

โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์
ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคทีฟ คีซี สปีดเตอริง

ธีระวิทย์ คีเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

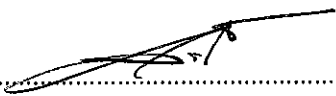
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

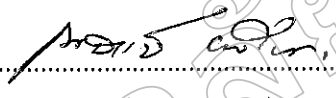
พฤษภาคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

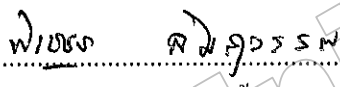
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ธีระวิทย์ ดีเลิศ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

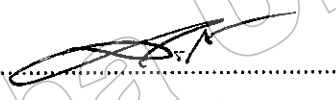
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

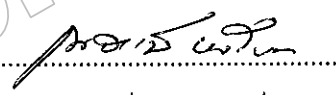

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ)

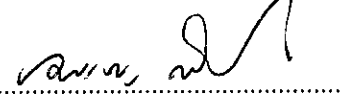

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ ผลโภค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิเชฐ ลิ้มสุวรรณ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ ผลโภค)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ดิลา)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประทุม ม่วงมี)

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา

จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

ประจำปีการศึกษา 2549

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.ณสรณ์ ผลโภค อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้แนวคิด และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลัมสุวรรณ ที่ให้ความกรุณา มาเป็นประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรหาญ์ ลีลา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็น กรรมการสอบ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจน แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การวิจัยและพัฒนาฟิล์มบางนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับกระจก ไร้คราบสกปรก” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ NN-B-22-m34-100-49-51 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ ยังได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยส่วนหนึ่งจาก “ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์” บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีภาคปลาย ปีการศึกษา 2549

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและ ฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือ ในการทำวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจ ทั้งทางด้านร่างกาย และจิตใจ กับข้าพเจ้าตลอด รวมถึง พี่ น้อง และหมู่เพื่อนทุกคน รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มีได้ เอื้อนามในที่นี้ ที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ซึ่งมีส่วนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยดี

ธีระวิทย์ ดีเลิศ

47911354: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ ไททาเนียมไดออกไซด์/ รีแอคทีฟ ดีซี สปีดเตอริง/ สมบัติทางแสง/

ค่าคงที่ทางแสง

ธีระวิทย์ คีเลิส: โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์
ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี สปีดเตอริง (STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF
TITANIUM DIOXIDE THIN FILM DEPOSITED BY REACTIVE DC SPUTTERING)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สุรสิงห์ ไชยคุณ, M.Sc., ณสรวิทย์ ผลโกล, Ph.D. 118 หน้า.
ปี พ.ศ. 2550.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์
และศึกษาผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อ โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียม
ไดออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยระบบเคลือบแบบ ดีซี
แมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยใช้กระบอกสไลด์และแผ่นซิลิกอนเป็นวัสดุรองรับ โดยจะศึกษา
อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนและอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 100-500 °C ฟิล์มบางทั้งหมด
จะนำไปหาลักษณะเฉพาะ โดยเทคนิค XRD, AFM, Spectrophotometer และ Envelope Method เพื่อ
ศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนา ค่าการส่งผ่านแสง ดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์
การดับสูญตามลำดับ จากการศึกษา พบว่า อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสม คือ
1: 4 ซึ่งจะให้ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เฟสรูไทล์ และมีอัตราเคลือบเท่ากับ 0.74 nm/ min
ฟิล์มบางที่เคลือบได้ที่อุณหภูมิห้องยังมีโครงสร้างผลึกไม่ดัดนัก แต่เมื่อนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ
ต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ในส่วนของลักษณะพื้นผิวพบว่า ที่อุณหภูมิอบอ่อน
ต่ำกว่า 300 °C ขนาดเกรนของฟิล์มจะเล็กลง และจะใหญ่ขึ้นเมื่ออบอ่อนฟิล์มบางที่อุณหภูมิ
400-500 °C ค่าความขรุขระจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิอบอ่อน 100-300 °C แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ
400-500 °C ค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสง (400-700 nm) มีค่า 70% ดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญ
ที่ความยาวคลื่น 550 nm คือ 2.28 และ 0.009 ตามลำดับ ดัชนีหักเหเพิ่มขึ้นขณะที่สัมประสิทธิ์
การดับสูญลดลงเมื่ออบอ่อนฟิล์มบางที่อุณหภูมิมากกว่า 400 °C

47912023: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: THIN FILM/ TITANIUM DIOXIDE/ REACTIVE DC SPUTTERING/
OPTICAL PROPERTIES/ OPTICAL CONSTANT

TEERAWIT DEELERT: STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF
TITANIUM DIOXIDE THIN FILM DEPOSITED BY REACTIVE DC SPUTTERING.

ADVISORY COMMITTEE : SURASINGH CHAIYACOUN, M.Sc., NASAN PHONPOKE,
Ph.D. 118 P. 2007

The main objectives of this research were studies on the titanium dioxide thin films deposited by reactive DC magnetron sputtering and the influence of annealing temperatures on the structure and optical properties. In this work, TiO_2 thin films were prepared by DC magnetron sputtering. The glass slide and silicon wafer were substrate. Parameter interested were argon-oxygen flow rate ratios and annealing temperatures between 100-500 °C. The films were characterized by XRD, AFM, spectrophotometer and envelope method for structural properties, surface morphologies, transmission spectrum and refractive index and extinction coefficient, respectively. The optimum ratio of argon-oxygen flow rate was 1: 4, which resulted in titanium dioxide thin films in rutile phase and coating rate of 0.74 nm/ min. The deposited thin film had poor structure while the annealed films at different temperatures had better structures. It was found that the small grain sizes obtained at annealed temperature range of 100-300 °C had become larger at temperature of 400-500 °C. The films' roughness increased at annealing temperatures of 100-300 °C but decreased at 400-500 °C. The averaged optical transmittance (400-700 nm) of titanium dioxide films was 70%. The refractive index and extinction coefficient at 550 nm were 2.28 and 0.009, respectively. The refractive index increased whereas the extinction coefficient decreased when the films were annealed at the temperature higher than 400 °C.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการจากการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การเลือกฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง.....	4
กระบวนการสปัตเตอร์ริง.....	5
กระบวนการโกล์ดดิสซารจ์.....	11
การก่อเกิดฟิล์มบาง.....	16
โครงสร้างของฟิล์มบาง.....	18
ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง.....	19
ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง.....	22
ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง.....	26
สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ.....	29
การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง.....	40
ไททานเนียมไดออกไซด์.....	47
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	58
เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	58
เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคทีฟ ดีซี สปัตเตอร์ริง.....	59

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การสร้างสภาวะสุญญากาศ	61
ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรองรับสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง	63
ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	64
การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ	65
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	68
4 ผลการวิจัย	72
การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	72
การหาอัตราเคลือบของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	74
ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	75
ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	76
ผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	79
5 อภิปรายและสรุปผล	87
อภิปราย	87
สรุปผล	90
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	97
ภาคผนวก ข ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5	101
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	103
ประวัติย่อของผู้วิจัย	118

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ	8
3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อ แก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	66
3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับหาอัตราเคลือบ	67
3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ เพื่อ ศึกษาสมบัติต่าง ๆ	68
4-1 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อ แก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	73
4-2 ค่าความขรุขระของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ	79
4-3 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ	82
4-4 ดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดับสูญเสียที่ความยาวคลื่น 550 nm ของฟิล์มบาง ไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ	83
4-5 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่า ตามความยาวคลื่น	85
4-6 สัมประสิทธิ์การดับสูญเสียของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อน ต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น	85
ภาคผนวก ข-1 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5 ในคลื่นแสง ช่วงตามองเห็น (Visible Range) 380-780 นาโนเมตร	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวของหน้าเป้าสารเคลือบ.....	6
2-2 ยึดตัวของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ	9
2-3 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อ ใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ	10
2-4 การเปลี่ยนแปลงของยึดเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบ ค่าต่าง ๆ	10
2-5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สไนออน	12
2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (p) และ ระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d)	14
2-7 โกลว์ดิสชาร์จ ของหลอดแก๊สไนออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar	14
2-8 การก่อเกิดฟิล์มบาง.....	17
2-9 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ	19
2-10 ระบบสปีดเตอริงแบบ ดีซี สปีดเตอริง	20
2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายึดและกระแสไฟฟ้าในระบบ สปีดเตอริงของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วาง ห่างกัน 4.5 cm.....	21
2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก.....	22
2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ	24
2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริง	25
2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอัมบาแลนซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	27
2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปีดเตอริง	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-17 เส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	32
2-18 การส่องผ่านแสงและการสะท้อน	34
2-19 ตัวอย่างของกลุมสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับการใช้ในการคำนวณดัชนีหักเหสัมประสิทธิ์การดับสูญ โดยลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัม	38
2-20 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม	41
2-21 ความเข้มของฟลักซ์ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี	42
2-22 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope	43
2-23 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ	44
2-24 เครื่อง AFM แบบ Multimode	45
2-25 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด	46
2-26 เฟสของไททานเนียมไดออกไซด์	48
2-27 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททานเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส	49
2-28 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททานเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์	49
2-29 ผลที่ได้จากการกระตุ้นอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตและกระบวนการสลายสารประกอบอินทรีย์บนไททานเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้น	51
3-1 เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย	60
3-2 ส่วนประกอบหลักของส่วนของระบบการเคลื่อนของเครื่องเคลื่อน	61
3-3 โค้ดแกรมระบบเครื่องสุญญากาศ ของระบบเคลื่อนสปีดเตอริง	62
3-4 ขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับ	64
3-5 ตัวอย่างของ (Envelope) กรอบสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับการใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ	71
3-6 ตัวอย่างเส้นตั้งฉากที่ความยาวคลื่นที่สนใจ	71
4-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุรองรับ ฟิล์มบางที่เคลือบได้ และฟิล์มบางที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C	73
4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับเวลาในการเคลือบ	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้และผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	76
4-4 สภาพพื้นผิวและภาพ 3 มิติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ.....	77
4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวกับอุณหภูมิอบอ่อน.....	79
4-6 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของกระจกและฟิล์มที่มีความหนาต่างกัน.....	80
4-7 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ.....	81
4-8 กราฟแสดงการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงที่ตามองเห็นที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ.....	82
4-9 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ	84
4-10 สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ	84
4-11 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น.....	86
4-12 สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น.....	86