โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง

ชัยฤกษ์ ตั้งเฮงเจริญ

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ชัยฤกษ์ ตั้งเฮงเจริญ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน

(ดร.วิเชียร ศิริพรม)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

..... กรรมการ

(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)

..... กรรมการ

(ดร.อดิศร บูรณวงศ์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

วันที่ 15 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ทุนผู้ช่วยวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.)
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.)

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนจากผู้เกี่ยวข้องหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชัย ตนัยอัชฌาวุฒ คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนและให้โอกาสผู้วิจัยในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา ณ มหาวิทยาลัยบูรพา ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดเวลาการศึกษา ณ มหาวิทยาลัยบูรพา ขอขอบคุณ ดร.วิเชียร ศิริพรม ประธานกรรมการสอบ ดร.อดิศร บูรณวงศ์ ตัวแทนฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ หัวหน้าห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความเห็น คำปรึกษาแนะนำเพิ่มเติม ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ (ศธ.) สำหรับทุนผู้ช่วยวิจัย ขณะศึกษา ณ มหาวิทยาลัยบูรพา

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือตลอดการทำวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พ่อ แม่ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจ ทั้งด้านร่างกาย และจิตใจ รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มิได้เอ่ยนามในที่นี้ ซึ่งเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ชัยฤกษ์ ตั้งเฮงเจริญ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

53910202: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

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

ชัยฤกษ์ ตั้งเฮงเจริญ: โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง (STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF AlN THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: นิรันดร์ วิทิตอนันต์, Ph.D., อรรถพล เชยศุภเกตุ, Ph.D. 117 หน้า. ปี พ.ศ. 2555.

ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ถูกเคลือบบนกระจกสไลด์ และแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ผลของเงื่อนไขการเคลือบได้แก่ อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน และความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ได้ถูกศึกษา ทั้งนี้สมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนาและค่าการส่งผ่านแสง ถูกตรวจสอบด้วย X-ray diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM) และสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ตามลำดับ ค่าคงที่ทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มที่เคลือบได้คำนวณจากสเปคตรัมการส่งผ่านแสง ผลการศึกษาพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลบนวัสดุรองรับได้ โดยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนและความหนามีผลต่อโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม สำหรับค่าคงที่ทางแสงที่ความยาวคลื่นแสง 600 nm พบว่ามีดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดับสูญ (k) เท่ากับ 1.97 และ 0.007 ตามลำดับ และแถบพลังงาน (E_g) มีค่าประมาณ 4.24 eV

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

53910202: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: THIN FILM/ ALUMINIUM NITRIDE / REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING/ OPTICAL CONSTANT / SWANEPOEL METHOD

CHAILOEK TANGHENGJAROEN: STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF AlN THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING. ADVISORY COMMITTEE: NIRUN WITIT-ANUN, Ph. D., ATTAPOL CHOEYSUPPAKET, Ph. D. 117 P. 2012.

Aluminium nitride (AlN) thin films were deposited on glass slides and silicon wafers by reactive DC magnetron sputtering method. The effects of deposition parameter such as N_2 gas flow rate and thickness have been investigated. The properties of the as-deposited AlN 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 calculated from transmission spectra. The results showed that AlN thin films with hexagonal phase were successfully deposited on substrates. The N_2 flow rate and thickness were effected on the crystal structure and surface morphology of films. The refractive index (n) and extinction coefficient (k) at wavelength 600 nm were 1.97 and 0.007, respectively, while energy band gap (E_g) was approximately 4.24 eV.

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

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 4

การก่อเกิดฟิล์มบาง 5

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง 7

กระบวนการโกล์วดิสชาร์จ 15

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง 19

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง 21

ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 26

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคตีฟ สปัตเตอริง 29

สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ 31

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง 44

อลูมิเนียมไนไตรด์ 53

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 55

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	59
กรอบแนวคิดของงานวิจัย	59
เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	61
เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง	64
การสร้างสภาวะสุญญากาศ	65
การเตรียมวัสดุรองรับสำหรับการเคลือบฟิล์ม	67
การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	68
การวิเคราะห์ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	70
แนวทางการทดลอง	74
1. การศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน	74
2. การศึกษาผลของความหนา	75
3. การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	75
4 ผลการวิจัย	76
ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างฟิล์ม	76
ผลของความหนาต่อโครงสร้างฟิล์ม	82
สมบัติทางแสงและแถบพลังงานฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	88
5 อภิปรายและสรุปผล	91
อภิปราย	91
สรุปผล	96
บรรณานุกรม	97
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก	102
ภาคผนวก ข	110
ประวัติย่อของผู้วิจัย	117

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ 12
3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์
ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 74
3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 75
4-1 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์
ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 78
4-2 ขนาดผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 78
4-3 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์
ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ 80
4-4 ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 84
4-5 ขนาดผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 85
4-6 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์
ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ 87
ก-1 ระบบผลึกและค่าคงที่แลตทิซ 104

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง 6

2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ 8

2-3 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง 10

2-4 ยีลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ 12

2-5 การเปลี่ยนแปลงค่ายีลด์ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ 14

2-6 การเปลี่ยนแปลงของยีลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิเกิล (Ni), โมลิบดินัม (Mo) , ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า) 14

2-7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน 16

2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) 17

2-9 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar 17

2-10 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง 20

2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าใน ระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ที่วางห่างกัน 4.5 cm 20

2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก 22

2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียวส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของ อนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ 23

2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 25

2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง 27

2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง 28

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-17	การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ	29
2-18	เส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	34
2-19	การส่งผ่านแสงและการสะท้อน	37
2-20	ตัวอย่างซองคลุมสเปคตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณดัชนีหักเหสัมประสิทธิ์การดับสูญ โดยลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปคตรัม	41
2-21	ตัวอย่างเส้นตั้งฉากสเปคตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญ ที่ความยาวคลื่นที่สนใจ	42
2-22	แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม	45
2-23	ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี	47
2-24	องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope	48
2-25	ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ	49
2-26	เครื่อง AFM แบบ Multimode	50
2-27	ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด	51
2-28	ลักษณะโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมไนไตรด์	54
3-1	กรอบแนวความคิดของการวิจัย	60
3-2	เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบ รีแอคตีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย	62
3-3	เครื่อง X-Ray Diffractrometer	62
3-4	เครื่อง Atomic Force Microscope	63
3-5	เครื่อง Spectrophotometer	63
3-6	ไดอะแกรมของเครื่องเคลือบ	64
3-7	ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ของระบบเครื่องเคลือบ	66
3-8	การล้างวัสดุรองรับ	67
3-9	การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	69
3-10	การวิเคราะห์ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	70

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-11	ตัวอย่างซอง (Envelope) และการกำหนดค่าความยาวคลื่นของครอบสเปคตรัม การส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณหาดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ	73
4-1	ลักษณะของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ	76
4-2	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ	77
4-3	ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ	79
4-4	ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ	81
4-5	ลักษณะของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	82
4-6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	83
4-7	ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	85
4-8	ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	87
4-9	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	88
4-10	ดัชนีหักเหของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	89
4-11	สัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	90
4-12	แถบพลังงานของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาเคลือบต่าง ๆ	90
ก-1	หน่วยเซลล์แบบต่าง ๆ	103
ก-2	ค่าคงที่แลตทิซของหน่วยเซลล์	103
ก-3	หน่วยเซลล์ 14 แบบในแลตทิซบราเวส์	105
ก-4	แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม	107
ก-5	Effect of crystallite size on diffraction curves (schematic)	110
ก-6	การหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด	111

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University