โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง

ธีระวิทย์ ดีเลิศ

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2550
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ธีระวิทย์ ดีเลิศ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณสรรค์ ผลโภค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณสรรค์ ผลโภค)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรหาญ ลิลา)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประทุม ม่วงมี)
วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา
จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา
ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2549

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.ณสรรค์ ผลโภค อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้แนวคิดและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ที่ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรหาญ ลิลา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การวิจัยและพัฒนาฟิล์มบางนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับกระจกไร้คราบสกปรก” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ NN-B-22-m34-100-49-51 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยส่วนหนึ่งจาก “ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์” บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2549

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการทำวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจ ทั้งทางด้านร่างกายและจิตใจ กับข้าพเจ้าตลอด รวมถึง พี่ น้อง และหมู่ผองเพื่อนทุกคน รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มิได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ซึ่งมีส่วนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ธีระวิทย์ ดีเลิศ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

47911354: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)
คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ ไททาเนียมไดออกไซด์/ รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง/ สมบัติทางแสง/ ค่าคงที่ทางแสง

ธีระวิทย์ ดีเลิศ: โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง (STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE THIN FILM DEPOSITED BY REACTIVE DC SPUTTERING) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สุรสิงห์ ไชยคุณ, M.Sc., ณสรรค์ ผลโภค, Ph.D. 118 หน้า. ปี พ.ศ. 2550.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ และศึกษาผลของอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้เคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยใช้กระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอนเป็นวัสดุรองรับ โดยจะศึกษาอัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนและอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 100-500 ^{o}C ฟิล์มบางทั้งหมดจะนำไปหาลักษณะเฉพาะโดยเทคนิค XRD, AFM, Spectrophotometer และ Envelope Method เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนา ค่าการส่งผ่านแสง ดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญตามลำดับ จากการศึกษา พบว่า อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสม คือ 1: 4 ซึ่งจะให้ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เฟสรูไทล์ และมีอัตราเคลือบเท่ากับ 0.74 nm/ min ฟิล์มบางที่เคลือบได้ที่อุณหภูมิห้องยังมีโครงสร้างผลึกไม่ดีนัก แต่เมื่อนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น ในส่วนของลักษณะพื้นผิวพบว่า ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่ำกว่า 300 ^{o}C ขนาดเกรนของฟิล์มจะเล็กลง และจะใหญ่ขึ้นเมื่ออบอ่อนฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 400-500 ^{o}C ค่าความขรุขระจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิอบอ่อน 100-300 ^{o}C แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ 400-500 ^{o}C ค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสง (400-700 nm) มีค่า 70% ดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญที่ความยาวคลื่น 550 nm คือ 2.28 และ 0.009 ตามลำดับ ดัชนีหักเหเพิ่มขึ้นขณะที่สัมประสิทธิ์การดับสูญลดลงเมื่ออบอ่อนฟิล์มบางที่อุณหภูมิมากกว่า 400 ^{o}C

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

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 ^{O}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 ^{O}C had become larger at temperature of 400-500 ^{O}C. The films' roughness increased at annealing temperatures of 100-300 ^{O}C but decreased at 400-500 ^{O}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 ^{O}C.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3

ขอบเขตของการวิจัย 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง 4

กระบวนการสปัตเตอริง 5

กระบวนการโกล์วดิสชาร์จ 11

การก่อเกิดฟิล์มบาง 16

โครงสร้างของฟิล์มบาง 18

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง 19

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง 22

ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 26

สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ 29

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง 40

ไททาเนียมไดออกไซด์ 47

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 51

3 วิธีดำเนินการวิจัย 58

เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 58

เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง 59

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

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

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ 8

3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 66

3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับหาอัตราเคลือบ 67

3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ 68

4-1 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 73

4-2 ค่าความขรุขระของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ 79

4-3 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ 82

4-4 ดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดับสูญที่ความยาวคลื่น 550 nm ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ 83

4-5 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น 85

4-6 สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอบอ่อนต่าง ๆ แปรค่าตามความยาวคลื่น 85

ภาคผนวก ข-1 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล และมวลอากาศ 1.5 ในคลื่นแสงช่วงตามองเห็น (Visible Range) 380-780 นาโนเมตร..... 102

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวของหน้าเป้าสารเคลือบ 6

2-2 ยีลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ 9

2-3 การเปลี่ยนแปลงค่ายีลด์ของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ 10

2-4 การเปลี่ยนแปลงของยีลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิเกิล (Ni), โมลิบดินัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ 10

2-5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกล์วดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน 12

2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (p) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) 14

2-7 โกล์วดิสชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar 14

2-8 การก่อเกิดฟิล์มบาง 17

2-9 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ 19

2-10 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง 20

2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm 21

2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก 22

2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียวส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ 24

2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง 25

2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 27

2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง 28

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

2-17 เส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน 32

2-18 การส่องผ่านแสงและการสะท้อน 34

2-19 ตัวอย่างซองคลุมสเปคตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ โดยลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปคตรัม 38

2-20 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม 41

2-21 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี 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 เฟสของไททาเนียมไดออกไซด์ 48

2-27 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส 49

2-28 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ 49

2-29 ผลที่ได้จากการกระตุ้นอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต และกระบวนการสลายสารประกอบอินทรีย์บนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้น 51

3-1 เครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย 60

3-2 ส่วนประกอบหลักของส่วนของระบบการเคลือบของเครื่องเคลือบ 61

3-3 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ของระบบเคลือบสปัตเตอริง 62

3-4 ขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับ 64

3-5 ตัวอย่างซอง (Envelope) ครอบสเปคตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ 71

3-6 ตัวอย่างเส้นตั้งฉากที่ความยาวคลื่นที่สนใจ 71

4-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุรองรับ ฟิล์มบางที่เคลือบได้ และฟิล์มบางที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 ^{o}C 73

4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มกับเวลาในการเคลือบ 74

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้และผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 76

4-4 สภาพพื้นผิวและภาพ 3 มิติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบอ่อนต่าง ๆ 77

4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวกับอุณหภูมิอบอ่อน..... 79

4-6 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของกระจกและฟิล์มที่ความหนาต่างกัน..... 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

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University