สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง

จินดาวรรณ ธรรมปรีชา

26 เม.ย. 2554
285867
เริ่มการ
13 มิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มีนาคม 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ จินดาวรรณ ธรรมปรีชา ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(ดร.วิเชียร ศิริพรม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ)

..... กรรมการ
(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)

..... กรรมการ
(ดร.ณัฐพงษ์ ศรีสุข)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)
วันที่ 15 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา
จากมหาวิทยาลัยบูรพา
ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2553
และ
ทุนผู้ช่วยวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.)
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.)

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณดร.วิเชียร ศิริพรม ที่ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการสอบ ขอขอบคุณดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ ที่ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบ และดร.ณัฐพงษ์ ศรีสุข ตัวแทนฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกทราบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนบางส่วนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2553 และได้รับทุนสนับสนุนหลักจาก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ภายใต้การกำกับของโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) (PERDO) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.)

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง (VTTF) และห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว (PSS) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการทำวิจัยด้วยดี นายอดิศร บูรณวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างในวิทยานิพนธ์นี้

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

จินดาวรรณ ธรรมปรีชา

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

52910041: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ เซอร์โคเนียมออกไซด์ / รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง/ ค่าคงที่ทางแสง / วิธี Swanepoel

จินดาวรรณ ธรรมปรีชา: โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง (STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZrO_2 THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สุรสิงห์ ไชยคุณ, Ph.D. 130 หน้า. ปี พ.ศ. 2554.

ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ถูกเคลือบบนกระจกสไลด์ และแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ผลของเงื่อนไขการเคลือบได้แก่ อัตราไหลแก๊สออกซิเจน ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์ ได้ถูกศึกษา ทั้งนี้สมบัติของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ เช่น โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนา และค่าการส่งผ่านแสง ถูกตรวจสอบด้วย X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM) และสเปคโตร โฟโตมิเตอร์ตามลำดับ ค่าคงที่ทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มที่เคลือบได้คำนวณจากสเปคตรัมการส่งผ่านแสง ผลการศึกษาพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกบนวัสดุรองรับได้ โดยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนไม่มีผลต่อโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับและความหนามีผลต่อโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ค่าคงที่ทางแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm พบว่ามีดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดับสูญ (k) เท่ากับ 2.06 และ 0.0009 ตามลำดับ และค่าแถบพลังงาน (E_g) มีค่าประมาณ 4.18 eV

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

52910041: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: THIN FILM/ ZIRCONIUM OXIDE / REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING/ OPTICAL CONSTANT / SWANEPOEL METHOD

JINDAWAN THAMMAPREECHA: STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZrO_2 THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING. ADVISORY COMMITTEE: SURASINGH CHAIYACOUN, Ph. D. 130 P. 2011.

Zirconium oxide (ZrO_2) thin films were deposited on glass slides and silicon wafers by reactive DC magnetron sputtering method. The effects of deposition parameter such as O_2 gas flow rate, substrate-target distance, and thickness have been investigated. The properties of the as-deposited ZrO_2 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 were evaluated from transmission spectra. The results showed that ZrO_2 thin films with monoclinic phase were successfully deposited on substrates. The O_2 flow rate was not effected on the crystal structure and surface morphology of films, whereas substrate-target distance and thickness were effect on the crystal structure and surface morphology of films. The refractive index (n) and extinction coefficient (k) at wavelength 550 nm were 2.03 and 0.001, respectively, while energy band gap (E_g) was approximately 4.18 eV.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3

ขอบเขตของการวิจัย 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 4

การก่อเกิดฟิล์มบาง 5

โครงสร้างของฟิล์มบาง 7

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง 9

กระบวนการโกล์วดิสชาร์จ 16

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง 21

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง 23

ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 27

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคตีฟ สปัตเตอริง 30

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง 32

เซอร์โคเนียมออกไซด์ 41

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 46

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย	50
	กรอบแนวคิดของงานวิจัย	50
	เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	52
	เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง	55
	การสร้างสภาวะสุญญากาศ	56
	การเตรียมวัสดุรองรับสำหรับการเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์	58
	การเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์	59
	การวิเคราะห์ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์	61
	แนวทางการทดลอง	66
	1. การศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน	66
	2. การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ	67
	3. การศึกษาผลของความหนา	68
	4. การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์	69
4	ผลการวิจัย	70
	ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน	70
	ผลของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ	75
	ผลของความหนา	81
	สมบัติทางแสงและแถบพลังงานฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์	87
5	อภิปรายและสรุปผล	91
	อภิปราย	91
	สรุปผล	98

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก การคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constants) และขนาดผลึก (Crystallite size)	105
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	118
ประวัติย่อของผู้วิจัย	130

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ 13

2-2 ระบบผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ 42

2-3 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกเซอร์โคเนียมออกไซด์เฟสโมโนคลินิก 43

2-4 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกเซอร์โคเนียมออกไซด์เฟสเตตระโกนอล..... 44

2-5 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกเซอร์โคเนียมออกไซด์เฟสคิวบิค 45

3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 67

3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 68

3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ..... 69

4-1 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ..... 72

4-2 ขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ.... 72

4-3 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ..... 74

4-4 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 77

4-5 ขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 77

4-6 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 80

4-7 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 83

4-8 ขนาดผลึกของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 83

4-9 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์
ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 86

ก-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกเซอร์โคเนียมออกไซด์ 109

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง 6

2-2 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ 8

2-3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ 10

2-4 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง 11

2-5 ยีลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ 13

2-6 การเปลี่ยนแปลงค่ายีลด์ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ 15

2-7 การเปลี่ยนแปลงของยีลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิเกิล (Ni), โมลิบดินัม (Mo) , ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า) 15

2-8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน 17

2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) 18

2-10 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar 19

2-11 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง 21

2-12 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm 22

2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก 23

2-14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียวส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ 25

2-15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง 26

2-16 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 28

2-17 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง 29

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

2-18 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ 30

2-19 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม 33

2-20 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี..... 35

2-21 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope 36

2-22 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ 37

2-23 เครื่อง AFM แบบ Multimode 38

2-24 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด 39

2-25 เฟสของเซอร์โคเนียมออกไซด์ 42

3-1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย 51

3-2 เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบ รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย..... 53

3-3 เครื่อง X-Ray Diffractrometer 53

3-4 เครื่อง Atomic Force Microscope 54

3-5 เครื่อง Spectrophotometer 54

3-6 ไดอะแกรมของเครื่องเคลือบ 55

3-7 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ของระบบเคลือบสปัตเตอริง 57

3-8 การล้างวัสดุรองรับ 58

3-9 การเคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ 60

3-10 ตัวอย่างซอง (Envelope) ครอบสเปคตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ 64

3-11 ตัวอย่างเส้นตั้งฉากที่ความยาวคลื่นที่สนใจ 64

3-12 การวิเคราะห์ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์..... 65

4-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ..... 71

4-2 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 73

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-3 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ 74

4-4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 76

4-5 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 78

4-6 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่าง ๆ 80

4-7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 82

4-8 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 84

4-9 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 86

4-10 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ .. 88

4-11 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์เคลือบที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 88

4-12 สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 89

4-13 แถบพลังงานของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 90

ก-1 แกนสมมุติและมุมขึ้นภายในรูปผลึก 106

ก-2 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม 108

ก-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ 109

ก-4 Effect of crystallite size on diffraction curves (schematic) 116

ก-5 การหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด 117

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University