10
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r_s r_p t_s และ t_p กับมุมตกกระทบของรอยต่อผิวตัวกลาง ระหว่างอากาศ ($n_1 = 1$) และแก้ว ($n_2 = 1.5$)	11
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_s R_p T_s และ T_p กับมุมตกกระทบของรอยต่อ ผิวตัวกลางระหว่างอากาศ ($n_1 = 1$) และแก้ว ($n_2 = 1.5$)	12
2.8 (ก) แสดงเส้นทางเดินแสงเมื่อแสงตกกระทบฟิล์มบางชั้นเดียว (ข) แสดงเส้นทางเดินแสงเมื่อแสงตกกระทบฟิล์มบางชั้นเดียวบนแผ่นรองรับ	14
2.9 แสดงสัญลักษณ์ของ (ก) แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและ (ข) แสงไม่โพลาไรซ์	17
2.10 โพลาไรเซชันชนิด S และ (ข) โพลาไรเซชันชนิด P	17
2.11 แสดงแสงที่ตกกระทบลงบนฟิล์มบางที่เคลือบไว้บนกระจก	19
2.12 แสดงโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์	24
2.13 ภาพแสดงการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	25
2.14 แสดงขั้นตอนการเกิดฟิล์ม	27
2.15 (ก) การเคลือบฟิล์มบางแบบทั่วไป และ (ข) การเคลือบแบบเอียงมุม	28
2.16 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ shadow effect และ ad-atom Diffusion ของการเคลือบด้วยเทคนิค OAD	28
2.17 (ก) การเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ เอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ (ข) ปรากฏการณ์บดบังของอนุภาคสารเคลือบ ระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบ ทุกทิศทาง	30
2.18 (ก) ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งเกลียว และ (ข) ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรง	30
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	33
3.2 แบบจำลองทางกายภาพของแท่งนาโนซิลิกอนไดออกไซด์จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ การส่องผ่านแสงด้วยเทคนิค RCWA	34
3.3 ส่วนประกอบภายในหน้าต่างการใช้งานในการคำนวณการส่องผ่านแสงด้วย เทคนิค RCWA	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เครื่องเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ
เอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) ภายใต้ระบบสุญญากาศ
(ก) เครื่องเคลือบฟิล์ม (ข) แผงควบคุมระบบและ (ค) อุปกรณ์ภายในเครื่องเคลือบ 36

3.5 แผนภาพการเตรียมชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์โดยกระบวนการเคลือบแบบ
ระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD
ภายใต้ระบบสุญญากาศ..... 37

3.6 แสดงแผนภาพการทำความสะอาดแผ่นรองรับภายนอกระบบสุญญากาศ 38

3.7 แสดงการติดแผ่นรองรับกับที่วางแผ่นรองรับ 39

3.8 แสดงสารเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ที่บรรจุลงไปในถ้วยหลอมสาร 39

3.9 แสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน 40

3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) 43

3.11 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผล 44

3.12 แสดงการปรับมุมของชิ้นงานเพื่อวัดสเปกตรัมทางแสงด้วย
สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ก) การวิเคราะห์การส่องผ่านแสงและโพลาไรเซชัน
(ข) การวิเคราะห์การส่องผ่านแสงรอบทิศทาง..... 45

3.13 แสดงเครื่องสเปกโตรสโคปอีลิปโซเมทรี 46

3.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนจากตัวกลาง 46

4.1 ภาพแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม (ก) การปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง
และ (ข) การปรับระยะห่างระหว่างแท่งนาโน 51

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง
ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง เมื่อทำการ
ปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน 51

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน
และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็น 52

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศ ดัชนีหักเห
ยังผลเฉลี่ยในปริมาตรและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็น 53

4.5 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้าง
นาโนแบบแท่งตรงที่ทำการปรับความหนา และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
และระยะห่างระหว่างแท่งนาโนคงที่..... 54

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง
ของชั้นฟิล์มที่ทำการปรับค่าความหนา 54

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าดัชนีหักเหยังผลเฉลี่ยในปริมาตร
และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็น 55

4.8 (ก) Sub-Wavelength Structure และ (ข) คุณสมบัติ Gradient refractive index 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9	(ก-จ) แสดงภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน	58
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิภายในระบบ	59
4.11	แบบจำลองทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์	59
4.12	การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่เวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที	60
4.13	(ก) การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิคสเปคโตรสโคปิคอิลิปโซเมทรีและ FE-SEM (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่มีความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร	61
4.14	(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P.....	62
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา กับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร	63
4.16	(ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิวจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงที่ทำการปรับเวลาในการเคลือบ	64
4.17	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ความหนาของชั้นฟิล์มและความยาวของแท่งนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ และ (ข) การเกิดปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว	65
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอุณหภูมิสะสมภายในระบบ	65
4.19	(ก) แบบจำลองปรากฏการณ์ที่ทำให้พื้นผิวของแท่งนาโนที่อยู่ติดกันชนกันแล้วเกิดการแยกตัวอย่างชัดเจน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับมุมการเอียงของแท่งนาโนที่กระทำกับเส้นตั้งฉากของระนาบแผ่นรองรับ	66
4.20	(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P และ (ค) ภาพแสดงการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่มีแนวโพลาริเซชันต่างกัน.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.21	(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P และ (ค) ภาพแสดงการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่แนวโพลาริเซชันต่างกัน เมื่อทำการหมุนฟิล์ม 90 องศา.....	70
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร (ก) ไม่หมุนตัวอย่าง และ (ข) หมุนตัวอย่าง 90 องศา.....	71
4.23	(ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ทำการปรับเวลาในการเคลือบ.....	72
4.24	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิสะสมภายในระบบ และ (ข) ภาพจำลองอุณหภูมิสะสมภายในระบบที่ส่งผลต่อการจำกัดการแพร่ของอะตอมสารเคลือบ.....	73
4.25	(ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวที่ทำการปรับเวลาในการเคลือบ.....	74
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิภายในระบบ.....	75
4.27	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและความหนาของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน.....	75
4.28	การปรับมุมระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแผ่นรองรับที่ส่งผลต่อความหนาและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์ม (ก) การเคลือบฟิล์มบางแบบทั่วไป และ (ข) การเคลือบแบบเอียงมุม.....	76
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว.....	77
4.30	แบบจำลองทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว.....	78
4.31	การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงเมื่อเวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.32	การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวเมื่อเวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที	80
4.33	การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิคสเปกโตรสโคปิก อีลิปโซเมทรีและ FE-SEM ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน (ก) แบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว.....	81
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและค่าดัชนีหักเหกับช่องว่างของอากาศ (Void) ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว	82
4.35	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P และการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน (ก) แบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว.....	83
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน (ก) แบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว.....	84
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสงมีบทบาทที่สำคัญกับมนุษย์เป็นอย่างมาก ดังที่เห็นโดยทั่วไปจากการเคลือบฟิล์มบางเชิงแสงเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านพลังงาน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เป็นชั้นส่งผ่านแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ การเคลือบเพื่อประยุกต์ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น หน้าจอแสดงผล การเคลือบลงบนกระจกเพื่อป้องกันหมอกฝ้าขณะฝนตกในอุตสาหกรรมรถยนต์ หรือการเคลือบลงบนเลนส์หรือกระจกเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating) เช่น ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ เลนส์กรองแสงและเลนส์แว่นตา [1] เป็นต้น โดยการออกแบบฟิล์มเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงนั้นจะทำการเคลือบฟิล์มบางเดี่ยวหรือเคลือบระบบฟิล์มบางหลายชั้นลงบนกระจก โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหและความหนาของชั้นฟิล์ม [2] แต่การเคลือบฟิล์มบางโดยทั่วไปชั้นฟิล์มจะมีความหนาแน่นสูงส่งผลให้มีค่าดัชนีหักเหสูงและสามารถป้องกันการสะท้อนแสงได้ดีที่สุดที่มุมตกกระทบเดี่ยวคือ มุมที่รังสีตกกระทบขนานกับเส้นปกติ (Normal incident) เท่านั้น เมื่อแสงเบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติจะเกิดการสะท้อนแสงมากขึ้นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์มุมบรูว์สเตอร์ (Brewster's angle) ดังนั้นปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาชั้นฟิล์มให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างนาโน (Nanostructures) เพื่อประยุกต์ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางป้องกันการสะท้อน เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหต่ำและมีคุณสมบัติป้องกันการสะท้อนของกระจก เมื่อแสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติ เรียกว่า การป้องกันการสะท้อนรอบทิศทาง (Omnidirectional anti-reflection) ส่งผลให้กระจกมีการส่งผ่านแสงที่สูงขึ้น โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการเคลือบส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โปร่งแสง ไม่นำไฟฟ้า ทนความร้อนได้ดี และมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าค่าดัชนีหักเหของแผ่นรองรับหรือกระจก ได้แก่ แมกนีเซียมฟลูออไรด์ (MgF_2) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) [3]

ปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุโปร่งใส ไม่นำไฟฟ้า มีราคาถูกและมีการส่งผ่านแสงในช่วงตามองเห็น (Visible range) สูง ซึ่งการเคลือบโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การเคลือบทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) ได้แก่ โซเจล (So-gel) [4] สปิน (Spin) [5] และกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical vapor deposition process; PVD) เช่น สเปตเตอริง (Sputtering) [6] และ วิธีระเหยสาร (Evaporation) [7] โดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (Oblique angle deposition; OAD) [8] และเทคนิคการเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ (Glancing-angle deposition; GLAD) [9] ร่วมด้วย สำหรับวิธีการเคลือบแบบระเหยสารโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากได้ชั้นฟิล์มบางที่มีความพรุนสูง อัตราการเคลือบสูง และสามารถควบคุมความหนาและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มได้ (Uniform) เป็นเทคโนโลยีสะอาดปราศจากสารเคมีปนเปื้อนซึ่งวัสดุสามารถยึดติดกับแผ่นรองรับได้ดี

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการศึกษาการออกแบบการเคลือบฟิล์มบางเดี่ยวซิลิกอนไดออกไซด์เอกสารนี้สำหรับฟิล์มป้องกันการสะท้อนจากการคำนวณและการศึกษาจากการจำลองลักษณะโครงสร้างทางไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter; d) ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน (Space; s) และความหนาของชั้นฟิล์ม (Thickness; t) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มโครงสร้างนาโนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Periodic) เพื่อศึกษาปัจจัยทางกายภาพและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลให้กระจกมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็นสูงที่สุดก่อนการเคลือบจริง จากนั้นทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD แล้วทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงเพื่อหาชั้นฟิล์มของโครงสร้างนาโนที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์สำหรับฟิล์มป้องกันการสะท้อนของกระจกในช่วงตามองเห็น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1) เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2.2) เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกลไกการเกิดชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD

1.2.3) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนของกระจก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1) ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค RCWA เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน

1.3.2) เตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD

1.3.3) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการเคลือบเพื่อป้องกันการสะท้อนของกระจก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) ทราบถึงหลักการและเข้าใจลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนที่ส่งผลต่อสมบัติการส่องผ่านแสงของกระจกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2) สามารถเตรียมชั้นฟิล์มและเข้าใจในกระบวนการเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD

1.4.3) มีความเข้าใจในหลักการวิเคราะห์และการใช้เครื่องมือ สามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.4) สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการทำวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนากระจกป้องกันการสะท้อนและนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงหรือเพิ่มการส่งผ่านความยาวคลื่นแสงของแผ่นรองรับนั้นพบว่า เงื่อนไขและวิธีการเตรียมจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเงื่อนไขในการเตรียมชั้นฟิล์ม โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของชั้นฟิล์มในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบ อีกทั้งทำการพัฒนาชั้นฟิล์มบางโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษา ลักษณะสมบัติโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์ม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเข้าใจถึงองค์ความรู้ด้วยหลักการทางด้านวิชาการ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปวิเคราะห์ผลและนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่อไป

2.1 หลักการของแสง

2.1.1 ธรรมชาติของแสง

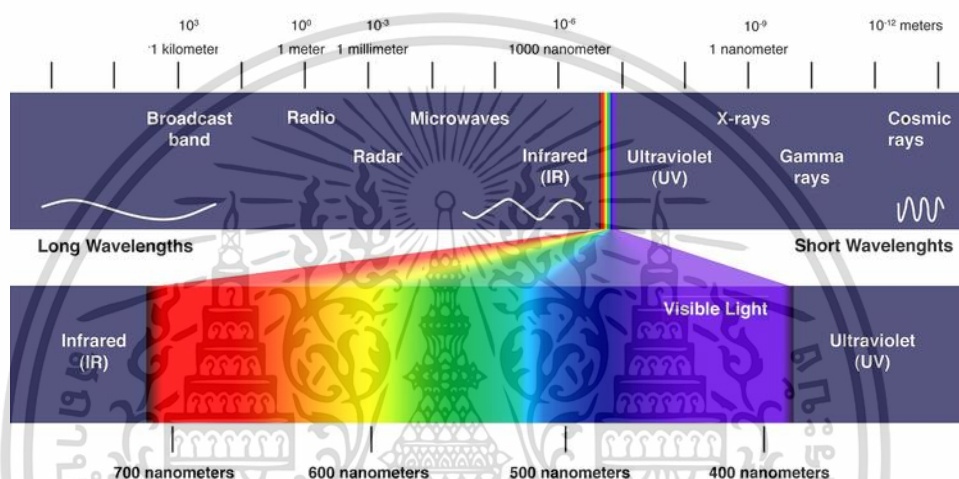
การอธิบายธรรมชาติของแสงนั้นมีทฤษฎีเกี่ยวกับแสง 2 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีคลื่นแสง (Wave Theory) เสนอโดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) ซึ่งเป็นคนแรกที่ทำการศึกษารี้วการเลี้ยวเบนของแสงสีต่างๆ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงขาวโดยฟิล์มบาง และคริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ได้นำทฤษฎีคลื่นแสงมาใช้ในการอธิบายกฎการสะท้อนและกฎการหักเห อีกทั้งยังใช้ในการอธิบายการหักเห 2 แนว (Double Reflection) และพบโพลาไรเซชันในผลึกแคลไซต์ ทฤษฎีต่อมาคือ ทฤษฎีอนุภาคแสง (Corpuscular Theory) ซึ่งเสนอโดย เซอร์ ไอแซค นิวตัน (Sir Isaac Newton) โดยเขามีชื่อเสียงโด่งดังเกี่ยวกับเรื่อง การกระจายแสง (dispersion) คือ แสงขาวประกอบด้วยแสงสีต่างๆ อนุภาคของแสงแต่ละสีสามารถกระตุ้นให้อิเทอร์ให้แผ่แสงนั้นออกไป เช่น แสงสีแดงเกิดจากอิเทอร์สั้นช้า และแสงสีม่วงเกิดจากอิเทอร์สั้นเร็ว ซึ่งอิเทอร์นั้นเป็นตัวกลางสมมติซึ่งสมัยนั้นเชื่อว่ามีอยู่ทุกหนแห่ง ต่อมา โทมัส ยังค์ (Thomus Yung) ได้พบปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงจากทฤษฎีคลื่นแสง จากนั้น ออกัสติน ยีน เฟรสเนล (Augustin Jean Fresnel) ได้นำการวิเคราะห์ของฮอยเกนส์ มาใช้ในการอธิบายการเลี้ยวเบนของแสงจากสลิตได้ และสามารถใช้สมบัติการเป็นคลื่นตามขวางของแสงที่เสนอโดยโทมัส ยังค์ ในการคำนวณหาแอมพลิจูดของแสงสะท้อนและแสงหักเหได้ถูกต้อง ดังนั้นจึงเป็นการสนับสนุนความเชื่อในทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่น และทำให้เสียงสนับสนุนทฤษฎีอนุภาคแสงของนิวตันลดลงไปอย่างมาก

ต่อมาได้มีการค้นพบใหม่ๆทางด้านความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็กกับแสง โดยไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) จากนั้นในปี ค.ศ.1831 – 1879 เจมส์ เคลิร์ก แมกเวลล์ (Jame Clerk Maxwell) ได้รวบรวมความรู้ทั้งหมดเกี่ยวกับไฟฟ้าและแม่เหล็กเป็นสมการคณิตศาสตร์และแสดงให้เห็นว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเขาสามารถคำนวณอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศในทอมค่าคงที่ของสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กของตัวกลางหรือเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (1) [10]

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \tag{2.1}$$

เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ
 ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ

ต่อมาเฮนริช รูดอล์ฟ เฮิร์ต (Heinrich Rudolf Hertz) ได้ทำการทดลองตรวจสอบพบว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจริงซึ่งโดยทั่วไปแล้วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยคลื่นในย่านความยาวคลื่นสั้น มากๆ (10^{-12} m) ซึ่งเรียกว่ารังสีแกมมา จนถึงระดับ 10^3 m ซึ่งเป็นย่านของคลื่นวิทยุ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [11]

ถึงแม้ว่าทฤษฎีคลื่นแสงสามารถอธิบายปรากฏการณ์เลี้ยวเบนและการแทรกสอดของคลื่นได้ดีแต่ยังใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างไม่ได้ เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) คือ ปรากฏการณ์ที่แสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงตกกระทบผิวโลหะแล้วมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของโลหะนั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดย อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้แนวคิดเกี่ยวกับโฟตอนจากงานวิจัยของ แมกซ์ คาร์ล เฮอร์นสต์ ลุดวิก แพลงค์ (Max Karl Ernst Ludwig Planck) เกี่ยวกับการเปล่งแสงจากวัตถุดำ โดยกล่าวว่า แสงประกอบด้วยกลุ่มก้อนของพลังงานเรียกหนึ่งก้อนพลังงานนั้นว่า โฟตอน โดยสามารถหาค่าพลังงานของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.2)

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda_0} \tag{2.2}$$

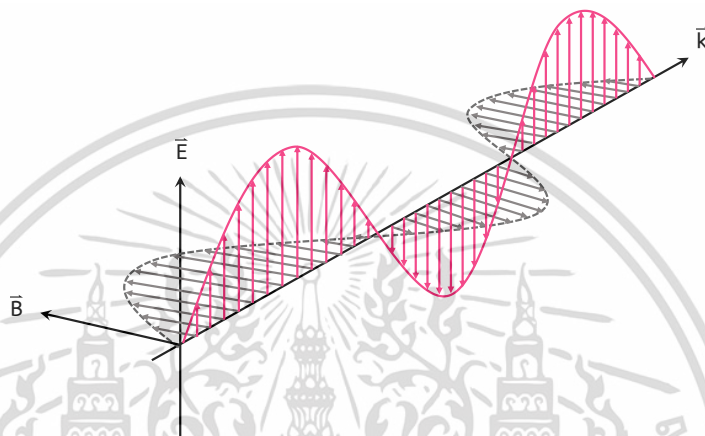
เมื่อ E คือ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
 h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์
 f คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ c คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

λ_0 คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

2.1.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยทั่วไปแสงในธรรมชาติมีสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค หากพิจารณาสมบัติการเป็นคลื่นของแสงจะเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย สนามแม่เหล็ก (Magnetic field; \vec{B}) และสนามไฟฟ้า (Electric field; \vec{E}) ที่สั่นในทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$) ตามเวกเตอร์คลื่น (\vec{k}) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) และสรุปเป็นทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ [12] โดยมีสมการทั่วไปในรูปอนุพันธ์ย่อย 4 สมการหลัก ดังสมการที่ (2.3-2.6)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

เมื่อ \vec{D} คือ สนามการกระจัด

ρ คือ ความหนาแน่นประจุ

\vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก

\vec{E} คือ สนามไฟฟ้า

\vec{J} คือ ความหนาแน่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ

μ_0 คือ สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ

เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา เมื่อพิจารณาสมการแมกซ์เวลล์จากสมการที่ (2.3-2.6) สำหรับกรณี
ที่ตัวกลางเป็นสุญญากาศซึ่งไม่มีประจุไฟฟ้า ($\rho = 0$) ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.10)$$

เมื่อ \vec{H} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ
จากสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

และจากสมการ (2.8) สามารถแสดงผลเฉลยได้ดังนี้

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

และจากผลเฉลยรูปคลื่นในรูปทั่วไปของสมการสำหรับพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายใน
ในแนวแกน z เป็น

$$\varphi = A \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (2.13)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดของคลื่น

ω คือ ความถี่เชิงมุม

k คือ เลขคลื่น

และ δ คือ เฟสของคลื่น

ดังนั้นจะได้ผลเฉลยของสมการสำหรับพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในดังนี้

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - Kz + \delta) \quad (2.14)$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - Kz + \delta) \quad (2.15)$$

เมื่อ E_0 คือ กำลังสองของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและ B_0 คือ กำลังสองของแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.16)

$$E_0 = cB_0 \quad (2.16)$$

ซึ่งจากสมการคลื่นที่ (2.14) และ (2.15) นี้สามารถเปลี่ยนรูปโดยใช้ Euler's formula

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta); (i = \sqrt{-1}) \quad (2.17)$$

ดังนั้นสามารถจัดรูปของสมการคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ

$$E = E_0 e^{[i(\omega t - Kz + \delta)]} \quad (2.18)$$

$$B = B_0 e^{[i(\omega t - Kz + \delta)]} \quad (2.19)$$

2.1.3 ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของวัสดุ

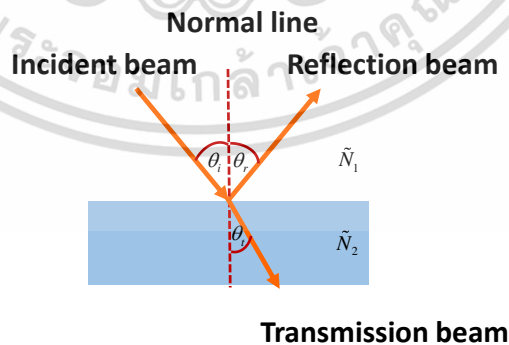
เมื่อแสงตกกระทบและเคลื่อนที่ถึงพื้นผิวรอยต่อระหว่างอากาศกับวัสดุ ดังรูปที่ 2.3 แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางเดิม (\tilde{N}_1) และแสงบางส่วนเคลื่อนที่เข้าไปยังตัวกลางที่สอง (\tilde{N}_2) โดยมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลดลงโดยค่าดัชนีหักเหสามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังสมการที่ (2.20)

$$\tilde{N} = n + ik \quad (2.20)$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ

i คือ จำนวนจินตภาพ ($\sqrt{-1}$)



รูปที่ 2.3 แสดงแสงตกกระทบพื้นผิวรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน

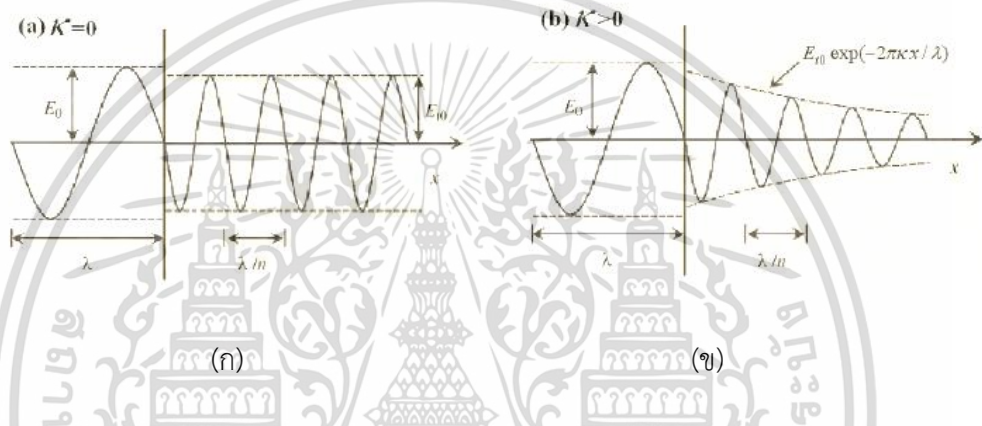
จากความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในตัวกลาง (v) ดังสมการที่ (2.21)

$$v = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{\kappa} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.18 เมื่อกำหนดให้ $v = f\lambda$ และ $\omega = 2\pi f$ จะได้สมการของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุโปร่งแสง

$$E = E_0 e^{i\left(\omega t - \frac{\omega \tilde{N}}{c} z + \delta\right)} = E_0 e^{i\left(\omega t - \frac{2\pi(n-ik)}{\lambda} z + \delta\right)} \quad (2.24)$$

$$E = E_0 e^{\left(-\frac{2\pi k}{\lambda} z\right)} e^{i\left(\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} z + \delta\right)} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน ก) ตัวกลางโปร่งแสง $k = 0$ และ ข) ตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง $k > 0$

จากรูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวกลาง พบว่า ความยาวคลื่นแสงจะมีค่าลดลงในตัวกลางใดๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแสงในอากาศ (สุญญากาศ) ซึ่งความยาวคลื่นแสงในตัวกลางมีค่าเท่ากับ λ/n เนื่องจากแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางด้วยความเร็วลดลง จากรูปที่ 2.4(ก) สำหรับตัวกลางที่มีลักษณะโปร่งแสง ($k = 0$) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุด้วยแอมพลิจูดคงที่โดยไม่มีการสูญเสียความเข้มแสง แต่สำหรับตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง ($k > 0$) ดังรูปที่ 2.4(ข) ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัตถุด้วยแอมพลิจูดลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ซึ่งไม่สามารถอธิบายด้วยอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวกลางเฉพาะค่าดัชนีหักเหเพียงค่าเดียวได้ ดังนั้นในตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสงนั้นจะต้องอธิบายในรูปของค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน (\tilde{N})

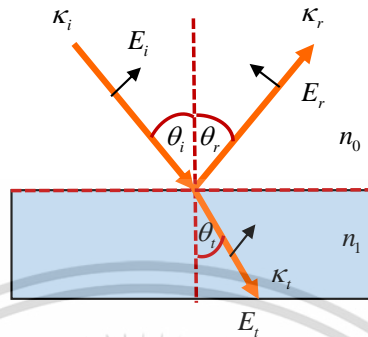
จากสมการที่ 2.25 สามารถนำมาหาความเข้มแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงดังสมการ 2.26

$$I = EE^* = E_0^2 e^{\left(-\frac{4\pi k}{\lambda} z\right)} = I_0 e^{(-\alpha z)} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การสะท้อนและการส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านรอยต่อของวัสดุ

ในกรณีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

จากกฎการสะท้อนที่กล่าวว่า มุมที่รังสีตกกระทบบเท่ากับมุมที่รังสีสะท้อน ดังสมการที่ (2.27)

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.27)$$

เมื่อ θ_i คือ มุมที่แสงตกกระทบบ
 θ_r คือ มุมที่แสงสะท้อน

จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบบและมุมหักเห ตามสมการ

$$n_0 \sin(\theta_i) = n_1 \sin(\theta_t) \quad (2.28)$$

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปในการพิจารณาแสงที่ตกกระทบบ สะท้อน และส่องผ่าน เมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลางในการเคลื่อนที่นั้นจะพิจารณาองค์ประกอบย่อยของสนามไฟฟ้า โดยแบ่งสนามไฟฟ้าในอยู่ในสองแกน คือ แกนขนานกับผิวระนาบตกกระทบบ (Parallel; P) และ แกนตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบบ (Senkrecht; S) จากสมการแมกเวลล์ ได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อน (r) และคลื่นส่องผ่าน (t) เมื่อเทียบกับคลื่นตกกระทบบดังนี้

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_0 \cos(\theta_i) - n_1 \cos(\theta_t)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \quad (2.29)$$

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_0 \cos(\theta_t)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \quad (2.30)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2n_0 \cos(\theta_i)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \quad (2.31)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2n_0 \cos(\theta_i)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \quad (2.32)$$

เมื่อ r_s คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบ

r_p คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบตกกระทบ

t_s คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบ

t_p คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบตกกระทบ

นอกจากนี้ สำหรับมุมตกกระทบที่เท่ากับศูนย์ ($\theta_i = \theta_t = 0$) สมการสามารถลดรูปได้เป็น

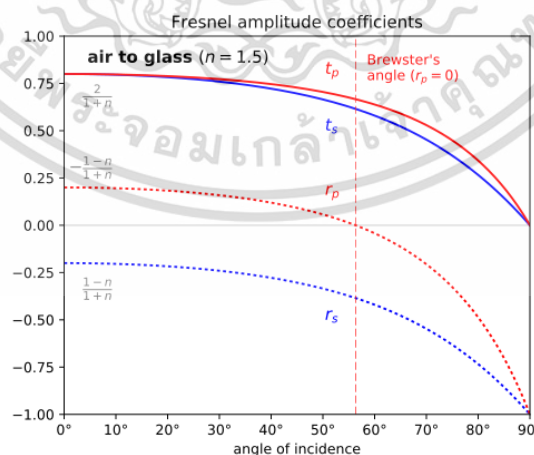
$$r_s = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2.33)$$

$$r_p = \frac{n_1 - n_0}{n_0 + n_1} \quad (2.34)$$

$$t_s = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (2.35)$$

$$t_p = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (2.36)$$

โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r_s r_p t_s และ t_p กับมุมตกกระทบของรอยต่อผิวตัวกลางระหว่างอากาศ ($n_1=1$) และกระจก ($n_2=1.5$) ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง r_s r_p t_s และ t_p กับมุมตกกระทบของรอยต่อผิวตัวกลางระหว่างอากาศ ($n_1=1$) และกระจก ($n_2=1.5$) [13]

การหาสัมประสิทธิ์กำลังงานของการสะท้อน (Power Reflection Coefficient; R) และสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่าน (Power Transmission Coefficient; T) สามารถหาได้จากจากสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด เนื่องจากกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรตามกำลังสองของแอมพลิจูด โดยสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนหาได้จากสมการ

$$R = |r_p r_p^*| = |r_s r_s^*| \quad (2.37)$$

ทำนองเดียวกันสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่านหาได้จากสมการ

$$T = |t_p t_p^*| = |t_s t_s^*| \quad (2.38)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.37) และ (2.38) จะได้ว่า

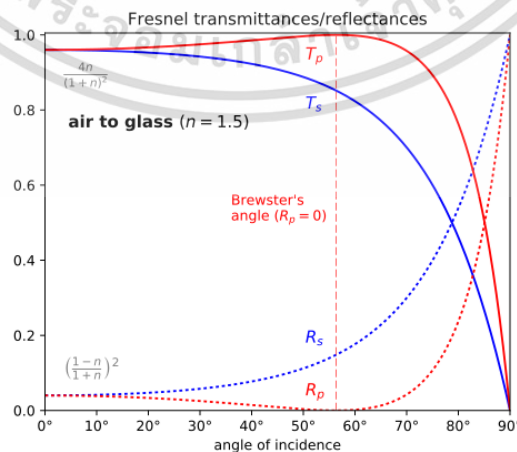
$$R_s = |r_s r_s^*| = \left(\frac{n_0 \cos(\theta_i) - n_1 \cos(\theta_t)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \right)^2 \quad (2.39)$$

$$R_p = |r_p r_p^*| = \left(\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_0 \cos(\theta_t)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \right)^2 \quad (2.40)$$

$$T_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i} \right) \left(|t_s t_s^*| \right) = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i} \right) \left(\frac{2n_0 \cos(\theta_i)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \right)^2 \quad (2.41)$$

$$T_p = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i} \right) \left(|t_p t_p^*| \right) = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i} \right) \left(\frac{2n_0 \cos(\theta_i)}{n_0 \cos(\theta_i) + n_1 \cos(\theta_t)} \right)^2 \quad (2.42)$$

จากสมการสัมประสิทธิ์กำลังงานของการสะท้อนและสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่านสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับการสะท้อนและการส่องผ่านความยาวคลื่นแสงซึ่งเคลื่อนที่จากอากาศที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1 ไปตกกระทบลงบนกระจกซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.5 แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_s R_p T_s และ T_p กับมุมตกกระทบของรอยต่อผิวตัวกลางระหว่างอากาศ ($n_1=1$) และแก้ว ($n_2=1.5$) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าทั้งสองแกน ได้แก่ แกนขนานกับผิวระนาบตกกระทบและแกนตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบ เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อน พบว่า มีสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนประมาณ 4% (0.04) ตั้งแต่มุมตกกระทบเท่ากับ 0° จนถึงมุมตกกระทบ 15° และมีสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนเพิ่มขึ้นเป็น 100% ที่มุมตกกระทบเท่ากับ 90° โดยที่มุมตกกระทบระหว่าง 15° ถึง 90° สนามไฟฟ้าแกนตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบจะสะท้อนได้ดีกว่าสนามไฟฟ้าแกนขนานกับผิวระนาบตกกระทบ และเมื่อพิจารณาที่มุม $59^\circ 36'$ จะไม่มีการสะท้อนของสนามไฟฟ้าแกนขนานกับผิวระนาบตกกระทบเลย เนื่องจากแสงทั้งหมดจะหักเหผ่านตัวกลาง ดังนั้นที่มุมตกกระทบนี้แสงที่สะท้อนจะมีเพียงสนามไฟฟ้าแกนตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบเท่านั้น [15] ซึ่งมุมตกกระทบนี้เรียกว่า มุมบรูว์สเตอร์ (Brewster's angle; θ_B) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.43

$$\tan(\theta_B) = \frac{n_1}{n_0} \quad (2.43)$$

สำหรับในกรณีที่มีมุมตกกระทบที่เท่ากับศูนย์ สัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนและสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่านสามารถสรุปได้ดังนี้

$$R_S = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (2.44)$$

$$R_P = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (2.45)$$

$$T_S = \left(\frac{2n_0}{n_0 + n_1} \right)^2 = \frac{4n_0}{(1 + n_0)^2} \quad (2.46)$$

$$T_P = \left(\frac{2n_0}{n_0 + n_1} \right)^2 = \frac{4n_0}{(1 + n_0)^2} \quad (2.47)$$

จากสมการกรณีที่มีมุมตกกระทบเท่ากับศูนย์ พบว่า สัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบเท่ากับสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบตกกระทบ ($R_S = R_P$) และสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่านของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบเท่ากับสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่องผ่านของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบตกกระทบ ($T_S = T_P$) และความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนและการส่องผ่าน ดังสมการที่ (2.48)

$$T + R + \alpha = 1 \quad (2.48)$$

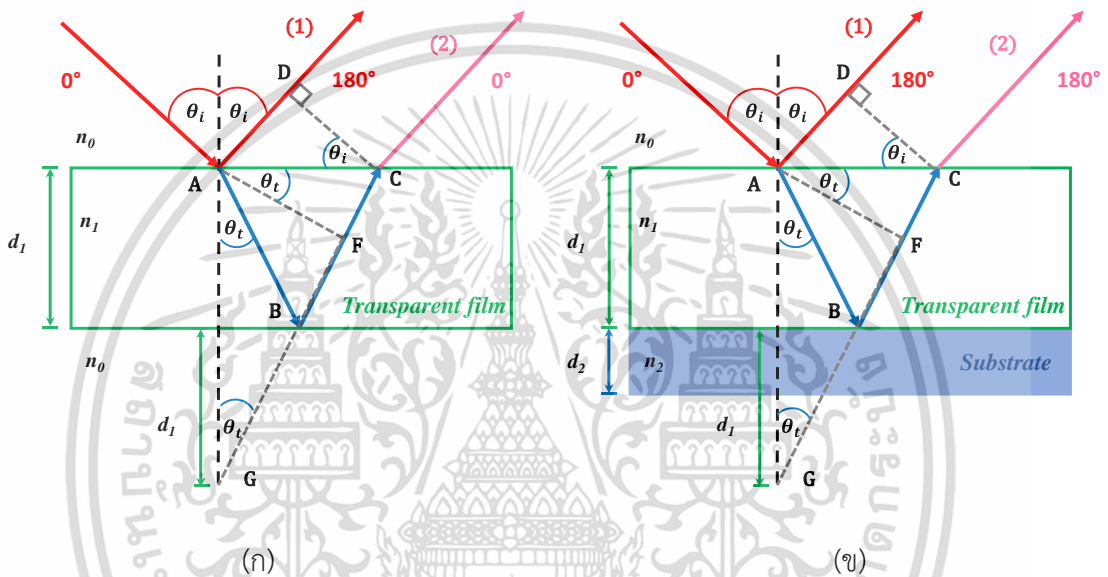
เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานของการดูดกลืนรังสีของวัสดุซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (λ) โดยที่วัสดุต่างชนิดกันการดูดกลืนแสงก็จะต่างกัน เนื่องจากการดูดกลืนแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางแต่ละชนิด แสดงดังสมการ

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.49)$$

จากการทดลองวัสดุที่เลือกใช้คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีสัมประสิทธิ์กำลังงานของการดูดกลืนรังสีของวัสดุน้อยมาก ซึ่งจะได้ $\alpha = 0$ สามารถเขียนสมการที่ 2.49 ได้เป็น

$$T + R = I \quad (2.50)$$

2.1.5 การแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางเดี่ยว



รูปที่ 2.8(ก) แสดงเส้นทางเดินแสงเมื่อแสงตกกระทบฟิล์มบางชั้นเดียว (ข) แสดงเส้นทางเดินแสงเมื่อแสงตกกระทบฟิล์มบางชั้นเดียวบนแผ่นรองรับ

พิจารณาฟิล์มบาง ($k = 0$) เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบบนรอยต่อระหว่างอากาศและฟิล์มบางที่จุด A ด้วยมุมตกกระทบ θ_i ดังรูปที่ 2.8(ก) จะเกิดการสะท้อนที่ผิวของรอยต่อด้วยมุมสะท้อน θ_i และส่องผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มแล้วตกกระทบกับรอยต่อระหว่างฟิล์มและแผ่นรองรับที่จุด B แล้วสะท้อนไปตามแนว BC แล้วส่องผ่านเข้าไปในอากาศไปรวมกับแสงสะท้อนที่ผิวบน เกิดการแทรกสอด โดยแสงที่สะท้อนที่รอยต่อของตัวกลางจะมีการเปลี่ยนเฟสไปจากแสงตกกระทบซึ่งขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มหรือวัสดุที่พื้นผิวรอยต่อตามเงื่อนไข 2 ประการดังนี้ [10]

1. แสงสะท้อนกลับเฟสเท่ากับ 180° หรือ π เรเดียน เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า
2. แสงสะท้อนไม่กลับเฟส เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่า

ดังนั้นแสงที่สะท้อนจากผิวของรอยต่อที่จุด A กับแสงที่ส่องผ่านออกมาที่จุด C จะมีเฟสต่างกัน (Optical phase different; δ) มีเฟสเริ่มต้นต่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ เนื่องจากแสงจากลำแสงทั้งสองมีทางเดินทัศน (Optical path; L) โดยสามารถหาผลต่างทางเดินทัศน (Optical path length; ΔL) จากสมการ

$$\Delta L = n_1(AB + BC) - \left(AD + \frac{\lambda}{2}\right) \quad (2.51)$$

จากกฎของสเนลล์ $n_0 \sin(\theta_i) = n_1 \sin(\theta_t)$ (2.52)

จะได้ $(1) \frac{AD}{AC} = n_1 \frac{FC}{AC}$

$$AD = n_1(FC) \quad (2.53)$$

แทนค่าสมการ (2.53) ในสมการที่ (2.51) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta L &= n_1(AB + BC) - n_1(FC) - \frac{\lambda}{2} \\ &= n_1(AB + BC - FC) - \frac{\lambda}{2} \\ &= n_1(AB + BF) - \frac{\lambda}{2} \\ &= n_1(GF) - \frac{\lambda}{2} \\ \Delta L &= n_1(2t_1 \cos \theta_t) - \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

จากสมการรีฟlectionแทรกสอดของแสงเป็นริ้วสว่างและริ้วมืด ดังสมการที่ (2.55) และ (2.56) ตามลำดับ

$$r_1 - r_2 = m\lambda \quad (\text{ริ้วสว่าง}) \quad (2.55)$$

$$r_1 - r_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{ริ้วมืด}) \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.55) และ (2.56) เมื่อนำมาใช้กับสมการ (2.54) จะได้ดังนี้

$$2n_1 t_1 \cos \theta_t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{ริ้วสว่าง}) \quad (2.57)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$2n_1 t_1 \cos \theta_t = m\lambda \quad (\text{ริ้วมืด}) \quad (2.58)$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.57) และ (2.58) ในกรณีฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนกระจกดังรูปที่ 2.8(ข) จะส่งผลให้รังสีที่ (1) และ (2) มีเฟสเริ่มต้นตรงกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.54) จะมีผลต่างทางเดินที่ศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (2.59)

$$\Delta L = n_1 (2d \cos \theta_i) \quad (2.59)$$

ดังนั้นจะทำให้ได้เงื่อนไขของการแทรกสอดแสงดังนี้

$$2n_1 t_1 \cos \theta_i = m\lambda \quad (\text{ริ้วสว่าง}) \quad (2.60)$$

$$2n_1 t_1 \cos \theta_i = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{ริ้วมืด}) \quad (2.61)$$

และจากความสัมพันธ์ของเฟสที่ต่างกันกับผลต่างทางเดินที่ศูนย์

$$\delta = k_0 \Delta L \quad (2.62)$$

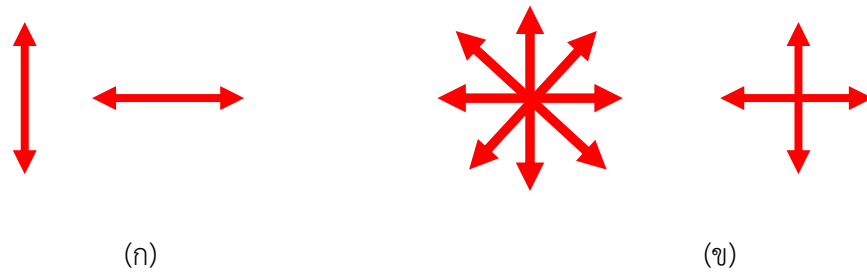
จากผลต่างทางเดินที่ศูนย์ของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกจากสมการ (2.59) แทนลงในสมการ (2.62) และ $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้สมการความต่างเฟสของแสงในฟิล์มบางเดียว (δ_1) ดังสมการ (2.63)

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (2n_1 t_1 \cos \theta_i) \quad (2.63)$$

$$\beta = \frac{\delta_1}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 t_1 \cos \theta_i) \quad (2.64)$$

2.1.6 โพลาริเซชันของแสง

การโพลาริเซชันเป็นสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณาองค์ประกอบย่อยของสนามไฟฟ้า โดยแบ่งสนามไฟฟ้าให้อยู่ในสองแกน คือ แกนขนานกับผิวระนาบตกกระทบ (P) และ แกนตั้งฉากกับผิวระนาบตกกระทบ (S) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.4 ซึ่งโพลาริเซชันเป็นปัจจัยพื้นฐานของแสงที่บ่งบอกถึงทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าที่เป็นระเบียบและมีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งถ้าสนามไฟฟ้าของแสงมีการแกว่งในระนาบใดระนาบหนึ่ง จะเรียกว่าโพลาริเซชันเชิงเส้นหรือแสงโพลาริเซชันเชิงระนาบ (Linear or plane polarized light) แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีทิศทางการแกว่งในทิศทางต่างกันและมีเฟสต่างกันอย่างสุ่ม เรียกว่า แสงไม่โพลาริเซชันหรือแสงโพลาริเซชันแบบสุ่ม (Unpolarized light or random unpolarized light) แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของ (ก) แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและ (ข) แสงไม่โพลาไรซ์

เมื่อสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบบนพื้นผิวซึ่งถ้าสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบมีการแกว่งในทิศตั้งฉากกับระนาบแสงตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีทิศการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ชนิด S (S-polarized light) และถ้าสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบมีการแกว่งในทิศขนานกับระนาบแสงตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีทิศการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ชนิด P (P-polarized light) โดยสามารถแสดงสัญลักษณ์ของ โพลาไรซ์ชนิด S และ P ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10(ก) โพลาไรซ์ชนิด S และ (ข) โพลาไรซ์ชนิด P

โดยทั่วไปสามารถทำให้สนามไฟฟ้า (แสงไม่โพลาไรซ์) เป็นแสงโพลาไรซ์ได้ 4 วิธี ได้แก่

1. การสะท้อน (Reflection)
2. การดูดกลืน (Absorption or Dichroism)
3. วัสดุที่สมบัติ Double refraction หรือ Birefringence
4. การกระเจิง (Scattering)

ในกรณีของการสะท้อนได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.3 โดยในงานวิจัยนี้จะขออธิบายในส่วน ของวัสดุที่สมบัติ Double refraction หรือ Birefringence ที่เกี่ยวกับงานวิจัย

วัสดุที่มีสมบัติ Double refraction หรือ Birefringence คือ ผลึกที่ส่วนใหญ่จะใช้ทางด้าน ทัศนศาสตร์ (Optical material) ได้แก่ Calcite (CaCO_3) และ Quartz (SiO_2) เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้ เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกไม่สมมาตร (Anisotropic) คือ อะตอมในผลึกมีการเรียงตัวที่ต่างกันในแต่ละ ทิศทาง ส่งผลให้ความเร็วของแสงในผลึกมีค่าไม่เท่ากันซึ่งขึ้นกับทิศทางและแนวโพลาไรซ์ของแสง โดยการที่ความเร็วของแสงในผลึกมีค่าไม่เท่ากันนั้นหมายความว่า ค่าดัชนีหักเหของผลึกในแนวขนาน และแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าของแสงมีค่าต่างกัน คือ มีดัชนีหักเหค่าหนึ่งสำหรับสนามไฟฟ้าของแสง ที่แกว่งในแนวตั้งฉากและมีดัชนีหักเหเป็นอีกค่าหนึ่งสำหรับสนามไฟฟ้าของแสงที่แกว่งในแนวขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปโพลาไรเซชันของแสงสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) และ โพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptical polarization) โดยมีรูปแบบของสมการสนามไฟฟ้าลัพท์เป็น

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2.65)$$

เมื่อ E_{0x} คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน x

E_{0y} คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน y $\delta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi, \dots$

$\delta = \delta_p - \delta_s$ คือ เฟสสัมพัทธ์ (relative phase)

จากสมการ (2.65) แสดงให้เห็นว่าลักษณะโพลาไรเซชันของแสงขึ้นอยู่กับเฟสสัมพัทธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าทั้ง 2 แกน และแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ แกน y ซึ่งจากสมการสามารถจำแนกโพลาไรเซชันของแสงได้เป็น 3 ชนิด ข้างต้นดังนี้

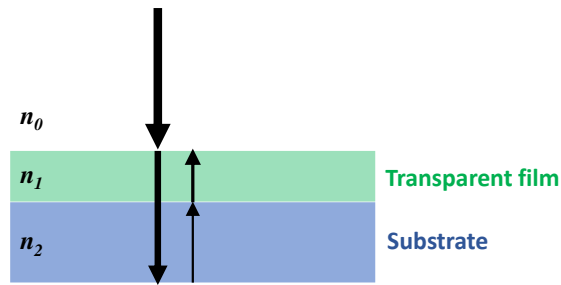
1. $\delta = n\pi = 0, \pi, 2\pi$ สนามไฟฟ้าลัพท์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots$

2. $\delta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$ สนามไฟฟ้าลัพท์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลม เมื่อ $E_{0x} = E_{0y}$ โดยถ้า $\delta = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \frac{9\pi}{2}, \dots$ จะเป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counterclockwise circular polarization) แต่ถ้า $\delta = \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{2}, \frac{11\pi}{2}, \dots$ จะเป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลมหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise circular polarization)

3. δ ไม่เป็น $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi, \dots$ คือ กรณีนอกเหนือจากที่กล่าวมาจะเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน

การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนนิยมเคลือบลงบนผิวของแผ่นรองรับที่เป็นกระจกหรือแผ่นรองรับที่มีความโปร่งใส เพื่อป้องกันการสะท้อนหรือเพิ่มสมบัติการส่องผ่านความยาวคลื่นแสงของแผ่นรองรับ โดยสามารถแสดงรูปภาพเมื่อแสงตกกระทบเป็นมุม $\theta_i = 0$ ของชั้นฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจกได้ดังรูปที่ 2.11 [10]



รูปที่ 2.11 แสดงแสงที่ตกกระทบลงบนฟิล์มบางที่เคลือบไว้บนกระจก

จากสภาพสะท้อน (ρ) และสภาพส่งผ่าน (τ) ที่สัมพันธ์กันดังสมการ

$$\rho + \tau = 1 \quad (2.66)$$

เมื่อสภาพสะท้อนของฟิล์มบางเดี่ยวแสดงดังสมการ (2.67)

$$\rho = \frac{n_1^2 (n_2 - n_0)^2 \cos^2 \frac{1}{2} \delta_1 + (n_1^2 - n_0 n_2)^2 \sin^2 \frac{1}{2} \delta_1}{n_1^2 (n_2 + n_0)^2 \cos^2 \frac{1}{2} \delta_1 + (n_1^2 + n_0 n_2)^2 \sin^2 \frac{1}{2} \delta_1} \quad (2.67)$$

และสภาพส่งผ่าน (τ) ของฟิล์มบางเดี่ยวแสดงดังสมการ (2.68)

$$\tau = \frac{4n_1^2 n_0 n_2}{n_1^2 (n_2 + n_0)^2 - (n_2^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_0^2) \sin^2 \frac{1}{2} \delta_1} \quad (2.68)$$

จากสมการสภาพสะท้อน (ρ) และสภาพส่งผ่าน (τ) ของชั้นฟิล์มบางเดี่ยวนั้นจะเห็นว่ามีค่าขึ้นกับค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มและแผ่นรองรับและจากสมการความต่างเฟส (δ_1) ในสมการที่ (2.63) สามารถพิจารณาใน 2 กรณีดังนี้

1. เมื่อความต่างเฟสเป็นเลขจำนวนเต็มคู่ของ π หรือริ้วสว่าง ($\delta_1 = 2m\pi$)

$$\frac{2\pi}{\lambda} (2n_1 t_1 \cos \theta_1) = 2m\pi \quad (2.69)$$

$$2n_1 t_1 \cos \theta_1 = m\lambda$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

ถ้าแสงตกตั้งฉาก $\theta_1 = 0$ ดังนั้นความหนาของฟิล์มที่ทำให้เกิดริ้วสว่างเป็น

$$t_1 = \frac{\lambda}{2n_1} ; m = 1 \quad (2.70)$$

โดยมีสภาพสะท้อน ดังสมการ

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_0}{n_2 + n_0} \right)^2 \quad (2.71)$$

2. เมื่อความต่างเฟสเป็นเลขจำนวนเต็มคี่ของ π หรือ ริ้วมืด $\delta_1 = (2m+1)\pi$

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda}(2n_1 t_1 \cos\theta_1) &= (2m+1)\pi \\ 2n_1 t_1 \cos\theta_1 &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \end{aligned} \quad (2.72)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$

ถ้าแสงตกตั้งฉาก $\theta_1 = 0$ ดังนั้นความหนาของฟิล์มที่ทำให้เกิดริ้วมืดเป็น

$$t_1 = \frac{\lambda}{4n_1}; m = 0 \quad (2.73)$$

โดยมีสภาพสะท้อน ดังสมการ

$$\rho = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (2.74)$$

ในการเคลือบฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนเพื่อเพิ่มการส่องผ่านแสงของแผ่นรองรับนั้นสามารถออกแบบเพื่อให้เกิดสภาพสะท้อนน้อยที่สุดจนเป็นศูนย์ได้โดยเลือกค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มและแผ่นรองรับ เช่น กระฉก ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถหาค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มได้จากสมการ (2.74) กำหนดให้ $\rho = 0$ จะได้

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (2.75)$$

เมื่อ n_0 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศ

n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม

n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของแก้วหรือแผ่นรองรับ

จากสมการ (2.75) เรียกว่า เงื่อนไขของสตรอง (Strong's Condition) เป็นเงื่อนไขที่ไม่มีแสงสะท้อน คือ แสงสามารถส่องผ่านไปได้อย่างหมด 100% [10] ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหแสงในกรณีของเงื่อนไขที่ไม่มีแสงสะท้อนที่ความยาวคลื่นที่พิจารณาเพียงค่าเดียวเท่านั้น โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ ฟิล์มบางจะต้องมีความหนาเชิงทัศน (Optical thickness; t_1) ดังสมการ

$$t_1 = \frac{\lambda}{4n_1}, \frac{3\lambda}{4n_1}, \frac{5\lambda}{4n_1}, \dots, (2m-1) \frac{\lambda}{4n_1} \quad (2.76)$$

ซึ่งจะทำให้เกิดเงื่อนไขการแทรกสอดแบบหักล้างเมื่อแสงตกกระทบที่พื้นผิวของฟิล์มบาง โดยแสงที่ตกกระทบจะต้องตกตั้งฉากกับผิวของฟิล์มบาง และมีความต่างเฟสของแสงในฟิล์ม (δ_1) ต้องเป็นเลขจำนวนเต็มคี่ของ π ดังสมการที่ (2.77)

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_1 t_1 = \pi, 3\pi, \dots, (2m-1)\pi \quad (2.77)$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

และ δ_1 คือ ความต่างเฟสของแสงในฟิล์ม

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในอากาศ

n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม

t_1 คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม

จะเห็นว่าการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนเพื่อเพิ่มการส่องผ่านแสงของแผ่นรองรับนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยที่สำคัญ คือ

1. ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มและแผ่นรับ ที่ส่งผลต่อสภาพสะท้อน

2. ความหนาของฟิล์มที่ส่งผลต่อต่างเฟสของแสงในฟิล์มที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบ

หักล้าง

2.2.1 เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณฟิล์มป้องกันการสะท้อน

ในการเคลือบชั้นฟิล์มบางเดี่ยวสำหรับฟิล์มป้องกันการสะท้อนเพื่อเพิ่มสมบัติการส่องผ่านความยาวคลื่นแสงนั้น สามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มกับแผ่นรองรับ และความหนาของชั้นฟิล์มจากการคำนวณที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในสมการที่ (2.75) และ (2.76) จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้แผ่นรองรับเป็นกระจกมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.5 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มจะต้องมีค่าเท่ากับ 1.22 แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัสดุใดที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.22 ดังนั้นเพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.22 สามารถทำได้โดยการเคลือบชั้นฟิล์มโครงสร้างนาโนที่มีความพรุนสูงซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มต่ำลง โดยในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าดัชนีหักเห การสะท้อนและการส่องผ่านแสงของฟิล์มป้องกันการสะท้อนที่มีโครงสร้างนาโนนั้นไม่สามารถใช้สมการของเฟรสเนลเพียงอย่างเดียวในการอธิบายได้จะต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากเทคนิคอื่นๆมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่ Effective medium theory (EMT), Transfer matrix method (TMM), Rigorous coupled wave analysis (RCWA), Finite element method (FEM) โดยแต่ละวิธีจะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิด ขนาด และรูปร่างของวัสดุ โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ฟิล์มป้องกันการสะท้อน 2 วิธี คือได้แก่ Effective medium theory (EMT) และ Rigorous coupled wave analysis (RCWA)

2.2.1.1 เทคนิค Effective medium theory (EMT) [16]

EMT คือ เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตร (Effective refractive index; n_{eff}) ของ Sub-wavelength structure (SWS) ที่มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุสารเคลือบที่มากกว่า 1 ชนิด ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริก เพื่อการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตรเท่านั้น ไม่สามารถบ่งบอกถึงรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของ Sub-wavelength structure ได้ แสดงได้ดังสมการที่ (2.78) และ (2.79)

$$\frac{1}{\epsilon_{upp}} = \frac{(1-f_x)}{\epsilon_1} + \frac{f_x}{f_y \epsilon_2 + (1-f_y) \epsilon_1} \quad (2.78)$$

$$\epsilon_{low} = (1-f_g) \epsilon_1 + f_y \left[f_x / \epsilon_2 + (1-f_x) / \epsilon_1 \right]^{-1} \quad (2.79)$$

เมื่อ ϵ_{upp} คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (วัสดุสารเคลือบ)

ϵ_{low} คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ (อากาศ)

ϵ_{eff} คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตรระหว่าง ϵ_{upp} กับ ϵ_{low}

ϵ_1 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศ

ϵ_2 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของแผ่นรองรับ

f_x และ f_y คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุกับอากาศในแนวแกน x และ y

ต่อมาได้มีการนำหลักการพื้นฐานของ EMT มาจัดรูปแบบสมการใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตร เรียกว่า Effective Medium Approximations (EMA) โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1. Maxwell-Garnett เป็นรูปแบบทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตรสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริก โดยสมมติฐานให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ที่ประกอบด้วยสารประกอบ 2 ชนิดแตกต่างกัน ได้แก่ วัสดุสารเคลือบและอากาศ โดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ (2.80)

$$\frac{(n_{eff}^2 - n_1^2)}{(n_{eff}^2 + 2n_1^2)} = (1-f_1) \frac{(n_2^2 - n_1^2)}{(n_2^2 + 2n_1^2)} \quad (2.80)$$

เมื่อ n_{eff} คือ ค่าดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตร

n_0 คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ

n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหของวัสดุสารเคลือบ

f_1 คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Bruggeman เป็นรูปแบบในการคำนวณหาดัชนีหักเหเชิงผลเฉลี่ยในปริมาตรสำหรับวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) โดยสมมติฐานให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ที่ประกอบด้วยสารประกอบ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุสารเคลือบและอากาศ โดยมีรูปแบบสมการที่ (2.81)

$$\sum_{f=1}^k f_i \left[\frac{(n_i^2 - n_{eff}^2)}{(n_i^2 + 2n_{eff}^2)} \right] = 0 \quad (2.81)$$

3. Lorentz-Lorentz เป็นรูปแบบในการคำนวณหาดัชนีหักเหเชิงผลเฉลี่ยในปริมาตรสำหรับชั้นฟิล์มที่ประกอบด้วยสารประกอบมากกว่า 2 ชนิด โดยสมมติให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

$$\frac{(n_{eff}^2 - 1)}{(n_{eff}^2 + 2)} = f_1 \frac{(n_1^2 - 1)}{(n_1^2 + 2)} + f_2 \frac{(n_2^2 - 1)}{(n_2^2 + 2)} \quad (2.89)$$

เมื่อ f_1 คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของอากาศ

$f_2 (= 1 - f_1)$ คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุสารเคลือบ

2.2.1.2 เทคนิค Rigorous coupled wave analysis (RCWA) [17]

RCWA คือ เทคนิคที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาการสะท้อนและการส่องผ่านของวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Periodic) ขนาดระดับไมโครเมตร ที่มีการเลี้ยวเบนของแสง เช่น เกรตติง (Grating) หรือใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยใช้หลักการพื้นฐานของ EMT และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่ (2.90)

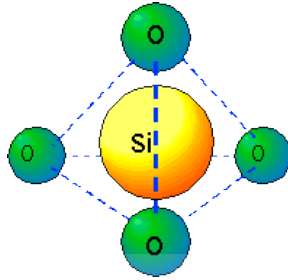
$$F(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m \exp(ik_{xm}x + ik_{zm}z) \quad (2.90)$$

เมื่อ A_m คือ Reflection coefficients in the upper halfspace

2.3 ซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) เป็นสารประกอบระหว่างธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุออกซิเจน (O) รวมตัวกันเป็นสูตรทางเคมี คือ SiO_2 โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม ทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กันอย่างแข็งแรง ซึ่งมีความยาวพันธะระหว่างซิลิกอนและออกซิเจนเท่ากับ 0.162 นาโนเมตรและความยาวพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจนเท่ากับ 0.262 นาโนเมตร เป็นโครงสร้างผลึกเป็นแบบผลึกร่างตาข่าย ดังรูปที่ 2.12 มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า มีความเป็นฉนวนสูง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงานกว้างประมาณ 8 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิกอนไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 [18]



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์ [19]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

โครงสร้างผลึก	อัสถุฐาน
ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)	2.18
ค่าดัชนีหักเห	1.45
จุดหลอมเหลว (°C)	1700
ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	8
สี	ขาว, โปร่งแสง

2.4 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

วิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition process : CVD) คือ การเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของของสารเคมีในสถานะก๊าซทำปฏิกิริยาเคมีกันกลายเป็นสารใหม่เคลือบลงบนแผ่นรองรับ ซึ่งตัวอย่างวิธีการเคลือบโดยไอเชิงเคมี ได้แก่ การเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยความร้อน (Thermal CVD processes) การเคลือบด้วยไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Plasma-enhanced CVD processes: PECVD) เป็นต้น

2. กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical vapor deposition process: PVD) คือ การเคลือบโดยการทำให้อะตอมหรือไอออนของสารตั้งต้นหลุดออกจากผิวของสารตั้งต้นแล้วกลายเป็นไอฟุ้งกระจายหรือบังคับให้วิ่งเข้าไปยึดติดกับพื้นผิวของแผ่นรองรับโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

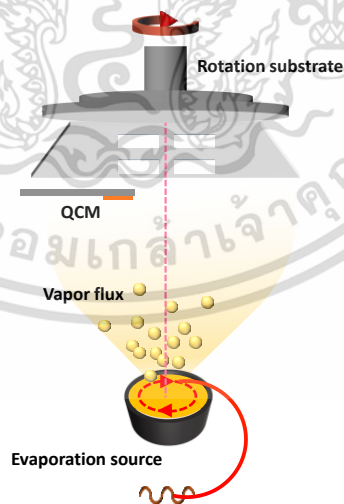
2.1 วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) คือ การเคลือบฟิล์มในสภาวะสุญญากาศที่ทำให้ไอออนของแก๊สอาร์กอนพุ่งชนกับเป้าสารเคลือบกระแทกจนอนุภาคของสารเคลือบที่ผิวเป้ากระเด็นออกมาเคลือบลงบนแผ่นรองรับแล้วมีการพอกพูนเกิดเป็นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วิธีการระเหยสาร (Evaporation) คือ การเคลือบฟิล์มในสภาวะสุญญากาศโดยให้ความร้อนหรือพลังงานที่มากพอเพื่อทำให้อะตอมของสารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอหรือของเหลวกลายเป็นไอแล้วฟุ้งกระจายไปเคลือบลงบนแผ่นรองรับทำให้เกิดการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง

2.5 การเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation)

การเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน คือการให้พลังงานกับสารเคลือบด้วยลำอิเล็กตรอน โดยลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดทั้งสเตนเจนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิออนิกส์อิมิสชันของอิเล็กตรอน (Thermionic emission) แล้วบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเป็นวิถีโค้งเพื่อให้ตกลงบนผิวหน้าของสารเคลือบซึ่งบรรจุอยู่ภายในภาชนะขนาดเล็กที่เรียกว่า ครูซิเบิล (Crucible) เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารเคลือบจะถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อนทำให้สารเคลือบหลอมเหลวจนกระทั่งกลายเป็นไอ (Evaporation) หรือระเหิด (Sublimation) ขึ้นไปติดกับแผ่นรองรับ โดยอัตราการเคลือบของสารเคลือบและความหนาของชั้นฟิล์มจะถูกรวัดด้วยตัวตรวจจูนิต QCM (Quartz Crystal Microbalance) แบบระบบเวลาจริง (Real-time) ซึ่งสามารถใช้ในการวัดอัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์มได้ โดยทั่วไปการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนนิยมใช้ในด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การเคลือบเชิงแสง (Optical coating) การเคลือบเลนส์เพื่อลดสะท้อนแสง และการเคลือบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงให้อัตราการเคลือบสูงและง่ายต่อการควบคุม โดยจะนิยมใช้ในการเคลือบสารที่เป็นโลหะออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ SiO_2 , Ta_2O_5 , MgF_2 , Al_2O_3 , TiO_2 และ ITO เป็นต้น



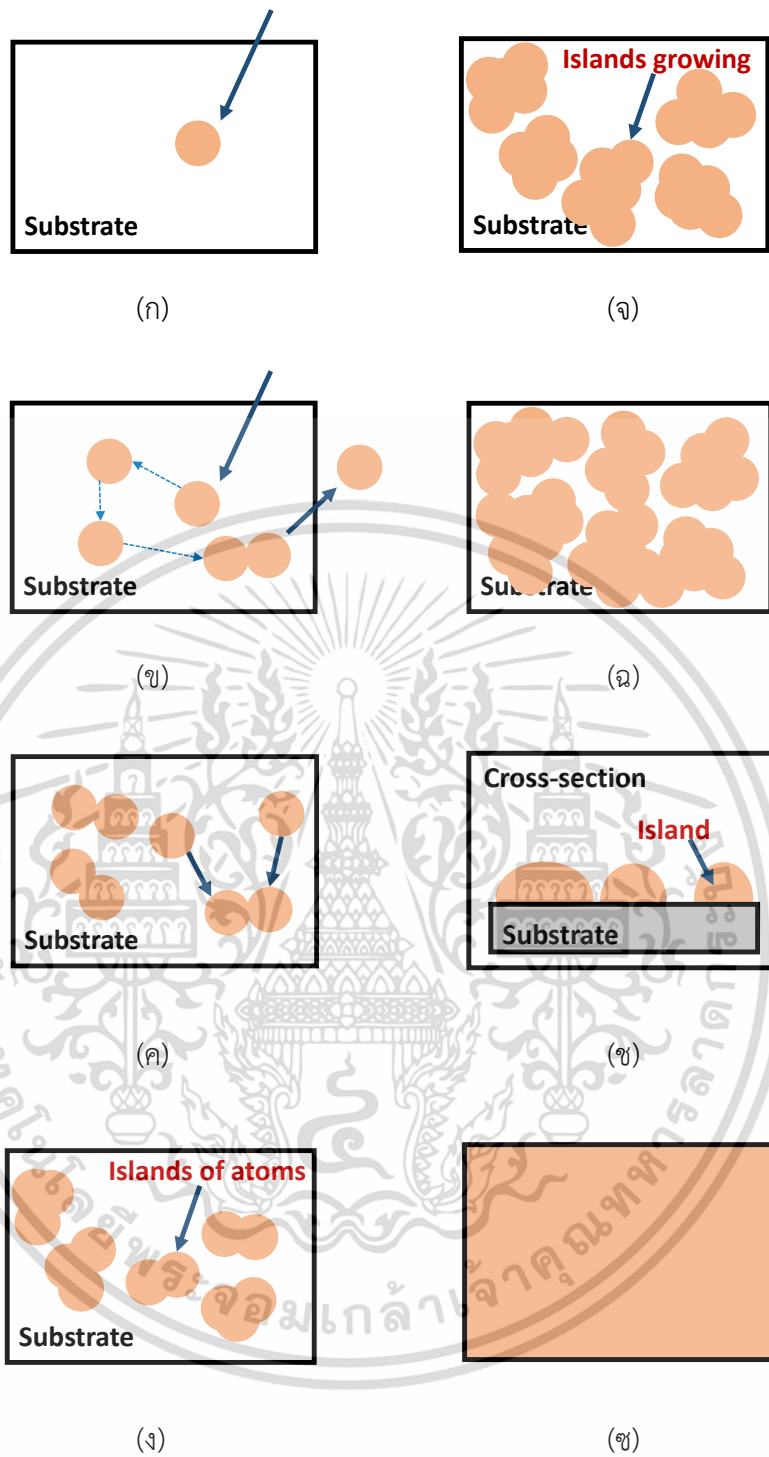
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

2.6 การเคลือบฟิล์มบางแบบใช้ไอออนช่วย (Ion-assisted deposition, IAD)

การเคลือบฟิล์มในระบบสุญญากาศแบบใช้ไอออนช่วย เป็นกระบวนการที่ให้การยอมรับในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถควบคุมความดันและปริมาณของแก๊สที่ให้กับระบบได้ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์ม อาทิเช่น ค่าความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห การส่องผ่านแสง และสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น โดยอาศัยกระบวนการการเพิ่มไอออนของก๊าซเข้าไปในระบบเพื่อระดมยิงแผ่นรองรับในการกำจัดสิ่งสกปรกก่อนทำการเคลือบและการเพิ่มปริมาณไอออนของก๊าซให้กับอะตอมสารเคลือบในระหว่างการเคลือบ เช่น การเติมไอออนของออกซิเจนให้กับสารเคลือบที่มีพันธะไม่สมบูรณ์หรือขาดหายไปเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของสาร ซึ่งการเติมไอออนของแก๊สออกซิเจนเข้าไปส่งผลให้สารเคลือบมีพันธะที่สมบูรณ์ทำให้ฟิล์มที่ได้มีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่นและโปร่งใสมากยิ่งขึ้น โดยการเคลือบฟิล์มบางแบบใช้ไอออนช่วยส่วนใหญ่จะใช้ในการเคลือบสารที่เป็นสารประกอบออกไซด์เพื่อใช้ในการพัฒนาฟิล์มบางเชิงแสง [20]

2.7 การก่อเกิดฟิล์ม [21]

ฟิล์มบางที่ได้จากกระบวนการเคลือบหรือการเคลือบสารบนผิววัสดุรองรับในระบบสุญญากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 จากรูปที่ 2.14(ก) และ (ข) เมื่อสารเคลือบที่อยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุลตกลงสู่ผิวของแผ่นรองรับอะตอมของสารเคลือบจะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมในแลตทิซของแผ่นรองรับ (Substrate lattice) ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะหลวมๆระหว่างกัน โดยจะเรียกอะตอมเหล่านี้ว่า adatom ในกรณีที่อะตอมเหล่านี้มีพลังงานมากก็จะทำให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลซึ่งสามารถไปรวมตัวกับอะตอมอื่นๆ และในทำนองเดียวกันอะตอมสารเคลือบเหล่านั้นก็อาจถูกอะตอมสารเคลือบที่เข้ามาใหม่ชนซึ่งทำให้อะตอมหลุดจากแผ่นรองรับแล้วอาจจะระเหยกกลับหรืออาจจะรวมตัวกับอะตอมที่หลุดออกมา จากรูปที่ 2.14(ค) เมื่ออะตอมมีการรวมตัวกัน ซึ่งอาจจะเริ่มจับกันเป็นคู่ และค่อยๆเพิ่มจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) หรือรูปแบบอื่น ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition rate) โดยการรวมตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่าการเกิดนิวเคลียส แสดงดังรูปที่ 2.14 (ง) ทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable islands) เกิดขึ้น จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตขึ้นจนกลายเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands growth) แสดงดังภาพที่ 2.14 (จ) และภาพที่ 2.14 (ฉ) โดยเมื่อกลุ่มอะตอมมีขนาดโตขึ้นจะเกิดการชนกันกับอะตอมกลุ่มข้างเคียงทำให้อะตอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ เรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) แสดงดังภาพที่ 2.14(ซ) ในขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน อะตอมจะประพฤติตัวคล้ายของเหลว (Liquidlike behavior) ระหว่างการรวมตัวกันของกลุ่มอะตอม และจะมีการจัดเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic orientation) การรวมกลุ่มกันของอะตอมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจนกระทั่งการรวมกันของกลุ่มอะตอมเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (Continuity) ดังรูปที่ 2.14(ซ)

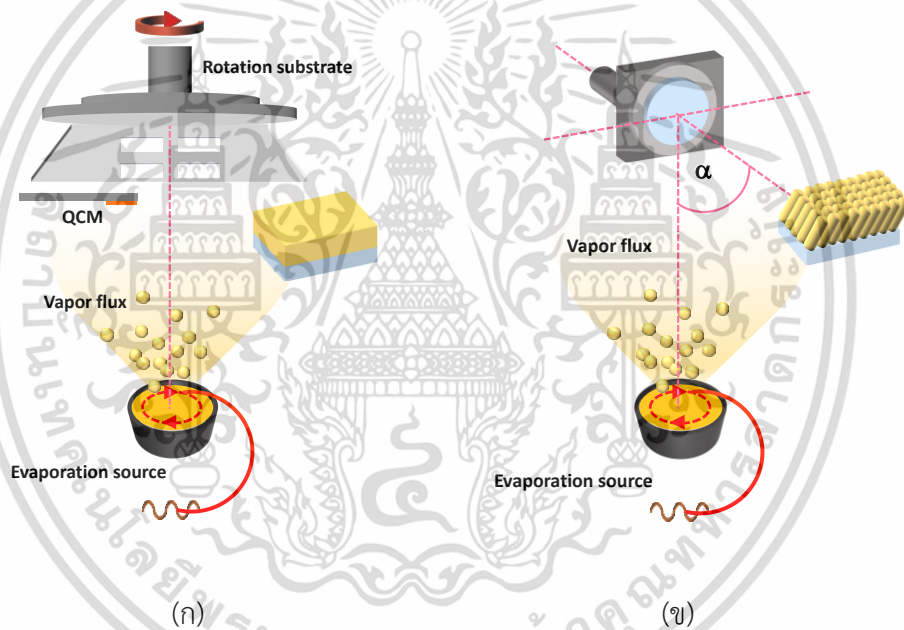


รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการเกิดฟิล์ม (ก) Single atom arrives (ข) Migration Re-evaporation (ค) Collision & Combination of single atom (ง) Nucleation (จ) Growth (ฉ) Island shape (ช) Coalescence และ (ซ) Continuity

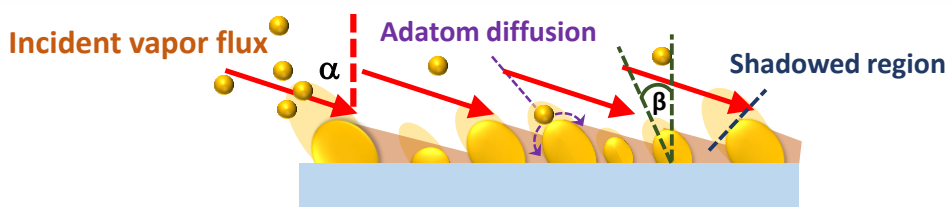
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การเคลือบแบบเอียงมุม (Oblique angle deposition)

การเคลือบฟิล์มแบบทั่วไปอะตอมของสารเคลือบจะทำมุมตกกระทบกับพื้นผิวของแผ่นรองรับในแนวขนานกับเส้นปกติ (Normal line) โดยการเคลือบเช่นนี้ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้ จะมีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่น ดังรูปที่ 2.15(ก) แต่ในกรณีที่ต้องการเคลือบฟิล์มบางให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างนาโนจะต้องทำการปรับมุมระหว่างอะตอมสารเคลือบที่เข้ามาตกกระทบกับแผ่นรองรับมากกว่า 75 องศา เรียกว่า การเคลือบแบบเอียงมุม ดังรูปที่ 2.15(ข) โดยการเคลือบแบบเอียงมุมจะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์บังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับ (Shadowing Effect) และ การจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบ (Adatom Diffusion) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเคลือบ ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบด้วยเทคนิค OAD นั้น จะได้ชั้นฟิล์มที่มีความพรุนและมีโครงสร้างระดับนาโนเมตร โดยแท่งนาโนนั้นจะเอียงทำมุมกับพื้นผิวปกติไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสารเคลือบ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 (ก) การเคลือบฟิล์มบางแบบทั่วไป และ (ข) การเคลือบแบบเอียงมุม



รูปที่ 2.16 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ shadow effect และ ad-atom Diffusion ของการเคลือบด้วยเทคนิค OAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.16 สามารถคำนวณมุมการเอียงของแท่งนาโน (β) ได้โดยการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.91 และ 2.92 [22]

$$\tan(\beta) = \frac{1}{2} \tan(\alpha) \quad (2.91)$$

$$\beta = \alpha - \arcsin\left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{2}\right) \quad (2.92)$$

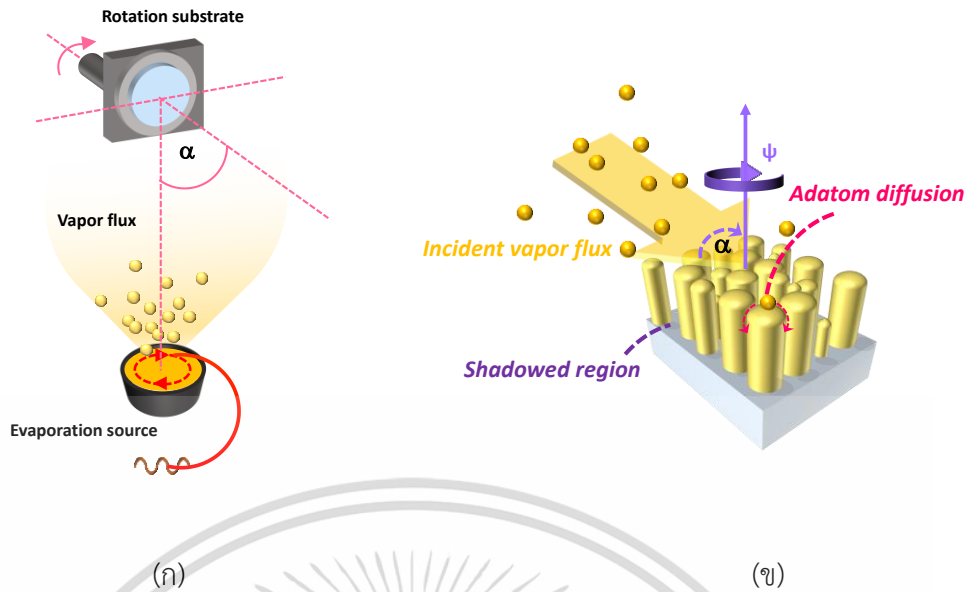
เมื่อ β คือ มุมการเอียงของแท่งนาโน

α คือ มุมระหว่างลำอนุภาคสารเคลือบกับเส้นปกติของแผ่นรองรับ

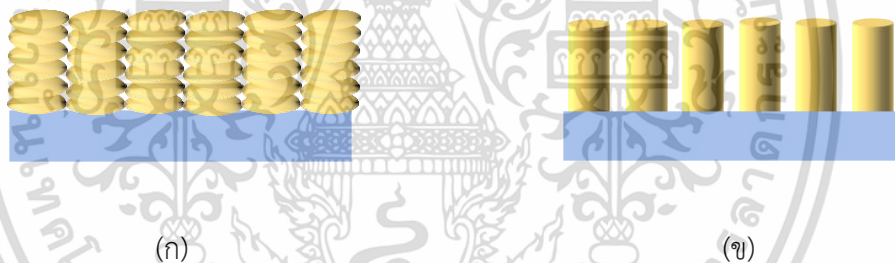
สมการที่ 2.91 เรียกว่า Tangent rule เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณมุมของแท่งนาโนที่ทำการเอียงมุมของแผ่นรองรับน้อยกว่า 60° ($\theta < 60^\circ$) และสมการที่ 2.92 เรียกว่า Cosine rule เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับคำนวณมุมของแท่งนาโนที่ทำการเอียงมุมของแผ่นรองรับมากกว่า 60° ($\theta > 60^\circ$) แต่สมการทั้งสองสามารถคำนวณมุมการเอียงของแท่งนาโนเนื่องจากปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับ (Shadowing Effect) ได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่สามารถอธิบายผลของ ความสูง พลังงานของอะตอมสารเคลือบและโมเมนตัมของวัสดุแต่ละชนิดได้

2.7.2 การเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ (Glancing angle deposition)

นอกจากการเอียงมุมของแผ่นรองรับเพื่อให้ฟิล์มเกิดเป็นโครงสร้างนาโนแล้วยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้โครงสร้างนาโนมีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ ความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับ (Rotation speed) เรียกเทคนิคนี้ว่า การเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) แสดงได้ดังรูปที่ 2.17(ก) ซึ่งโดยทั่วไปหากทำการเคลือบโดยการเอียงมุมแต่ไม่ทำการหมุนรองรับขณะเคลือบ (OAD) จะเกิดเป็นชั้นฟิล์มของแท่งนาโนที่มีโครงสร้างแบบแท่งเอียง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์บดบังของอนุภาคสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบในทิศทางเดียว แต่การเคลือบด้วยเทคนิค GLAD จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มของแท่งนาโนที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรง เนื่องจากสารเคลือบสามารถตกกระทบยังพื้นผิวของแผ่นรองรับได้โดยรอบทำให้เกิดปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบทุกทิศทาง ดังรูปที่ 2.17(ข) อีกทั้งยังสามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างนาโนให้เป็นรูปร่างต่างๆได้โดยการปรับความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับ (Substrate rotation speed; ψ) [23] อาทิเช่น กรณีหมุนแผ่นรองรับแบบช้า จะได้ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียง ดังรูปที่ 2.18(ก) และกรณีหมุนแผ่นรองรับแบบเร็ว จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง ดังรูปที่ 2.18(ข)



รูปที่ 2.17(ก) การเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ GLAD (ข) ปรัชการณบดบังของอะตอมสารเคลือบระหวางการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบทุกทิศทาง



รูปที่ 2.18(ก) ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งเกลียว และ (ข) ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1993 Eric B. Grann, et al. [24] ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ทางแสงของเกรตติงที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง (Sub-wavelength gratings) ของเกรตติงที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าเดียว (Uniaxial dielectrics) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 2 ค่า (Biaxial dielectrics) โดยใช้เทคนิค Rigorous coupled wave analysis (RCWA) เปรียบเทียบกับเทคนิค Effective medium theory (EMT) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตร (Effective refractive index;) ของโครงสร้างของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง (Sub-wavelength structure) ที่มีมิติภายนอก 1 มิติ จากผลการทดลองพบว่า เทคนิค RCWA เป็นอีกเทคนิคที่สามารถนำมาใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตรของ Sub-wavelength gratings ที่มีมิติภายนอก 1 และ 2 มิติ เนื่องจากมีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกันกับเทคนิค EMT ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 K. Narasimha Rao, et al. [25] ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางเดี่ยวที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรของ 2 วัสดุ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ทำการเตรียมด้วยเทคนิคการระเหยสาร แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปทำการอบที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 200°C , 300°C และ 400°C เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ทำการอบ ในกรณีของ SiO_2 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น จาก 1.45 ถึง 1.48 เมื่อทำการวัดสมบัติการส่องผ่านแสงนั้นพบว่า ฟิล์มที่ไม่ได้ทำการอบมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงที่สุด และมีการส่องผ่านแสงในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet region) และย่านตามองเห็นได้ดี (Visible region) ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการพัฒนาสมบัติทางแสงให้กับอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะการเคลือบป้องกันการสะท้อนแสง ในปี ค.ศ. 2003 Y.-P.Zhao. et al. [26] ได้ทำการศึกษาและออกแบบฟิล์มบางโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD พบว่าชั้นฟิล์มที่ได้มีความพรุนสูงและความเร็วรอบ (Rotation speed) ในการหมุนแผ่นรองรับส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างนาโน เช่น กรณีที่ไม่หมุนแผ่นรองรับจะทำให้ได้โครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียง กรณีที่หมุนแผ่นรองรับแบบช้าด้วยความเร็วคงที่จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียว และกรณีที่หมุนแผ่นรองรับแบบเร็วด้วยความเร็วคงที่จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง เป็นต้น ดังนั้นการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค GLAD จึงได้รับความนิยมทางด้านการวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบเป็นฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง ต่อมาในปี ค.ศ. 2011 Hemant Kumar Raut. et al. [27] ได้ทำการรวบรวมและศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนในการออกแบบเป็นฟิล์มป้องกันการสะท้อน โดยพบว่าโครงสร้างนาโนมีค่าดัชนีหักเหที่ต่ำและมีคุณสมบัติพิเศษ คือ Gradient refractive index (GRIN) ซึ่งช่วยลดการสะท้อนที่บริเวณรอยต่อ ทำให้การส่องผ่านแสงของกระจกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติที่ควรคำนึงในการเคลือบชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนที่สำคัญเพื่อให้ได้ฟิล์มลดการสะท้อนที่ดีนั้นจะต้องมีสมบัติในการลดการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (Broadband anti-reflection) มีสมบัติในการลดการสะท้อนทุกทิศทาง (Omnidirectional anti-reflection) และ จะต้องไม่ตอบสนองต่อโพลาไรเซชันของแสงเมื่อแสงตกกระทบในทิศทางเดียวกับเส้นปกติและที่มุมตกกระทบน้อยๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 [28] Katherine Han และ Chin-Hung Chang ได้ทำการรวบรวมและศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสงของ Sub-wavelength structure ในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับฟิล์มป้องกันการสะท้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเทคนิค EMT และเทคนิค RCWA เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาชั้นฟิล์มของโครงสร้างนาโนอย่างกว้างขวาง ซึ่งเทคนิค EMT มีข้อดี คือ สามารถจำลองเพื่อหาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มได้อย่างแม่นยำแต่ยังไม่สามารถระบุหรือทราบลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มได้ ดังนั้นในการออกแบบเพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนนั้นจึงนิยมใช้เทคนิค RCWA เนื่องจากสามารถจำลองสัมประสิทธิ์การส่องผ่านแสง สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และสมบัติการเลี้ยวเบน ได้จากลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ได้แก่ ความหนาของชั้นฟิล์ม ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสงของฟิล์ม ซึ่งมีวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ รวมทั้งวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 เตรียมสารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำยาล้างจาน
2. น้ำกลั่น (Distilled water: DI)
3. อะซิโตน (Acetone: C_3H_6O)
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol (IPA): C_3H_8O)
5. ก๊าซอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99.99%
6. ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 95.5%
7. ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO_2)

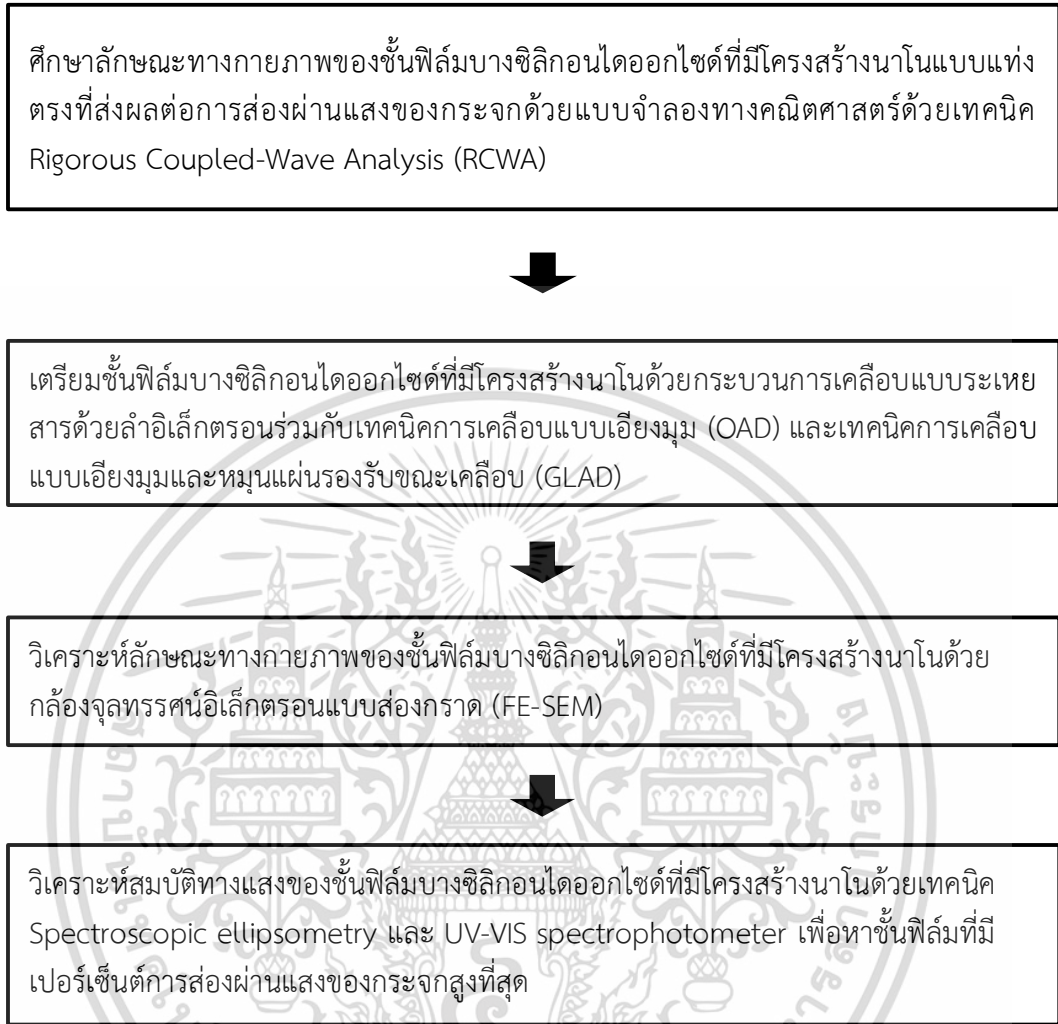
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ
2. ถังมือยางแบบไม่มีแป้น
3. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)
4. กระจกทราย
5. คีมปากคีบ
6. กระจกสไลด์
7. แผ่นซิลิกอนระนาบ (100)
8. เครื่องอัลตราโซนิก

3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) สำหรับสถานที่ อุปกรณ์และสารเคมี รวมทั้งคำแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

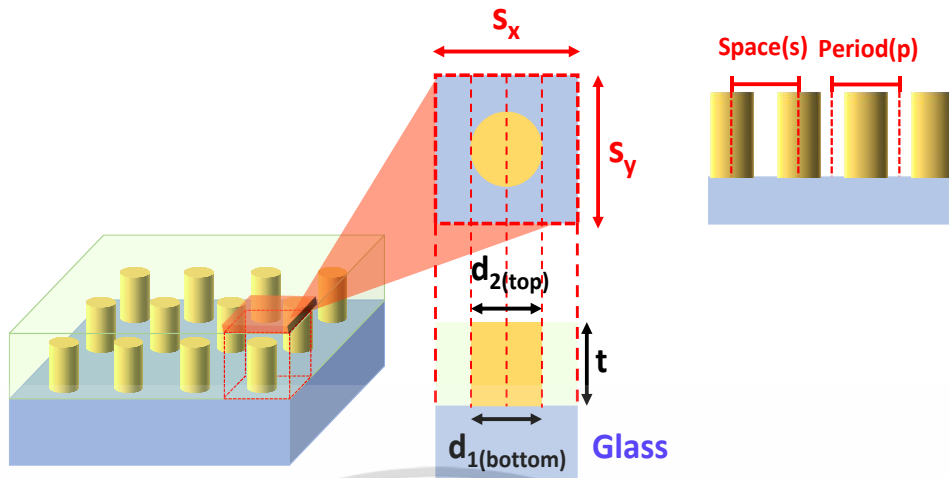
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



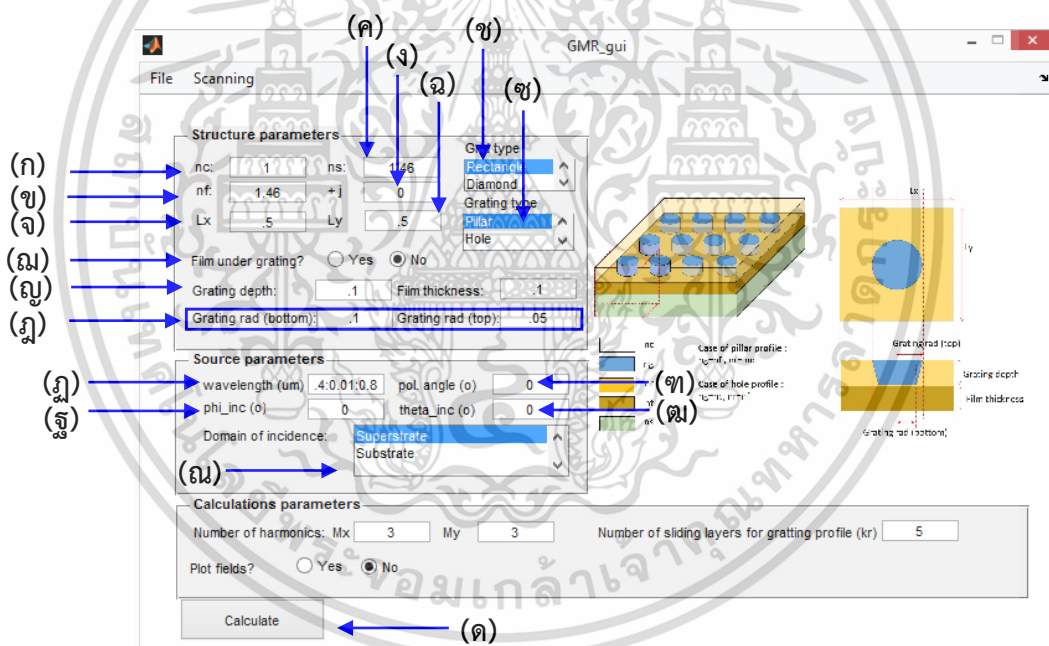
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่องผ่านแสงของกระจกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนที่เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน (s) และความหนาของชั้นฟิล์ม (t) โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบชั้นฟิล์ม ซึ่งมีแบบจำลองทางกายภาพดังรูปที่ 3.1 และมีหน้าตาการใช้งานดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิลิกอนไดออกไซด์จากกรคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงด้วยเทคนิค RCWA



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบภายในหน้าต่างการใช้งานในการคำนวณการส่องผ่านแสงด้วยเทคนิค RCWA

- (ก) ปรับค่าดัชนีหักเหของวัสดุรอบแท่งนาโน
- (ข) ปรับค่าดัชนีหักเหของแท่งนาโน
- (ค) ปรับค่าดัชนีหักเหของแผ่นรองรับ
- (ง) ปรับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- (จ) ปรับระยะห่างระหว่างแท่งนาโนในแนวแกน x
- (ฉ) ปรับระยะห่างระหว่างแท่งนาโนในแนวแกน y
- (ช) เลือกลักษณะการจัดเรียงตัวของแท่งนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ซ) เลือกลักษณะโครงสร้างของแท่งนาโน
- (ฅ) เลือกชั้นฟิล์มภายใต้แท่งนาโน (ในงานวิจัยนี้เป็นกรณีที่ไม่มีชั้นฟิล์มภายใต้แท่งนาโน)
- (ญ) ปรับความลึกหรือความหนาของแท่งนาโน (μm)
- (ฎ) ปรับขนาดของรัศมีแท่งนาโนด้านล่าง (bottom) และด้านบน (top) (μm)
- (ฏ) ปรับความยาวคลื่นแสง (μm)
- (ฐ) ปรับมุมพี (ϕ)
- (ฑ) ปรับโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบ ($0^\circ = P$ -polarize, $90^\circ = S$ -polarize)
- (ฒ) ปรับมุมเซต้า (θ)
- (ณ) เลือกตำแหน่งที่แสงตกกระทบชั้นฟิล์ม
- (ด) ปุ่มคำสั่งสำหรับการคำนวณ

3.3.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

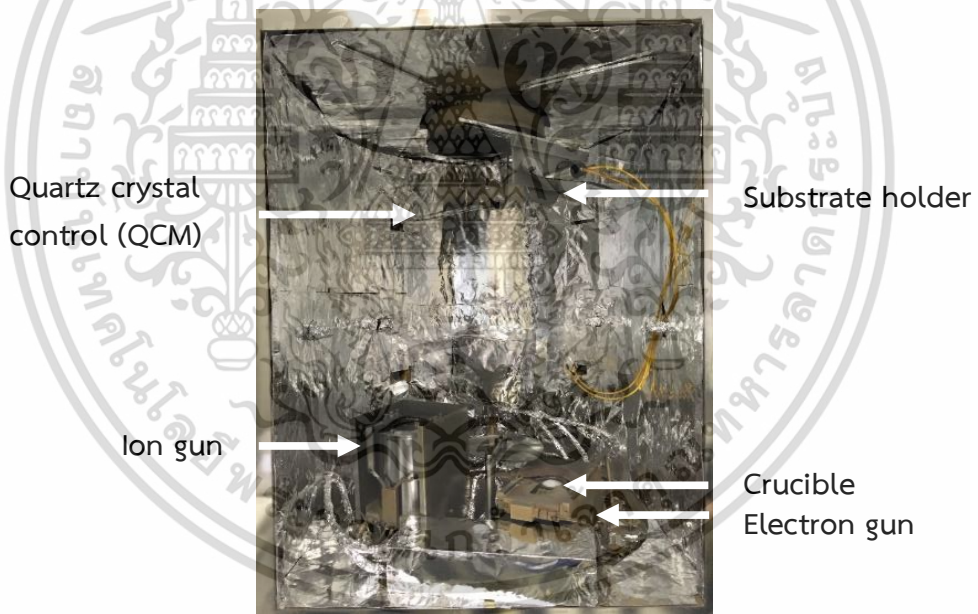
การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนสามารถเตรียมได้จากกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD ภายใต้ระบบสุญญากาศ รุ่น DVB-SJC ผลิตโดยบริษัท Denton Vacuum Inc. แสดงดังรูปที่ 3.4





(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD ภายใต้ระบบสุญญากาศ (ก) เครื่องเคลือบฟิล์ม (ข) แผงควบคุมระบบ และ (ค) อุปกรณ์ภายในเครื่องเคลือบ

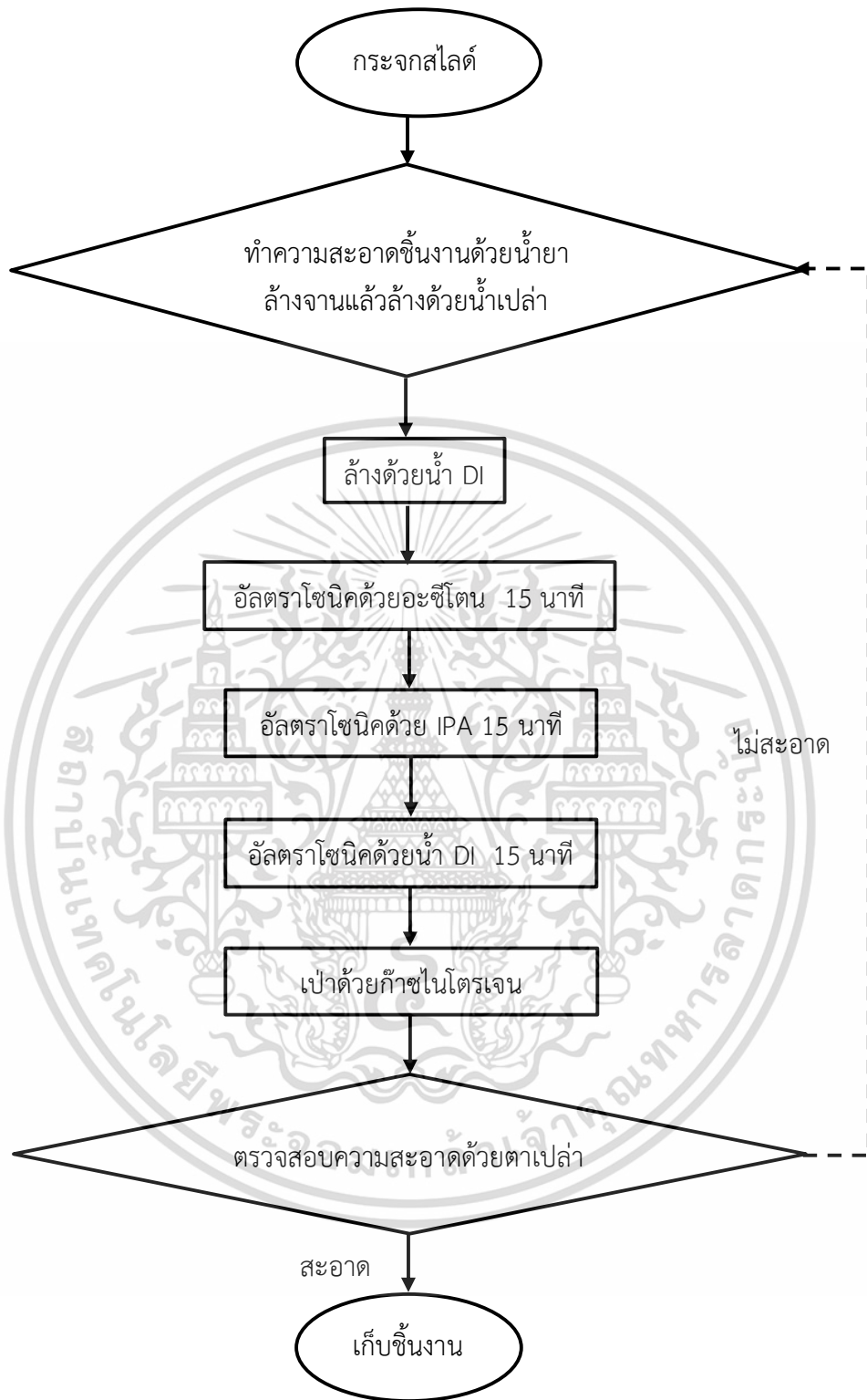
โดยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนหลักๆ ในการเตรียมชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนดังรูปที่ 3.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนภาพการเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์โดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบ OAD และ GLAD ภายใต้ระบบสุญญากาศ

3.3.2.1 การทำความสะอาดแผ่นรองรับภายนอกระบบสุญญากาศ

ก่อนทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ ต้องทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นรองรับให้สะอาด เพื่อไม่ให้มีฝุ่นหรือสิ่งแปลกปลอมทำให้ชั้นฟิล์มที่ได้จากการเคลือบนั้นมีการยึดติดกับผิวแผ่นรองรับที่ดีโดยสามารถสรุปได้แสดงดังรูปที่ 3.6

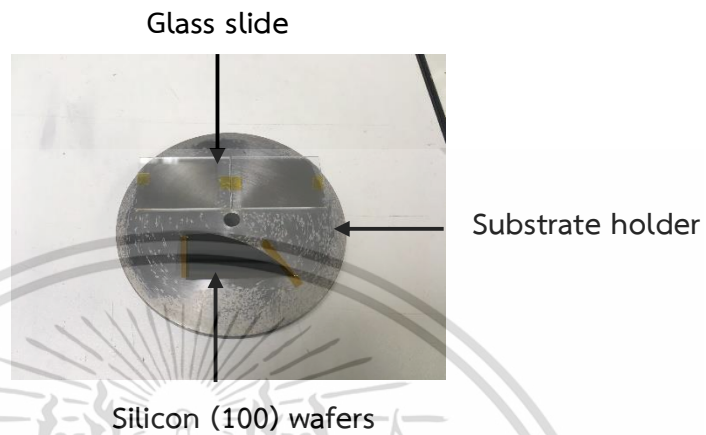


รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการทำความสะอาดแผ่นรองรับภายนอกระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

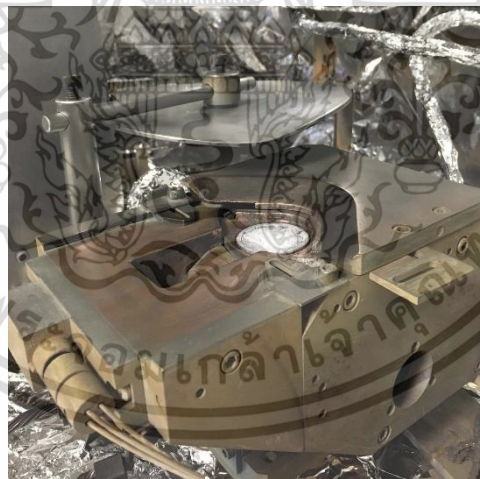
3.3.2.2 เตรียมแผ่นรองรับและสารเคลือบภายในระบบ

1. ทำการตัดแผ่นรองรับซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นรองรับ 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ แล้วนำมาติดกับที่วางแผ่นรองรับ (Substrate holder) ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำไปติดตั้งในเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.7 แสดงการติดแผ่นรองรับกับที่วางแผ่นรองรับ

2. นำสารเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์บรรจุลงไปในถ้วยหลอมสาร (Crucible) ดังรูปที่ 3.8



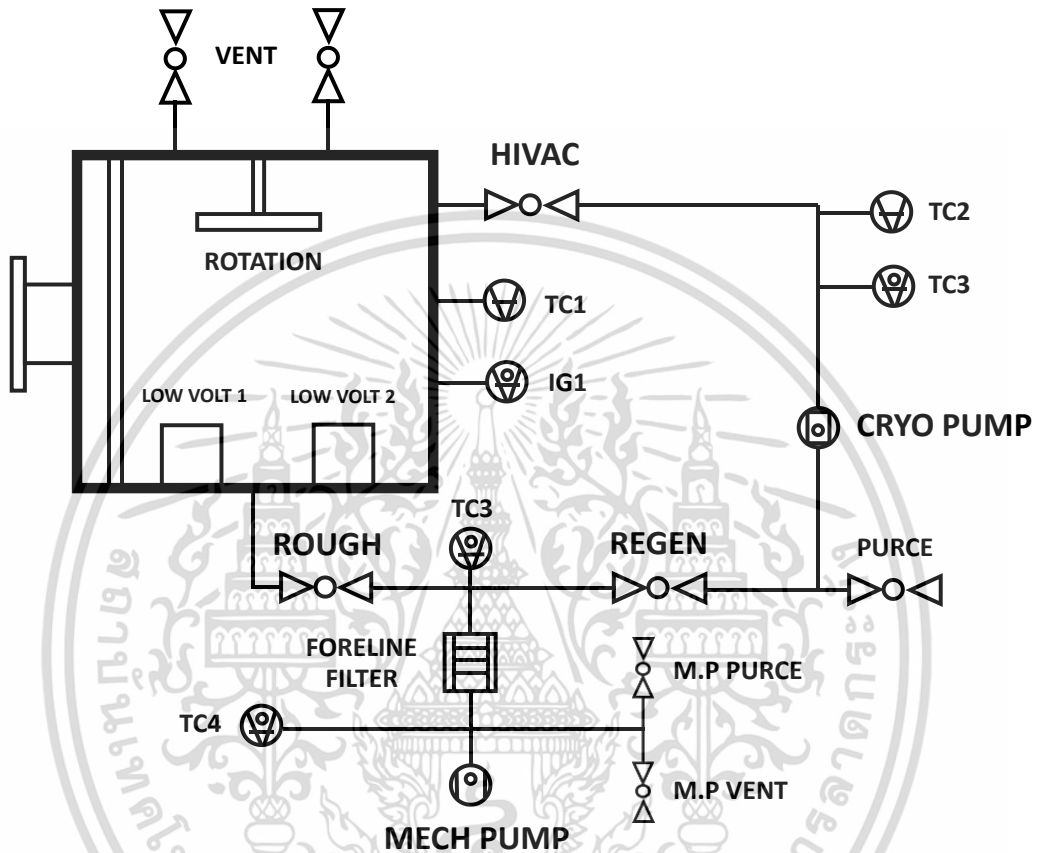
รูปที่ 3.8 แสดงสารเคลือบซิลิกอนไดออกไซด์ที่บรรจุลงไปในถ้วยหลอมสาร

4. ทำความสะอาดโดยการดูดฝุ่นภายในเครื่องเคลือบ
5. ปิดฝาเครื่องเคลือบแล้วทำการเตรียมระบบภายในเครื่องเคลือบให้เป็นระบบสุญญากาศ โดยสามารถแสดงระบบของกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 การทำให้ระบบภายในเครื่องเคลือบเป็นสุญญากาศ

การทำให้ระบบภายในเครื่องเคลือบเป็นสุญญากาศนั้นสามารถทำได้โดยการลดความดันภายในเครื่องเคลือบประมาณ 3×10^{-6} ทอร์ โดยสามารถแสดงภาพการทำงานของกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

1. การเตรียมปั๊มความเย็น

1.1 เปิดปั๊มกลโรตารี (rotary pump) เพื่อให้ความดันภายในลดลงถึงประมาณ 80 มิลลิทอร์ โดยสามารถสังเกตจากเกจเทอโมคัพเปิด

1.2. เปิดวาล์วรีเจน (regeneration valve) เพื่อลดความดันภายในปั๊มความเย็นต่ำจนถึงประมาณ 80 มิลลิทอร์

1.3. ปิดวาล์วรีเจนและปั๊มกลโรตารี หลังจากนั้นเปิดน้ำหล่อเย็นระบบสุญญากาศ

1.4. เปิดสวิทช์ปั๊มความเย็นต่ำ รอให้สถานะในปั๊มมีอุณหภูมิ 10 เคลวิน

2. การเตรียมระบบสุญญากาศภายในเครื่องเคลือบ

2.1 เปิดปั๊มกลโรตารี (rotary pump) จนความดันภายในระบบลดลงถึงประมาณ 80 มิลลิทอร์

2.2 เปิดวาล์วสุญญากาศต่ำ (rough vacuum valve) เพื่อลดความดันภายในเครื่องเคลือบจนได้ประมาณ 80 มิลลิทอร์

2.3 ปิดวาล์วสุญญากาศต่ำ หลังจากนั้นเปิดวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) จนความดันภายในเครื่องเคลือบระเหยสาร ลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 3.0×10^{-6} ซึ่งเป็นสภาวะที่พร้อมทำการเคลือบ

3.3.2.4 การเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

เมื่อทำการเตรียมระบบสุญญากาศภายในเครื่องเคลือบเรียบร้อยแล้วจะทำการทำการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยลำไอออนของก๊าซอาร์กอน

ก่อนทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวซิลิกอนและกระจกที่ใช้เป็นแผ่นรองรับด้วยลำไอออนของก๊าซอาร์กอน เพื่อขจัดคราบไขมันและฝุ่นละอองบนพื้นผิวทำให้การยึดเกาะของฟิล์มดีขึ้น โดยมีเงื่อนไข ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยลำไอออนของก๊าซอาร์กอน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ความดันก่อนการเคลือบ	3.0×10^{-6} ทอร์
ความดันขณะทำการเคลือบ	2.0×10^{-5} ทอร์
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	13 sccm
แรงดันไฟฟ้า	120 โวลต์
กระแสไฟฟ้า	1 แอมแปร์
เวลา	5 นาที

โดยการทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยลำไอออนของก๊าซอาร์กอนประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 เปิดสวิตช์หมุนที่วางแผ่นรองรับ

1.2 เปิดสวิตช์จ่ายไฟให้แหล่งกำเนิดไอออน (ion beam controller) และอุปกรณ์ควบคุมก๊าซ (gas control unit)

1.3 เปิดวาล์วป้อนก๊าซอาร์กอนผ่านแหล่งกำเนิดไอออนที่ปริมาณ 13 sccm

1.4. เปิดสวิตช์ไดรฟ์ (drive current, Id) เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ion gun โดยตั้งค่าไว้ที่ 1.0 A และค่าศักย์ไฟฟ้า 120 V ใช้เวลา 5 นาที

1.5 เมื่อครบเวลา 5 นาที ทำการปิดสวิตช์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเคลือบฟิล์มโดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

ในการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนโดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน มีเงื่อนไขในการเคลือบ ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนโดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ความดันก่อนการเคลือบ	3.0×10^{-6} ทอร์
ความดันขณะทำการเคลือบ	1.0×10^{-6} ทอร์
อัตราการเคลือบ	0.2 นาโนเมตรต่อวินาที
เวลา	9, 17, 25, 34 และ 42 นาที
ความหนา	100, 200, 300, 400 และ 500 นาโนเมตร
เวลา	5 นาที
ความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับ	0, 0.2 และ 30 รอบต่อนาที

การเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนโดยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ทำการตั้งโปรแกรมการเคลือบ ในเครื่องควบคุมการเคลือบโดยกำหนดค่าหลักที่สำคัญได้แก่ ชนิดของสารเคลือบ

2.2 เปิดสวิตช์หมุนที่วางชิ้นงานและรอความดันภายในเครื่องเคลือบลดลงประมาณ 3×10^{-6} ทอร์ หลังจากนั้นเปิดสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนทำการอุ่นสารเป็นเวลา 5 นาที

2.3 เมื่ออุ่นสารครบเวลา กดปุ่มสตาร์ทของเครื่องควบคุมการเคลือบเพื่อเริ่มทำการเคลือบสาร โดยค่อยๆจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนจ่ายพลังงานให้แก่สารเคลือบ เมื่อสารเคลือบได้รับความร้อนถึงจุดที่พรวดระเหย ให้ทำการเปิดชัตเตอร์ เพื่อให้สารเคลือบระเหยขึ้นไปติดกับแผ่นรองรับ โดยระบบเคลือบจะมีผลึกควอทซ์ในการอ่านค่าความหนาและอัตราการเคลือบของชั้นฟิล์มขณะทำการเคลือบจริงซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากจอแสดงผล จึงทำให้สามารถควบคุมความหนาได้ตามต้องการ และเมื่อได้ความหนาตามที่กำหนด ปิดชัตเตอร์เหนือเข้าสารเคลือบ และลดการจ่ายพลังงานลงแล้วทำการปิดสวิตช์เครื่องควบคุม

3.3.2.5 นำชิ้นงานออกจากเครื่องเคลือบ

1. รอให้อุณหภูมิภายในระบบเครื่องเคลือบลดลงเหลือประมาณ 50°C เพื่ออุณหภูมิภายในและภายนอกระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

2. ปิดวาล์วสุญญากาศสูง หลังจากนั้นเปิดวาล์วกันระหว่างระบบภายในเครื่องเคลือบกับภายนอกระบบ (Vent) เพื่อปล่อยให้อากาศภายนอกระบบเข้าสู่ภายในระบบเครื่องเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อความดันภายในเครื่องเคลือบ เท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก ฝาเครื่องเคลือบจะเปิดแล้วนำชิ้นงานออกมาใส่ไว้ในกล่องเก็บชิ้นงาน

3.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) รุ่น S4700 ผลิตโดยบริษัทฮิตาชิ (Hitachi) ประเทศญี่ปุ่น สถานที่ติดตั้งอยู่ที่ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีหลักการทำงาน คือ เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์มจากภาพตัดขวาง และขนาดของของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนจากภาพพื้นผิว

3.3.3.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์ม เครื่องมือที่ใช้คือ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องรุ่น Cary 7000 Universal measurement spectrophotometer (UMS) บริษัท Agilent technologies ดังรูปที่ 3.11 สถานที่ตั้งอุปกรณ์ หน่วยวิจัยอุปกรณ์และระบบอัจฉริยะ ศูนย์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ตั้งอยู่ที่ สังกัดศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ โดยทำการวัดในช่วงความยาวคลื่นแสง 200-2000 นาโน เมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ของฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจก โดยแบ่งรูปแบบการวัดเป็น 2 รูปแบบ คือ เมื่อแสงตกกระทบบน ขานกับเส้นปกติของชิ้นงาน (0 องศา) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการ ตอบสนองต่อโพลาริเซชัน การปรับมุมของชิ้นงานตั้งแต่ (-80 – 80 องศา) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ สมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางซึ่งมีขั้นตอนการวัด ดังนี้



รูปที่ 3.11 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผล

1. การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและโพลาริเซชัน

1.1 นำชิ้นงานมาวางในเครื่องโดยให้หน้าฟิล์มอยู่ทิศเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงหรือให้ รังสีตกกระทบบนกับเส้นปกติของชิ้นงาน (0 องศา) โดยกำหนดให้รังสีที่ตกกระทบบนเป็นโพลาริเซชันชนิด S และโพลาริเซชันชนิด P

1.2 ตั้งค่าโปรแกรมใช้งานโดยทำการวัด base line ของแหล่งกำเนิดแสงเทียบกับ อากาศโดยค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของอากาศจะมีค่าเท่ากับ 100%

1.3 วัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชิ้นงาน

1.4 เก็บบันทึกข้อมูล

2. การวิเคราะห์การส่องผ่านแสงรอบทิศทาง

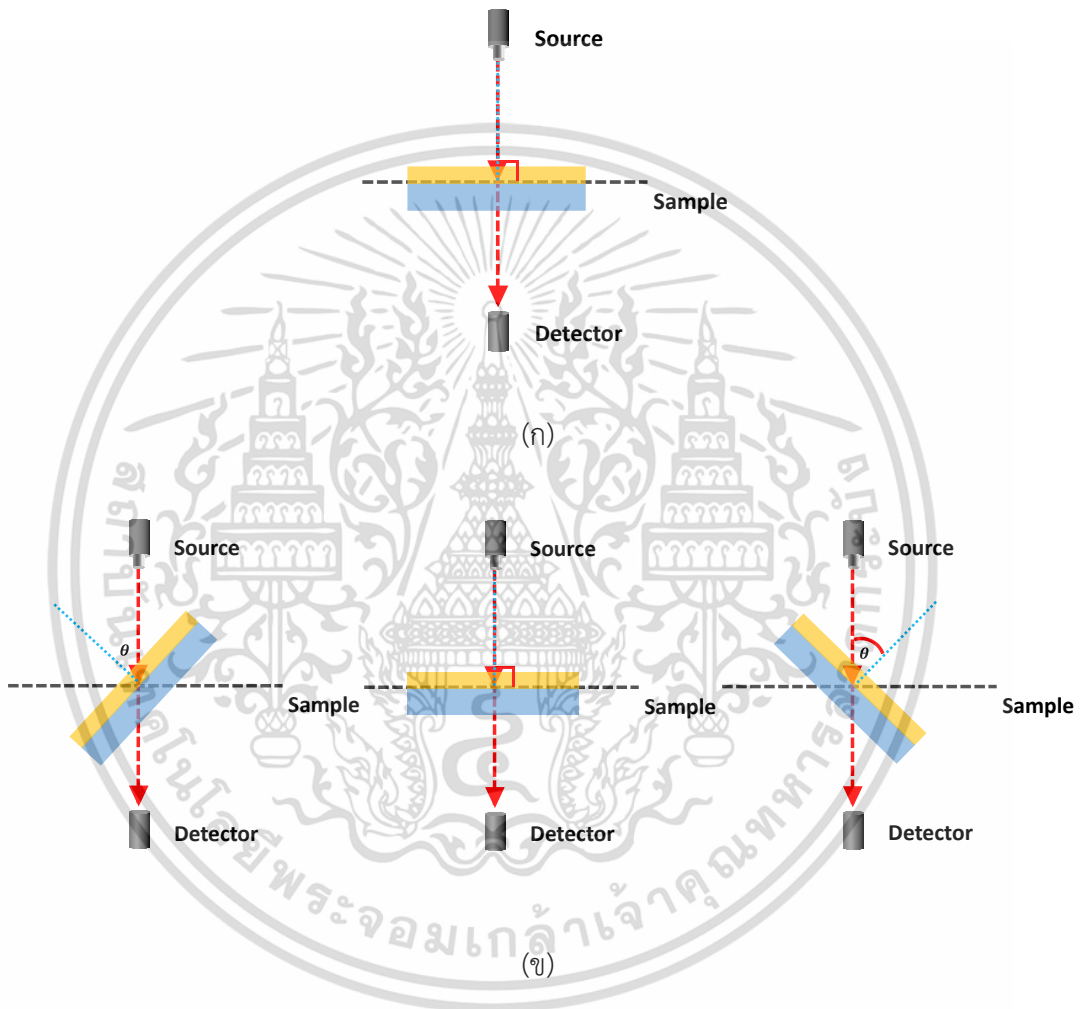
2.1 นำชิ้นงานมาวางในเครื่องโดยให้หน้าฟิล์มอยู่ทิศเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงและปรับ ให้รังสีตกกระทบบนทำมุมกับเส้นปกติของชิ้นงานตั้งแต่ -80 – 80 องศา โดยกำหนดให้รังสีที่ตกกระทบบนเป็นโพลาริเซชันชนิด S เนื่องจากจะแสดงการสะท้อนของแสงได้ดีกว่ารังสีแกนนอนกับผิวระนาบตกกระทบบนที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์มุมบรีวสเตอร์

2.2 ตั้งค่าโปรแกรมใช้งานโดยทำการวัด base line ของแหล่งกำเนิดแสงเทียบกับอากาศโดยค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของอากาศจะมีค่าเท่ากับ 100%

2.3 วัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชิ้นงาน

2.4 เก็บบันทึกข้อมูล

โดยขั้นตอนการปรับมุมของชิ้นงานเพื่อวัดสเปกตรัมทางแสงในการวิเคราะห์ผลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการปรับมุมของชิ้นงานเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (ก) การวิเคราะห์การส่องผ่านแสงและโพลาไรเซชัน (ข) การวิเคราะห์การส่องผ่านแสงรอบทิศทาง

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็น (380-780 นาโนเมตร) ได้ดังสมการ

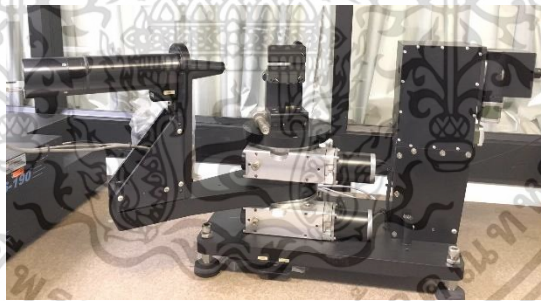
$$\%T_{avg} = \frac{\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} T(\lambda)E(\lambda)}{\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} E(\lambda)} \quad (3.1)$$

เมื่อ $T(\lambda)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน

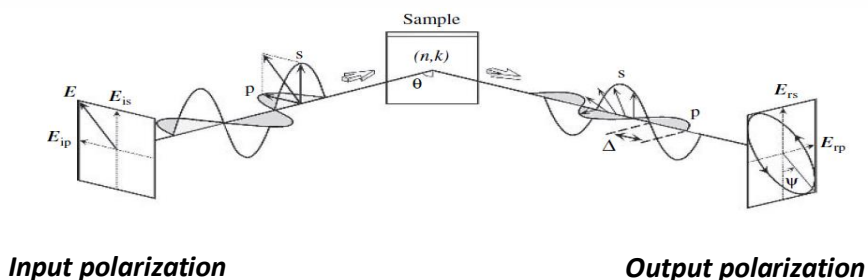
$E(\lambda)$ คือ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์สัมพัทธ์ (Relative Solar Energy) แสดงตารางที่ 1
ภาคผนวก ก โดย $\sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} E(\lambda)$ มีค่าเท่ากับ 100

3.3.3.3 สเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรี

การวิเคราะห์ความหนา ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยใช้เครื่องสเปกสโคปอิลิปโซเมทรี (J.A. Woollam Co., Inc.) แสดงดังรูปที่ 3.13 ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งหลักการทำงานของ คือ การวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันของแสงที่เราทราบความยาวคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุที่ทำการวัด แล้วนำมาวิเคราะห์ผลโดยนำผลจากการวัดเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมซึ่งจะต้องทราบข้อมูลทางด้านองค์ประกอบและโครงสร้างแลตทิซของสารนั้นๆ



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรี



รูปที่ 3.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนจากตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงที่รอยต่อผิวของตัวกลาง 2 ชนิด เมื่อแสงตกกระทบผ่านมาจากทางซ้ายและสะท้อนทางด้านขวาโดยที่มีค่าสนามไฟฟ้า (E) โดยทั่วไป เมื่อแสงโพลาไรซ์สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่างทั้งเฟส (phase) และแอมพลิจูด (Amplitude) ของแสงนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าคงที่ทางแสง (Optical Constant) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญของเทคนิคนี้คือ เฟสที่เปลี่ยนแปลงไป (Δ) ของ E_s และ E_p และแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไป (Ψ) ซึ่งเรียกว่าตัวแปรทั้งคู่ คือ เดลตา (Δ) และ ซาย (Ψ) ว่าเป็น Ellipsometric Parameters โดยมีสมการหลักได้แก่

$$\Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs} \quad (3.3)$$

และ

$$\tan \Psi = \frac{[r_p]}{[r_s]} \quad (3.4)$$

ซึ่งเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (Complex Reflection Coefficient) ρ ได้จาก

$$\rho = \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) = \frac{[r_p]}{[r_s]} \quad (3.5)$$

เมื่อ δ_{rp} คือ เฟสที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับ P-component (ระนาบขนาน)

δ_{rs} คือ เฟสที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับ S-component (ระนาบตั้งฉาก)

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปอิลิปโซเมทรีจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันจากการเปลี่ยนเฟสและแอมพลิจูดของแสงสะท้อนที่ออกมาจากตัวอย่างที่มุมต่างกัน แล้วนำผลที่ได้จากการวัด (Experiment data) มาเทียบกับค่าจากการจำลองลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม (Model) ซึ่งจะมีฐานข้อมูลของฟิล์มโดยทั่วไปและฟิล์มที่มีลักษณะพิเศษอยู่ในโปรแกรม WVASE 32 ของเครื่องสเปคโตรสโคปอิลิปโซเมทรี จากนั้นใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับฟิล์มมาใช้ในการคำนวณหาสมบัติทางแสง ได้แก่ ความหนา ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยฟิล์มซิลิกอนในงานวิจัยนี้ มีความโปร่งใสและไม่นำไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ คือ สมการคอชี่ (Cauchy equation) ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหแต่ละความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด แสดงดังสมการที่ 3.6

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (3.6)$$

เมื่อ A_n, B_n และ C_n คือ Cauchy parameter

$n(\lambda)$ คือ ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสง

และ λ คือ ความยาวคลื่นแสง

เมื่อได้ค่าความหนา ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน จากผลการเปรียบเทียบผลของฟิล์มจากการวัดและการจำลองลักษณะทางกายภาพแล้ว ความถูกต้องของสมบัติทางแสงของฟิล์มที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความใกล้เคียงหรือเท่ากันระหว่างผลการเปรียบเทียบทั้งสอง โดยถ้าใกล้เคียงกันมากแสดงว่าสมบัติของฟิล์มและค่าคงที่ทางแสงที่ได้จะมีความถูกต้องมาก ซึ่งค่าความถูกต้องหรือความใกล้เคียงจากการเปรียบเทียบนั้นจะพิจารณาจากค่า Mean squared error (MSE) แสดงดังสมการที่ 3.7

$$MSE^2 = \frac{1}{2N - M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\psi_i^{\text{mod}} - \psi_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\psi,i}^{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{\text{mod}} - \Delta_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\Delta,i}^{\text{exp}}} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

- เมื่อ N คือ จำนวนคู่ของชายด์ (Ψ) และเดลต้า (Δ)
 M คือ จำนวนตัวแปรที่ปรับในแบบจำลอง
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นฟิล์มออกไซด์ที่มีคุณสมบัติน่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก มีความต้านทานสูง และมีสมบัติการส่งผ่านแสงที่ดี [29] จึงเป็นเหตุผลให้ฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะงานวิจัยทางแสง เช่น เป็นชั้นดัชนีหักเหต่ำของระบบฟิล์มบางหลายชั้น [30] หรือการพัฒนาเป็นฟิล์มบางเดี่ยวที่มีโครงสร้างนาโนเพื่อเพิ่มการส่งผ่านแสงให้กับแผ่นรองรับ ในการพัฒนาเพื่อให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพสำหรับการส่งผ่านแสงที่ดีนั้นจะขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเห (n) และความหนา (t) ของชั้นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้จะมุ่งพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนหรือเพื่อเพิ่มสมบัติการส่งผ่านแสงของแผ่นรองรับที่เป็นกระจก โดยเริ่มจากการศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) ในการจำลองเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของกระจกที่ทำการเคลือบฟิล์ม จากการศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบ จากนั้นทำการพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนโดยเตรียมจากกระบวนการเคลือบแบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD) และเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างทางกายภาพที่ส่งผลต่อสมบัติทางแสงของฟิล์ม โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่งผ่านแสงของกระจกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 การศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่งผ่านแสงของกระจกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยทั่วไปแล้วในการเคลือบชั้นฟิล์มเพื่อป้องกันการสะท้อนหรือเพิ่มการส่งผ่านแสงให้กับกระจกนั้น สามารถคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของชั้นฟิล์มที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่งที่พิจารณาได้ โดยสามารถคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มได้จากสมการที่ (2.75) จากการคำนวณพบว่า ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบลงบนกระจกนั้นจะต้องมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.22 และเนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาชั้นฟิล์มที่ช่วยเพิ่มการส่งผ่านแสงในช่วงตามองเห็น (380-780 นาโนเมตร) ดังนั้นจากสมการการแทรกสอดแบบหักล้างดังสมการที่ (2.76) ที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์ม ความหนา และความยาวคลื่นแสง เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อสายตามนุษย์ที่ดีที่สุดจะทำให้ได้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ทำให้เกิดเงื่อนไขการแทรกสอดแบบหักล้างที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 112 นาโนเมตร

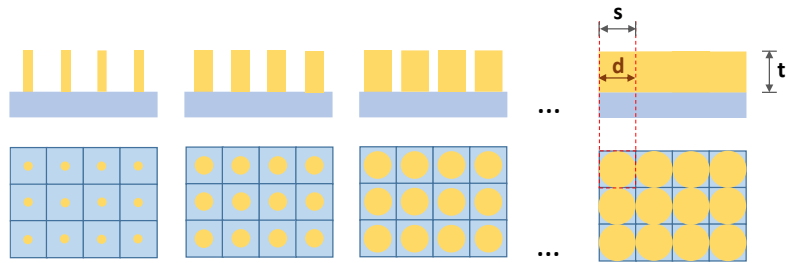
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับการประยุกต์เป็นฟิล์มป้องกันการสะท้อนที่ช่วยในการเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงให้กับกระจก การเคลือบแบบทั่วไปชั้นฟิล์มจะมีการเรียงตัวของสารเคลือบอย่างหนาแน่น ทำให้มีค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่สูงเท่ากับ 1.45-1.46 [31] เพื่อให้กระจกมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ดีจึงต้องลดค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มให้มีค่าเท่ากับ 1.22 ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบชั้นฟิล์มให้เป็นโครงสร้างนาโน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนนั้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความพรุนสูงและมีค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มลดลงเท่ากับ 1.05-1.3 [32, 33]

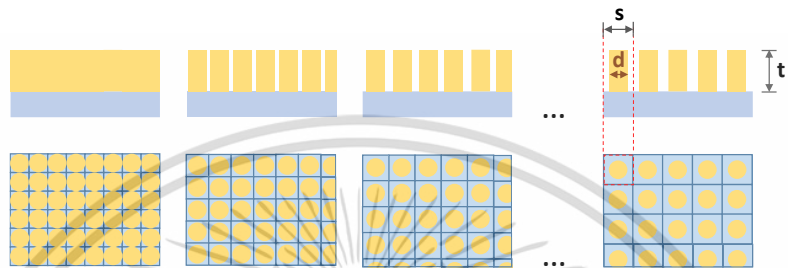
ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนก่อนทำการเคลือบจริงเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1.22 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค RCWA จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนที่เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน (s) และความหนาของชั้นฟิล์ม (t)

4.1.1 การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน

จากสมการของ Maxwell-Garnett ดังสมการที่ (2.80) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยเชิงปริมาตรของชั้นฟิล์มที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของซิลิกอนไดออกไซด์ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ และอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนซิลิกอนไดออกไซด์และอากาศ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาโนเมตร โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแท่งนาโนในแนวแกน x เท่ากับระยะห่างระหว่างแท่งนาโนในแนวแกน y ($s_x = s_y = s$) และมีความหนาของชั้นฟิล์มคงที่เท่ากับ 112 นาโนเมตร เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1.22 โดยสามารถแสดงภาพการจำลองลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.1



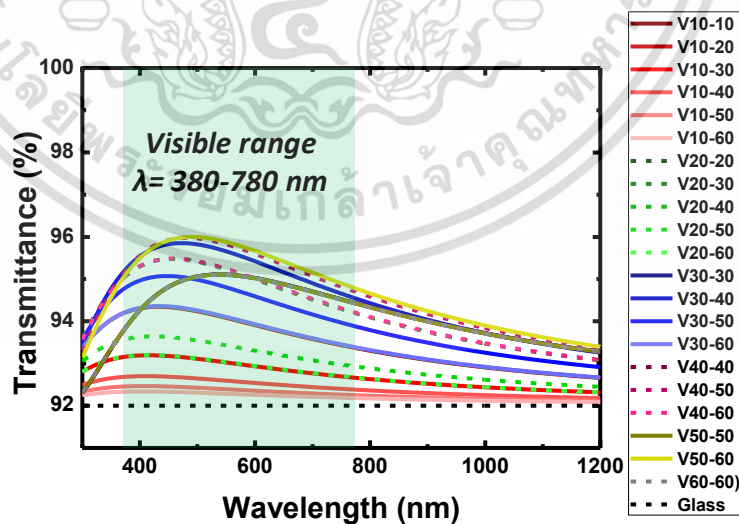
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ภาพแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม (ก) การปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง และ (ข) การปรับระยะห่างระหว่างแท่งนาโน

จากรูปที่ 4.1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ทำการเคลือบบนกระจกจากการจำลองได้ดังรูปที่ 4.2 โดยแสดงการปรับค่าตัวแปรจากแบบจำลองและชื่อตัวอย่างในตารางที่ 2 ภาคผนวก ก



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง เมื่อทำการปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน

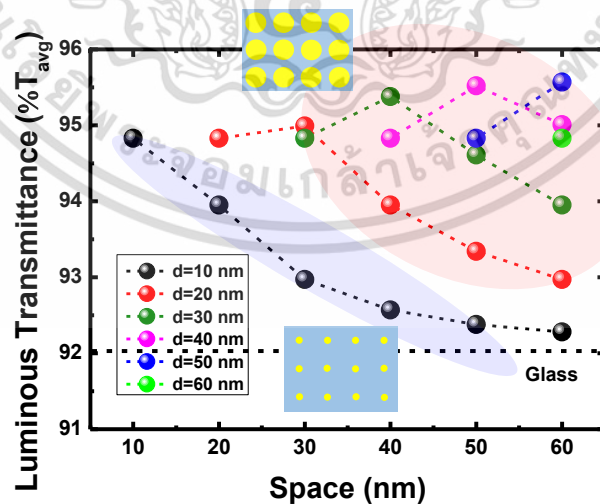
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 พบว่า ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็นที่ดี และเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหมีค่าเข้าใกล้ 1.22 และเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นจากสมการที่ (3.1) สามารถแสดงผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและค่าดัชนีหักเหยังผลเฉลี่ยในปริมาตร ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและค่าดัชนีหักเหยังผลเฉลี่ยในปริมาตรของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ทำการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน

diameter (nm)	10		20		30		40		50		60	
Space (nm)	n_{eff}	%T _{avg}	n_{eff}	%T _{avg}	n_{eff}	%T _{avg}	n_{eff}	%T _{avg}	n_{eff}	%T _{avg}	n_{eff}	%T _{avg}
10	1.35	94.8										
20	1.07	93.9	1.35	94.8								
30	1.03	92.9	1.14	94.9	1.35	94.8						
40	1.02	92.5	1.07	93.9	1.18	95.3	1.35	94.8				
50	1.01	92.3	1.04	93.3	1.11	94.6	1.21	95.5	1.35	94.8		
60	1.00	92.2	1.03	92.9	1.07	93.9	1.14	95.0	1.23	95.6	1.35	94.8

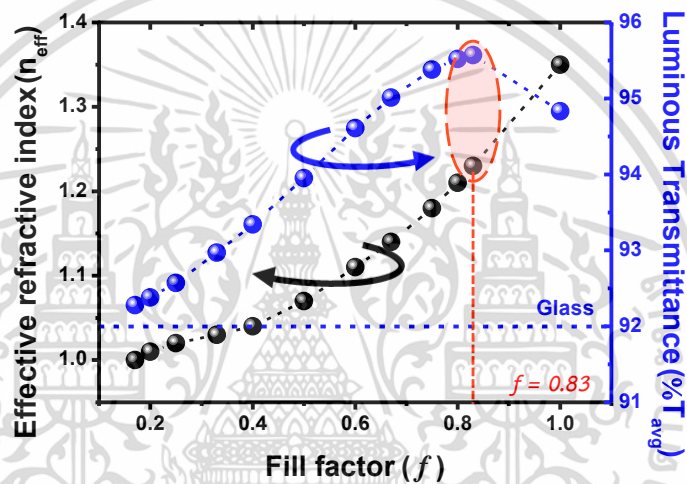
จากตารางที่ 4.1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างแท่งนาโนและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างแท่งนาโนและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่า สามารถแบ่งการตอบสนองต่อแสงของแท่งนาโนได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ กรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กมากๆ ($d = 10$ nm) เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นมีค่าลดลง และกรณีต่อมาคือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น ($d = 20, 30, 40, 50$ และ 60 nm) พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลง โดยที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 60 นาโนเมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร เท่ากับ 96.0% และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นของกระจกมากที่สุดเท่ากับ 95.6% เนื่องจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนที่สัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศและค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตร ดังรูปที่ 4.4



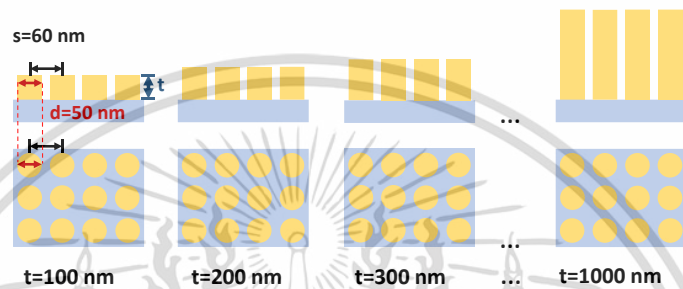
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศ ดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตร และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่ออัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 60 นาโนเมตร มีค่าอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศเท่ากับ 0.83 ทำให้ชั้นฟิล์มมีค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตรเท่ากับ 1.23 ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร เท่ากับ 96.0% และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นของกระจกสูงที่สุดเท่ากับ 95.6%

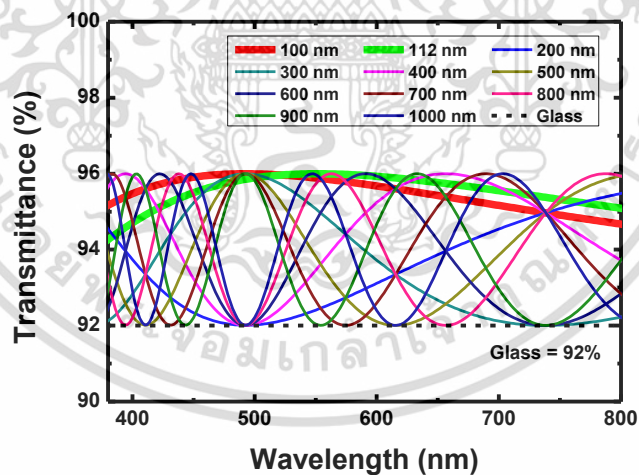
4.1.2 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม

จากการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 112 นาโนเมตร และจากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่า เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 60 นาโนเมตร จะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นของกระจกสูงที่สุด ดังนั้นใน

หัวข้อนี้จะทำการศึกษาลักษณะของความหนาของชั้นฟิล์มเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นเมื่อความหนาเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเทคนิค RCWA โดยทำการปรับค่าความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 100, 112, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 นาโนเมตร กำหนดให้ความยาวคลื่นแสงที่พิจารณาเท่ากับ 550 นาโนเมตร และมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนคองที่เท่ากับ 50 นาโนเมตร และ 60 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มที่ทำการปรับค่าความหนาได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แบบจำลองลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ทำการปรับค่าความหนา และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนคองที่

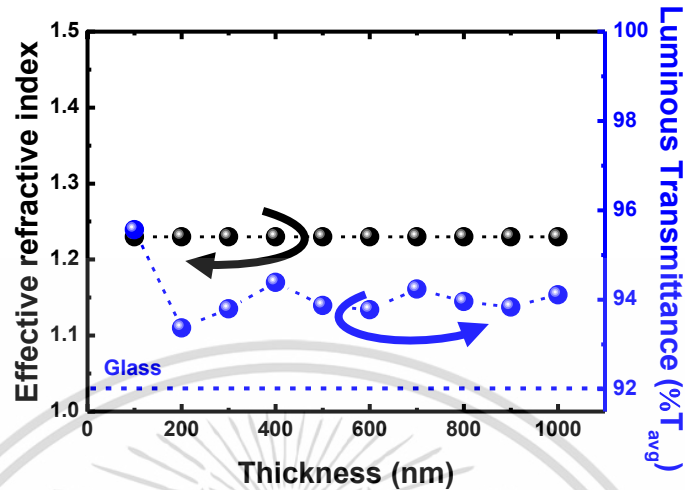


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มที่ทำการปรับค่าความหนา

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดรีฟลักชันของคลื่นแสงมากขึ้น เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสของแสงและความหนาของชั้นฟิล์มดังสมการที่ (2.63) โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุดเท่ากับ 100 และ 112 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นที่สูงที่สุดตลอดความยาวคลื่นแสงในช่วงตามองเห็น โดยสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตรและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นได้ดังรูปที่ 4.7



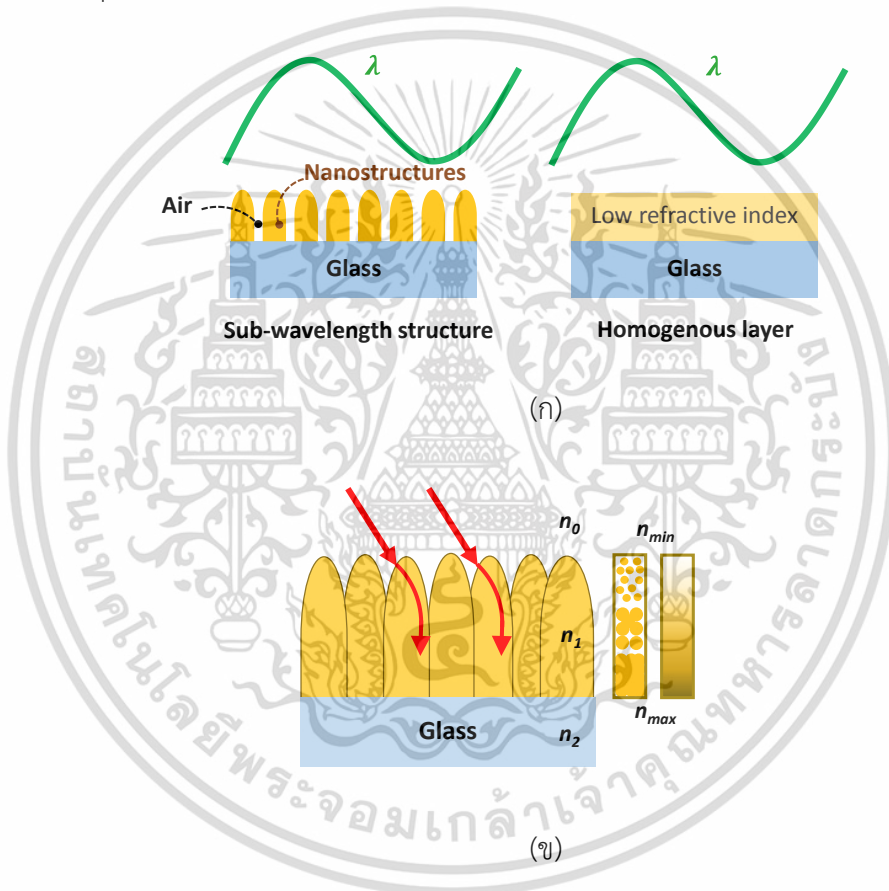
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตร และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น

จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 100 และ 112 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร เท่ากับ 95.8% และ 96.0% ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นเท่ากันมีค่าเท่ากับ 95.6% นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตร เนื่องจากอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแก๊งนาโนและอากาศมีค่าคงที่ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหียงผลเฉลี่ยในปริมาตรมีค่าคงที่เท่ากับ 1.23

4.2 การศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน

ปัจจัยที่ยอมรับว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มป้องกันการสะท้อนนอกจากค่าดัชนีหักเหและความหนาของชั้นฟิล์มแล้ว การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนที่ดีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการใช้งานจริงจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ดังนี้ คือ เมื่อแสงตกกระทบในทิศทางานกับเส้นปกติของแผ่นรองรับจะต้องมีคุณสมบัติในการลดการสะท้อนหรือช่วยเพิ่มการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (Broadband anti-reflection) และไม่ตอบสนองต่อโพลาไรเซชันของแสง (Polarization insensitivity) อีกทั้งมีสมบัติการลดการสะท้อนหรือเพิ่มการส่องผ่านแสงรอบทิศทาง (Omnidirectional anti-reflection) คือ ช่วยเพิ่มการส่องผ่านแสงเมื่อแสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติของกระจกซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่อแสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติจะทำให้เกิดการสะท้อนของแสงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมุมบริวสเตอร์ดังสมการที่ (2.43) ซึ่งการเคลือบชั้นฟิล์มให้มีโครงสร้างนาโนจะช่วยลดการสะท้อนของแสงจากผลของมุมบริวสเตอร์ได้ เนื่องจากโครงสร้างนาโนมีขนาดเอกลักษณะเป็นเอกลักษณะที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับดูตาเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Size) และระยะห่างระหว่างแท่งนาโน (Space) ที่เล็กกว่าความยาวคลื่นแสง เรียกว่า Sub-Wavelength Structure (SWS) เมื่อแสงตกกระทบชั้นฟิล์มจะประพฤติตนเหมือนชั้นฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีค่าดัชนีหักเหต่ำซึ่งไม่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสง ดังรูปที่ 4.8(ก) อีกทั้งมีคุณสมบัติ Gradient refractive index คือ ความหนาแน่น (Density) ของชั้นฟิล์มมีค่าไม่เท่ากัน (ดัชนีหักเหไม่เท่ากัน) โดยเรียงจากความหนาแน่นที่มีค่ามากที่มีค่าใกล้เคียงกับแผ่นรองรับ ($n_i \leq n_s$) ไปยังความหนาแน่นที่มีค่าใกล้เคียงกับอากาศ ($n_i \geq n_0$) ดังรูปที่ 4.8(ข) ดังนั้นด้วยคุณสมบัตินี้จึงส่งผลให้มีคุณสมบัติป้องกันการสะท้อนเมื่อแสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติของชั้นฟิล์ม เนื่องจากแสงจะค่อยๆ เบี่ยงเบนเข้าไปยังชั้นฟิล์มตามกฎของสเนลล์ ดังสมการที่ (2.28) และช่วยลดการสะท้อนของแสงเนื่องจากมุมบรีวสเตอร์ [34]



รูปที่ 4.8(ก) Sub-Wavelength Structure และ (ข) คุณสมบัติ Gradient refractive index

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [35] พบว่า ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มที่แตกต่างกันส่งผลต่อการตอบสนองต่อแสงที่ต่างกัน ซึ่งจากการจำลองในหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่า ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 50 และ 60 นาโนเมตร จะมีค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1.23 ซึ่งช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงให้กับกระจกได้ดีกว่าฟิล์มบางแบบทั่วไปที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่น (Dense) และมีการส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นที่สูงที่สุด ดังนั้นในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจึงทำการเตรียมเคลือบชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนด้วยกระบวนการเอกสารถ่ายเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน โดยใช้เทคนิคการเคลือบที่แตกต่างกัน 2 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD) และเทคนิคเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ (GLAD) พร้อมทั้งเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มกับฟิล์มบางแบบทั่วไป โดยวิเคราะห์ผลของลักษณะโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีออปติคัลโพลาไรซ์และสเปกโตรโฟโตเมทรี เพื่อหาชั้นฟิล์มของโครงสร้างนาโนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มป้องกันการสะท้อน โดยสภาวะในการเตรียมแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

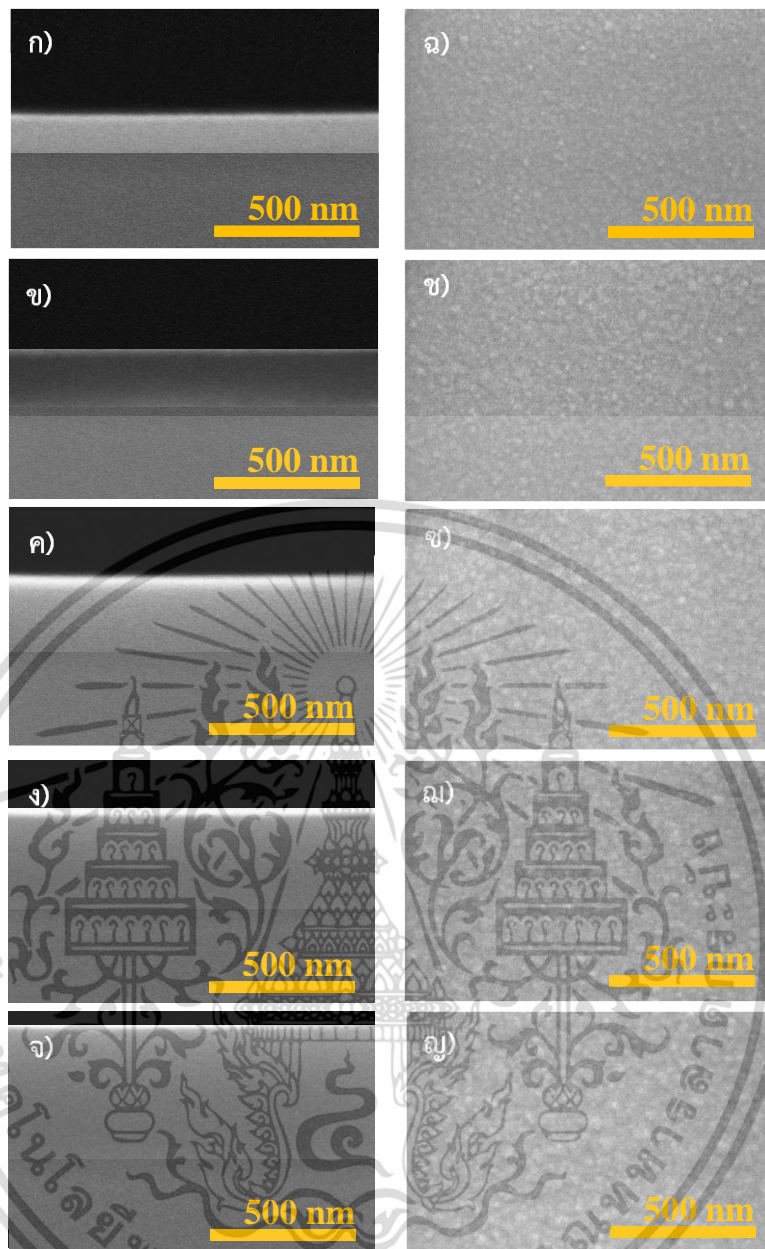
ตารางที่ 4.2 แสดงสภาวะในการเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีเงื่อนไขต่างกัน

ชนิดของตัวแปร	ช่วงการควบคุม			
	Conventional method	OAD	GLAD	
มุมแผ่นรองรับ (องศา)	12°	85°	85°	85°
ความเร็วในการหมุนแผ่นรองรับ (รอบต่อนาที)	12	0	30	0.2
อัตราการเคลือบ (nm/s)	0.2			
เวลาในการเคลือบ (นาที)	9, 17, 25, 34 และ 42			

4.2.1 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

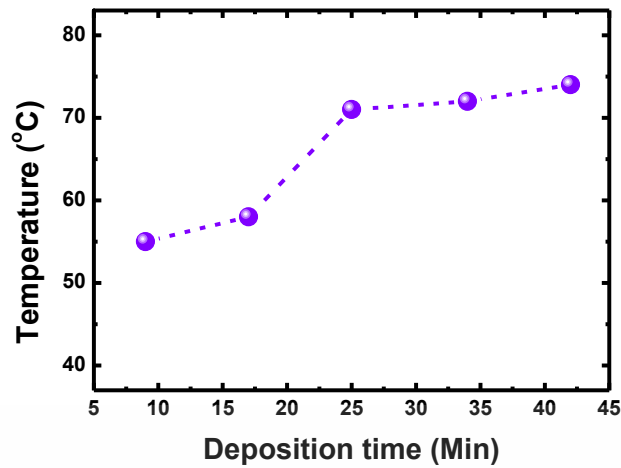
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่น (Dense) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มกับชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนที่ได้จากเทคนิค OAD และ GLAD

จากการวิเคราะห์ FE-SEM ดังรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบที่แตกต่างกันเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาที จากการวิเคราะห์ภาพตัดขวาง รูปที่ 4.9(ก-จ) พบว่าชั้นฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100 ± 2.2 , 210 ± 3.4 , 325 ± 4.0 , 410 ± 3.1 และ 510 ± 3.0 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพพื้นผิวดังรูปที่ 4.9 (ฉ-ญ) ของฟิล์มพบว่า ชั้นฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวเรียบ



รูปที่ 4.9(ก-จ) แสดงภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

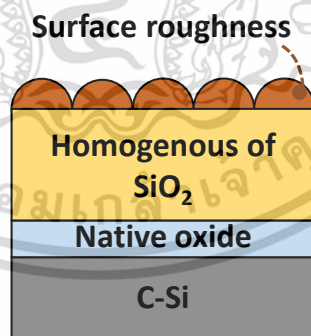


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิภายในระบบ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิภายในระบบ ดังรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 42, 62, 69, 73 และ 75 องศา ตามลำดับ

4.2.1.1 การใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

เทคนิคสเปคโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ได้แก่ ค่าความหนา ดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ซึ่งในการวิเคราะห์ฟิล์มให้มีความถูกต้องนั้นจะต้องสร้างแบบจำลองทางกายภาพและเลือกใช้แบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมกับฟิล์มที่ได้จากการเคลือบ

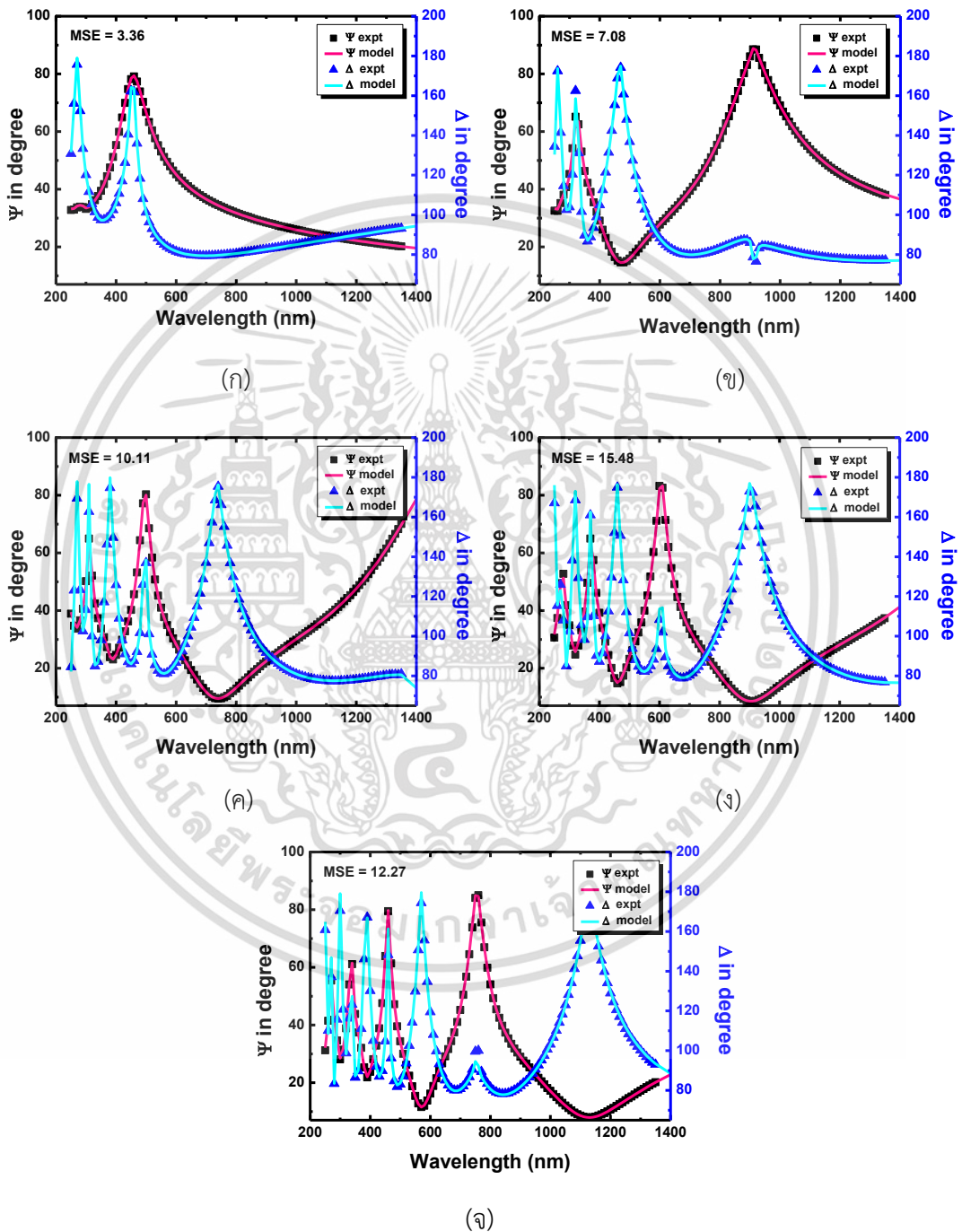


รูปที่ 4.11 แบบจำลองทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.11 แสดงแบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบประกอบด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์ (C-Si) ซึ่งเป็นแผ่นรองรับและชั้นเนทีฟออกไซด์ (Native Oxide) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดขึ้นจากออกไซด์ในชั้นบรรยากาศทั่วไป ต่อมา คือ ชั้นฟิล์มของซิลิกอนไดออกไซด์โดยสมมติฐานว่าฟิล์มที่เคลือบนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีชั้นผิวขรุขระอยู่ด้านบน (Surface roughness: Srough) โดยในการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงจะเลือกใช้แบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซีเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Cauchy dispersion) ดังสมการที่ 3.6 เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางแสงที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นฉนวน ไม่มีการดูดกลืนแสง ($k=0$) หรือฟิล์มบางใส[31]

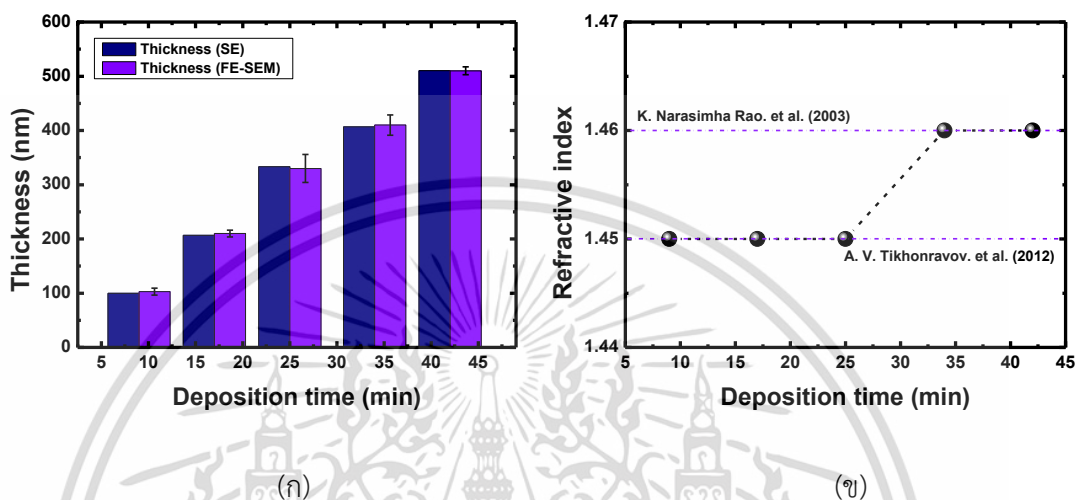
จากการทดลองเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณโดยโปรแกรม WVASE 32 ของเทคนิคสเปคโตรสโคปีออลิโกลิโซเมทรี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่เวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) พบว่า ค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับผลการวัด (Mean Square Error; MSE) มีค่าความผิดพลาดน้อยมากเท่ากับ 3.36, 7.08, 10.11, 15.48 และ 12.27 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่เลือกใช้จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ โดยสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.13



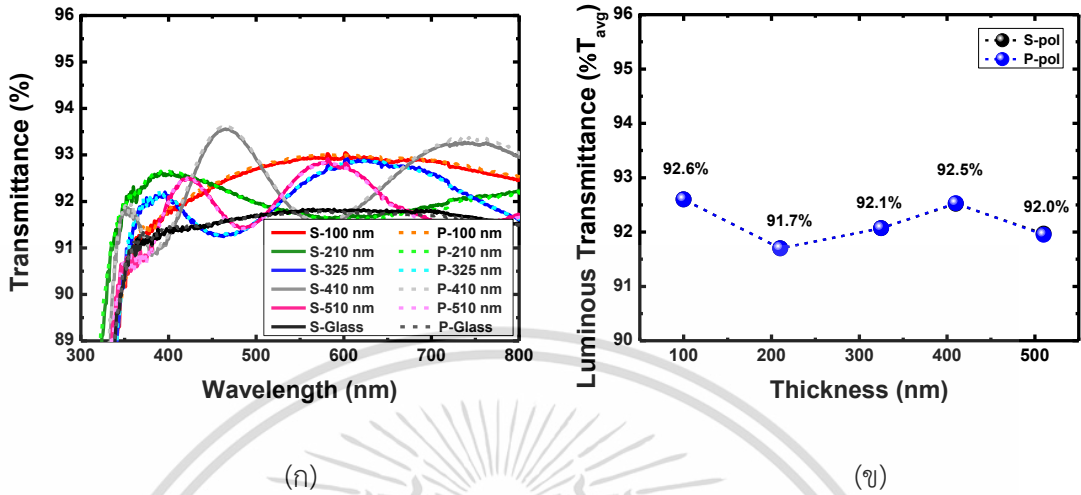
รูปที่ 4.13(ก) การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีและ FE-SEM (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร

เนื่องจากเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีเป็นเทคนิคการวัดโดยอ้อม (Indirect measurement) ดังนั้นจึงต้องทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดโดยตรง (Direct measurement) จากเทคนิค FE-SEM จากผลการวิเคราะห์ความหนาดังรูปที่ 4.13(ก) พบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค FE-SEM ซึ่งบ่งบอกถึงความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร พบว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เวลาในการเคลือบเท่ากับ 9, 17 และ 25 นาที มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.45 และเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 34 และ 42 นาที พบว่าค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 1.46 ดังรูปที่ 4.13(ข) ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการเคลือบที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการอบอย่างอ่อนของชั้นฟิล์ม (Self-annealing) จึงทำให้ชั้นฟิล์มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

4.2.1.2 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี ในงานวิจัยนี้จะใช้ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันในกรณีที่แสงตกกระทบในทิศทางกับ

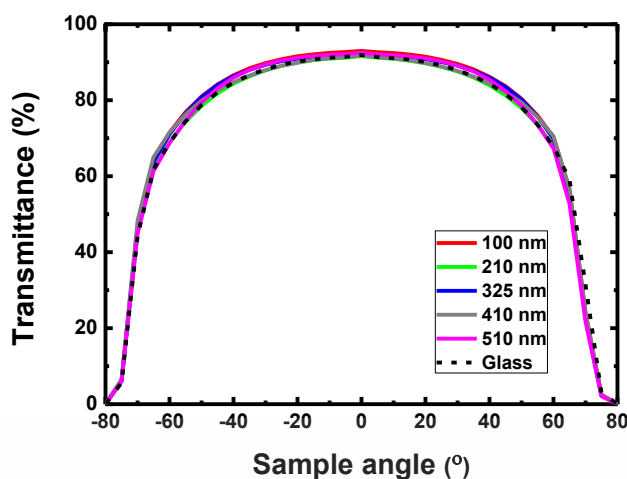
เส้นปกติ และสมบัติการส่องผ่านแสงทุกทิศทางในกรณีที่แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.14(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P

รูปที่ 4.14(ก) จากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาริเซชันในกรณีที่แสงตกกระทบในทิศทางกับเส้นปกติพบว่า เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของแสงมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสของแสงและความหนาของชั้นฟิล์มดังสมการที่ (2.63) นอกจากนั้นเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S มีค่าเท่ากับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด P ตลอดช่วงความยาวคลื่นแสง ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของกระจกมีค่าเท่ากัน คือ 92.6%, 91.7%, 92.1%, 92.5% และ 92.0% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14(ข) ดังนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ไม่มีการตอบสนองต่อโพลาริเซชันเมื่อแสงตกกระทบในทิศทางกับเส้นปกติ อีกทั้งใช้เวลาในการเคลือบที่น้อยที่สุดเท่ากับ 9 นาที หรือความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุดเท่ากับ 100 ± 2.2 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นที่สูงที่สุดเท่ากับ 92.6%

จากผลของมุมบริวสเตอร์ที่ส่งผลให้โพลาริเซชันชนิด S มีการสะท้อนที่สูงและไม่มีการสะท้อนของโพลาริเซชันชนิด P (แสงทั้งหมดจะหักเหผ่านตัวกลาง) ดังนั้นเพื่อศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงทุกทิศทางจึงกำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นโพลาริเซชันชนิด S โดยพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร และทำการปรับมุมของแผ่นรองรับตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา ดังรูปที่ 4.15

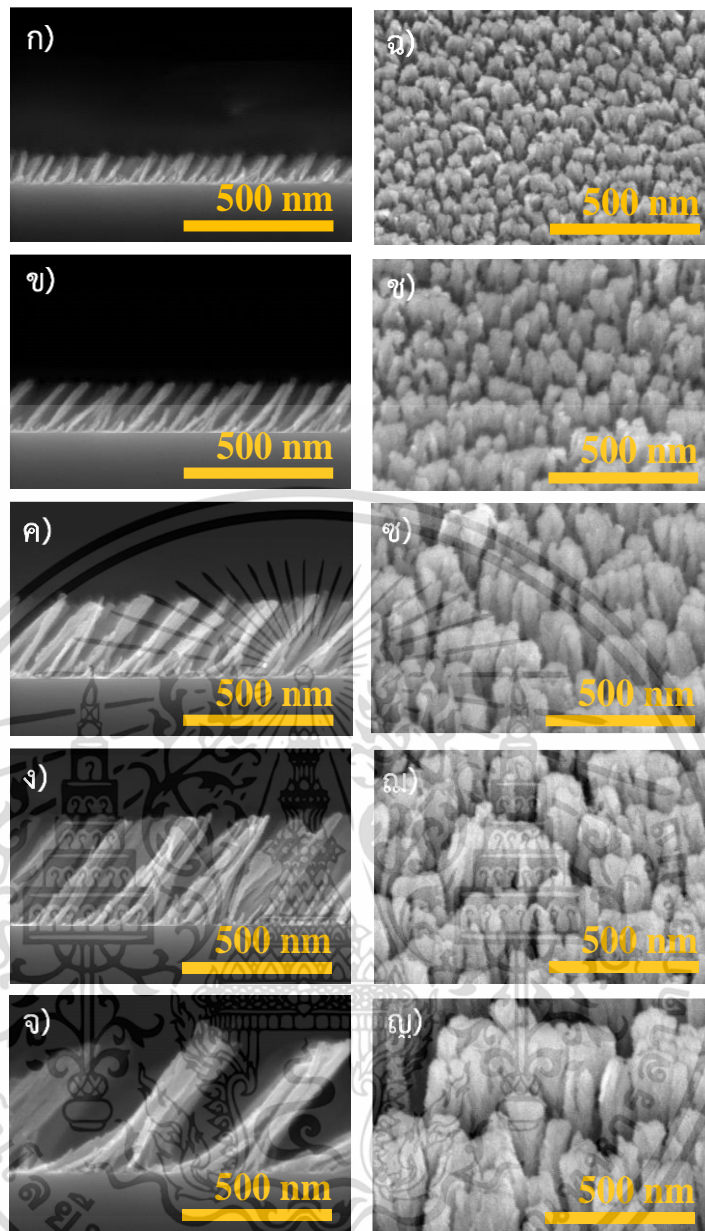


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา กับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร

จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อมุมของแผ่นรองรับหรือมุมตกกระทบของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจกมีค่าลดลงซึ่งกระจกที่ทำการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่มุมตกกระทบต่างๆเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับกระจกเปล่าที่ไม่ได้ทำการเคลือบ

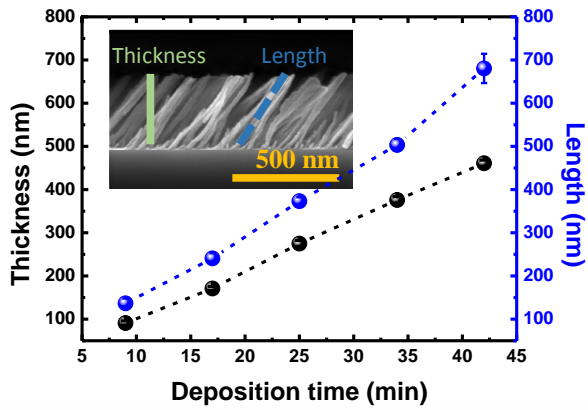
4.2.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มจากรูปที่ 4.16(ก-จ) พบว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สมมาตร และเมื่อทำการปรับเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาที ส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 91 ± 4.9 , 171 ± 4.6 , 275 ± 7.1 , 376 ± 7.4 และ 461 ± 7.0 นาโนเมตร และมีความยาวของแท่งนาโนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 135 ± 11.1 , 240 ± 12.2 , 370 ± 9.1 , 500 ± 13.7 และ 680 ± 20.0 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ความหนาและความยาวของแท่งนาโนที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาภาพพื้นผิวจากรูปที่ 4.16(ฉ-ญ) พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน เท่ากับ 52 ± 9.3 , 90 ± 9.0 , 114 ± 10.2 , 154 ± 14.2 และ 197 ± 20.0 นาโนเมตร ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่ามีการรวมกลุ่มของแท่งนาโนที่อยู่ติดกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนาแน่นลดลง

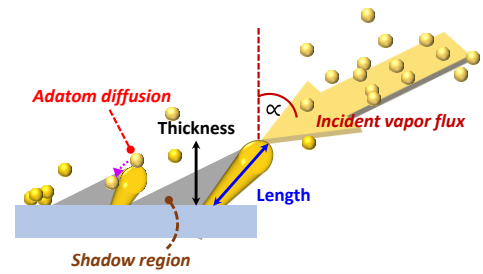


รูปที่ 4.16(ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิวจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงที่ทำการปรับเวลาในการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



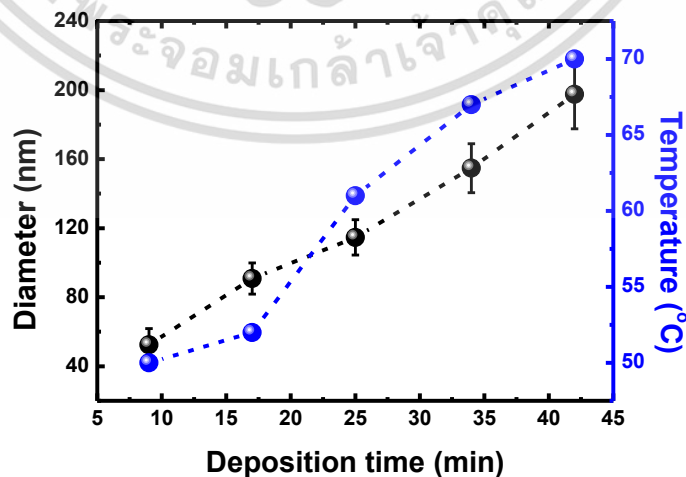
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ความหนาของชั้นฟิล์มและความยาวของแท่งนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ และ (ข) การเกิดปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว

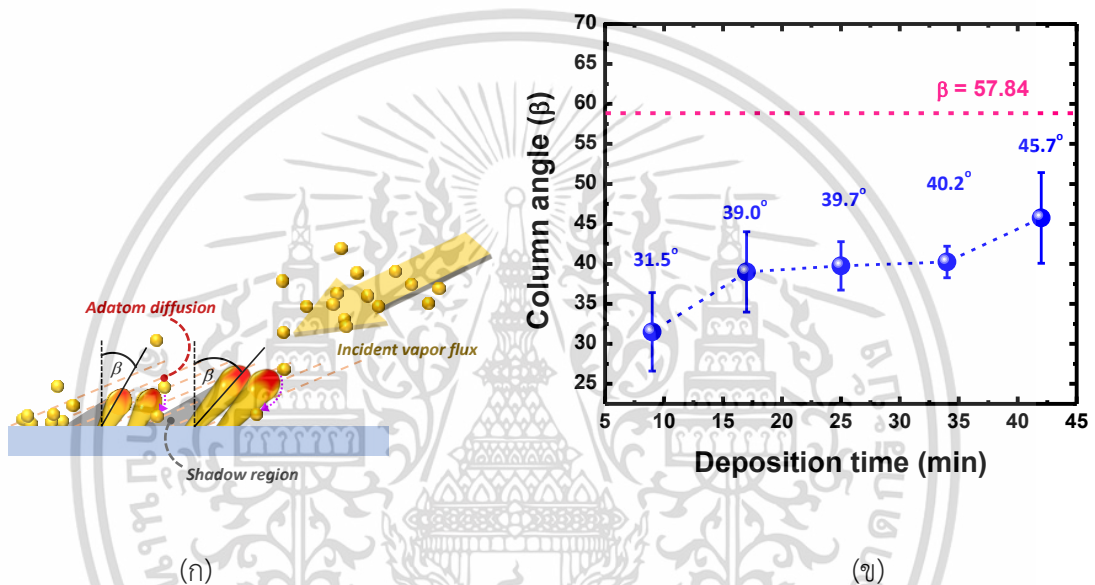
จากผลการวิเคราะห์ด้วย FE-SEM เมื่อนำมาแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.17(ก) พบว่าแท่งนาโนมีความยาวมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม เนื่องจากการเอียงมุมของแผ่นรองรับเท่ากับ 85 องศา และไม่ทำการหมุนแผ่นรองรับ ทำให้เกิดปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับในทิศทางเดียว [36] อะตอมของสารเคลือบจึงไม่สามารถตกลงมาที่บริเวณที่ถูกบดบังได้จึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างแท่งนาโน รวมถึงการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวจึงทำให้อะตอมสารเคลือบตกลงที่บริเวณเดิมแล้วก่อตัวเป็นโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงที่มีความยาวของแท่งนาโนมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.17(ข) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากความร้อนสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอุณหภูมิสะสมภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 พบว่าการที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นทั้งนี้เนื่องจากความร้อนสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น จึงเกิดเป็นความร้อนสะสมที่บริเวณพื้นผิวของแท่งนาโนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทำให้อะตอมของสารเคลือบสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้นเมื่อตกกระทบยังพื้นผิวของแท่งนาโน ดังนั้นจึงทำให้ยากต่อการจำกัดการแพร่ของอะตอม นอกจากนี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้พื้นผิวของแท่งนาโนที่อยู่ติดกันชนกันแล้วเกิดการรวมกลุ่มและแยกตัวกันอย่างชัดเจนแสดงได้ดังแบบจำลอง ดังรูปที่ 4.19(ก) และแสดงมุมการเอียงของแท่งนาโนที่กระทำกับเส้นตั้งฉากของระนาบแผ่นรองรับที่ได้จากการเคลือบโดยการปรับเวลาในการเคลือบที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.19(ข)



รูปที่ 4.19(ก) แบบจำลองปรากฏการณ์ที่ทำให้พื้นผิวของแท่งนาโนที่อยู่ติดกันชนกันแล้วเกิดการแยกตัวอย่างชัดเจน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับมุมการเอียงของแท่งนาโนที่กระทำกับเส้นตั้งฉากของระนาบแผ่นรองรับ

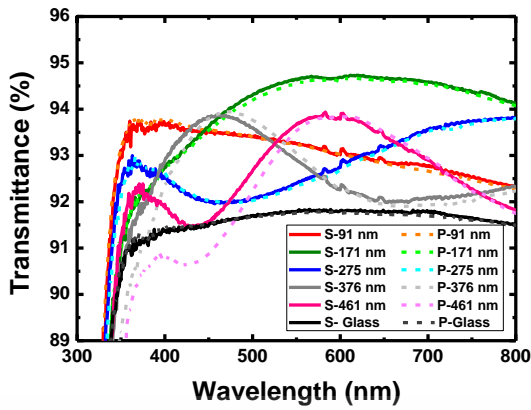
จากรูปที่ 4.19(ข) พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบมากขึ้นส่งผลให้แท่งนาโนเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบแผ่นรองรับ (β) มากขึ้นเท่ากับ 31.5 ± 4.8 , 39.0 ± 5.0 , 39.7 ± 3.0 , 40.2 ± 1.9 และ 45.7 ± 5.6 องศา ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามุมที่คำนวณได้จากทฤษฎี ($\beta = 57.8$) ในสมการที่ (2.92) ทั้งนี้เนื่องจากสมการที่ (2.92) เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณมุมการเอียงของแท่งนาโนที่เกิดจากปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งในการเคลือบจริงจะต้องพิจารณาถึงชนิดของสารเคลือบที่มีคุณสมบัติและพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้มุมการเอียงของแท่งนาโนที่ทำการเคลือบจริงมีค่าไม่ตรงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี

4.2.1.1 การใช้เทคนิคสเปคโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

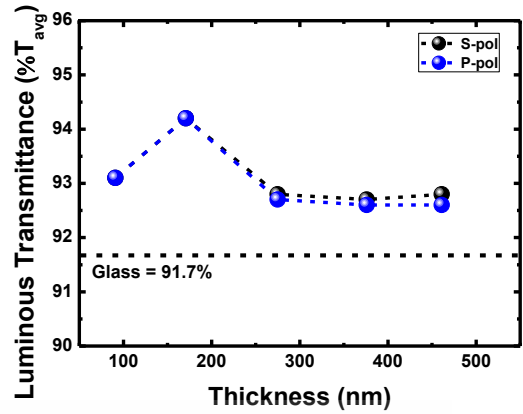
การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันในกรณีที่แสงตกกระทบในทิศทางกับเส้นปกติด้วยเทคนิคสเปคโตรโฟโตเมทรีสามารถแสดงเงื่อนไขการวิเคราะห์โพลาไรเซชันและการกำหนดชื่อของชั้นฟิล์มที่ทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.3 และสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.3 แสดงการกำหนดชื่อเงื่อนไขการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียง

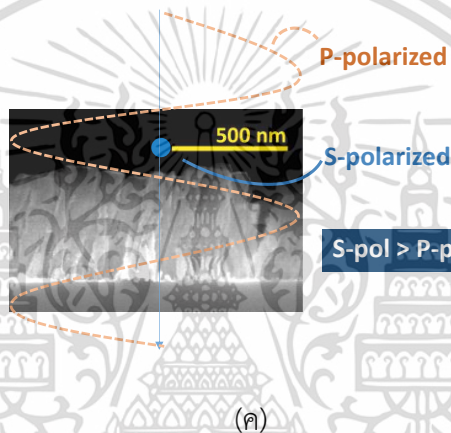
Sample	Thickness (nm)	Polarization
SL115-S	115	S-pol
SL210-S	210	S-pol
SL305-S	305	S-pol
SL405-S	405	S-pol
SL523-S	523	S-pol
SL115-P	115	P-pol
SL210-P	210	P-pol
SL305-P	305	P-pol
SL405-P	405	P-pol
SL523-P	523	P-pol



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.20(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P และ (ค) ภาพแสดงการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่มีแนวโพลาริเซชันต่างกัน

จากรูปที่ 4.20(ก) พบว่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และโพลาริเซชันชนิด P มีค่าไม่เท่ากันหรือมีการตอบสนองต่อโพลาริเซชันของแสง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S มีค่ามากกว่าโพลาริเซชันชนิด P และเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นจะพบการตอบสนองต่อโพลาริเซชันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และโพลาริเซชันชนิด P มีค่าต่างกัน ดังรูปที่ 4.20(ข) โดยสามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นได้ดังตารางที่ 4.4 ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมมาตรของชั้นฟิล์ม [37] ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงอีกทั้งเกิดจากการรวมกลุ่มและแยกตัวกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มในแนวโพลาริเซชันชนิด S และ P มีค่าไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.20(ค)

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P

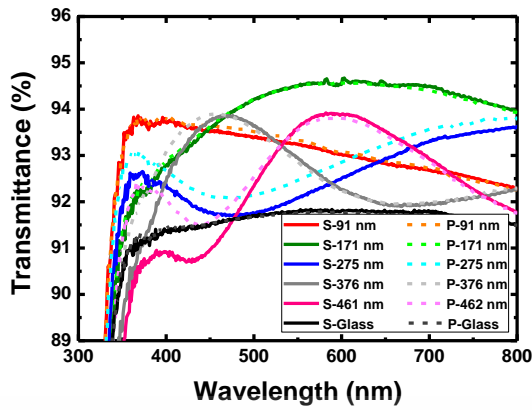
โพลาริเซชัน	ความหนาของชั้นฟิล์ม				
	91 nm	171 nm	275 nm	376 nm	461 nm
S	93.0%	93.7%	92.4%	92.5%	92.7%
P	93.0%	93.7%	92.3%	92.4%	92.5%

ในทางกลับกันจากการวิเคราะห์เมื่อทำการหมุนชั้นฟิล์มไป 90 องศา พบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด P มีค่ามากกว่าโพลาริเซชันชนิด S แสดงดังรูปที่ 4.21(ก) และเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการตอบสนองต่อโพลาริเซชันมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นมีค่าต่างกัน ดังรูปที่ 4.21(ข) โดยสามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นได้ดังตารางที่ 4.5

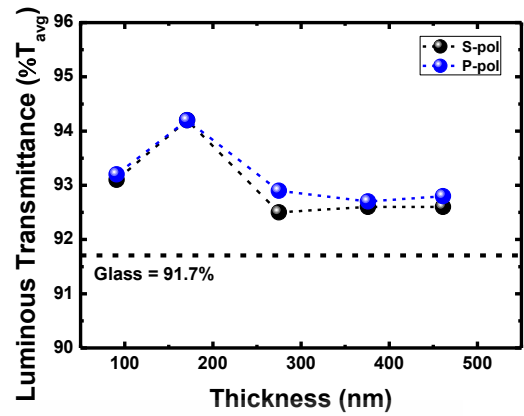
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P เมื่อทำการหมุนตัวอย่าง 90 องศา

โพลาริเซชัน	ความหนาของชั้นฟิล์ม				
	91 nm	171 nm	275 nm	376 nm	461 nm
S	93.1%	94.2%	92.5%	92.6%	92.6%
P	93.1%	94.2%	92.8%	92.7%	92.8%

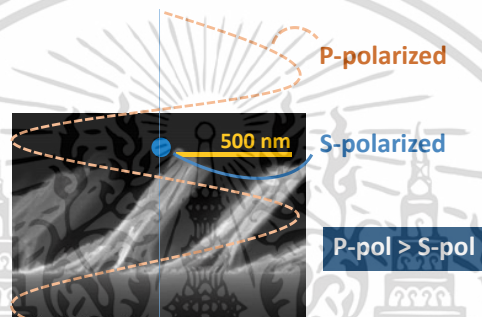
และสามารถแสดงความไม่สมมาตรของชั้นฟิล์มที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหในแนวโพลาริเซชันชนิด S และ P มีค่าไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.21(ค)



(ก)



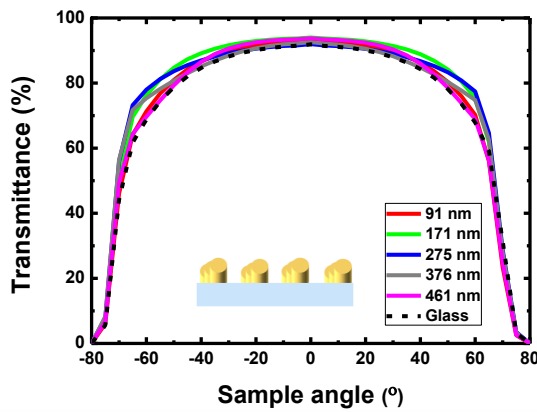
(ข)



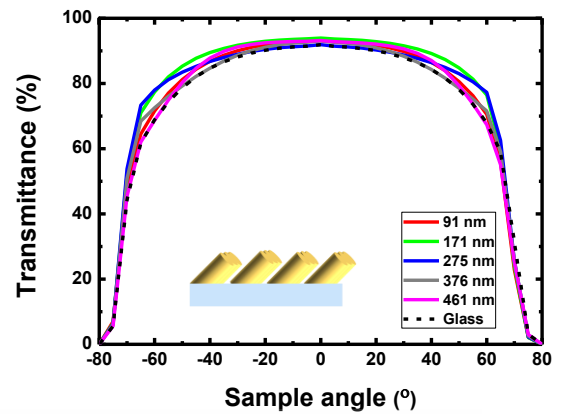
(ค)

รูปที่ 4.21(ก) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P (ข) การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P และ (ค) ภาพแสดงการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่แนวโพลาริเซชันต่างกันเมื่อทำการหมุนฟิล์ม 90 องศา

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางของโพลาริเซชันชนิด S ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร จากการปรับมุมที่แสงตกกระทบตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา แสดงดังรูปที่ 4.22



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร (ก) ไม่หมุนตัวอย่าง และ (ข) หมุนตัวอย่าง 90 องศา

จากรูปที่ 4.22(ก) และ (ข) พบว่าเมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากขึ้นกระจกที่ทำการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระจกเปล่าที่ไม่ได้ทำการเคลือบ เนื่องจากความพรุนของชั้นฟิล์มที่ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าต่ำและคุณสมบัติ gradient refractive index ซึ่งช่วยลดการสะท้อนของแสงที่บริเวณรอยต่อระหว่างอากาศกับชั้นฟิล์มเมื่อแสงทำมุมกับเส้นปกติ และช่วยลดการสะท้อนของโพลาริเซชันชนิด S เนื่องจากผลของมุมบริวสเตอร์

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงในหัวข้อนี้พบว่า ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงไม่เหมาะต่อการเคลือบเป็นกระจกป้องกันการสะท้อน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มมีความไม่สมมาตรซึ่งตอบสนองต่อโพลาริเซชันของแสงเมื่อแสงตกกระทบในทิศทางขนานกับเส้นปกติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อปรับโครงสร้างนาโนให้มีความสมมาตรและเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์เป็นฟิล์มบางป้องกันการสะท้อน ซึ่งจะทำให้การปรับการเอียงของการเคลือบในหัวข้อต่อไป

4.2.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ (GLAD)

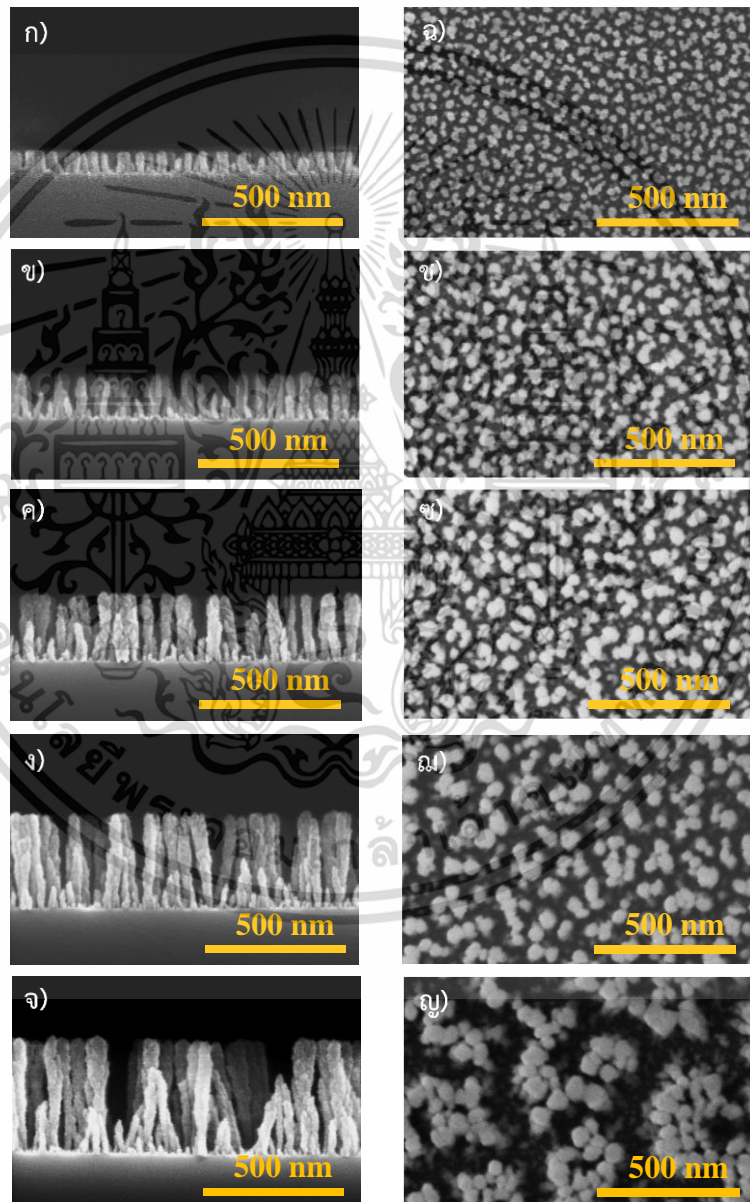
เนื่องจากการเคลือบด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิค OAD ทำให้ได้โครงสร้างนาโนที่มีลักษณะไม่สมมาตรและตอบสนองต่อโพลาริเซชันของแสงซึ่งไม่เหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการปรับวิธีการเคลือบชั้นฟิล์มเพื่อให้มีโครงสร้างนาโนที่สมมาตรยิ่งขึ้นโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบ GLAD เข้ามาร่วมด้วยนอกจากจะทำให้ได้โครงสร้างนาโนที่มีความสมมาตรแล้วยังสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของแท่งนาโนได้โดยการปรับความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับขณะทำการเคลือบ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับความเร็วรอบของแผ่นรองรับเพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนที่

แตกต่างกัน 2 โครงสร้าง คือ แบบแท่งตรงและแบบเกลียว เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นฟิล์มที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1.22 สำหรับการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนเพื่อช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงให้กับกระจก

4.2.3.1 ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง

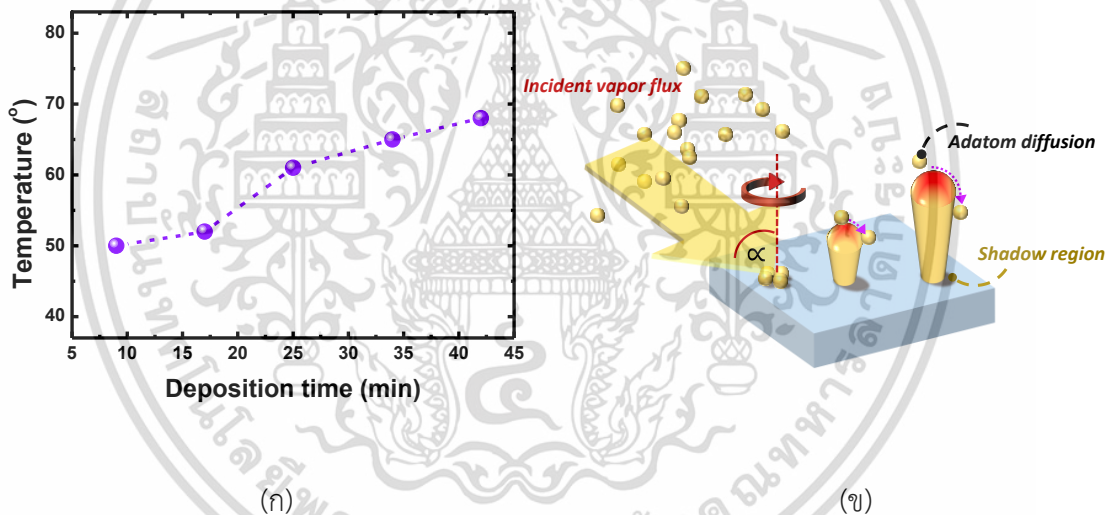
การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง จากเงื่อนไขการเอียงมุม 85 องศา และทำการหมุนแผ่นรองรับเท่ากับ 30 รอบต่อนาที ที่เวลาในการเคลือบต่างกันเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาที สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพจาก FE-SEM ได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 (ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่ง

ตรงที่ทำกรการปรับเวลาในการเคลือบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ภาพตัดขวางจากรูปที่ 4.23 (ก-จ) พบว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเคลือบมีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง และเมื่อปรับเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาที ส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 80 ± 6.4 , 155 ± 3.6 , 235 ± 25.9 , 338 ± 18.7 และ 420 ± 7.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ภาพพื้นผิวของชั้นฟิล์มดังรูปที่ 4.23(ฉ-ญ) พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนมีขนาดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 38 ± 7.3 , 42 ± 13.6 , 50 ± 13.0 , 57 ± 9.1 และ 63 ± 8.7 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 62 ± 10.0 , 68 ± 10.2 , 87 ± 12.3 , 101 ± 13.3 และ 184 ± 35.3 นาโนเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 50, 52, 61, 65 และ 68 องศา เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.24(ก) ทำให้ยากต่อการจำกัดการแพร่ของอะตอมที่บริเวณพื้นผิวของแท่งนาโน แสดงดังรูปที่ 4.24(ข) นอกจากนั้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของแท่งนาโนที่อยู่ติดกันและแยกตัวกันอย่างชัดเจนทำให้ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มมีค่าลดลง



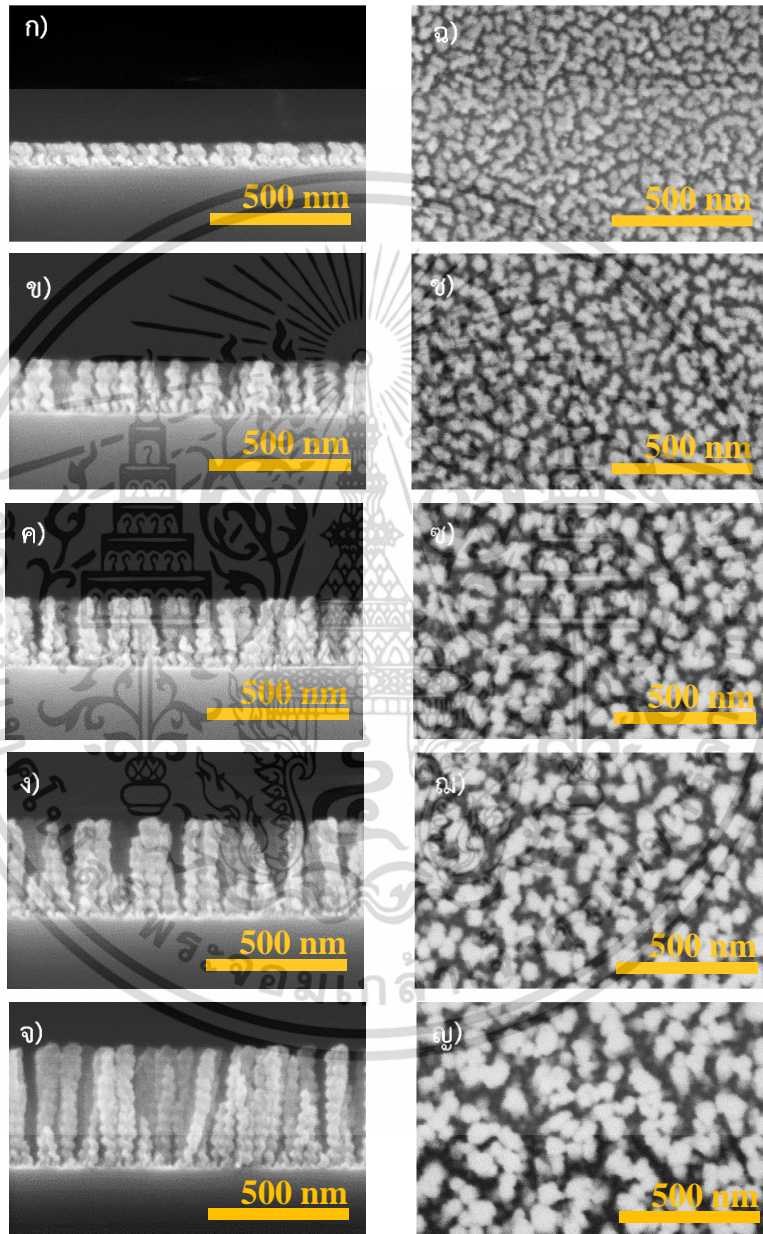
รูปที่ 4.24(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิสะสมภายในระบบ และ (ข) ภาพจำลองอุณหภูมิสะสมภายในระบบที่ส่งผลต่อการจำกัดการแพร่ของอะตอมสารเคลือบ

4.2.3.2 ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียว

จากการปรับเงื่อนไขในการเคลือบโดยการเอียงมุมของแผ่นรองรับเท่ากับ 85 องศา และปรับความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 0.2 รอบต่อนาที และการปรับเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9, 17, 25, 34 และ 42 นาที พบว่าจากศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มจากรูปที่ 4.25(ก-จ) พบว่าชั้นฟิล์มมีลักษณะโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียว และเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 85 ± 3.4 , 196 ± 4.0 ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

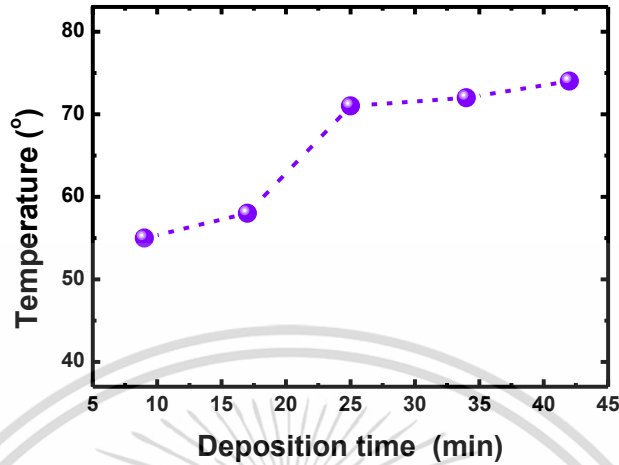
247±17.5, 347±4.4 และ 439±5.6 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพพื้นผิวจากรูปที่ 4.25(ฉ-ญ) พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 46±12.4, 48±11.9, 58±9.5, 68±11.5 และ 81±17.3 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 55±6.9, 60±12.4, 83±14.1, 93±13.9 และ 120±21.1 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.25(ก-จ) ภาพตัดขวาง และ (ฉ-ญ) ภาพพื้นผิว จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวที่ทำการปรับเวลาในการเคลือบ

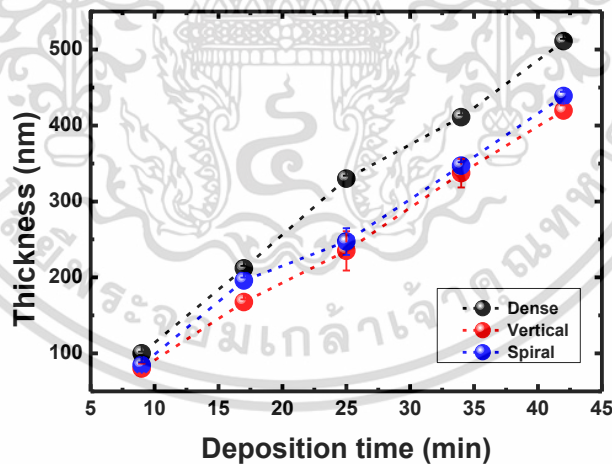
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบดังรูปที่ 4.26 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและอุณหภูมิภายในระบบ

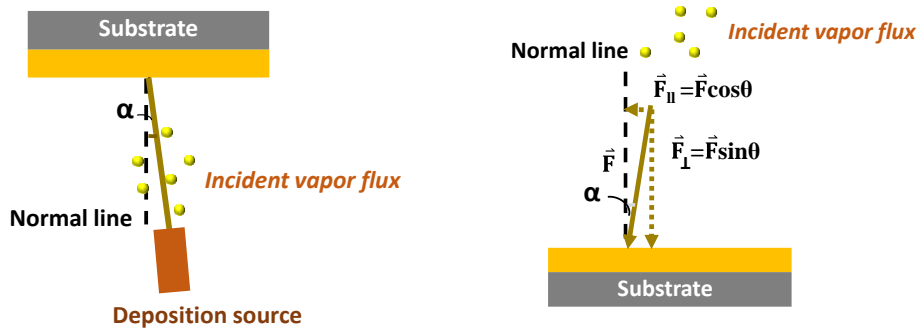
พิจารณาการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวกับชั้นฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นแบบทั่วไป ดังรูปที่ 4.27



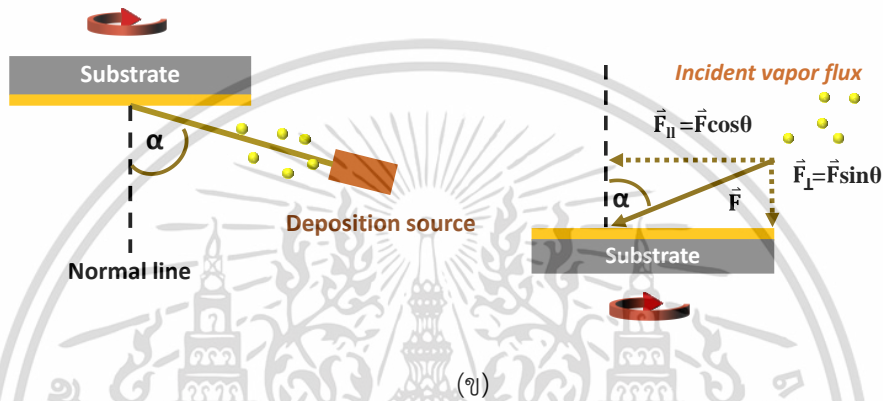
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและความหนาของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากรูปที่ 4.27 พบว่า ที่เวลาในการเคลือบเท่ากันชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนจะมีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยกว่าฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นเนื่องจากมุมระหว่างอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบกับแผ่นรองรับ [26] แสดงดังรูปที่ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



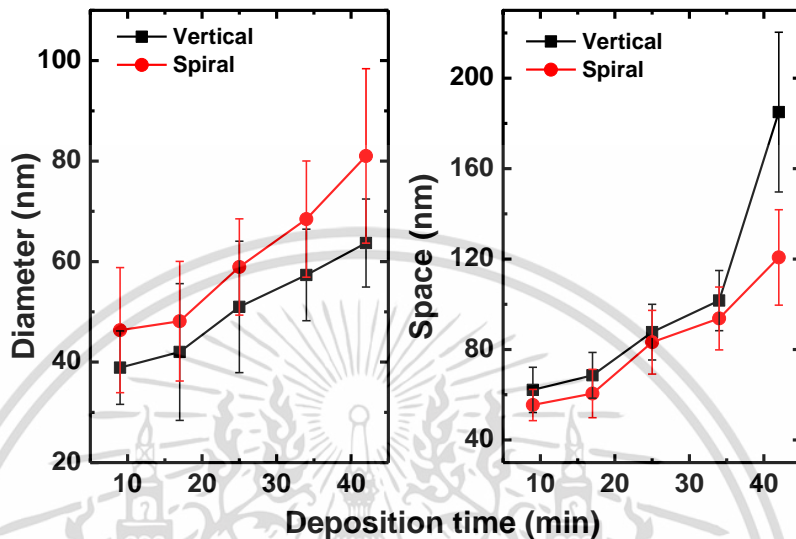
(ข)

รูปที่ 4.28 การปรับมุมระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแผ่นรองรับที่ส่งผลต่อความหนาและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์ม (ก) การเคลือบฟิล์มบางแบบทั่วไป และ (ข) การเคลือบแบบเอียงมุม

รูปที่ 4.28 พิจารณาให้เวกเตอร์ \vec{F} เป็นทิศการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบ สามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือ อะตอมของสารเคลือบที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ ($\vec{F}\sin\theta$) และอะตอมของสารเคลือบที่ขนานกับแผ่นรองรับ ($\vec{F}\cos\theta$) เมื่อพิจารณาฟิล์มบางแบบทั่วไป ที่มีมุมระหว่างอะตอมของสารเคลือบที่ตกกระทบกับแผ่นรองรับเท่ากับ 12 องศา ($\alpha = 12^\circ$) หรืออนุมาณว่าอะตอมของสารเคลือบไม่ทำมุมกับแผ่นรองรับ ($\alpha = 0^\circ$) ดังรูปที่ 4.28(ก) พบว่า อะตอมของสารเคลือบจะก่อตัวบนพื้นผิวของแผ่นรองรับในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นรองรับมากกว่าในทิศขนานกับกับแผ่นรองรับ ($\vec{F}\sin\theta > \vec{F}\cos\theta$) ดังนั้นจึงทำให้อะตอมของสารเคลือบสามารถก่อตัวบนพื้นผิวแผ่นรองรับได้ดีและมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่น ทำให้มีความหนาของชั้นฟิล์มมากกว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนซึ่งเกิดจากมุมระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแผ่นรองรับ ($\alpha = 85^\circ$) และการหมุนแผ่นรองรับขณะเคลือบ ดังรูปที่ 4.28(ข) พบว่าอะตอมของสารเคลือบสามารถก่อตัวลงบนแผ่นรองรับในทิศทางขนานกับแผ่นรองรับมากกว่าในทิศตั้งฉากกับกับแผ่นรองรับ ($\vec{F}\cos\theta > \vec{F}\sin\theta$) ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์บดบังของอะตอมสารเคลือบระหว่างการตกสู่แผ่นรองรับกับการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมของสารเคลือบ นอกจากนี้ความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับแบบช้า (0.2 rpm) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์บดบังและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบอย่างช้าๆ ดังนั้นอะตอมของสารเคลือบจะสามารถก่อตัวลงบนพื้นผิวแผ่นรองรับได้ดีกว่าการหมุนแผ่นรองรับแบบเร็ว (30 rpm) ดังนั้นจึงพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวจะมีความหนาของชั้นฟิล์มมากกว่าโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง และจากการวิเคราะห์ภาพพื้นผิวสามารถเปรียบเทียบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวได้ดังรูปที่ 4.29

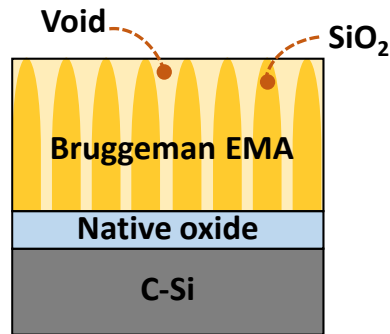


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะห่างระหว่างแท่งนาโนของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว

จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.29 พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งนาโนมีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนสะสมภายในระบบที่สัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีขนาดใหญ่กว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง และเมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างแท่งนาโน พบว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีระยะห่างที่น้อยกว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับแบบช้า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์บดบังและการจำกัดการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบอย่างช้าๆ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จะได้ว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งเกลียวมีความหนาแน่นมากกว่าชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรง

4.2.3.1 การใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

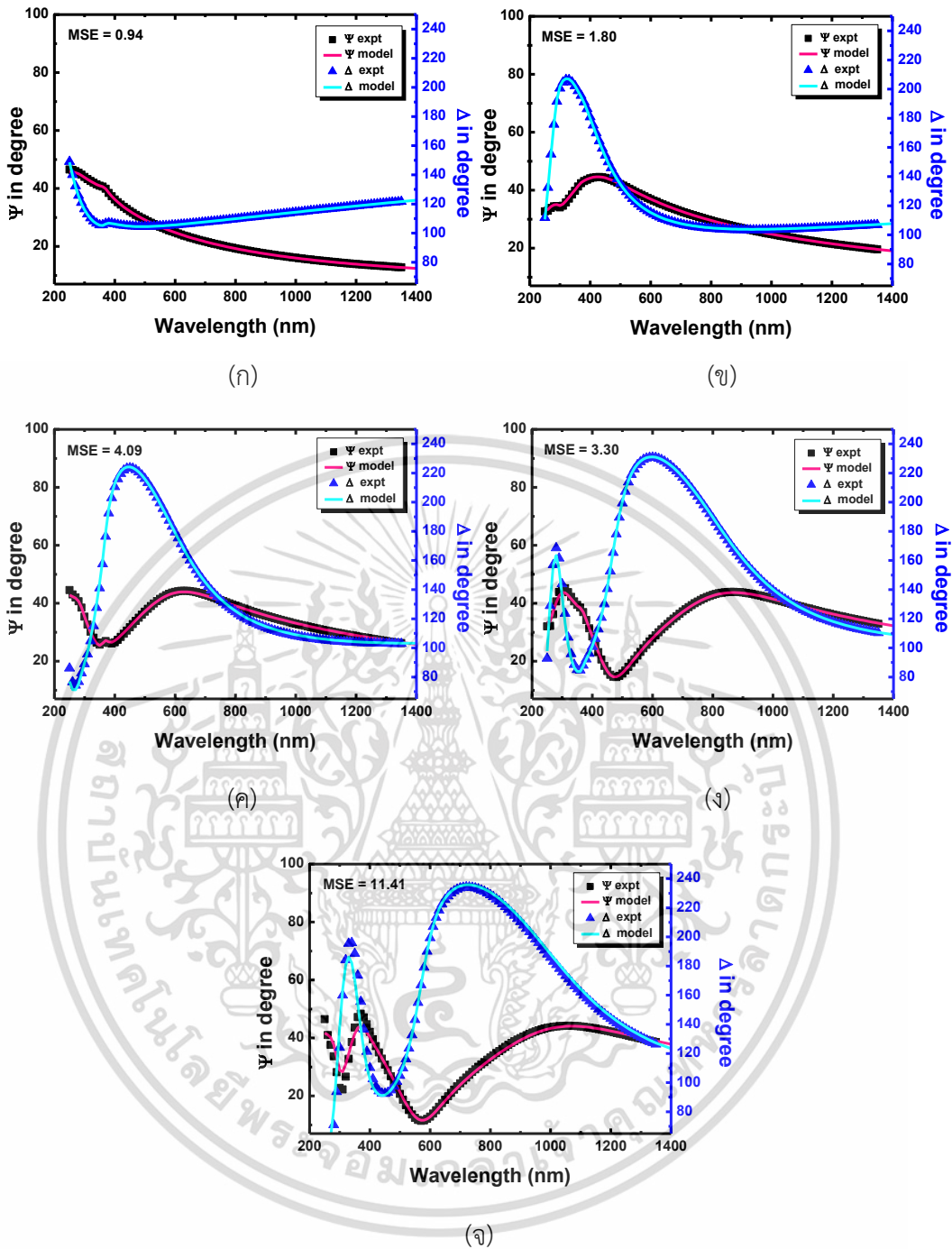
การวิเคราะห์ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต สามารถแสดงแบบจำลองทางกายภาพได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แบบจำลองทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว

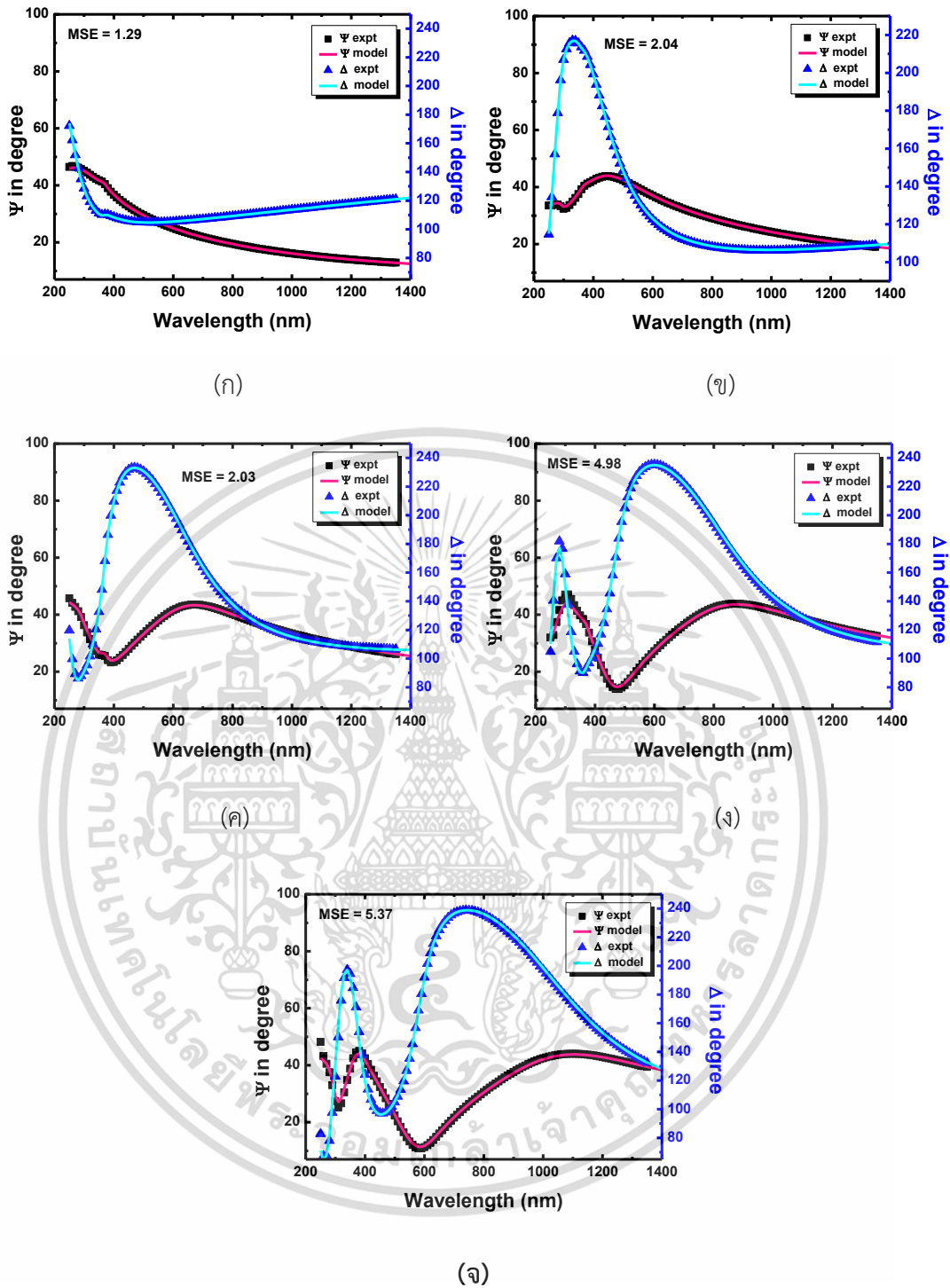
จากรูปที่ 4.30 แสดงแบบจำลองทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวเพื่อวิเคราะห์ค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์ม โดยแบบจำลองทางกายภาพประกอบด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์ (C-Si) ซึ่งเป็นแผ่นรองรับและชั้นเนทีฟออกไซด์ (Native Oxide) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดขึ้นจากออกไซด์ในชั้นบรรยากาศทั่วไป ต่อมาคือ ชั้นฟิล์มของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว โดยสมมติฐานว่าชั้นฟิล์มที่เคลือบมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน คือ เป็นชั้นของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีช่องว่างของอากาศ (Void) ซึ่งมาจากการใส่ชั้นของ Bruggeman Effective Medium Approximation (Bruggeman EMA) และเลือกสมการคออร์ซี (Cauchy dispersion) เป็นแบบจำลองทางแสง เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นฉนวนที่ไม่มีการดูดกลืนแสง ($k=0$) หรือฟิล์มบางใส

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวกับผลการคำนวณโดยโปรแกรม WVASE 32 ของเทคนิคสเปคโตรสโคปีคิอิลิปโซเมทรี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงเมื่อเวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที

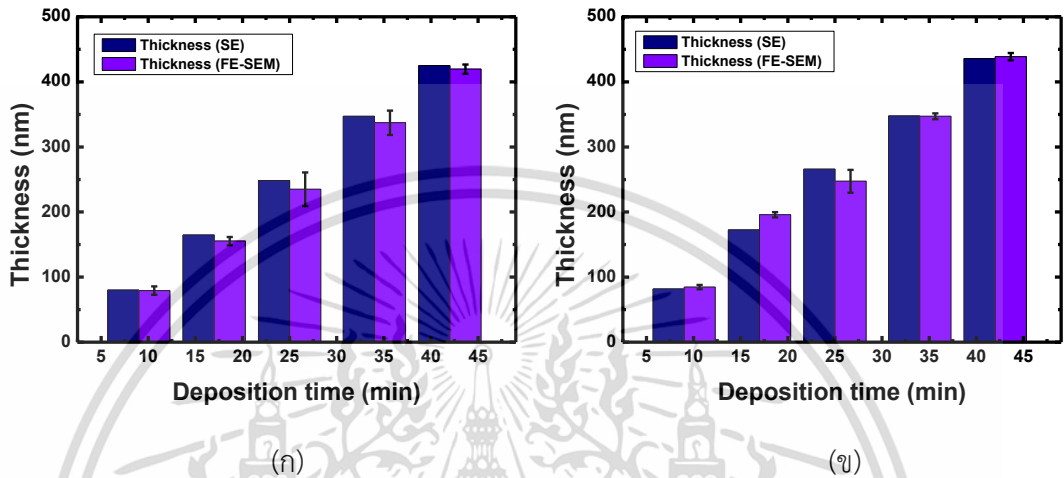
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงที่มุมตกกระทบ 70° ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวเมื่อเวลาในการเคลือบต่างกัน (ก) 9 นาที (ข) 17 นาที (ค) 25 นาที (ง) 34 นาที และ (จ) 42 นาที

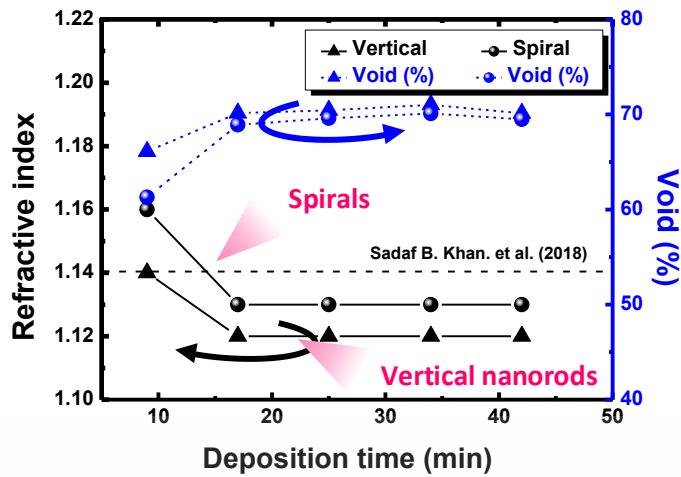
จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) ดังรูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวพบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบต่างกันค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับผลการวัด (MSE) มีค่าความผิดพลาดน้อยมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในกรณีของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงมีค่าเท่ากับ 0.94, 1.80, 4.09, 3.30 และ 11.41 ตามลำดับ และในกรณีของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีค่าเท่ากับ 1.29, 2.04, 2.03, 4.98 และ 5.37 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่เลือกใช้จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม โดยสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความหนาดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรี และ FE-SEM ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน (ก) แบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว

จากการวิเคราะห์ผลของความหนาดังรูปที่ 4.33 พบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM โดยมีค่าของความหนาที่แตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นฟิล์มที่เคลือบมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ และสามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ได้ดังรูปที่ 3.34

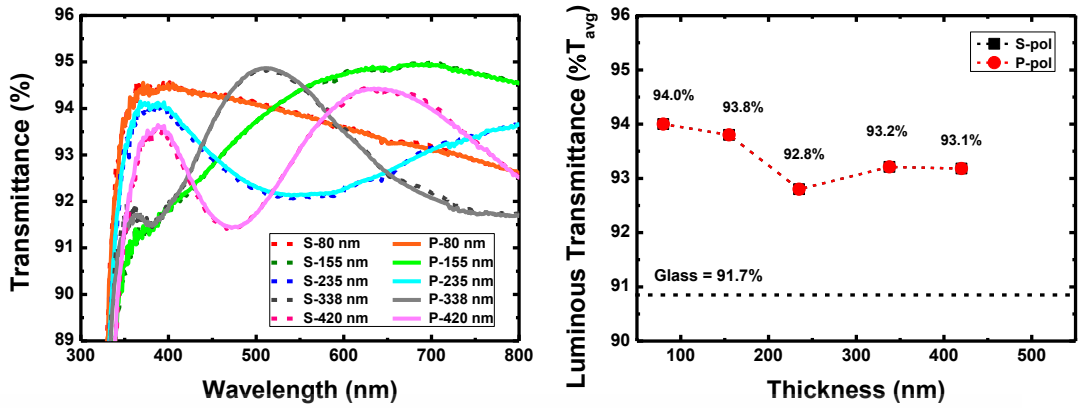


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบและค่าดัชนีหักเหกับช่องว่างของอากาศ (Void) ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว

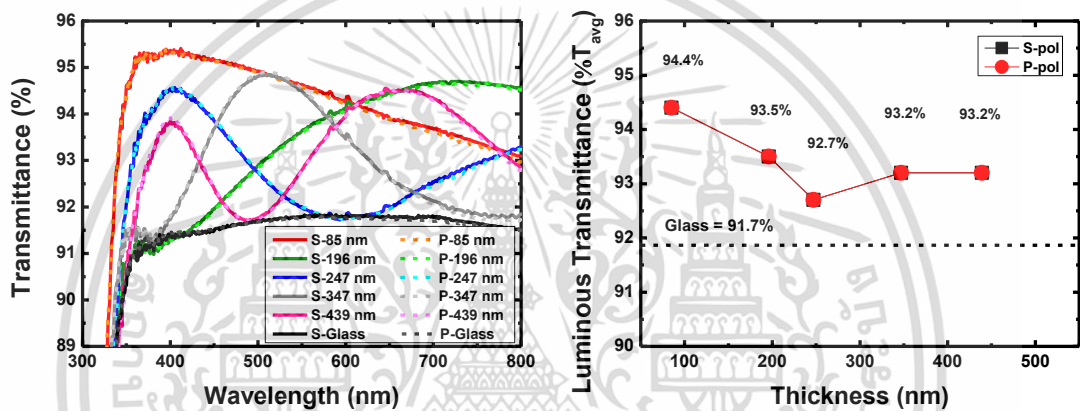
จากรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นฟิล์มที่ลดลง ซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์ภาพพื้นผิวในหัวข้อที่ผ่านมาและเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (Void) ที่เพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการเคลือบที่น้อยที่สุดเท่ากับ 9 นาที ชั้นฟิล์มมีค่าดัชนีหักเหที่สูงที่สุดเท่ากับ 1.14 และ 1.16 ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีความหนาแน่นมากกว่าแบบแท่งตรง

4.2.4.2 การใช้เทคนิคสเปคโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

การศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวนี้จะใช้เทคนิคสเปคโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันในกรณีที่แสงตกกระทบในทิศทางกับเส้นปกติ และศึกษาสมบัติการส่องผ่านแสงทุกทิศทางในกรณีที่แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติ โดยการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันของชั้นฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจกแสดงดังรูปที่ 4.35



(ก)



(ข)

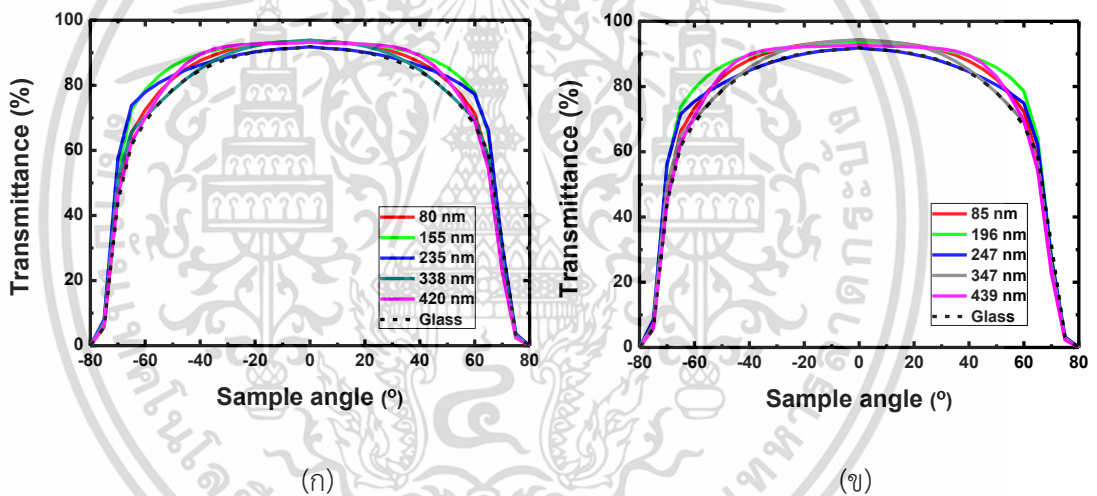
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นแสงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S และ P และการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการปรับเวลาในการเคลือบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของโพลาริเซชันชนิด S และ P ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว

จากการศึกษาโพลาริเซชันของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงแสดงดังรูปที่ 4.35(ก) พบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาริเซชันชนิด S มีค่าเท่ากับโพลาริเซชันชนิด P ตลอดช่วงความยาวคลื่นแสง ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของกระจกเท่ากัน คือ 94.0%, 93.8%, 92.8%, 93.2% และ 93.2% ตามลำดับ นั้นหมายความว่าฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงไม่มีการตอบสนองต่อโพลาริเซชันเมื่อแสงตกกระทบในทิศทางกับเส้นปกติและที่ความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุดเท่ากับ 80 ± 6.4 นาโนเมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นที่สูงที่สุดเท่ากับ 94.0% ซึ่งช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจก 2.3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงและโพลาไรเซชันของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียว จากรูปที่ 4.35(ข) พบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาไรเซชันชนิด S มีค่าเท่ากับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของโพลาไรเซชันชนิด P ตลอดช่วงความยาวคลื่นแสง ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของกระจกเท่ากัน คือ 94.4%, 93.6%, 92.7%, 93.2% และ 93.3% ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวไม่มีการตอบสนองต่อโพลาไรเซชันเมื่อแสงตกกระทบในทิศขนานกับเส้นปกติ และจะพบว่าที่เวลาในการเคลือบที่น้อยที่สุดซึ่งมีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 85 ± 3.4 นาโนเมตร กระจกจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามมองเห็นสูงที่สุดเท่ากับ 94.4% ซึ่งช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจก 2.7%

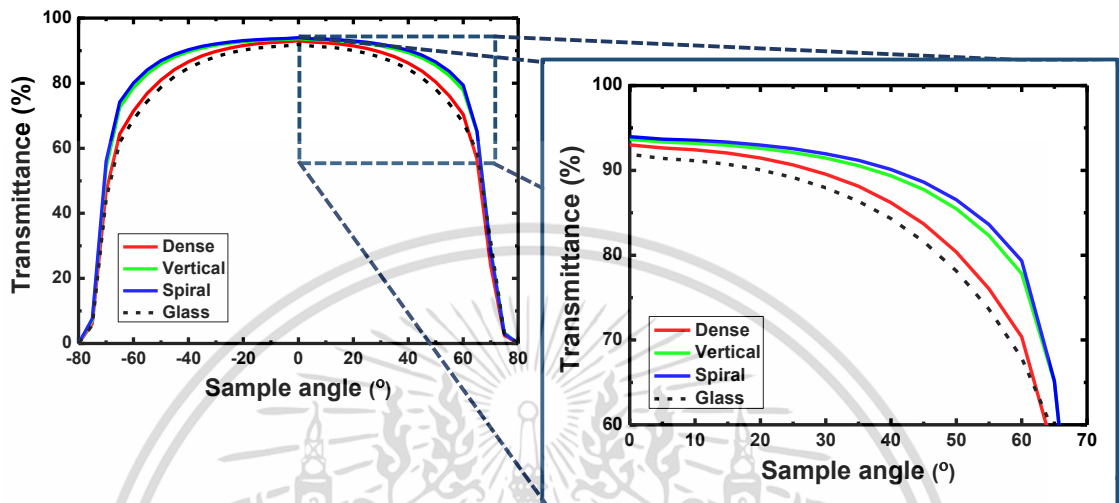
การศึกษสมบัติการส่องผ่านแสงทุกทิศทางของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวที่เวลาในการเคลือบต่างกัน กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นโพลาไรเซชันชนิด S โดยพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร และทำการปรับมุมของแผ่นรองรับตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา แสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน (ก) แบบแท่งตรง และ (ข) แบบแท่งเกลียว

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางดังรูปที่ 4.36 พบว่ากระจกที่ทำการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวมีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทาง เนื่องจากเมื่อมุมของแผ่นรองรับมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระจกเปล่าที่ไม่ได้ทำการเคลือบ จากรูปที่ 4.36(ก) เมื่อพิจารณาชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงพบว่า ที่เวลาในการเคลือบเท่ากับ 17 นาที หรือความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 155 นาโนเมตร มีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่สูงที่สุด และจากรูปที่ 4.36(ข) เมื่อพิจารณาชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวพบว่า ที่เวลาในการเคลือบเท่ากับ 17 นาที หรือความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 196 นาโนเมตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของชั้นฟิล์มที่ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหต่ำและมีคุณสมบัติ Gradient refractive index ที่ดี และเมื่อนำเงื่อนไขของชั้นฟิล์มที่มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงที่สุดของแต่ละโครงสร้างมาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สามารถแสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแผ่นรองรับกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.37 พบว่ากระจกที่ทำการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวและแท่งตรงมีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่ดีกว่าฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นแบบทั่วไป โดยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่สูงที่สุด ตั้งแต่มุมที่แสงตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 65 องศา และเมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบเท่ากับ 55 และ 60 องศา ซึ่งเป็นมุมที่มีค่าใกล้เคียงกับมุมบรีวสเตอร์ของกระจกประมาณ 56.3 องศา พบว่าชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจกเท่ากับ 10% และ 11.4% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกระจกเปล่าที่ไม่ได้ทำการเคลือบ โดยสามารถแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นที่มุมตกกระทบต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 80 องศา ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน

มุมที่แสงตกกระทบ	กระจก	ฟิล์มบาง	แท่งตรง	แท่งเกลียว
0	91.8	93.0	93.6	93.9
5	91.4	92.6	93.3	93.6
10	91.1	92.4	93.1	93.5
15	90.7	92.0	92.9	93.3
20	90	91.4	92.6	92.9
25	89.1	90.6	92.1	92.5
30	87.9	89.5	91.4	91.9
35	86.3	88.1	90.5	91.1
40	84.3	86.1	89.3	90.1
45	81.6	83.6	87.7	88.6
50	78.1	80.3	85.4	86.5
55	73.6	76.0	82.3	83.6
60	67.9	70.3	77.8	79.3
65	58.9	56.6	65.0	65.1
70	31.4	24.0	29.2	28.4
75	3.0	2.5	3.3	3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนเพื่อประยุกต์ใช้ในการเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน สามารถสรุปได้โดยแสดงเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่ส่งผลต่อการส่องผ่านแสงของกระจกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มบางสำหรับกระจกลดการสะท้อน พบว่าค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มควรมีค่าเท่ากับ 1.22 และเคลือบที่ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 112 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์โดยเริ่มจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิค RCWA ของชั้นฟิล์มที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จากการศึกษาผลของลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์ม 3 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน และความหนาของชั้นฟิล์ม

5.1.1 การศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโน

จากการจำลองนี้พบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อค่าอัตราส่วนเชิงปริมาตรระหว่างแท่งนาโนและอากาศ (f) ที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหซึ่งผลเฉลี่ยในปริมาตรหรือค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์ม โดยที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเท่ากับ 60 นาโนเมตร และความสูงของชั้นฟิล์มเท่ากับ 112 นาโนเมตร มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.23 และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นที่สูงที่สุดเท่ากับ 95.6%

5.1.2 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม

จากการจำลองความหนาของชั้นฟิล์มพบว่า เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของแสงมากขึ้น เนื่องจากค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่สัมพันธ์กับเฟสของคลื่นแสง และความหนาของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยในปริมาตร โดยความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 100 และ 112 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากัน และมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 95.6%

5.2 การศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโน

5.2.1 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

จากผลการเคลือบจะได้ชั้นฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนาและอุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้น

5.2.1.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

จากการวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปอิลิปโซเมทรีมีพบว่า มีค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 นาโนเมตร พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเวลาในการเคลือบที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิสะสมในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการอบอย่างอ่อนของชั้นฟิล์ม (Self-annealing) ชั้นฟิล์มจึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

5.2.1.2 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

1.) ชั้นฟิล์มที่เวลาในการเคลือบน้อยที่สุดเท่ากับ 9 นาที หรือความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุดเท่ากับ 100 ± 2.2 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงที่สุดเท่ากับ 92.6% โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่องผ่านแสงของกระจกเท่ากับ 0.9% และไม่ตอบสนองต่อโพลาไรเซชันเมื่อแสงตกกระทบขนานกับเส้นปกติ

2.) ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 100 ± 2.2 นาโนเมตร มีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางสูงที่สุด

5.2.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุม (OAD)

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพพบว่า ได้ชั้นฟิล์มบางที่มีโครงสร้างแบบแท่งเอียงซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สมมาตร ส่งผลต่อโพลาไรเซชันของแสงซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำมาเคลือบสำหรับชั้นฟิล์มป้องกันการสะท้อน

5.2.2.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

1. ชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเอียงเป็นชั้นฟิล์มที่มีลักษณะโครงสร้างไม่สมมาตรจึงประพฤติตัวเสมือนวัสดุไบรีฟรินเจนท์ ส่งผลให้สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของโพลาไรเซชันชนิด S และ P มีค่าไม่เท่ากันหรือมีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงเมื่อแสงตกกระทบขนานกับเส้นปกติ และที่ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 171 ± 4.6 นาโนเมตร มีสมบัติการส่องผ่านแสงสูงที่สุด คือ 94.2% โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการส่องผ่านแสงของกระจก 2.5%

2. ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 171 ± 4.6 นาโนเมตร มีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทาง สูงที่สุด

5.2.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับ เทคนิคการเคลือบแบบเอียงมุมและหมุนแผ่นรองรับ (GLAD)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพบว่าชั้นฟิล์มมีโครงสร้างสมมาตร เมื่อปรับเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น อีกทั้งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนสะสมที่เพิ่มขึ้นในระบบที่สัมพันธ์กับเวลาในการเคลือบทำให้ยากต่อการจำกัดการแพร่ของอะตอมและความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้นฟิล์ม คือ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 รอบต่อนาที พบว่าชั้นฟิล์มมีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและมีความพรุนสูง และเมื่อลดความเร็วรอบในการหมุนแผ่นรองรับเท่ากับ 0.2 รอบต่อนาที พบว่าชั้นฟิล์มมีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

5.2.3.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอัลตราไวโอเล็ตในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอัลตราไวโอเล็ตพบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM และเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มลดลง และที่เวลาในการเคลือบที่น้อยที่สุดเท่ากับ 9 นาที ของทั้งสองโครงสร้างมีค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มสูงที่สุดเท่ากับ 1.14 และ 1.16 ตามลำดับ

5.2.3.2 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ชั้นฟิล์ม

1. เวลาในการเคลือบที่น้อยที่สุดเท่ากับ 9 นาที ของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียว มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นสูงที่สุดเท่ากับ 94.0% และ 94.4% ตามลำดับ โดยชั้นฟิล์มบางที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็นที่สูงที่สุด

2. กระจุกที่ทำการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งตรงและแท่งเกลียวที่ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 155 ± 3.6 และ 196 ± 4.0 นาโนเมตร มีสมบัติการส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่สูงที่สุด โดยชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงรอบทิศทางที่สูงที่สุด ตั้งแต่มุมที่แสงตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 65 องศา และเมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบเท่ากับ 55 และ 60 องศา ซึ่งเป็นมุมที่มีค่าใกล้เคียงกับมุมบรีวสเตอร์ของกระจุก พบว่าชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนแบบแท่งเกลียวช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจุกเท่ากับ 10% และ 11.4% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกระจุกเปล่าที่ไม่ได้ทำการเคลือบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การปรับค่าความหนาของชั้นฟิล์มควรเคลือบให้ความหนาจากการทดลองเท่ากับความหนาจากการคำนวณ

5.5.2 ศึกษาวิธีการเคลือบเพื่อทำให้ชั้นฟิล์มของโครงสร้างนาโนมีความเป็นระเบียบมากขึ้น

5.2.3 ทำการปรับเงื่อนไขในการเคลือบจากเงื่อนไขเดิมเพื่อปรับปรุงและพัฒนาการส่องผ่านแสงของกระจกให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Prado, G. Beobide, A. Marcaide, J. Goikoetxea, A. Aranzabe. 2010. "Development of multifunctional sol-gel coatings : Anti-reflection coatings with enhanced self-cleaning capacity." *Sol Energy Mater Sol Cells*. 94 : 1081-1088.
- [2] D. Lesnic, G. Wakefield, B.D. Sleeman, J.R. Ockendon. 2010. "Determination of the index of refraction of anti-reflection coatings." *Mathematics-in-Industry Case Studies Journal*. 2 : 155-173.
- [3] S. Bruynooghe, M. Schulze, M. Helgert, M. Challier, D. Tonova, M. Sundermann, T. Koch, A. Gatto and E.-B. Kley. 2015. "Broadband and wide-angle hybrid antireflection coatings prepared by combining interference multilayers with subwavelength structures." *Journal of Nanophotonics*. 10(3) : 033002.
- [4] H.N. Azlinaa, J.N. Hasnidawani, H. Noritaa and S.N. Surip. 2015. "Synthesis of SiO₂ Nanostructures Using Sol-Gel Method." *Acta Physica Polonica*. 129(4) : 842-844.
- [5] S. S. Shindež, S. Park, and J. Shin. 2015. "Spin synthesis of monolayer of SiO₂ thin films." *Journal of Semiconductors*. 36(4) : 043002.
- [6] Le-Nian Hea and Jin Xu. 2003. "Properties of amorphous SiO₂ films prepared by reactive RF magnetron sputtering method." *Vacuum*. 68 : 197-202.
- [7] Hao Zhang, Chaogang Lou, Xiaodan Huang, Xiaojian Yu, Hua Yang, and Didier Pribat. "A broadband antireflective nanostructure with Ag nanoparticles on SiO₂ nanocolumns." *Appl. Phys. Lett*. 111 : 201602.
- [8] J.-Q. XI, MARTIN F. SCHUBERT, JONG KYU KIM, E. FRED SCHUBERT, MINFENG CHEN, SHAWN-YU LIN, W. LIU AND J. A. SMART. 2007. "Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection." *Nature photonics*. 1 : 176-179.
- [9] B. Dick, M. J. Brett, and T. Smy. 2003. "Controlled growth of periodic pillars by glancing angle deposition." *Journal of Vacuum Science & Technology*. 21(1) : 23-28.
- [10] จำนง ฉายเชิด. 2549. **ทัศนศาสตร์ฟิล์มบาง**. นครปฐม : มหาวิทยาลัยศิลปกร.
- [11] Andrew Bruce. 2018. *The Electromagnetic Spectrum & UV Rays*. [Online]. Available:<http://www.dailyoptician.com/andrewbruce/2015/9/23/theelectromagnetic-spectrum-uv-rays-andrew-bruce>.
- [12] David J. Griffiths. 2008. **Introduction to electrodynamics**. United States of America.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13, 14] Wikipedia. 2018. Fresnel equations. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations.
- [15] รศ.ดร. วรารุณี เถาลัดดา. **ออปโตอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] S. Chattopadhyay, Y.F. Huang, Y.J. Jen, A. Ganguly, K.H. Chen and L.C. Chen. 2010. "Anti-reflecting and photonic nanostructures.". *Materials Science and Engineering R*. 69 : 1–35.
- [17] J. Chandezon, D. Maystre, G. Raoult. 1980. "A new theoretical method for diffraction gratings and its numerical application." *J. Optics (Paris)*. 11(4) : 235-241.
- [18] นางสาวเบญจพร พวงจำปี. 2547. ซิลิคอน. [Online]. Available : www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3249.
- [19] Daniel Dobkin. 2016. SiO₂: Properties and Applications. [Online]. Available : http://www.enigmaticconsulting.com/semiconductor_processing/CVD_Fundamentals/films/SiO2_properties.html.
- [20] N. K. Sahoo, S. Thakur, D. Bhattacharyya and N. C. Das. 1999. Ion assisted deposition of refractory oxide thin film coatings for improved optical and structural properties. India : Bhabha atomic research centre Mumbai.
- [21] สุคนธ์ กาละสังข์. 2558. "ศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการประยุกต์ในพื้นที่ขยายสัญญาณการกระเจิงแบบรามาน." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- [22] *Rer. Nat.* 1980. "Glancing angle deposition of silicon nanostructures by ion beam sputtering." *Doctors degree Phys. Universitat Leipzig*.
- [23] K. Robbie, G. Beydaghyan, T. Brown, C. Dean and J. Adams. "Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure." *American Institute of Physics*. 75(4) : 1089-1097.
- [24] Eric B. Grann, M. G. Moharam, and Drew A. Pommet. 1994. "Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings." *J. Opt. Soc. Am. A*. 11(10) : 2695- 2703.
- [25] K. Narasimha Rao *, L. Shivlingappa, S. Mohan. 2003. "Studies on single layer CeO₂ and SiO₂ films deposited by rotating crucible electron beam evaporation." *Materials Science and Engineering*. 98 : 38-44.

- [26] Y.-P. Zhao, D.-X. Ye, G.-C. Wang, and T.-M. Lu. 2003. "Designing Nanostructures by Glancing Angle Deposition." *Proc. of SPIE*. 5219 : 59-73.
- [27] H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair and S. Ramakrishn. 2011. "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review" *Energy Environ. Sci.* 4 : 3779.
- [28] Katherine Han and Chih-Hung Chang. 2014. "Numerical Modeling of Sub-Wavelength Anti-Reflective Structures for Solar Module Applications." *Nanomaterials*. 4 : 87-128.
- [29] Wang Guogang, Liang Jing, Yang Haijiao and Chen Qiang. 2014. "Preparation Methods and Application of Silicon Oxide Films." 479-483. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2014)*. Atlantis Press.
- [30] Zhao Qiao, Yunti Pu, Hao Liu, Kang Luo, GangWang, Zhichao Liu and Ping Ma. 2015. "Residual stress and laser-induced damage of ion-beam sputtered Ta₂O₅/SiO₂ mixture coatings." *Thin Solid Films*. 592 : 221-224.
- [31] Edward D. Palik. 1998. **Hand book of optical constants of solids**. San diego : Academic Press.
- [32] S. Chhajed, D. J. Poxson, X. Yan, J. Cho, E. F. Schubert, R. E. Welser, A. K. Sood, and J. K. Kim. 2011. "Nanostructured Multilayer Tailored-Refractive-Index Antireflection Coating for Glass with Broadband and Omnidirectional Characteristics." *Applied Physics Express*. 4 : 052503.
- [33] Shenghong Yang and Yueli Zhang. 2012. "Spectroscopic ellipsometry investigations of porous SiO₂ films prepared by glancing angle deposition." *Surf. Interface Anal.* 45 : 1690-1694.
- [34] J. Cai and L. Qi. 2015. "Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays". *Mater. Horiz.*, 2. 37-53.
- [35] S. Chattopadhyay , Y.F. Huang, Y.J. Jen d, A. Ganguly, K.H. Chen, L.C. Chen. 2010. "Anti-reflecting and photonic nanostructures." *Materials Science and Engineering*. R69 : 1-35.
- [36] Motofumi Suzuki. 2013. "Practical applications of thin films nanostructured by shadowing growth." *Journal of nanophotonics*. 7 : 073598.
- [37] J. Gospodyn and J.C. Sit. 2006. "Characterization of dielectric columnar thin films by variable angle Mueller matrix and spectroscopic ellipsometry." *Optical Materials*. 29 : 318-325.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5 ในคลื่นแสงช่วงตามองเห็น 380-780 nm

Wavelength (nm)	Energy (W/m ² mm)	Relative Energy
380	513.14	2.06
400	749.95	3.00
420	1003.24	4.02
440	1136.67	4.55
460	1387.34	5.56
480	1456.28	5.83
500	1425.25	5.71
520	1373.08	5.50
540	1362.83	5.46
560	1316.44	5.27
580	1347.84	5.40
600	1324.65	5.30
620	1310.23	5.25
640	1298.73	5.20
660	1278.77	5.12
680	1249.75	5.00
700	1220.04	4.89
720	1180.45	4.73
740	1140.92	4.57
760	828.63	3.32
780	1065.90	4.27
Total Relative Energy		100.01
Average Transmission		0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการปรับค่าตัวแปรจากแบบจำลองของชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบแท่งตรงที่ทำการปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างแท่งนาโนเพื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของกระจก

Sample No.	Diameter (nm)	Space (nm)
V10-10	10	10
V10-20	10	20
V10-30	10	30
V10-40	10	40
V10-50	10	50
V10-60	10	60
V20-20	20	20
V20-30	20	30
V20-40	20	40
V20-50	20	50
V20-60	20	60
V30-30	30	30
V30-40	30	40
V30-50	30	50
V30-60	30	60
V40-40	40	40
V40-50	40	50
V40-60	40	60
V50-50	50	50
V50-60	50	60
V60-60	60	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ELSEVIER

STEMa2016

Investigation of optical characteristics of the evaporated Ta₂O₅ thin films based on ellipsometry and spectroscopy

R. Prachachet^{a,b*}, P. Buranasiri^a, M. Horprathum^b, P. Eiamchai^b,
S.Limwichean^b, V. patthanasettakul^b, N.Nuntawong^b, P. Chindaudom^b,
B. Samransuksamer^{b,c}, T. Lertvanithphol^{b,c}

^a Department of physics, Faculty of science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

^b Optical Thin-Film Laboratory, National Electronics and computer Technology Center, Pathumthani, 12120 Thailand

^c Department of physics, Faculty of science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand

Abstract

The tantalum oxide (Ta₂O₅) thin films were prepared by the ion-assisted electron-beam evaporation system. With the fixed film thickness at 200 nm, the deposition conditions were performed based on oxygen flow rate the ion assistance during the film deposition. The prepared thin films were characterized by spectroscopic ellipsometry in order to determine their physical and optical properties. From the ellipsometric measurements, the physical structures of the thin films and the optical dispersions were constructed, and then analyzed for the results of film thickness and optical constants. The thin films were also measured by the UV-Vis-NIR spectrophotometry for the optical transmission. The measured transmission was analyzed with the Swanepoel method, whose results also yielded the thickness and the refractive index. Finally, the thin films were examined by the scanning electron microscopy (SEM) in order to observe physical microstructures. This study explored the physical and optical analyses based on the spectroscopic ellipsometry and the spectrophotometry, with the confirmations from the SEM micrographs. The results from the analyses would be compared and thoroughly discussed.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and Peer-review under responsibility of International Conference on Science and Technology of the Emerging Materials.

Keywords: Electron-beam evaporation; Tantalum oxide; Optical constant

* Corresponding author. Tel.: +66-9-6154-2955.

E-mail address: lessonjune77@gmail.com

1. Introduction

Tantalum pentoxide (Ta_2O_5) thin films have been widely studied due to its high index of refraction, low absorptions, and essential transparency. There have been used in several optical applications, i.e., anti-reflection coatings for solar cell [1] and multilayer optical coatings [2]. Ta_2O_5 thin films can be prepared by various methods of physical vapor deposition (PVD) or chemical vapor deposition (CVD) such as electron-beam evaporation [3], ion-assisted deposition [4], reactive magnetron sputtering [5], laser deposition [6], and sol-gel [7]. For most optical coating applications, the Ta_2O_5 thin films are usually prepared by the ion-assisted electron-beam evaporation which typically yielded high quality dielectric films with enhanced packing density. In most researches and developments, however, the optical coatings usually need the most accurate optical measurements and characterizations for the physical and optical properties, i.e., the film thickness and the refractive index. These properties of the transparent thin films can usually be determine either by spectroscopic ellipsometry or spectrophotometry based on Swanepoel. Both of which are a nondestructive and powerful technique to investigate the optical response of the optical Ta_2O_5 thin films.

In this study, we therefore focuses on the fabrication of the Ta_2O_5 thin films with the ion-assisted electron-beam evaporation. The fabricated films were thoroughly investigated for the physical structures and optical characteristics based on the spectroscopic ellipsometry. For further validations, the thin films were also examined by spectrophotometry with the Swanepoel method to obtain the film thickness and refractive index. This study further compared and discuss the results of both techniques in order to establish the most optimal analytic technique for such thin films. Finally, the overall results were confirmed from the SEM micrographs.

2. Experimental

Thin films of tantalum pentoxide (Ta_2O_5) were deposited on silicon wafers and glass slide substrates by the ion-assisted electron-beam evaporation system. The chamber obtained a vacuum state by a mechanical pump and a cryopump with a base pressure of 3×10^{-6} Torr. The Ta_2O_5 films were e-beam deposited with an operating pressure of $\sim 5 \times 10^{-6}$ Torr. From high purity Ta_2O_5 material (99.99%), the thin films were prepared at 200 nm with the deposition rate fixed at 2 Å/s. The deposition conditions were performed based on oxygen flow rate of 0, 6 and 12 sccm, with the ion assistance during the film deposition. The distance between the rotating substrate holder and the e-beam evaporation source was 600 mm.

The thickness and refractive index of the Ta_2O_5 thin films were analyzed by spectroscopic ellipsometry on the films deposited on the silicon wafers. The measurements were performed in the photon energy range of 0.75-5.5 eV at an incident angle of 70° . The ellipsometric analyses were performed with mathematical modeling based on physical structures and optical properties of the thin films. The transmittance spectra on the films deposited on the glass slides in wavelength 340-1400 nm were measured as thickness and refractive index by Swanepoel method. Finally, the film thickness was confirmed by FE-SEM technique to compare with the SE and SM result.

3. Results and discussion

3.1. Spectroscopic ellipsometry analysis

From the measured ellipsometric data at photon energy range of 0.75-5.5 eV, the thin film thickness and the optical constants were determined from the ellipsometric parameters [8] according to the ratio of the Fresnel reflection coefficients for p-polarized (r_p) and s-polarized (r_s) waves from equation (1).

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) \exp(i\Delta) \quad (1)$$

when ψ is relative intensity of the reflected lights of the two polarizations and Δ is the phase difference between the coefficients. The proposed physical model was constructed in order to describe physically possible Ta₂O₅ films. The model assumed that the thin films were ideally homogeneous of Ta₂O₅ with a surface roughness on top as shown in Fig. 1(a). From the Tauc-Lorentz optical models, the experimental ellipsometric data were fitted and represented as the ellipsometric parameters, ψ and Δ , for the different samples, as shown in figure 1(b), 1(c) and 1(d), respectively.

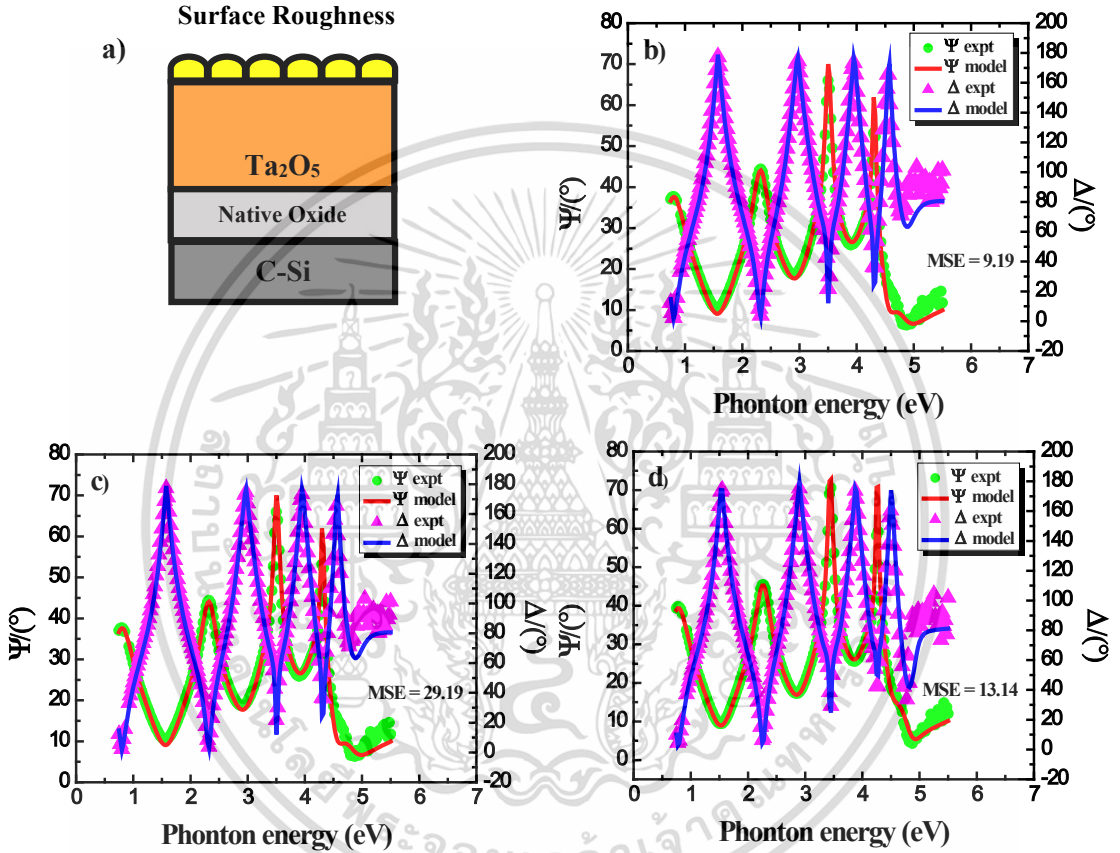


Fig1. (a) Schematic representation of the proposed physical models for the SE-modeling procedure. The experimental and modelled values for three different samples with the varying oxygen flow rates (b) 0 sccm; (c) 6 sccm; (d) 12 sccm respectively as measured at 70° incident angle.

From the graphs, the ellipsometry data and the modelled values were in good agreement for all samples because the mean square error function (MSE) were minimized during the model fitted. The values of the film thickness and the refractive index of the studied films at wavelength 550 nm were listed in Table I. It can be seen that when the oxygen flow rate was varied, the refractive index results at 550 nm were still nearly identical.

Table 1. Shown the values of film thickness and reflective index at 550 nm obtained from fitting the ellipsometry data with model, with three different samples explored reflective index are decreased with the increased oxygen flow rates.

Oxygen flow rate (sccm)	Roughness (nm)	Thickness (nm)	Total thickness (nm)	Reflective index (n)
0	2.67	211.64	214.3	2.04
6	2.46	217.11	219.5	2.05
12	2.63	227.64	230.2	2.01

3.2. Spectrophotometric analysis

The spectrophotometric technique was used to measure the transmission spectra of the thin films. From the transmittance spectra of the Ta₂O₅ films in figure 2(a), strong absorption from wavelengths below 320 nm was observed from all three samples. The transmittance spectra of the Ta₂O₅ films shown peaks and valleys that were associated with the interference effects. The optical properties of the thin films could be evaluated from the transmittance data with a calculation based on Swanepoel method [9]. First step, the calculation of the maximum T_M and minimum T_m transmittance enveloped curves in a computer program, as shown in Fig.2(b) for the Ta₂O₅ thin films prepared in this study.

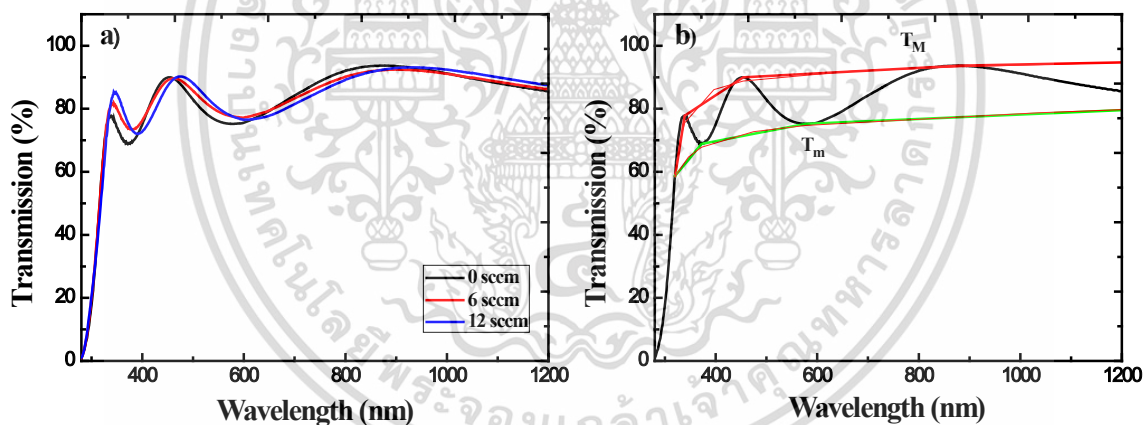


Fig. 2. (a) Interference fringes of thin film transmission of Ta₂O₅ thin films deposited on glass substrate; (b) Transmittance enveloped curves in a computer program

From the enveloped curves, the substrate refractive index (n_s) can be given by the following equation (2).

$$n_s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

when T_s is the transmission spectrum of the blank substrate

The refractive index values (n) are calculated from equation (3).

$$n = \left[N + \left(N^2 - n_s^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

where

$$N = 2n_s \left(\frac{T_M - T_m}{T_M T_m} \right) + \left(\frac{n_s^2 + 1}{2} \right)$$

If n_1 and n_2 are the refractive index at two adjacent maxima (or minima) at λ_1 and λ_2 , it follows that the film thickness is given by the expression equation (4).

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (4)$$

The values of thickness and reflective index of studies films determined are listed in Table II.

Table 2. Values of difference Transmission maximum (T_M) and Transmission minimum (T_m) at wavelength 550 nm of Ta_2O_5 thin films. Three different conditions were performed based on oxygen flow rates corresponding to transmission spectra. The calculated values of film thickness and reflective index based on Swanepoel method.

Oxygen flow rate (sccm)	T_M	T_m	Thickness (nm)	Reflective index (n)
0	0.897	0.742	271.4	2.01
6	0.891	0.767	272.0	1.82
12	0.907	0.758	257.9	1.89

3.3. SEM measurements

The cross sectional SEM micrographs (Fig. 3) show high-packing structure and thickness of Ta_2O_5 thin films. Then it can be seen that the thickness increase when increase oxygen flow rate. The occurrence of thickness are not due to oxygen flow rate but occur from human error.

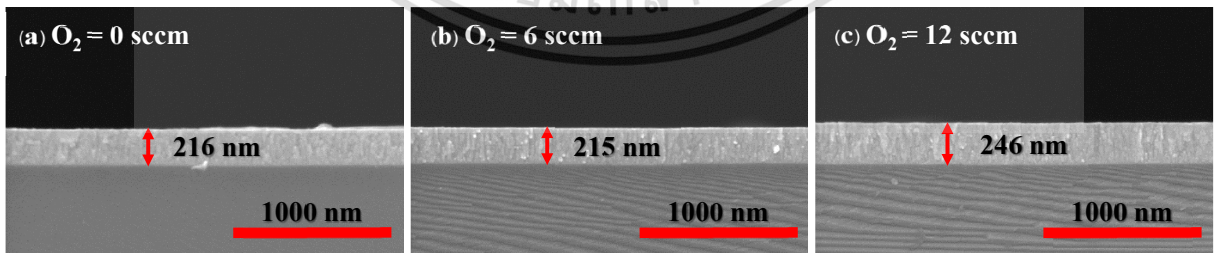


Fig. 3. Cross-section FE-SEM image of Ta_2O_5 thin films based on oxygen flow rate. (a) 0 sccm; (b) 6 sccm; (c) 12 sccm

3.4. Results analyses

From the physical structures of the thin films, the results of the film thickness from different techniques, i.e, ellipsometry, Swanepoel method, and the SEM micrographs, were compared, as shown in figure 4. It can be seen that the thickness calculated from ellipsometric measurements was nearly identical to the result from the FE-SEM micrographs. On the other hand, the film thickness values obtained from the Swanepoel method were incorrect and the error percentage was as high as 25%.

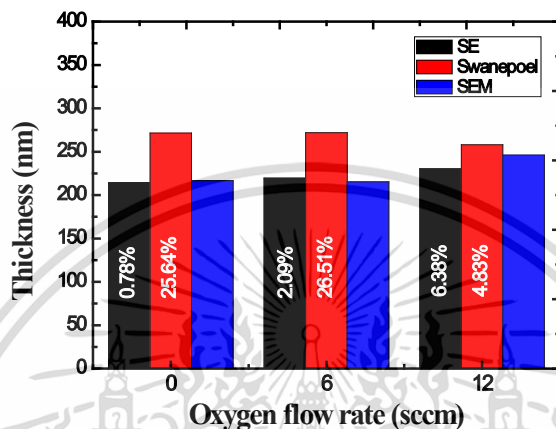


Fig. 4. The comparison of the film thicknesses of the prepared films based on different analytic techniques.

Next, from the optical properties of the thin films, the refractive index data obtained from the ellipsometry and the Swanepoel method were compared in Figure 5. The figure also includes the results from the references [10-14]. It can be seen that the refractive index calculated from ellipsometric measurements were similar to the reference values than those from the Swanepoel method. This confirmed that the ellipsometric results were in preferable to the Swanepoel method to deduce the optical properties of this films.

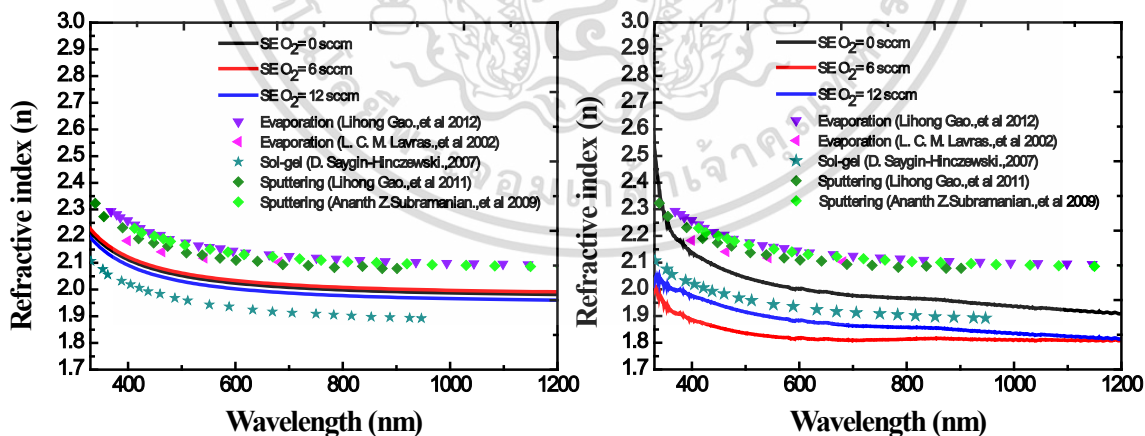


Fig. 5. Show variation of refractive index as a function of wavelength. (a) SE method (b) Swanepoel method

4. Conclusion

In summary, the Ta₂O₅ thin films have been prepared by the ion-assisted electron-beam evaporation on the silicon and glass substrates, based on different conditions of the oxygen flow rates. The prepared thin films were thoroughly measured and investigated with the spectroscopic ellipsometry (SE) in the range of 0.75 to 5.5 eV. The measured SE data were analyzed based on physical structures and the optical dispersions of the thin films. This study proposed the physical model based on the homogeneous Ta₂O₅ layer with the surface roughness. On the other hand, the analyses proposed the Tauc-Lorentz optical model to represent the optical dispersions. The SE results were closely investigated in comparison with the spectrophotometry and the Swanepoel method. The SEM micrographs were also used to confirmed the actual film thickness. The results showed that the SE measurements of the optical coatings were somewhat complicated and needed experienced mathematical analyses, while the Swanepoel method was more simple and quite fast to obtain the results. Although both techniques could be used to determine the film thickness and refractive index, the ellipsometric analyses proved to offer the best results and were preferable for thin films characterizations with the smallest error percentages when compared with the Swanepoel method.

Acknowledgments

This work was carried out with the help of Optical Thin-Film Technology Laboratory (OTL): Thin films group, the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) for supporting their facilities. Researchers would like to thanks to faculty of science, department of applies physics, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial supports.

References

- [1] C. T. Wu, F. H. Ko, and C. H. Lin, *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 171911-171913.
- [2] L. Chen, H. Nishimura, K. Fukumi, J. Nishii, K. Hirao, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2007) 4906–4910.
- [3] N. Arshi, J. Lu, C. G. Lee, B. H. Koo, F. Ahmed, *Thin Solid Films.* 546 (2013) 22–25.
- [4] M. S. Farhan, E. Zalnezhad, A.R. Bushroa, *Materials Research Bulletin.* 48 (2013) 4206–4209.
- [5] S. C. Wang, K. Y. Liu, J. L. Huang, *Thin Solid Films.* 520 (2011) 1454–1459.
- [6] G. Stanciu, M. Filipescu, V. Ion, E. Andronescu, M. Dinescu, *U.P.B. Sci. Bull.* 75 (2013) 1454-2331.
- [7] M. Oubaha, S. Elmaghrum, R. Copperwhite, B. Corcoran, C. McDonagh, A. Gorin, *Opt. Mater.* 34 (2012) 1366–1370.
- [8] R. Yusoha, M. Horprathumb, P. Eiamchaib, P. Chindaudomb, K. Aiempnakita, *Procedia Engineering* 32 (2012) 745 – 751.
- [9] E. R. Shaaban, I. S. Yahia, E. G. El-Metwally, *Acta Physica Polonica.* 121 (2012) 628-635.
- [10] L. Gao, F. Lemarchand, M. Lequime, *OSA.* 20 (2012) 15734-15751.
- [11] L. C. M. Lavras, A. J. Damião, N. A. S. Rodrigues, *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo.* 21 (2002) 25-30.
- [12] L. Gao, F. Lemarchand, M. Lequime, *Thin Solid Films.* 520 (2011) 501–509.
- [13] A. Z. Subramanian, C. J. Oton, J. S. Wilkinson, R. Greef, *J. Lumin.* 129 (2009) 812–816.
- [14] D. S. Hinczewski, K. Koca, I. Sorar, M. Hinczewski, F.Z. Tepehana, G.G. Tepehan, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 91 (2007) 1726-1732

PROCEEDINGS OF SPIE

SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

Omnidirectional anti-reflection properties of vertically align SiO_2 nanorod films prepared by electron beam evaporation with glancing angle deposition

R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, et al.

R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, C. Chananonnawathorn, T. Lertvanithphol, P. Muthitamongkol, S. Boonruang, P. Buranasiri, "Omnidirectional anti-reflection properties of vertically align SiO_2 nanorod films prepared by electron beam evaporation with glancing angle deposition," Proc. SPIE 10714, Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017), 107140S (5 March 2018); doi: 10.1117/12.2300959

SPIE.

Event: Third International Conference on Photonic Solutions, 2017, Pattaya, Thailand

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Omnidirectional Anti-reflection Properties of Vertically Align SiO₂ Nanorod Films Prepared by Electron Beam Evaporation with Glancing Angle Deposition

R. Prachachet ^{*a}, B. Samransuksamer ^b, M. Horprathum ^c, P. Eiamchai ^c, S. Limwichean ^c, C. Chananonwathorn ^c, T. Lertvanithphol ^b, P. Muthitamongkol ^d, S. Boonruang ^e, P. Buranasiri ^a

^a Department of physics, Faculty of science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand;

^b Department of physics, Faculty of science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand;

^c Optical Thin-Film Laboratory, National Electronics and computer Technology Center, Pathumthani, 12120 Thailand;

^d National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani 12120, Thailand;

^e National Electronics and computer Technology Center, Pathumthani, 12120 Thailand.

ABSTRACT

Omnidirectional anti-reflection coating nanostructure film have attracted enormous attention for the developments of the optical coating, lenses, light emitting diode, display and photovoltaic. However, fabricated of the omnidirectional anti-reflection nanostructure film on glass substrate in large area was a challenge topic. In the past two decades, the invention of glancing angle deposition technique as a growth of well-controlled two and three-dimensional morphologies has gained significant attention because of it is simple, fast, cost-effective and high mass production capability. In this present work, the omnidirectional anti-reflection nanostructure coating namely silicon dioxide (SiO₂) nanorods has been investigated for optimized high transparent layer at all light incident angle. The SiO₂ nanorod films of an optimally low refractive index have been fabricated by electron beam evaporation with the glancing angle deposition technique. The morphological of the prepared sampled were characterized by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) and high-resolution transmission electron microscope (HRTEM). The optical transmission and omnidirectional property of the SiO₂ nanorod films were investigated by UV-Vis-NIR spectrophotometer. The measurement were performed at normal incident angle and a full spectral range of 200 – 2000 nm. The angle dependent transmission measure were investigated by rotating the specimen, with incidence angle defined relative to the surface normal of the prepared samples. The morphological characterization results showed that when the glancing angle deposition technique was applied, the vertically align SiO₂ nanorods with partially isolated columnar structure can be constructed due to the enhanced shadowing and limited addtom diffusion effect. The average transmission of the vertically align SiO₂ nanorods were higher than the glass substrate reference sample over the visible wavelength range at all incident angle due to the transition in the refractive index profile from air to the nanostructure layer that improved the anti-reflection characteristics.

Keywords: Anti-reflection, electron beam evaporation, nanorod, omnidirectional, silicon dioxide

1. INTRODUCTION

Omnidirectional anti-reflection coating have been proposed as a method for improving the performance of the optical devices such as lenses¹, photovoltaic^{2,4}, light emitting diodes (LEDs)⁵⁻⁷, etc. The top layer of nanostructure thin film is required to reduce the reflection of light for several wavelength and incident angle.

*r.prachachet@gmail.com; phone +66(09) 6154-2955; kmitl.ac.th

Various methods have been used to fabricate the nanostructure thin films including photolithography^{8,9}, chemical etching^{10,11}, and plasma-enhanced chemical vapor deposition^{12,13}. However, these methods have limitations of large-area deposition and uniformity. To overcome this point, the physical vapor deposition (PVD), including electron beam evaporation^{14,15} and reactive magnetron sputtering^{16,17}, with glancing-angle deposition (GLAD) technique was established as a nanostructures fabrication method on large-area. In details, the vaporized particle flux of coating material was inclined over than 75° with the plane of substrate that continuously rotated with constant speed¹⁸. The self-shadowing effect and limited adatom diffusion cause of the inclination made the thin film had high porosity and became nanostructure¹⁸. In case of material selection, MgF_2 and SiO_2 were commonly used for anti-reflection coating cause of its low refractive index^{19,20}. However, the SiO_2 got more interested due to the lower cost.

In this work, we reported the fabrication of vertically aligned SiO_2 nanorod thin films via electron beam evaporation with GLAD technique. The length of SiO_2 nanorods were varied from 80 to 420 nm in order to realize the omnidirectional anti-reflection property in visible spectral range. In addition, the morphologies and optical transmission were also determined.

2. EXPERIMENTAL

The SiO_2 nanorods were fabricated by ion-assisted electron beam evaporation with glancing angle deposition technique (GLAD) on the bare silicon (100) wafers and glass slide. Deposition system set the distance and deposition angle (α) between incident flux and substrate normal were 60 cm and 85° at substrate rotation speed of 30 rpm as illustrated Figure 1. The roughly 1-3 mm pellets SiO_2 material (99.999%) of AJA International, Inc., was used as source material for the evaporation process with following deposition conditions: Pre-clean the substrate by Ar ion, base pressure and operated pressure around 3.0×10^{-6} Torr, thickness about 80, 170, 230, 340 and 420 nm controlled by quartz crystal monitor (QCM) and deposition rate of 2 nm/s. The morphologies of SiO_2 nanorods on Si wafer substrate were confirmed by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Hitachi 8030). Another, the morphology and crystallinity of SiO_2 nanorods on Si wafer was characterized by high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) performed with an acceleration voltage of 200 kV. The optical property such as the transmittance spectra and omnidirectional transmittance of SiO_2 nanorods on glass slide were investigated by spectrophotometry (Agilent technologies; Cary 7000)

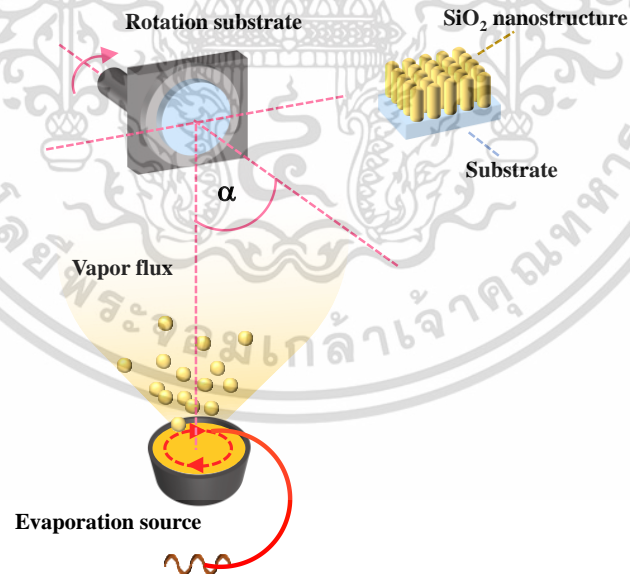


Figure 1. Schematic diagram of ion-assisted electron beam evaporation with glancing angle deposition technique (GLAD) were fabricated the SiO_2 nanostructure.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Physical morphologies

The ion-assisted electron beam evaporation with glancing angle deposition technique (GLAD) can fabricate SiO₂ nanorods which was analyzed morphology by FE-SEM. There are two effects of GLAD technique such as self-shadowing effect and limit ad-atom diffusion give to vertically align SiO₂ nanorods. The surface and cross-section image as Figure 2(a)-(e) and (f)-(j) shows diameter, density and length of SiO₂ nanorods. In this experiment, when increased nanorods length effect to the large diameter and low density of SiO₂ nanorods as shown as Figure 3(a)-(b). As the result of the long length SiO₂ nanorods used the long deposition time that effect to increasing heat accumulate on surface of the SiO₂ nanorods as Figure 3(c). At the high temperature hard to limit ad-atom diffusion make to large diameter of SiO₂ nanorod²¹. Moreover at long length of SiO₂ nanorods gives low density, because of the competition effect when growth process²² another SiO₂ nanorods aggregates together. Furthermore, HRTEM can confirm the morphology of SiO₂ nanorods including the amorphous in SiO₂ structure as illustrated in Figure 3(d).

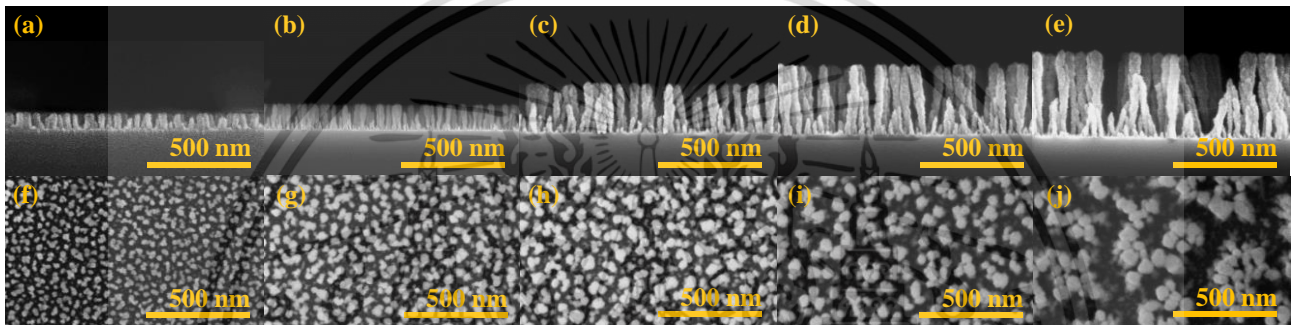


Figure 2. the cross-sectional (a)-(e) and top-view (f)-(j) with SEM images of SiO₂ nanorods were fabricated different length at 80, 170, 230, 340 and 420 nm on silicon (100) wafer substrates.

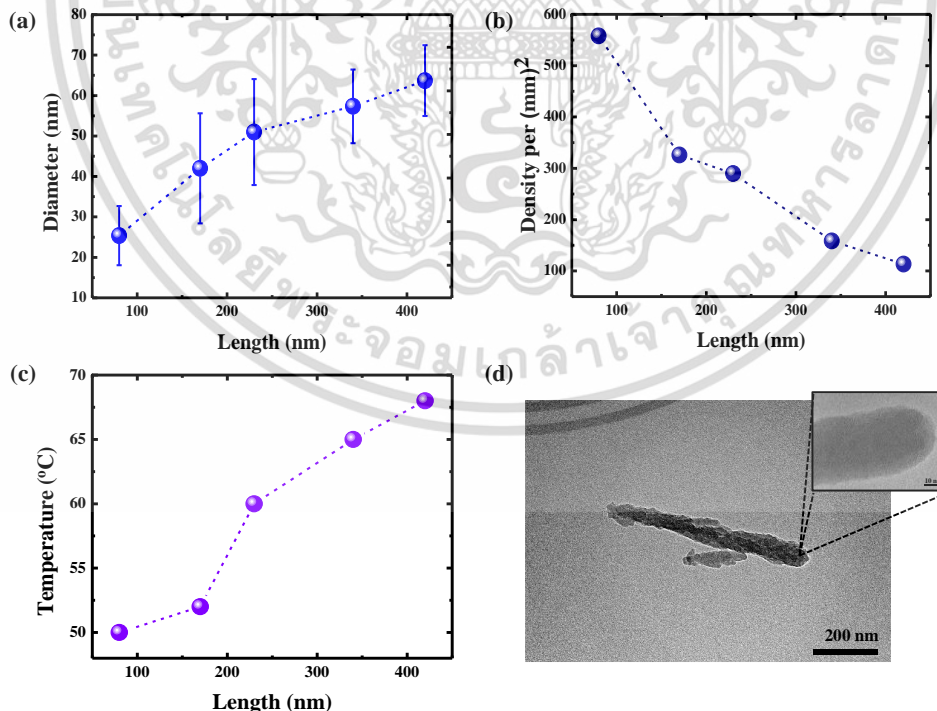


Figure 3.(a) The relation between diameter and length, (b) The relation of density and length, (c) The temperatures during the film growth and (d) HRTEM images of the individual SiO₂ nanorod at 420 nm.

3.2 Optical properties analysis

The transmission spectra of the SiO₂ nanorod films on glass substrate were characterized by UV-Vis-NIR spectrophotometer. As shown in Figure 4(a), the results showed that all SiO₂ nanorod sample had the higher transmission percentage along the measured wavelength compared with the bare glass. From the measured spectra, the average luminous transmission (%*T*_{avg}) in visible region, in the wavelength range of 380-780 nm, was calculated from the following expression²³:

$$\%T_{avg} = \frac{\int_{\lambda=380}^{780} T(\lambda)E(\lambda)}{\int_{\lambda=380}^{780} E(\lambda)}$$

where %*T*_{avg} is the average luminous transmission

T(λ) is the value of transmission at wavelength of λ nm

E(λ) is the solar irradiance spectrum for air mass 1.5 at wavelength of λ nm²⁴.

As illustrated in Figure 4(b), the calculated %*T*_{avg} of sample with SiO₂ nanorods length as 80, 170, 230, 340 and 420 nm had respectively equal to 93.6%, 93.7%, 92.5%, 93.0% and 93.0%. From the results, the SiO₂ nanorod films improved the anti-reflection property in the visible region of glass which indicated from the average transmission of all sample were higher than the value of bare glass substrate which equal to 92.1%. In addition, the nanorods produced a gradient refractive index between air and glass by a volume density gradient that enhanced the anti-reflection property of glass substrate. Moreover, from the results, the samples with nanorods length as 80 and 170 nm showed the highest value of the average transmission in visible region due to the less effect from interference in the thin films.

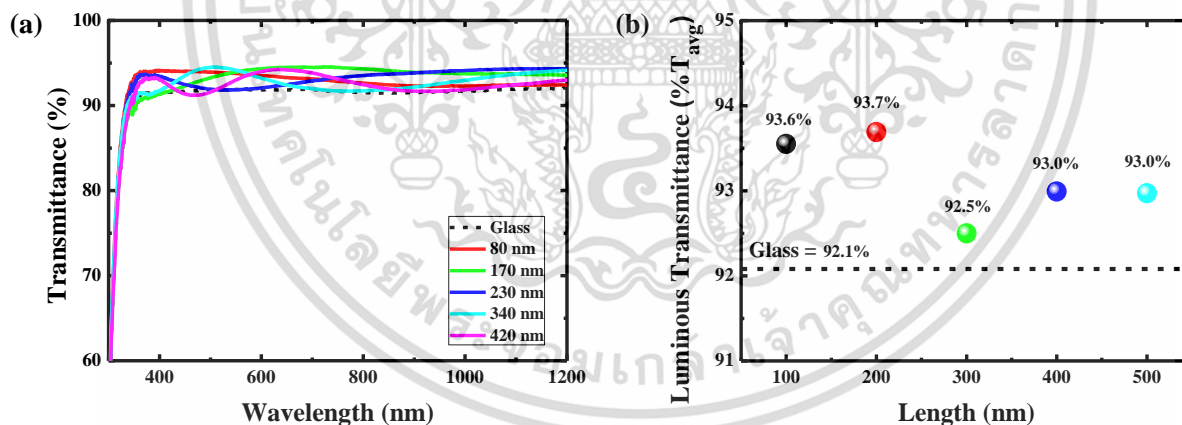


Figure.4 (a) The optical transmittance spectra (200-1,200 nm), (b) The average transmittance spectra in visible wavelength range from 380-780 nm.

The omnidirectional anti-reflection properties at 550 nm were characterized by UV-Vis-NIR spectrophotometer with varying the incident angle from -80° to 80° as illustrated in Figure 5. The results showed that all sample of SiO₂ nanorods had higher omnidirectional transmission than the bare glass substrate and showed the highest transmission at all incident angle when the nanorods length as 170 nm. This occurred because the nanorods length and the gap between nanorods were appropriated for multiple internal reflections of light at wide range of incident angle.

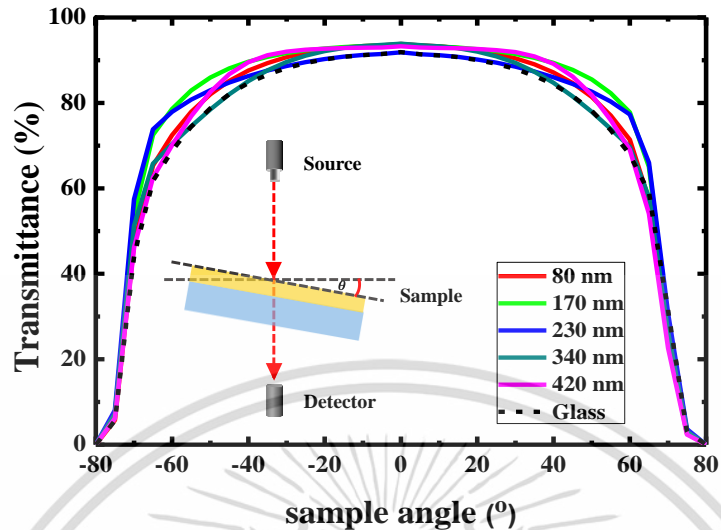


Figure. 5 the omnidirectional characteristics of the prepared samples at 550 nm.

4. CONCLUSION

In summary, the SiO₂ nanorod thin films were fabricated by electron beam evaporation with GLAD technique on silicon (100) wafer and glass substrate. The length of SiO₂ nanorods were varied from 80 to 420 nm to investigate the morphologies and omnidirectional anti-reflection properties. The FE-SEM images were confirmed the thickness and the morphologies of the thin films. Moreover, the images showed that the top diameter increased while the density per area decreased related with increasing of thickness due to self-shadowing effect and limited adatom diffusion at long deposition time. The HR-TEM results was also confirmed morphologies of the nanorods. The transmission spectra of SiO₂ nanorods on glass substrate were measured and calculated for average luminous transmission which all higher than bare glass. The omnidirectional anti-reflection characteristics were characterized that showed the improvement of transmission when coating with SiO₂ nanorod films on the surface. In addition, the samples of 170 nm nanorods length showed the best omnidirectional anti-reflection properties compared with the rest samples.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out with the help of Optical Thin-Film Technology Laboratory (OTL): Thin films group, the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) for supporting their facilities. Researchers would like to thanks to faculty of science, department of applies physics, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial supports.

REFERENCES

- [1] Takashi Yanagishita, Kazuyuki Nishio, and Hideki Masuda1., "Anti-Reflection Structures on Lenses by Nanoimprinting Using Ordered Anodic Porous Alumina," Appl. Phys. Express 2, 022001, (2009).
- [2] Stéphane Bruynooghe, Marcel Schulze, Michael Helgert, Michel Challier, Diana Tordova, Michael Sundermann, Thomas Koch, Alexandre Gatto, Ernst-Bernhard Kley., "Broadband and wide-angle hybrid antireflection coatings prepared by combining interference multilayers with subwavelength structures," JNP. SPIE. Papers 10(3), 033002 (2016).
- [3] Seung Jae Oh, Sameer Chhajed, David J. Poxson, Jaehee Cho, E. Fred Schubert, Sung Ju Tark, Donghwan Kim, and Jong Kyu Kim., "Enhanced broadband and omni-directional performance of polycrystalline Si solar cells by using discrete multilayer antireflection coatings" OSA. Opt Express. Papers 21, 157-166 (2012).

- [4] Lin Yao, Junhui He., "Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – From surface engineering to functional surfaces" *Prog. Mater. Sci. Papers* 61, 94–143 (2014).
- [5] Xue Li, Xinfang Yuan, Wenjuan Shang, Yuqiao Guan, Lingling Deng, Shufen Chen., "Lifetime improvement of organic light-emitting diodes with a butterfly wing's scale-like nanostructure as a flexible encapsulation layer," *Org. Electron. Papers* 37, 453-457 (2016).
- [6] Jae Su Yu, Jung Woo Leem, Yeong Hwan Ko, and Hee Kwan Lee., "Semiconductor Nanostructures Towards Optoelectronic Device Applications," *Proc. of SPIE* 8268, 82680 (2012).
- [7] Junhu Zhang and Bai Yang., "Patterning Colloidal Crystals and Nanostructure Arrays by Soft Lithography," *Adv. Funct. Mater. Papers* 20, 3411–3424 (2010).
- [8] Deying Xia, Zahyun Ku, S. C. Lee, and S. R. J. Brueck., "Nanostructures and Functional Materials Fabricated by Interferometric Lithography," *Adv. Mater. Papers* 23, 147–179, (2011).
- [9] Matt DeJarld, Jae Cheol Shin, Winston Chern, Debashis Chanda, Karthik Balasundaram, John A. Rogers, and Xiuling Li., "Formation of High Aspect Ratio GaAs Nanostructures with Metal-Assisted Chemical Etching," *Nano Lett. Papers* 11, 5259–5263, (2011).
- [10] Xiuling Li., "Metal assisted chemical etching for high aspect ratio nanostructures: A review of characteristics and applications in photovoltaics," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. Papers* 16, 71–81, (2012).
- [11] Milana C. Vasudev, Hilmar Koerner, Kristi M. Singh, Benjamin P. Partlow, David L. Kaplan, Ehud Gazit, Timothy J. Bunning, and Rajesh R. Naik., "Vertically Aligned Peptide Nanostructures Using Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition," *Biomacromolecules. Papers* 15, 533–540 (2014).
- [12] Milana C. Vasudev, Kyle D. Anderson, Timothy J. Bunning, Vladimir V. Tsukruk, and Rajesh R. Naik., "Exploration of Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition as a Method for Thin-Film Fabrication with Biological Applications," *ACS Appl. Mater. Interfaces. Papers* 5 (10), 3983–3994 (2013).
- [13] P. Nuchuay, T. Chaikereee, M. Horprathum, N. Mungkung, N. Kasayapanand, C. Oros, S. Limwichean, N. Nuntawong, C. Chananonawathorn, V. Patthanasettakul, P. Muthitamongkol, B. Samransuksamer, S. Denchitcharoen, A. Klamchuen, C. Thanachayanont, P. Eiamchai., "Engineered omnidirectional antireflection ITO nanorod films with super hydrophobic surface via glancing-angle ion-assisted electron-beam evaporation deposition," *Current Applied Physics. Papers* 17, 222-229 (2017).
- [14] C. H. Chiu, Peichen Yu, C. H. Chang, C. S. Yang, M. H. Hsu, H. C. Kuo, and M. A. Tsai., "Oblique electron-beam evaporation of distinctive indium-tin-oxide nanorods for enhanced light extraction from InGaN/GaN light emitting diodes," *OSA. Opt Express. Papers* 17(23), 21250-21256 (2009).
- [15] Myung Yang, Hong Chan Kim, Seong-Hyeon Hong., "Growth of ZnO nanorods on fluorine-doped tin oxide substrate without catalyst by radio-frequency magnetron sputtering" *Thin Solid Films. Papers* 573, 79–83 (2014).
- [16] R. Nandi and S.S. Major., "The mechanism of growth of ZnO nanorods by reactive sputtering" *Appl. Surf. Sci. Papers* 399, 305-312 (2017).
- [17] Y.-P. Zhao, D.-X. Ye, G.-C. Wang, and T.-M. Lu., "Designing Nanostructures by Glancing Angle Deposition," *Proc. of SPIE* 5219, 59-73 (2003).
- [18] John J. Steele and Michael J. Brett., "Nanostructure engineering in porous columnar thin films: recent advances," *J Mater. Sci. Mater Electron. Papers* 18, 367–379 (2007).
- [19] Mehdi Keshavarz Hedayati and Mady Elbahri., "Antireflective Coatings: Conventional Stacking Layers and Ultrathin Plasmonic Metasurfaces, A Mini-Review," *Materials. Papers* 9(6), 497 (2016).
- [20] Jinguang Cai and Limin Qi., "Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays," *Mater. Horiz. Papers* 2, 37–53 (2015).
- [21] P. Nuchuay, T. Chaikereee, N. Kasayapanand, N. Mungkung, S. Arunrungrusmi, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, V. Patthanasettakul, N. Nuntawong, C. Oros, S. Denchitcharoen, B. Samransuksamer, P. Chindaudom., "Preparation and characterization of ITO nanostructure by oblique angle deposition," *Proc. Materials Today* 4, 6284-6288 (2017).
- [22] Christian Patzig, Bodo Fuhrmann, Hartmut S. Leipner, and Bernd Rauschenbach., "Silicon Nanocolumns on Nanosphere Lithography Templated Substrates: Effects of Sphere Size and Substrate Temperature," *JNN. Papers* 8, 1–7 (2008).
- [23] C. Liu, X. Cao, A. Kamyshny, J.Y. Law, S. Magdassi, Y. Long., "VO₂/Si–Al gel nanocomposite thermochromic smart foils: Largely enhanced luminous transmittance and solar modulation," *J. Colloid Interface Sci. Papers* 427, 49–53 (2014).
- [24] Richard E. Bird., "a simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance," *Sol Energy. Papers* 32(4), 461-471 (1984).

PROCEEDINGS OF SPIE

SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

A comparative study on omnidirectional anti-reflection SiO₂ nanostructure films coating by glancing angle deposition

R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, et al.

R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, C. Chananonnawathorn, T. Lertvanithphol, P. Muthitamongkol, S. Boonruang, P. Buranasiri, "A comparative study on omnidirectional anti-reflection SiO₂ nanostructure films coating by glancing angle deposition," Proc. SPIE 10533, Oxide-based Materials and Devices IX, 105332N (23 February 2018); doi: 10.1117/12.2290056

SPIE.

Event: SPIE OPTO, 2018, San Francisco, California, United States

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A comparative study on omnidirectional anti-reflection SiO₂ nanostructure films coating by glancing angle deposition

R. Prachachet ^{*a}, B. Samransuksamer ^b, M. Horprathum ^c, P. Eiamchai ^c, S. Limwichean ^c,

C. Chananonwathorn ^c, T. Lertvanithphol ^b, P. Muthitamongkol ^d, S. Boonruang ^e, P. Buranasiri ^a

^a Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand;

^b Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand;

^c Optical Thin-Film Laboratory, National Electronics and computer Technology Center, Pathumthani, 12120 Thailand;

^d National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani 12120, Thailand;

^e National Electronics and computer Technology Center, Pathumthani, 12120 Thailand.

ABSTRACT

Fabricated omnidirectional anti-reflection nanostructure films as a one of the promising alternative solar cell applications have attracted enormous scientific and industrial research benefits to their broadband, effective over a wide range of incident angles, lithography-free and high-throughput process. Recently, the nanostructure SiO₂ film was the most inclusive study on anti-reflection with omnidirectional and broadband characteristics. In this work, the three-dimensional silicon dioxide (SiO₂) nanostructured thin film with different morphologies including vertical align, slant, spiral and thin films were fabricated by electron beam evaporation with glancing angle deposition (GLAD) on the glass slide and silicon wafer substrate. The morphological of the prepared samples were characterized by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) and high-resolution transmission electron microscope (HRTEM). The transmission, omnidirectional and birefringence property of the nanostructure SiO₂ films were investigated by UV-Vis-NIR spectrophotometer and variable angle spectroscopic ellipsometer (VASE). The spectrophotometer measurement was performed at normal incident angle and a full spectral range of 200 – 2000 nm. The angle dependent transmission measurements were investigated by rotating the specimen, with incidence angle defined relative to the surface normal of the prepared samples. This study demonstrates that the obtained SiO₂ nanostructure film coated on glass slide substrate exhibits a higher transmission was 93% at normal incident angle. In addition, transmission measurement in visible wavelength and wide incident angles -80 to 80 were increased in comparison with the SiO₂ thin film and glass slide substrate due to the transition in the refractive index profile from air to the nanostructure layer that improve the anti-reflection characteristics. The results clearly showed the enhanced omnidirectional and broadband characteristic of the three dimensional SiO₂ nanostructure film coating.

Keywords: Anti-reflection, birefringence properties, electron beam evaporation, glancing angle deposition (GLAD), nanostructure, omnidirectional, polarization, silicon dioxide

1. INTRODUCTION

Glass is one such a dielectric material substrate which is completely transparent. Because the reflection due to the Fresnel reflection at a surface is about 4% (8% from two surfaces), however, in many applications, the reflection of light is undesirable. The omnidirectional anti-reflection nanostructure thin film is a type of optical coating applied to the surface of a substrate to reduce light reflection and to increase light transmission for several wavelength and incident angle because the nanostructure produced a gradient refractive index between air and glass. In addition, the nanostructure size and gap between individual nanostructures which are smaller than the wavelength of light, named sub-wavelength structure (SWS), behave as omnidirectional antireflection surfaces¹⁻². There were widely used in various optical applications such as glasses³, lenses⁴ and some materials that we use for windows⁵ of building.

*r.prachachet@gmail.com; phone +66(09) 6154-2955; kmitl.ac.th

In addition, it has been applied for a cover or encapsulation for optoelectronic devices such as light emitting diodes (LEDs)⁶ and solar cell⁷. Normally, the silicon dioxide (SiO_2) is a dielectric material widely used for anti-reflection coating cause of its low refractive index and low cost. Various methods have been used to fabricate the SiO_2 nanostructure thin films including so-gel method⁸ and spin coating⁹. However, these methods have limitations of large-area deposition and uniformity. To overcome these limitations, the physical vapor deposition (PVD), including electron beam evaporation¹⁰ and reactive magnetron sputtering¹¹ with glancing-angle deposition (GLAD) techniques have been used. GLAD is an augmentation to oblique angle deposition (OAD). It was established as a nanostructures fabrication method on large-area. In details, the vaporized particle flux of coating material is made the angle over than 75° with the plane of the substrate that is continuously rotated with a constant speed. The self-shadowing effect and limited ad-atom diffusion cause of the inclination made the thin film high porosity and to become nanostructure¹². Moreover, the rotation speed of substrate is an important parameter in controlling vertical morphologies of nanostructure. In this work, we reported the fabrication of SiO_2 nanostructure thin films with different morphologies including slant, spiral and vertical align prepared by electron beam evaporation with GLAD technique. Our samples were fabricated on the glass slide and silicon wafer substrates. The morphological of the prepared samples were characterized by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) and high-resolution transmission electron microscope (HRTEM). The optical properties such as transmission, omnidirectional and birefringence properties of the nanostructure SiO_2 films were investigated by UV-Vis-NIR spectrophotometer and variable angle spectroscopic ellipsometer (VASE).

2. EXPERIMENTAL METHODS

The SiO_2 nanostructures with different morphologies including slant, spiral and vertical align were fabricated by ion-assisted electron beam evaporation with glancing angle deposition technique (GLAD) on the p-type silicon (100) wafers and glass slide. Both substrates were cleaned ultrasonically, washed in acetone, isopropanol and deionized (DI) water, for 15 min in each liquid, respectively and finally dried with nitrogen gas. In our deposition system, the distance and deposition angle between incident flux and substrate normal were 60 cm and 85° , respectively, with vary substrate rotation speed at 0, 0.2 and 30 rpm which were employed to control the columnar microstructure of the thin films as illustrated in Fig. 1. Then, make sure the optical properties of all samples with those of the SiO_2 thin films prepared by conventional electron beam evaporation technique. The roughly 1-3 mm pellets SiO_2 material (99.999%) of AJA International, Inc., was used as source material for the evaporation process which obtained under the constant film deposition rate of 2 \AA/s . The evaporation process with following deposition conditions: Pre-clean the substrate by Ar ion, base pressure and operated pressure around 3.0×10^{-6} Torr with fixed the thickness of SiO_2 nanostructure around 500 nm controlled by quartz crystal monitor (QCM). The morphologies of SiO_2 nanostructure on Si wafer substrate were confirmed by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Hitachi 8030). Then, the morphology and crystallinity of SiO_2 nanostructure on Si wafer were characterized by high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) performed with an acceleration voltage of 200 kV. The transmission, omnidirectional and birefringence properties of the nanostructure SiO_2 films were investigated by UV-Vis-NIR spectrophotometer (Agilent technologies; Cary 7000) in wavelength range of 200 to 2000 nm with 1 nm interval and variable angle spectroscopic ellipsometer (VASE).

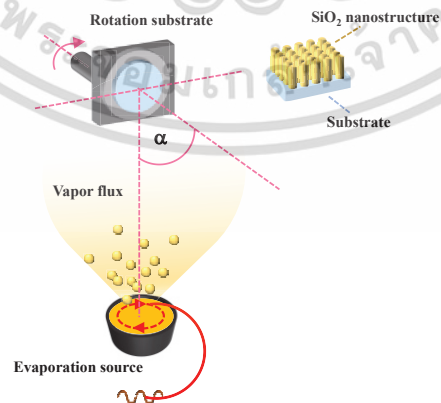


Figure 1. Schematic diagram of ion-assisted electron beam evaporation with glancing angle deposition technique (GLAD) used for fabricating the SiO_2 nanostructure.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Physical morphologies

The SiO₂ nanostructures films with different morphologies were obtained when the GLAD angle was fixed at 85° and the substrate rotation speed was varied at 0, 0.2 and 30 rpm. The morphologies of films, then, were compared with those of the SiO₂ thin films prepared by conventional electron beam evaporation technique. The physical morphologies of all samples were characterized by FE-SEM as shown in Fig. 2(a)-(d). It can be seen that the results from FE-SEM images of the SiO₂ nanostructures thin films with GLAD technique showed the different physical feature of nanostructures with different substrate rotation speed. The SiO₂ thin films fabricated by evaporate vapor of SiO₂ materials source condensed as a compact films on the surface of substrate as shown in Fig. 2 (a). Next, the slant SiO₂ nanostructures thin films were deposited with GLAD technique without the substrate rotation (0 rpm), the shadowing effect was unidirectional, cause the slanted columnar thin films as shown in Fig. 2(b). At very low speed of substrate rotation (0.2 rpm), simulate omnidirectional flux to the substrate, the direction of ad-atom deposition was gradually changed. The non-slanted with spiral-shaped nanostructure was observed as shown in Fig. 3(c). Finally, with the substrate rotation speed increasing, to continuously rotating at 30 rpm, the vertical align nanostructure was observed as shown in Fig. 3(d) since the abrupt direction of ad-atom deposition was changed. Furthermore, HRTEM was used to confirm the different morphologies of SiO₂ nanostructures including slant, spiral and vertically align with the amorphous in SiO₂ structure as shown in Fig 3(a)-(d).

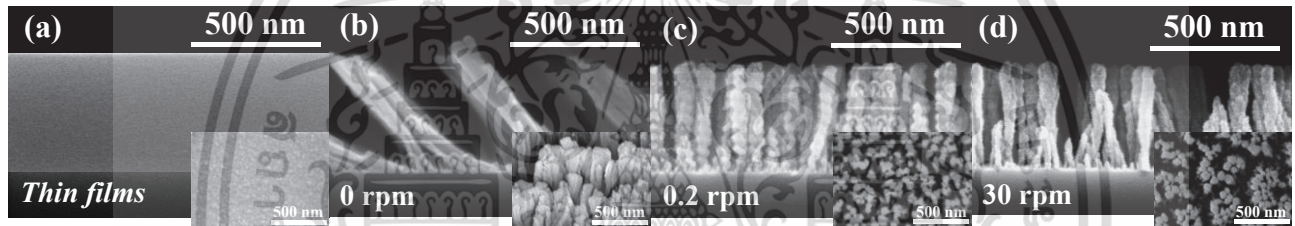


Figure 2. Schematic illustrations of the SiO₂ nanostructures growth by using the GLAD technique

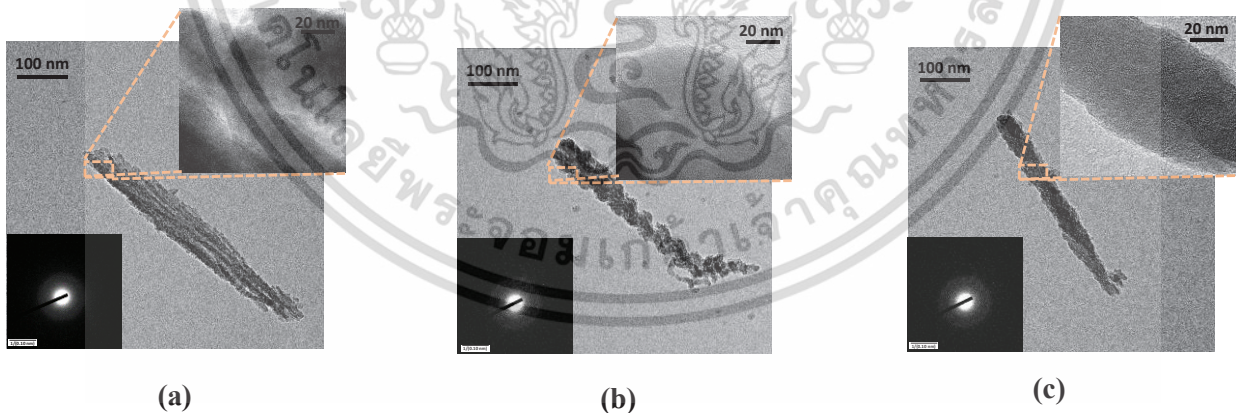


Figure 3. HRTEM images of SiO₂ nanostructures with different morphology at (a) slant, (b) spiral-shape and (c) vertical align nanostructures

3.2 Spectrophotometric analysis

The transmission spectra of the SiO₂ nanostructures films with different morphologies on glass substrate were characterized by UV-Vis-NIR spectrophotometer. As shown in Figure 4(a), the p-polarized and s-polarized transmittance spectra at normal incidence (0°) showed that all of SiO₂ nanostructure samples exhibit the higher transmission percentage along the measured wavelength compared with that of the bare glass substrate. In addition, the results showed that the conventional thin films, spiral, and vertical align (Rods) of SiO₂ nanostructures samples had similar spectral transmission between p- and s-polarized spectra, and on the other hand, the slanted SiO₂ nanostructures sample had different spectral transmission between p- and s-polarized spectra that showed the birefringence properties due to the anisotropic nanostructures¹⁵. From the measured spectra, the average luminous transmission (%T_{avg}) in visible region (380-780 nm), was calculated by the following equation (1)¹⁶:

$$\%T_{avg} = \frac{\int_{\lambda=380}^{780} T(\lambda)E(\lambda)}{\int_{\lambda=380}^{780} E(\lambda)} \quad (1)$$

where %T_{avg} is the average luminous transmission

T(λ) is the value of transmission at wavelength of λ nm

E(λ) is the solar irradiance spectrum for air mass 1.5 at wavelength of λ nm.

The calculated %T_{avg} of SiO₂ nanostructures with different morphologies of conventional thin films, and the thin film with slant, spiral and vertically align of SiO₂ nanostructures when all samples were varied their rotations at 0°, 90°, 180° and 270° with fixed the polarization spectra were shown in Figure 4(b). From the results, the SiO₂ nanostructure films of all sample improved the anti-reflection properties in the visible region of glass (original at 91.7%). Since the gap between the SiO₂ nanostructures is smaller than the wavelength of visible light, and thus make very small optical scattering¹⁷. The nanostructure produced a gradient refractive index between air and glass as well. Moreover, the slanted SiO₂ nanostructure sample showed birefringence properties that affect to the p- and s-polarized with rotating of the sample. The s-polarized spectra at 0° and 180° had an average transmittance of 92.9% that is higher than the transmittance of the sample at 90° and 270° (92.6%); conversely, the transmittance of p-polarized spectra at 0° and 180° (92.6%) had lower than that of the sample rotation at 90° and 270° (92.8%). So, as the results that got from feature of the slanted SiO₂ nanostructure sample, the slant sample was anisotropic. The spiral and vertically align of SiO₂ nanostructures samples had higher transmission spectra than the transmission spectral of slanted sample due to the isotropic morphology of the sample. In addition, the results showed that the sample rotation do not affect to the p- and s-polarized transmittance spectra as the properties of the conventional thin film.

The omnidirectional anti-reflection properties at 550 nm were characterized by UV-Vis-NIR spectrophotometer with varying the incident angle from -80° to 80° as shown in Figure 5. The results clearly showed that the samples with SiO₂ nanostructure had higher optical transmission than the glass reference. Moreover, the spiral-shape and vertically align SiO₂ nanostructure had large omnidirectional transmittance with all incidence angle because there were appropriated multiple internal reflections of light and gradient refractive index with isotropic nanostructures.

3.3 Spectroscopic ellipsometry analysis

The refractive index of SiO₂ nanostructure including conventional thin films, and thin film with slant, spiral and vertically align were determined by ellipsometry at photon energy range of 0.75-5.5 eV. The thin film thickness and refractive index were calculated from the ellipsometry parameters according to the complex ratio of the total reflection coefficients for p-polarized (r_p) and s-polarized (r_s) or two parameters ψ and Δ from equation (2):

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) \exp(i\Delta) \quad (2)$$

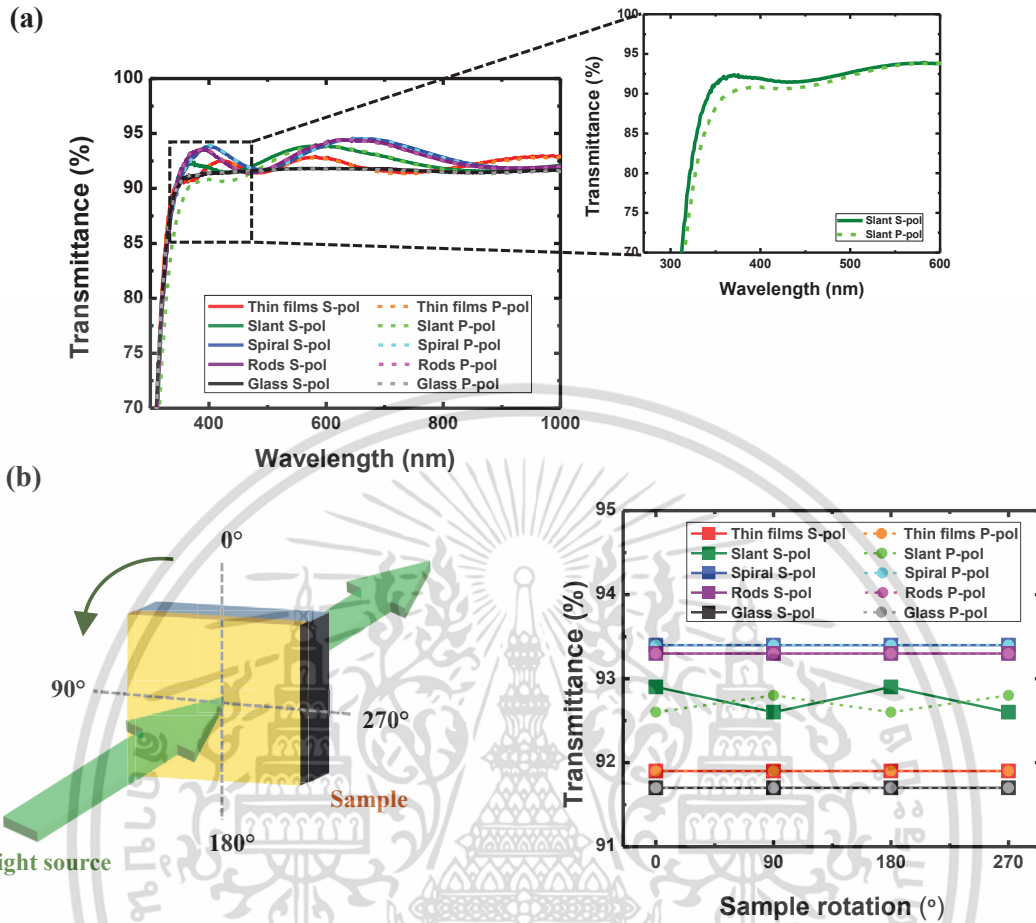


Figure 4. (a) The optical transmittance spectra (300-1,000 nm) of SiO₂ nanostructure with different morphologies. Inset illustrate the change of the optical transmission of the slanted sample, (b) The average transmittance spectra in visible wavelength range from 380-780 nm with various sample rotation.

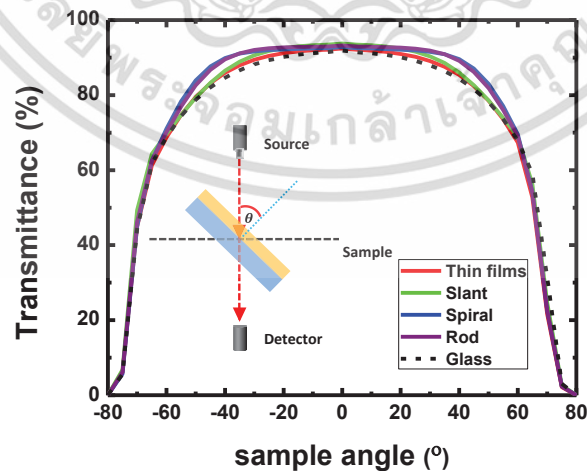


Figure 5. Schematic illustrations of the omnidirectional transmittance characteristics of the prepared samples at 550 nm

when ψ is relative intensity of the reflected lights of the two polarizations and Δ is the phase difference between the coefficients. In the experiment, it can be expected that the conventional thin films, and thin films with spiral and vertically align of SiO₂ nanostructures samples were introduce isotropy properties, on the other hand, the slanted of SiO₂ nanostructures sample was introduce anisotropy properties. These properties are confirmed from the transmission spectra results. The physical model of differential morphology can be divided into three model. One of the physical model of thin films were ideally homogenous of SiO₂ with a surface roughness on top as shown in fig 6(a) with cauchy's formula as the calculation showed, the refractive index at $\lambda = 550$ nm as 1.45 and the thin films thickness of 510 nm. The slanted sample was determined by cauchy's formula with biaxial anisotropy layer as shown in fig 6(b). The refractive index (n_x, n_y) at $\lambda = 550$ nm were 1.3 and 1.1, respectively, and the films thickness calculation was 460 nm. The physical model of the spiral-shaped and the vertically align of SiO₂ nanostructures were established employing effective medium theory (EMA). Assumed a thin films composed of amorphous SiO₂ and void, thus is suitable for the Bruggeman EMA as shown in fig 6(c). The calculated refractive index at $\lambda = 550$ were 1.13 and 1.14, and the thickness were 445 nm and 420 nm, respectively. The refractive index data of all samples obtained from the ellipsometry were compared with each other, as shown in Figure 6(d). As the results showed that the SiO₂ nanostructures which were prepared by GLAD technique, had very low refractive index when compared with the refractive index of the SiO₂ conventional thin films.

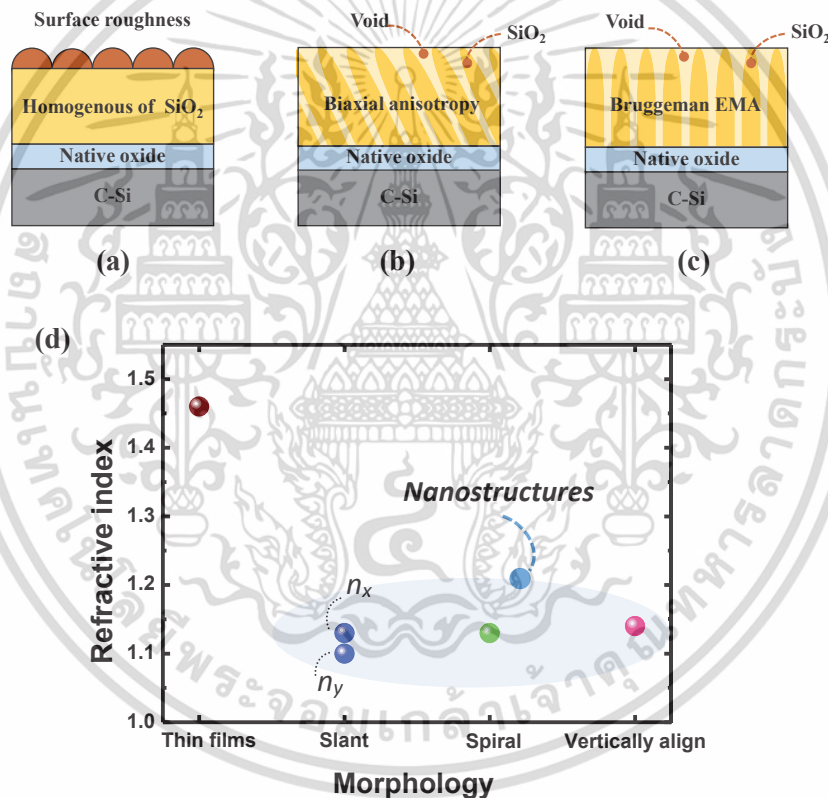


Figure.6 Schematic illustrations of the physical models of the SE-modeling procedure (a) thin films, (b) slant, and (c) spiral-shape and vertically align SiO₂ nanostructures, and (d) the refractive index of SiO₂ nanostructures at a wavelength 550 nm.

4. CONCLUSION

In summary, we have presented the SiO₂ nanostructure samples which were fabricated via the electron beam evaporation with GLAD technique, and then compared their physical morphologies and optical properties with those properties of the SiO₂ conventional thin films. The effect of the substrate rotation speed with GLAD technique was investigated with the

physical morphologies and optical characteristics. The results showed that the substrate rotation speed effect to the morphologies and the optical properties of SiO₂ nanostructures. From the spectrophotometric results, all SiO₂ nanostructures sample exhibits the higher transmission percentage along the measured wavelength compared with that of the bare glass substrate. The slanted nanostructure sample showed the birefringence properties with different rotations of sample; conversely, the morphology including spiral-shape and vertically align were not effect to the polarization of light as the properties of the conventional thin film. In addition, there were highest the average luminous transmission and omnidirectional transmittance properties. Next, the measured SE data were analyzed with the physical model including homogenous, biaxial anisotropy, and Bruggemen EMA model. The results showed that the SiO₂ nanostructures samples at a wavelength 550 nm were very low refractive index when compared with the SiO₂ conventional thin films.

REFERENCE

- [1] Hemant Kumar Raut, V. Anand Ganesh, A. Sreekumaran Nair and Seeram Ramakrishna., "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review," *Energy Environ. Sci. Papers* 4, 3779 (2011).
- [2] Young Min Song and Yong Tak Lee., "Investigation of geometrical effects of antireflective subwavelength grating structures for optical device applications," *Opt Quant Electron. Papers* 41, 771-777 (2009).
- [3] Eusun Yu, Seul-Cham Kim, Heon Ju Lee, Kyu Hwan Oh and Myoung-Woon Moon., "Extreme wettability of nanostructured glass fabricated by non-lithographic, anisotropic etching," *Scientific Reports. Papers* 5, 9362 (2015).
- [4] Takashi Yanagishita, Kazuyuki Nishio, and Hideki Masuda., "Anti-Reflection Structures on Lenses by Nanoimprinting Using Ordered Anodic Porous Alumina," *Jpn. J. Appl. Phys. Papers* 2, 022001 (2009)
- [5] Claes G. Granqvist., "Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices," *Thin Solid Films. Papers* 564, 1-38 (2014).
- [6] Xue Li, Xinfang Yuan, Wenjuan Shang, Yuqiao Guan, Lingling Deng, and Shufen Chen., "Lifetime improvement of organic light-emitting diodes with a butterfly wing's scale-like nanostructure as a flexible encapsulation layer," *Org. Electron. Papers* 37, 453-457 (2016).
- [7] Seung Jae Oh, Sameer Chhajed, David J. Poxson, Jaehee Cho, E. Fred Schubert, Sung Ju Tark, Donghwan Kim, and Jong Kyu Kim., "Enhanced broadband and omni-directional performance of polycrystalline Si solar cells by using discrete multilayer antireflection coatings," *J. Opt. Soc. Am. Papers* 21, 158-166 (2012).
- [8] H.N. Azlina, J.N. Hasnidawani, H. Noritaa and S.N. Surip, "Synthesis of SiO₂ Nanostructures Using Sol-Gel Method," *Acta Phys. Pol. A. Papers* 129(4), 842-844 (2016).
- [9] S. S. Shinde, S. Park, and J. Shin., "Spin synthesis of monolayer of SiO₂ thin films," *Journal of Semiconductors. Papers* 36(4), 043002 (2015).
- [10] Hao Zhang, Chaogang Lou, Xiaodan Huang, Xiaojian Yu, Hua Yang, and Didier Privat., "A broadband antireflective nanostructure with Ag nanoparticles on SiO₂ nanocolumns," *Appl. Phys. Lett. Papers* 111, 201602 (2017).
- [11] Samson T. H. Silalahi, H. Y. Yang, K. Pita, and Yu Mingbin., "Rapid Thermal Annealing of Sputtered Silicon-Rich Oxide/SiO₂ Superlattice Structure," *Electrochem. Solid-State Lett. Papers* 12(4), 29-32 (2009).
- [12] John J. Steele and Michael J. Brett., "Nanostructure engineering in porous columnar thin films: recent advances," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron. Papers* 18, 367-379 (2007).
- [13] Motofumi Suzuki., "Practical applications of thin films nanostructured by shadowing growth," *J. Nanophotonics. Papers* 7, 073598 (2013).
- [14] Christian Patzig, Bodo Fuhrmann, Hartmut S. Leipner, and Bernd Rauschenbach., "Silicon Nanocolumns on Nanosphere Lithography Templated Substrates: Effects of Sphere Size and Substrate Temperature," *J. Nanosci. Nanotechnol. Papers* 8, 1-7 (2008).
- [15] Yi-Jun Jen, Chih-Hui Chen, and Ching-Wei Yu., "Deposited metamaterial thin film with negative refractive index and permeability in the visible regime," *Opt. Lett. Papers* 36(6), 1014-1016 (2011).
- [16] Richard E. Bird., "A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance," *Solar Energy. Papers* 32(4), 461-471 (1984).
- [17] Jong Kyu Kim, J.-Q. Xi, and E. Fred Schubert., "Omni-directional reflectors for light-emitting diodes," *Proc. of SPIE* 6134, 61340D (2006).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวรัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันพฤหัสบดี ที่ 10 ธันวาคม พ.ศ.2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	43/1 หมู่ 3 ต.ทะเลทรัพย์ อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160
ประวัติการศึกษา	(2557) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.31 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2561) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ เกรดเฉลี่ย 3.68 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนค่าเล่าเรียน คณะวิทยาศาสตร์
ผลงานทางวิชาการ	<ol style="list-style-type: none"> 1. R. Prachacheta, S.Limwichean, V. patthanasettakul, N.Nuntawong, P. Chindaudom, B. Samransuksamer, T. Lertvanithphol. 2017. “Investigation of optical characteristics of the evaporated Ta2O5 thin films based on ellipsometry and spectroscopy.” Proc. of Materials Today. 4, 6365–6371. 2. R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, C. Chananonnawathorn, T.Lertvanithphol, P. Muthitamongkol, S. Boonruang, P. Buranasiri. 2018. “A comparative study on omnidirectional anti-reflection SiO₂ nanostructure films coating by glancing angle deposition.” Proc. of SPIE 10533, 105332N. 3. R. Prachachet, B. Samransuksamer, M. Horprathum, P. Eiamchai, S. Limwichean, C. Chananonnawathorn, T. Lertvanithphol, P. Muthitamongkol, S. Boonruang, P. Buranasiri. 2018. “Omnidirectional Anti-reflection Properties of Vertically Align SiO₂ Nanorod Films Prepared by Electron Beam Evaporation with Glancing Angle Deposition.” Proc. of SPIE 10714, 107140S.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้