หอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยบูรพา
แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน ซึ่งเคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

วรรณิศา ชะงัดรัมย์

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

13 มิ.ย. 2556
323066

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2556
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ วรรณิศา ชะงัดรัมย์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(ดร.วิเชียร ศิริพรม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

..... กรรมการ
(ดร.อดิศร บูรณวงศ์)

..... กรรมการ
(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2556

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา
จากมหาวิทยาลัยบูรพา
ประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2554
และ
ทุนผู้ช่วยวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.)
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.)

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้องหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่ให้ความกรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณ ดร.วิเชียร ศิริพรม ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ ดร.อดิศร บูรณวงศ์ กรรมการสอบ และ ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ ตัวแทนฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนวิจัย โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนหลักจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) ภายใต้การกำกับของโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) (PERDO) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.) และทุนสนับสนุนบางส่วนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2554

ขอขอบคุณบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง (VTTF) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) สำหรับการให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยด้วยดี รวมถึงคุณภาษิณี สหายา สำหรับการประสานงานต่าง ๆ จนเสร็จสิ้นงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจ ตลอดระยะเวลาการศึกษา รวมถึง พี่ น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคน รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มิได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ซึ่งมีส่วนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

วรรณิศา ชะงัดรัมย์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

53910204: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน/ รีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง/ ค่าคงที่ทางแสง / วิธี Swanepoel

วรรณิศา ชะงัดรัมย์: โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนซึ่งเคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF N-DOPED TiO_2 THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: นิรันดร์ วิทิตอนันต์, Ph.D. 119 หน้า. ปี พ.ศ. 2556.

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน (N-doped TiO_2) เคลือบบนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ผลของเงื่อนไขการเคลือบได้แก่ อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนได้ถูกศึกษา โดยสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบได้ ได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนาและค่าการส่งผ่านแสง ถูกตรวจสอบด้วย X-ray diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM) และสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ตามลำดับ ค่าคงที่ทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มที่เคลือบได้คำนวณจากสเปคตรัมการส่งผ่านแสง ผลการศึกษาพบว่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ความดันรวม และอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ ค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 nm พบว่ามีดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดับสูญ (k) เท่ากับ 2.53 และ 0.001 – 0.002 ตามลำดับ แถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน พบว่ามี 2 ช่วง คือ 3.20 eV ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสและ 2.40 eV – 2.60 eV ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

53910204: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: THIN FILM/ N-DOPED TiO_2 / REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING/ OPTICAL CONSTANT / SWANEPOEL METHOD

WANNISA CHANGADRAM: STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF N-DOPED TiO_2 THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING. ADVISORY COMMITTEE: NIRUN WITIT-ANUN, Ph. D. 119 P. 2013.

Nitrogen doped titanium dioxide (N-doped TiO_2) thin films were deposited on glass slides and silicon wafers by reactive DC magnetron sputtering method. The effect of deposition parameter such as N_2 gas flow rate has been investigated. The properties of the as-deposited thin film such as crystal structure, surface morphology, thickness and transmittance were characterized by X-ray diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM), and spectrophotometer, respectively. Optical constant and energy band gap of the as-deposited films were evaluated from transmission spectra. The results showed that the O_2 gas flow rate, total pressure and N_2 gas flow rate were affected on the crystal structure and surface morphology of films. The optical constants of the N-doped TiO_2 thin films namely, refractive index (n) and extinction coefficient (k) at wavelength 550 nm were 2.53 and 0.001 – 0.002, respectively. The energy band gap (E_g) of N-doped TiO_2 thin films was found in 2 ranges, 3.20 eV for Anatase phase TiO_2 thin film and 2.40 eV – 2.60 eV for N-doped TiO_2 thin films.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ ฌ

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4

ขอบเขตของการวิจัย 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 5

การก่อเกิดฟิล์มบาง 6

โครงสร้างของฟิล์มบาง 8

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง 10

กระบวนการ โกล์วดิสชาร์จ 17

ระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอริง 22

ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 24

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคตีฟสปัตเตอริง 28

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง 30

ไทเทเนียมไดออกไซด์ 37

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 41

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย	45
	กรอบแนวคิดของงานวิจัย	45
	เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	47
	เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคตีฟดีซีสปัตเตอริง	50
	การสร้างสภาวะสุญญากาศ	51
	การเตรียมวัสดุรองรับสำหรับการเคลือบฟิล์ม	54
	การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน	55
	การวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน	57
	แนวทางการทดลอง	63
4	ผลการวิจัย	66
	การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส	66
	การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน	77
	สมบัติทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน	82
5	อภิปรายและสรุปผล	87
	อภิปรายผล	87
	สรุปผลการทดลอง	94
บรรณานุกรม		96
ภาคผนวก		101
	ภาคผนวก ก	102
	ภาคผนวก ข	110
ประวัติย่อของผู้วิจัย		119

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ 14

2-2 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส 39

2-3 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ 40

3-1 เงื่อนไขการเคลือบเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน 62

3-2 เงื่อนไขการเคลือบเมื่อแปรค่าความดันรวม 63

3-3 เงื่อนไขการเคลือบเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 64

4-1 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 68

4-2 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 68

4-3 ความหนา และความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 70

4-4 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสที่ความดันรวมต่างๆ 73

4-5 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความดันรวมต่าง ๆ 73

4-6 ความหนา และความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซดที่ความดันรวมต่าง ๆ 75

4-7 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนเฟสอนาเทสที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างๆ 79

4-8 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 79

4-9 ความหนา และความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 81

4-10 แถบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือและไม่เจือไนโตรเจน 85

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง 7

2-2 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ 9

2-3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ 11

2-4 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง 12

2-5 ยีลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ 14

2-6 การเปลี่ยนแปลงค่ายีลด์ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ 16

2-7 การเปลี่ยนแปลงของยีลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิเกิล (Ni), โมลิบดินัม (Mo) , ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า) 16

2-8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน 19

2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) 19

2-10 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar 20

2-11 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง 22

2-12 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm 23

2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก 24

2-14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียวส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ 26

2-15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง 27

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

2-16 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ 29

2-17 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม 31

2-18 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี..... 33

2-19 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope 34

2-20 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ 34

2-21 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด 36

2-22 เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ 38

3-1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย 46

3-2 เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบ รีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย 48

3-3 เครื่อง X-Ray Diffractrometer 48

3-4 เครื่อง Atomic Force Microscope 49

3-5 เครื่อง Spectrophotometer 49

3-6 ไดอะแกรมของเครื่องเคลือบ 51

3-7 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ของระบบเคลือบสปัตเตอริง 53

3-8 การล้างวัสดุรองรับ 54

3-9 การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน 56

3-10 การวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน 57

3-11 ตัวอย่างซอง (Envelope)) และการเลือกค่าการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ 60

4-1 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 66

4-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 67

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-3 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 69

4-4 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 70

4-5 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ที่ความดันรวมต่าง ๆ..... 71

4-6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความดันรวมต่าง ๆ..... 72

4-7 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่ความดันรวมต่าง ๆ 74

4-8 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความดันรวมต่าง ๆ..... 76

4-9 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่เคลือบบกระจกสไลด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 77

4-10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ..... 78

4-11 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนด้วยเทคนิค AFM ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ..... 80

4-12 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ..... 82

4-13 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 83

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-14 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 84

4-15 สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 84

4-16 แถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส 85

4-17 แถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 86

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University