

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



242310



การวิเคราะห์ลักษณะที่สัมพันธ์กับอายุโดยใช้การวัดทางแสง

โดย

นางสาวโรชิตีนา สุริยะ

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2554



242310

การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มบางโดยใช้วิธีการวัดทางแสง

โดย

นางสาวโรสลิษา ยูโตะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2554

อธิบดีมหาวิทยาลัย

จาก.....

Characterization of Thin Film by Photometry

By

Miss Roseleena Yusoh

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Faculty of Science and Technology

Thammasat University

2011

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวโรสลิษา ยูโซะ

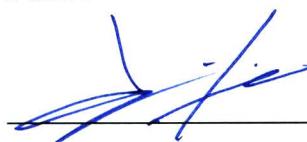
เรื่อง

การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มบางโดยใช้วิธีการวัดทางแสง

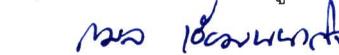
ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2554

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ มนูญ เพ็องพุ่ง)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์


(ดร.กมล เอี่ยมพนาภิจ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์


(ดร.พงศ์พันธ์ จินดาอุดม)

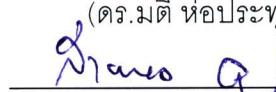
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ดร.สัทธินท์ ผุศวัฒน์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ดร.มติ ห่อประทุม)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ สาอห่ง อมรวิเชษฐ์)

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการวัดทางแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรี (Spectroscopic ellipsometry:SE) และเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) ดยวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอคทีฟ แมกนีตรอน สปัดเตอริง (Reactive magnetron sputtering) และวิธีการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน (Thermal oxidation) และวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่เคลือบเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating) ที่เตรียมจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีระเหยสาร จากการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรี พบว่า แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงของทาว์นลอร์เรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ เป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความหนา ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสัญญาณในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75 ถึง 6 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งทำให้ทราบลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่มีความไม่เนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) และสามารถทราบค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสัญญาณของฟิล์มตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตช่วงตามองเห็น และช่วงรังสีอินฟราเรดได้ ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีจากการคำนวณด้วยสมการ Swanepole พบว่า สามารถคำนวณค่าดัชนีหักเหเฉพาะช่วงตามองเห็นและช่วงอินฟราเรด โดยสามารถทราบค่าดัชนีหักเหเพียงบางความยาวคลื่นที่มีค่าการส่งผ่านแสงสูงสุดและต่ำสุดเท่านั้น โดยฟิล์มที่มีความหนามากขึ้น สามารถคำนวณหาค่าดัชนีหักเหได้มากขึ้นและมีความแม่นยำสูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทั้งสองด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่า ความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรีและเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากความหนาที่วิเคราะห์ด้วย FE-SEM ไม่เกิน 6% นอกจากนี้ เทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรียังสามารถตรวจสอบคุณภาพของเครื่องเคลือบฟิล์มเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงที่เตรียมจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีระเหยสาร ซึ่งเคลือบฟิล์มจากเครื่องเคลือบ 3 เครื่อง จากผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์มพบว่าเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามมีประสิทธิภาพในการเคลือบฟิล์มใกล้เคียงกัน

Abstract**242310**

The thesis focuses on characterization of optical thin films by photometry and utilization of such analytical process obtained from the study on anti-reflection (AR) coatings. Zirconium Dioxide (ZrO_2) films were first prepared by reactive magnetron sputtering and thermal oxidation. Such films were then characterized by spectroscopic ellipsometry (SE) and spectrophotometry techniques. During the SE analyses, the ZrO_2 films were investigated for structural and optical properties based on SE modeling process. This process involves constructions of physical and optical dispersion models. The study demonstrated that, based on the SE physical model, the prepared ZrO_2 films were best described by a double-layer film structure which indicated inhomogeneity within the films. Based on the SE optical model, the prepared films were best described by two Tauc-Lorentz oscillators for optical dispersion covering ultraviolet to near-infrared regions. This optical dispersion models could be used to extract for optical constants of the films. In comparison, the ZrO_2 films were measured by spectrophotometry and were calculated for film thicknesses and refractive indices based on the Swanepole method. When the film thickness was increased, the accuracy of the results obtained from the method was also increased. The obtained film thicknesses from both SE and spectrophotometry were later confirmed by the field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The results showed that, the thicknesses obtained from both techniques fell within 6% from the actual results obtained from the FE-SEM. Finally, the highly accurate SE analyses were utilized in characterization of multi-layer thin films for AR coatings prepared by three different optical coating systems in order to identify their coating efficiency.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพประกอบ.....	(10)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/เชิงประยุกต์.....	3
1.5 คำสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการของแสง	6
2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.1.2 สมการคลื่น.....	8
2.2 โฟลาโรเซชันของแสง	14
2.3 สมบัติทางแสงของวัตถุ.....	15

2.4	สมการพื้นฐานของอิลิปโซเมทรี	17
2.5	การคำนวณหาความหนาของฟิล์มโดยวิธีทางแสง	19
2.5.1	การหาค่าคงที่ทางแสงโดยวิธี Swanepole	19
2.5.2	การกำหนดความหนาของฟิล์ม.....	25
3.	วิธีการวิจัย.....	27
3.1	การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี.....	27
3.1.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ฟิล์ม.....	28
3.1.2	การสร้างแบบจำลองของฟิล์ม.....	30
3.2	การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	34
3.3	การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
3.4	การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	38
3.5	เครื่องเคลือบฟิล์มระบบสเป็คเตอริง.....	39
3.5.1	ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์ม.....	39
3.6	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.7	อุปกรณ์ทำความสะอาดแผ่นรองรับ.....	42
3.8	ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ.....	43
4.	ผลการดำเนินงานวิจัย	44
4.1	การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง	44
4.1.1	การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีในการวิเคราะห์ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	45
4.1.1.1	การสร้างแบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มเซอริโคเนียม	

ไดออกไซด์.....	46
4.1.1.2 การสร้างแบบจำลองทางแสงฟิล์มเซอริโคเนียม	
ไดออกไซด์.....	48
4.1.1.3 ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญและค่าช่องว่าง	
พลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	56
4.1.2 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ฟิล์มเซอริโคเนียม	
ไดออกไซด์.....	60
4.1.2.1 สเปกตรัมทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	60
4.1.2.2 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	62
4.1.2.2 ความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	65
4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์	
ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	68
4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบฟิล์มต่อสมบัติทางแสงของ	
ฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	73
4.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง	
เซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	69
4.2.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอริโคเนียมได	
ออกไซด์.....	70
4.2.2 ผลกระทบของเวลาในการอบฟิล์มต่อสมบัติทางแสงของ	
ฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	71
4.2.2.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง	
เซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	71
4.2.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอริโคเนียมได	
ออกไซด์.....	73
4.2.1.3 ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ค่าช่องว่างพลังงาน	
และความหนาของฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	74

4.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์มบางป้องกัน	
การสะท้อนแสง.....	84
4.3.1 การวิเคราะห์ฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂).....	85
4.3.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO ₂).....	87
4.3.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบาง 5 ชั้น.....	90
5. สรุปผลการศึกษา.....	79
5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียม	
ไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอคทีฟแมกนีตรอน สเปคโตรริง	104
5.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาด้วยเทคนิคสเปกโตร	
สโคปิกอิลิปโซเมทรี.....	104
5.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาด้วยเทคนิคสเปกโตร	
โฟโตเมทรี.....	105
5.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียม	
ไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน	106
5.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มที่เคลือบเพื่อ	
ป้องกันการสะท้อนแสง.....	107
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	108
บรรณานุกรม	109
ภาคผนวก	
ก. สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	113
ข. ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ.....	114
ประวัติการศึกษา.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
4.1	ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่นำมาวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนา....	45
4.2	เปรียบเทียบแบบจำลองทางกายของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการ เคลื่อน 4 ชั่วโมง.....	48
4.3	ข้อมูลแบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซีของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ ที่ทำการเคลื่อน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	51
4.4	เปรียบเทียบแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ของฟิล์มเซอริโคเนียม ไดออกไซด์ที่ทำการเคลื่อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	51
4.5	เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ สองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์	52
4.6	ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลื่อนด้วยเวลาต่างกัน	59
4.7	ผลของเวลาในการเคลื่อนฟิล์มต่อการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์	62
4.8	ตัวอย่างฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที.....	68
4.9	ตัวอย่างฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	

	ด้วยเวลา 5 15 30 และ 60 นาที.....	71
4.10	ผลของเวลาในการอบฟิล์มมีต่อเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม เซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	73
4.11	เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ สองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอรเอนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์	79
4.12	ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน	82
4.13	เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FE-SEM และเทคนิค SE.....	84
4.14	ตัวอย่างฟิล์มบางสำหรับป้องกันการสะท้อนแสง.....	85
4.15	เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง.....	90
4.16	เปรียบเทียบความหนาแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่เคลือบฟิล์มจาก เครื่องเคลือบทั้ง 3 เครื่อง.....	102

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ตั้งฉากตามเวกเตอร์ k	6
2.2 แสดงตกกระทบที่พื้นผิวรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห \tilde{N}_1 และตัวกลางที่มี ค่าดัชนีหักเห \tilde{N}_2 เมื่อ θ_i คือ มุมตกกระทบ θ_r คือ มุมสะท้อน θ_t คือ มุมส่งผ่าน	10
2.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน a.) ตัวกลางโปร่งแสง $k = 0$ และ b.) ตัวกลางที่มีการดูดกลืนแสง $k > 0$	12
2.4 การโพลาไรซ์ของแสง a.) แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น และ b.) แสงโพลาไรซ์วงรี.....	15
2.5 ไดโพลไฟฟ้า a.) ทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า และ b.) เกิดแรงกระทำต่อไดโพล...	16
2.6 แสดงระนาบตกกระทบซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่เข้า และตั้งฉากกับพื้นผิวดังตัวอย่าง โดยมีแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวขนาน (E_p) และสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก (E_s) กับระนาบตกกระทบ.....	18
2.7 การส่งผ่านแสงผ่านฟิล์มหนา d ที่เคลือบบนกระจกโปร่งแสง.....	20
2.8 เปอร์เซนต์การส่งผ่านของฟิล์มที่มีความหนาต่าง ๆ.....	20
2.9 การจำลองสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่เคลือบลงบนกระจกที่มีค่าการส่งผ่าน เป็น T_s พิคการส่งผ่านสูงสุด T_M และพิคการส่งผ่านต่ำสุด T_m	21

2.10	กราฟระหว่าง I/I_0 กับ n/λ ซึ่งใช้กำหนดตัวเลขลำดับที่ของพีคการแทรกสอดและความหนาฟิล์ม.....	26
3.1	Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer (VASE) ที่มีตัวรับแสงเพื่อวิเคราะห์แบบหมุนรอบแกน (Rotating Analyzer Ellipsometer,RAE).....	28
3.2	แผนภาพขั้นตอนการหาค่าความหนาและค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มที่วัดได้จากเครื่อง VASE ด้วยโปรแกรม WVASE32.....	28
3.3	สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แบบ Dual Beam รุ่น λ -900 UV/Vis.....	31
3.4	แผนภาพประกอบวิธีการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม.....	35
3.5	เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด รุ่น S4700.....	37
3.6	เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance.....	38
3.7	เครื่องสปีดเตอริง รุ่น ATC 2000F.....	39
3.8	a.) Sputtering gun ภายใน Main chamber และ b.)การประกอบชิ้นส่วนตำแหน่ง Sputtering gun.....	40
3.9	Main chamber.....	41
3.10	การนำแผ่นวัสดุรองรับวางไว้บน Substrate holder.....	41
3.11	Load lock chamber.....	41
3.12	ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ.....	43
4.1	แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์ม a.) แบบจำลองชั้นเดียว (Single Layer Model:	

	SLM) b.) แบบจำลองสองชั้น (Double Layer Model: DLM).....	46
4.2	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ)และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโค- ปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางกาย ภาพหนึ่งชั้น และสองชั้น กับผลการทดลอง.....	47
4.3	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ)และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโค- ปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางแสงของคอร์ซี และสมการของทาว์นลอรันซ์ 1 และ 2 ออสซิลเลเตอร์.....	50
4.4	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ)และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโค- ปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสง จากสมการทาว์นลอรันซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์.....	53
4.5	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ)	

- ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโค-
 ปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ทำการเคลือบบน C-Si
 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสง
 จากสมการทาวน์ลอรันซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์..... 54
- 4.6 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ)
 ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโค-
 ปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ทำการเคลือบบน C-Si
 เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสง
 จากสมการทาวน์ลอรันซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์..... 55
- 4.7 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H และ S7H ที่ใช้เวลา
 ในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ..... 57
- 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H
 และ S7H ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ..... 58
- 4.9 ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H และ S7H
 ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ..... 59
- 4.10 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน 61
- 4.11 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน

	แสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของฟิล์ม ZrO_2 ที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน.....	61
4.12	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เคลือบลงบนกระจกที่มีการส่งผ่านแสงเป็น T_s พีคการส่งผ่านแสงสูงสุด T_m และพีคการส่งผ่านแสงต่ำสุดเป็น T_m	63
4.13	เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ Swanepole เทคนิค SE และจากรายงานอ้างอิง.....	64
4.14	กราฟระหว่าง $1/2$ กับ n/λ ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบเป็นเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง.....	65
4.15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มเซอร์โคเนียม ไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบฟิล์มด้วยเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง.....	66
4.16	เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM เทคนิค SE และวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง.....	67
4.17	a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 400 และ 500°C เป็นเวลา 60 นาที.....	69
4.18	พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมและฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 °C เป็นเวลา 60 นาที.....	70
4.19	a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียม	

- ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที..... 72
- 4.20 เพอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที..... 72
- 4.21 พิศการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที..... 73
- 4.22 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอร์นซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์..... 75
- 4.23 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอร์นซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์..... 76

- 4.24 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิก อีลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาว์นลอร์นซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์..... 77
- 4.25 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิก อีลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม ZrO_2 ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาว์นลอร์นซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์..... 78
- 4.26 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที..... 80
- 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที..... 81
- 4.28 ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที..... 82
- 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่าน

- การอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที... 83
- 4.30 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการเชลล์มายด์ 86
- 4.31 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้น กับค่าดัชนีหักเหของ Bulk material ที่ทำการวิเคราะห์โดย Palik..... 87
- 4.32 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการคอรีชี 88
- 4.33 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น กับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากรายงานอ้างอิงที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสารและวิธีสปัตเตอริง..... 90
- 4.34 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง

	a.) फिल्मश्लिकोनडोकोडाइट b.) फिल्मशेओरโคनेयमडोकोडाइट.....	90
4.35	แบบจำลองฟิล์มบาง 5 ชั้น สำหรับเคลือบป้องกันการสะท้อนแสง.....	91
4.36	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ Couple ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มชลิคอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์.....	92
4.37	เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มชลิคอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ a.) फिल्मश्लिकोनडोकोडाइट b.) फिल्मशेओरโคनेयमडोकोडाइट....	93
4.38	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มชลิคอนไดออกไซด์.....	94

- 4.39 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น
โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์
a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์..... 95
- 4.40 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ)
ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตร
สโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่
เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ Couple
เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์..... 96
- 4.41 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น
โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์
a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์..... 97
- 4.42 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ)
ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตร
สโคปิกอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่
เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ ไม่ Couple
ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์..... 98
- 4.43 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น

- โดยทำการ ไม่ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โค-
 เนียมไดออกไซด์ a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์..... 99
- 4.44 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียม
 ไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น จากการสร้างแบบจำลองทั้ง 4 แบบ..... 100
- 4.45 เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม
 ซิลิกอนไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR_01) เครื่องเคลือบที่ 2 (AR_02)
 และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR_03) โดย a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์
 b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่สอง (L2) และชั้นที่สี่ (L4)..... 101
- 4.46 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาของฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำการเคลือบ
 จากเครื่องที่ 1 (AR_01) เครื่องที่ 2 (AR_02) และเครื่องที่ 3 (AR_03)..... 102
- 4.47 เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR_01)
 เครื่องเคลือบที่ 2 (AR_02) และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR_03) a.) สเปกตรัมเปอร์เซ็นต์
 ค่าการส่งผ่านแสง b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและเปอร์เซ็นต์
 ค่าการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร..... 103