

การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง  
แบบรีแอกทีฟ

โดย

ร.อ. พัฒนา เทพขจร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-11-6152-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**DEPOSITION OF ALUMINIUM OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE  
DC MAGNETRON SPUTTERING**

**By**

**Pattana Thepchalotorn**

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**MASTER OF SCIENCE**

**Department of Physics**

**Graduate School**

**SILPAKORN UNIVERSITY**

**2005**

**ISBN 974-11-6152-2**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง " การเคลือบฟิล์มบาง อะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ " เสนอโดย เรืออากาศเอก พัฒนา เทพชโลธร เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิสาข์ จัฒวิตร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ รักษาการแทน

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. ประเสริฐ ไกรสิงห์เดชา

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จำนงค์ นายเชิด)

...../...../.....

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ประเสริฐ ไกรสิงห์เดชา)

...../...../.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร โอสดจันทร์)

...../...../.....

K 44306205 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : ดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริงแบบรีแอคทีฟ / ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ร.อ. พัฒนา เทพชโลธร : การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริงแบบรีแอคทีฟ (DEPOSITION OF ALUMINIUM OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING) อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ :  
อาจารย์ ดร. ประเสริฐ ไกรสิงห์เดชา. 94 หน้า. ISBN 974-11-6152-2

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธี และสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริงแบบรีแอคทีฟ โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟที่ใช้ให้มีปริมาณต่างๆ ในระหว่างทำการศึกษาและการเคลือบฟิล์ม จากนั้นศึกษาสมบัติและโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ รวมทั้งผลของอุณหภูมิที่มีต่อฟิล์ม โดยวิเคราะห์ผลด้วยวิธี เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Atomic Force Spectroscopy และหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางที่สร้างได้

ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศมีผลต่อกระบวนการต่างๆของการสเป็คเตอริง โดยสามารถแบ่งโมดการเคลือบฟิล์มได้ 2 แบบ คือโมดการเคลือบฟิล์มโลหะ และโมดการเคลือบฟิล์มโลหะออกไซด์ ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนแบบรีแอคทีฟนี้ เมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟระหว่าง 0.92 ถึง 1.27 sccm จะได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นผลึก เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ฟิล์มที่สร้างได้มีโครงสร้างผลึกแบบเคิลต์้าเฟส หรือเตต้าเฟส หรือมีทั้งสองเฟสผสมกัน โดยที่ระนาบต่างๆเหล่านี้จะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆขนานไปกับผิวของวัสดุรองรับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวหน้าของฟิล์มที่สร้างได้ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.04 nm และฟิล์มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเฉลี่ยเท่ากับ 8.53 เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาอบที่อุณหภูมิ 200 °C, 300 °C, 400 °C ตามลำดับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าช่วงอุณหภูมิค่าดังกล่าวไม่มีผลต่อสมบัติและโครงสร้างของฟิล์ม

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ .....

K 44306205 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING / ALUMINIUM OXIDE  
THIN FILMS

PATTANA THEPCHALOTORN : DEPOSITION OF ALUMINIUM OXIDE  
THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING. THESIS ADVISORS :  
PRASERT KRAISINGDECHA, Ph.D. 94 pp. ISBN 974-11-6152-2

This thesis was a study of deposition of aluminium oxide thin films by reactive dc magnetron sputtering. In this study, many reactive gas flow rates were controlled for analysis and depositions. The structure and properties of aluminium oxide thin films were studied by XRD technique, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Atomic Force Spectroscopy and dielectric constant determination.

Reactive gas flow rate was influenced in deposition processes. There were 2 modes in this process. Metallic mode, when used low reactive gas flow rate and metal oxide mode for high reactive gas flow rate. Crystalline aluminium oxide thin films had recieved when reactive gas flow rate was 0.92 to 1.27 sccm. XRD peak of these films shown the delta and theta phases of aluminium oxide crystalline phase. Average surface roughness was 12.04 nm and 8.53 for average dielectric constant. After annealing these films at 200 °C, 300 °C and 400 °C for 1 hour , no significant change in structure and orientation of these films.

---

Department of Physics      Graduate School, Silpakorn University      Academic year 2005

Student's signature .....

Thesis Advisor's signature .....

## กิจกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ประเสริฐ ไกรสิงห์เดชา อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือการดำเนินงาน ทั้งปวงรวมทั้งจัดหาเครื่องมือที่จำเป็นในการวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ และขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่จำเป็นในการวิจัยครั้งนี้ ดังรายนามต่อไปนี้

รศ. กำชัย ตรีชัยรัมย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลองและอุปกรณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ผศ.ดร. ธนากร โอสดจันท์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับคำแนะนำแนวทางในการทำวิจัย

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ XRD รวมทั้งให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง XRD

ภาควิชาฟิสิกส์, กองวิชาวิทยาศาสตร์, กองการศึกษา และโรงเรียนนายเรืออากาศ กองบัญชาการฝึกศึกษาทหารอากาศ ที่ให้โอกาสในการลาเพื่อเข้ารับศึกษา

รวมทั้งคุณอาจารย์ทุกท่าน บิดา มารดา พี่น้อง เพื่อนรุ่นพี่และรุ่นน้อง สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ได้ให้กำลังใจรวมทั้งความช่วยเหลือ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิจกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2 फिल्मบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	4
โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์.....	4
การวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธี	
X-ray diffraction.....	6
3 กระบวนการสปีดเตอริงและการเคลือบฟิล์มบาง.....	8
ทฤษฎีเบื้องต้นของสปีดเตอริง.....	8
กระบวนการ โกลดดิซซาร์จของก้ำซ.....	9
กระบวนการในระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นใน โกลดดิซซาร์จ.....	11
กระบวนการของการชน.....	11
การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	13
กระบวนการ โดยรวมที่เกิดขึ้นใน โกลดดิซซาร์จ.....	14
ความหนาแน่นก้ำซและระยะปลดการชน.....	14
การนำกระแสไฟฟ้าในระบบดิซซาร์จ.....	15
คุณสมบัติของดิซซาร์จพลาสมา.....	16
กระบวนการในการเกิดซีท.....	19

บทที่	หน้า
กระบวนการสปีดเตอริง.....	20
ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอริง.....	21
อัตราการสปีดเตอริง.....	22
ค่าพลังงานของไอออนที่เข้าชน.....	22
ชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ.....	23
ชนิดของไอออนบวก.....	23
มุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ.....	24
คิซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	24
การสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ.....	26
4    วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	30
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
เครื่องเคลือบฟิล์มบาง.....	31
ภาชนะสุญญากาศ.....	32
ระบบเครื่องสูบลำสุญญากาศ.....	32
แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง.....	32
อิเล็กทรอนิกส์และหัวแมกนีตรอน.....	33
เครื่องควบคุมการป้อนก๊าซ.....	33
เครื่องวัดอัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์ม.....	34
ระบบหล่อเย็น.....	35
เป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับ.....	35
เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค โดมิเตอร์.....	35
เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) .....	36
เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	37
เครื่อง LCR Meter.....	37
การหาค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม.....	38
การหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของขบวนการ โกลวดิซซาร์จ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ.....	39



บทที่	หน้า
การสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	40
การทำความสะอาดวัสดุรองรับ และเป่าสารเคลือบ.....	40
การเตรียมอุปกรณ์.....	40
ขั้นตอนการปฏิบัติ.....	41
ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	41
การเตรียมอุปกรณ์.....	41
ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง.....	42
5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	43
ค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม.....	43
ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของขบวนการ โกลวดิสชาร์จกับ	
อัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟ.....	47
ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิสชาร์จกับอัตราการ	
ไหลของก๊าซรีแอคทีฟ.....	47
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหลของ	
ก๊าซรีแอคทีฟ.....	50
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับอัตราการ	
ไหลของก๊าซรีแอคทีฟ.....	52
การวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	54
การศึกษาสมบัติ และ โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์	
ที่เตรียมได้เมื่อใช้ปริมาณก๊าซรีแอคทีฟแตกต่างกัน.....	55
การศึกษาสมบัติทั่วไป และ โครงสร้างของฟิล์มบาง	
อะลูมิเนียมออกไซด์.....	58
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	62
การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติ และ โครงสร้างของฟิล์ม	
บางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	64

บทที่	หน้า
6	
สรุปผล.....	67
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก 1 วิธีในการปฏิบัติงานในการใช้เครื่องสปีดเตอร์ EP 280.....	73
ภาคผนวก 2 วิธีการใช้เครื่อง MDX-1K.....	77
ภาคผนวก 3 วิธีการใช้เครื่อง FTM7 (Film Thickness Monitor).....	79
ภาคผนวก 4 การใช้ Mass flow Controller.....	84
ภาคผนวก 5 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาค่าช่วงความดัน ของก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียม.....	85
ภาคผนวก 6 ผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ ของการโกลดดิซาร์จกับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ.....	88
ภาคผนวก 7 ตารางแสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์ มาตรฐานเฟสต่างๆ.....	91
ประวัติผู้วิจัย.....	94

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สงวนนดิชชิตร์

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างของผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ).....	5
2.2	แสดงโครงสร้างผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) แบบ (a) อัลฟาเฟส และ(b) แกมมาเฟส.....	5
2.3	แสดง Powder XRD pattern ของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์.....	7
3.1	แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในกระบวนการ โกลวดิสซาร์จของก๊าซ.....	9
3.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง ขั้วไฟฟ้าของหลอดบรรจุก๊าซขณะเกิดสภาวะการ โกลวดิสซาร์จช่วงต่างๆ....	10
3.3	แสดงค่าไอออไนซ์เซชันครอสเซคชันของอิเล็กตรอน สำหรับก๊าซบางชนิด.....	13
3.4	แสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะปลดการชนและค่าความหนาแน่นก๊าซ กับความดันก๊าซอาร์กอน.....	15
3.5	อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ.....	20
3.6	แสดงการกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปีดเตอริง โดยไอออนของก๊าซ Kr ที่ค่าพลังงานต่างๆ.....	22
3.7	แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการสปีดเตอริงของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออน จากก๊าซอาร์กอนที่มีพลังงานค่าต่างๆ.....	23
3.8	แสดงเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนจากคาโทดเมื่อมีสนามแม่เหล็ก.....	25
3.9	แสดงระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	25
3.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิสซาร์จกับค่าอัตราการไหล ของก๊าซรีแอกทีฟ ( $N_2$ ) .....	27
4.1	ชุดเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280.....	31
4.2	ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280.....	32
4.3	ระบบปั๊มสุญญากาศของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280.....	32
4.4	แสดงส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด.....	33
4.5	แสดงหน้าจอส่วนควบคุมแหล่งกำเนิดไฟฟ้า.....	33
4.6	Mass flow controller รุ่น 825 บริษัท EDWARDS.....	34

รูปที่	หน้า
4.7	หน้าจอส่วนควบคุมการปล่อยก๊าซและแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซ..... 34
4.8	แสดงหน้าจอแสดงผลของเครื่อง FTM7..... 34
4.9	แสดงส่วนหัววัดของเครื่อง FTM7..... 34
4.10	รูปแสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM)..... 36
4.11	เครื่อง LCR Meter..... 37
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับความดันก๊าซ..... 45
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิสชาร์จกับความดันก๊าซ..... 45
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความดันก๊าซ..... 46
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์..... 48
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์..... 48
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์..... 49
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์..... 50
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์..... 51
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์..... 51
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มสัมพัทธ์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์..... 52
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มสัมพัทธ์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์..... 53
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มสัมพัทธ์กับอัตราการไหล ของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์..... 53
5.13	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 491.5 nm. เคลือบบนกระจกสไลด์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.78 sccm.. 57

รูปที่	หน้า
5.14	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 41.2 nm เคลือบบนกระจกสไลด์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.92 sccm.. 57
5.15	แสดงฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์..... 58
5.16	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm เคลือบบนกระจกสไลด์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.27 sccm.... 60
5.17	แสดงสเปกตรัมของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยใช้วิธี Energy dispersive X-ray spectroscopy จากเครื่อง SEM ..... 60
5.18	ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง จากเครื่อง Atomic Force Microscope..... 61
5.19	แสดงตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางที่มีฟิล์มบาง $Al_2O_3$ เป็นชั้นไดอิเล็กตริก..... 61
5.20	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ อบที่อุณหภูมิ 200 °C 1 ชั่วโมง..... 65
5.21	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ อบที่อุณหภูมิ 300 °C 1 ชั่วโมง..... 65
5.22	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ อบที่อุณหภูมิ 400 °C 1 ชั่วโมง..... 66
ผ1	แสดงระบบของเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง รุ่น EP 280..... 76
ผ2	แสดงระบบการติดตั้งเครื่อง FTM7..... 82
ผ3	แสดงหน้าจอส่วนควบคุมการทำงานของเครื่อง FTM7..... 83

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์.....	6
3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบคริสตัลที่สภาวะการคริสตัลต่างๆ.....	18
5.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์.....	63
ผ1 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม อะลูมิเนียม กระแสคริสตัลที่เท่ากับ 0.5 A.....	85
ผ2 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม อะลูมิเนียม กระแสคริสตัลที่เท่ากับ 0.75 A.....	86
ผ3 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม อะลูมิเนียม กระแสคริสตัลที่เท่ากับ 1.0 A.....	87
ผ4 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการ โกลวคริสตัล กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสคริสตัล คงที่เท่ากับ 0.5 A.....	88
ผ5 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการ โกลวคริสตัล กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสคริสตัล คงที่เท่ากับ 0.75 A.....	89
ผ6 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการ โกลวคริสตัล กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสคริสตัล คงที่เท่ากับ 1.0 A.....	90
ผ7 แสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์มาตรฐานเฟสต่างๆ.....	92

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น คอมพิวเตอร์, หน่วยความจำชนิดพกพา, เครื่องคำนวณ ฯลฯ มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มความสามารถในการทำงานให้เร็วขึ้น สามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้น มีขนาดเล็กลง และใช้พลังงานน้อยลง อุปกรณ์เหล่านี้มีการพัฒนาโดยมีพื้นฐานของเทคโนโลยี Large-Scale Integrated Circuit (LSI) เป็นหลัก และหนทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีนี้ ทำได้โดยการลดขนาดของส่วนประกอบต่างๆ เช่น Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFETs), DRAM Capacitor เพื่อให้การประมวลผลข้อมูล การเข้าถึงหน่วยเก็บข้อมูล มีความเร็วสูง และใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงานน้อยลง เป็นต้น

สารไดอิเล็กตริกเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญในเทคโนโลยี LSI โดยใช้เป็นส่วนของเกตไดอิเล็กตริก (gate dielectric) ในทรานซิสเตอร์ประเภท MOS หรือใช้เป็นส่วนไดอิเล็กตริกในหน่วยความจำชนิด DRAM รวมทั้งใช้เป็นฉนวนป้องกัน (inter-metal isolation) เป็นต้น มีรายงานการประชุมจาก International Solid State Circuits Conference : ISSCC (DRAM Technology 2006) ว่าตั้งแต่ปี 1982 จนถึงปี 2003 ได้มีการพัฒนาหน่วยความจำ เช่น DRAM ในวงการอุตสาหกรรมไปอย่างมาก โดยในปี 1983 มีบริษัทจำนวนมาก เช่น บริษัท NEC, Mitsubishi, Toshiba และ Fujitsu เป็นต้น ทำการผลิตหน่วยความจำที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ประเภท DRAM ขนาด 256 Kb โดยเทคโนโลยีสำหรับการผลิตจะใช้ ทรานซิสเตอร์ประเภท CMOS ซึ่งมีขนาดในระดัับ 1- 2.5  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นมีการพัฒนาภายในช่วง 20 ปีนี้ไปอย่างมาก ในปี 1995 เริ่มมีการผลิตหน่วยความจำประเภท DRAM ขนาด 1 Gb โดยเทคโนโลยีสำหรับการผลิตจะใช้ ทรานซิสเตอร์ประเภท CMOS ซึ่งมีขนาดในระดัับ 0.25  $\mu\text{m}$  และในปี 2003 มีการผลิตหน่วยความจำชนิด DDR2 และ DDR3 SDRAM โดยใช้เทคโนโลยีระดัับ 0.1 และ 0.13  $\mu\text{m}$  เป็นต้น

จะเห็นว่าขนาดของทรานซิสเตอร์ประเภท MOS ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญใน LSI เทคโนโลยี มีการพัฒนาและมีขนาดที่เล็กลง เป็นผลให้ส่วนประกอบต่างๆภายในทรานซิสเตอร์มีขนาดที่เล็กลงตาม โดยชั้นของสารไดอิเล็กตริกซึ่งนิยมใช้สารประกอบ  $\text{SiO}_2$  มีความหนาลดลงในระดัับไม่กี่สิบนานาเมตร ทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสผ่านชั้นสารไดอิเล็กตริกนี้ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์อุโมงค์ทะลุ (direct tunnelling effect) โดยปริมาณกระแสที่รั่วผ่านชั้นสารนี้จะขึ้น

กับค่าความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก, ค่าฟังก์ชันงานของสาร และค่ามวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อใช้สารอื่นแทนสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  โดยที่สารประกอบเหล่านี้จะเป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารประกอบ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งมีค่าประมาณ 4.5 หรือที่เรียกว่าสารประเภท High-k material ซึ่งทำให้ปริมาณกระแสรั่วไหลมีปริมาณน้อย และมีความสามารถในการเก็บประจุมากขึ้นเมื่อนำมาทำเป็นตัวเก็บประจุ

อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นสารประกอบหนึ่งที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง โดยมีค่าประมาณ 9.3 - 11.5 ซึ่งมากกว่า  $\text{SiO}_2$  กว่าสองเท่า ในปี 2001 ชางและคณะได้สร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยวิธี Plasma-assisted Atomic Layer Controlled Deposition (PAALD) โดยฟิล์มมีความหนา 15 nm มีค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลเท่ากับ  $10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> ที่ความต่างศักย์ไบแอสเท่ากับ 1 V และมีค่าสนามไฟฟ้าพังทลายเท่ากับ 7 MV/cm (Jeong et al. 2001) ในปี 2002 โกลเนอร์และคณะได้สร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์บนวัสดุรองรับซิลิคอนและโลหะชนิดต่างๆ ด้วยวิธีตกเคลือบแบบอะตอมมิกเลเยอร์ (ALD) โดยฟิล์มมีความหนาระหว่าง 30 ถึง 3540 Å และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 7.6 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลน้อยกว่า 1 nm/cm<sup>2</sup> เมื่อให้สนามไฟฟ้าเท่ากับ 5 MV/cm ในปี 2003 โยอิชิโร ได้สร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บนวัสดุรองรับชนิดซิลิคอนด้วยวิธี ตกเคลือบแบบแคทาไลติกเคมีคัลวapor (catalytic chemical vapor deposition) โดยฟิล์มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 7.4 และมีค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลเท่ากับ  $5.01 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่เกตมีค่าเท่ากับ 1 V (Ogita et al. 2003) และในปี 2004 ชามาลาและคณะทำการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้ด้วยวิธีอิเล็กตรอนบีมอีวาพอเรชัน (electron beam evaporation) และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) พบว่าฟิล์มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 9.6 เมื่อสร้างฟิล์มโดยวิธีอิเล็กตรอนบีมอีวาพอเรชัน และมีค่าเท่ากับ 8.3 เมื่อใช้วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Shamala et al. 2004)

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับเคลือบฟิล์มที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เพราะสามารถควบคุมชั้นตอนหรือวิธีการเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติต่างๆตามที่ต้องการได้ง่าย ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถใช้ได้ดีกับเฉพาะฟิล์มที่เป็นสารประเภทโลหะ แต่สำหรับฟิล์มที่เป็นสารประเภทฉนวน เช่น ออกไซด์ของโลหะ จะไม่สามารถทำได้เนื่องจากเมื่อนำออกไซด์ของโลหะมาเป็นเป้า ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณส่วนของพลาสมาจะมีค่าต่ำ เป็นผลให้อะตอมที่ใช้ในการสปีดเตอริงมีค่าโมเมนตัมไม่เพียงพอที่จะเกิดเป็นฟิล์มได้



สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยวิธี ดีซีแมกนี-  
ตรอนสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเคลือบฟิล์มประเภทออกไซด์  
ของโลหะ โดยใช้อะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะมาเป็นเป้าในระบบ และใช้ก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นส่วน  
ประกอบของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นก๊าซรีแอกทีฟผ่านเข้าไปบริเวณชิ้นงาน เพื่อให้  
ฟิล์มอะลูมิเนียมที่เกิดการออกซิเดชันในระหว่างการสปีดเตอริง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง  
แบบรีแอกทีฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติและ โครงสร้างทั่วไปของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างได้

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิธีการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง  
แบบรีแอกทีฟ

1.3.2 สร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบรีแอก  
ทีฟ

1.3.3 ศึกษาสมบัติและ โครงสร้างทั่วไปของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่สร้างได้

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างได้

1.3.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่สร้างได้

## บทที่ 2

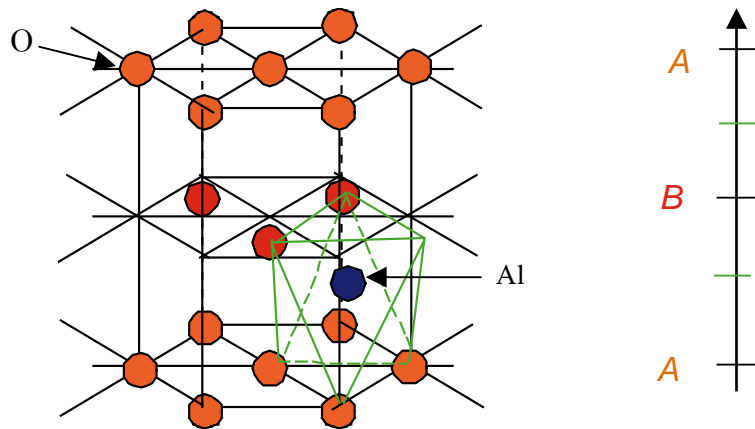
### ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ฟิล์มบางของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยทั่วไปมีสมบัติที่ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี อันได้แก่ ความร้อน สารเคมี ความชื้น ที่อาจทำให้วัสดุที่ต้องการเคลือบเสื่อมคุณภาพได้ ดังนั้นจึงมีการนำฟิล์มบางของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ มาใช้ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น นำไปเคลือบเพื่อป้องกันเนื้อของวัสดุ เคลือบเพื่อลดการสะท้อนของแสงของเลนส์ และนอกจากนี้ผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถนำมาใช้ในงานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี เช่น ใช้เป็นเกตอินซูเลเตอร์ในทรานซิสเตอร์ประเภท MOS เช่น MOS Field Effect Transistor (MOSFET), CMOS transistor เป็นต้น หรือใช้ทำเป็นส่วนไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ (dielectric capacitor) ในหน่วยความจำประเภท DRAM เป็นต้น

#### 2.1 โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Klein and Hurlburt 1999)

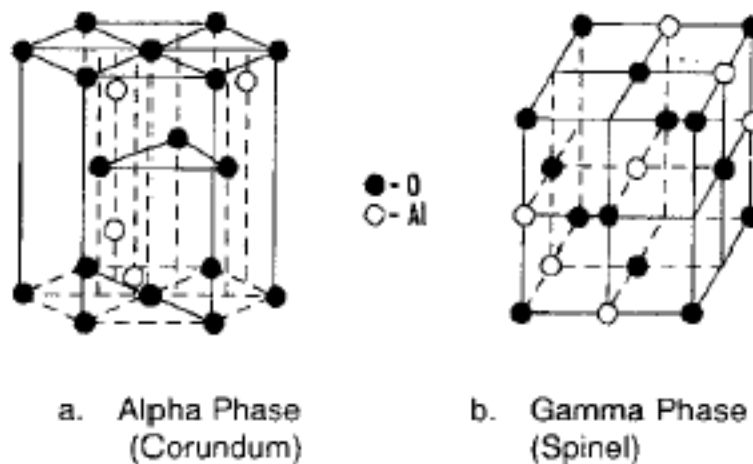
สารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จัดอยู่ในกลุ่มของแร่ฮีมาไทต์ (hematite group) โดยมีรูปแบบโครงสร้างทั่วไปของผลึกประกอบด้วยไอออนของธาตุออกซิเจน ( $\text{O}^{2-}$ ) ที่มีการจัดเรียงกันแบบ Hexagonal Close Packing (HCP) โดยมีอะลูมิเนียมไอออน ( $\text{Al}^{3+}$ ) อยู่ในตำแหน่งช่องว่าง ออกตะเสดครอน (octahedral interstitial) ของระนาบอะตอมออกซิเจน รูปแบบนี้จัดเป็นรูปแบบหนึ่งของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่รู้จักกันในรูปของแร่ Corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีความเสถียรมากที่สุด

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าบริเวณตำแหน่งช่องว่างออกตะเสดครอน (octahedral interstitial) ของโครงสร้างผลึกจะถูกยึดครองโดยอะลูมิเนียมไอออน 2 ใน 3 ส่วน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

นอกจากนี้ผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์ยังมีโครงสร้างรูปแบบอื่นๆอีกโดยแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ กลุ่มอัลฟา ซึ่งกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่จัดเรียงกันแบบ HCP ประกอบด้วย  $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$  และกลุ่มแกมมา ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่จัดเรียงกันแบบ FCC ซึ่งประกอบด้วย  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แบบ (a) อัลฟาเฟส และ (b) แกมมาเฟส

สมบัติ	ค่า
โครงสร้าง	HCP (Al in octahedral coordinate)
น้ำหนักโมเลกุล	101.96 g
สมบัติทั่วไป	
ความแข็ง	9 Mohs
จุดหลอมเหลว	2054 °C
ความหนาแน่น	4000 Kg m <sup>-3</sup>
สมบัติทางไฟฟ้า	
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	9.3 - 11.5
ช่องว่างพลังงาน	8.5 eV
สมบัติทางแสง	
ดัชนีหักเห (at 1.06 microns)	1.75449 (O) 1.74663 (E)
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน	0.17 - 5.5 microns

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวิจัยสิทธิ์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของผลึกสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์

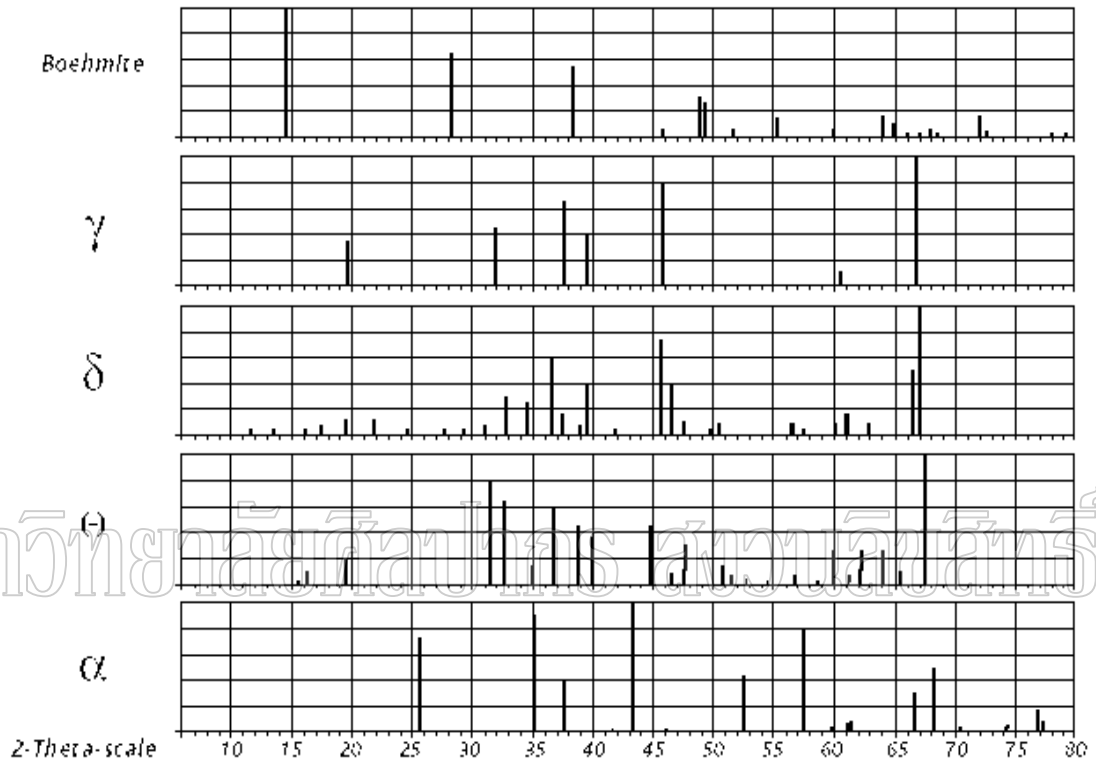
## 2.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธี X-ray diffraction (นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุกรักษ์ 2547)

รังสีเอกซ์จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.1 - 2000 Å ° และเรียกว่าโฟตอนรังสีเอกซ์ (x-ray photon) โดยความยาวคลื่นและความเข้มของรังสีที่ปลดปล่อยมานั้นจะใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทั้งด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

เมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบกับวัตถุจะทำอันตรกริยากับวัตถุ เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง(emission), การดูดกลืน(absorption) และการกระเจิง(scattering) เป็นต้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่ต้องการนั้น เมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์ตกกระทบและทำอันตรกริยากับอะตอมต่างๆในสาร จะเกิดปรากฏการณ์ Coherent scattering และการแทรกสอด และเมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์เป็นผลึกซึ่งประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ จะทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของสารเหล่านั้นจาก รังสีที่กระเจิงและเกิดการแทรกสอด ซึ่งมีลักษณะเฉพาะสำหรับแต่ละโครงสร้างของสารต่างๆเหล่านั้น

รูปที่ 2.3 แสดง Powder XRD Pattern ของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสต่างๆ ที่เตรียมได้จากการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้น Boehmite ที่ช่วงอุณหภูมิแตกต่างกัน (High Purity Activated Aluminas 2006) และตารางที่ ผ7 (ภาคผนวก 7) แสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์มาตรฐานเฟสต่างๆ (Santos et al , 2000:107)



รูปที่ 2.3 แสดง Powder XRD pattern ของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์

## บทที่ 3

### กระบวนการสเปตเตอริงและการเคลือบฟิล์มบาง

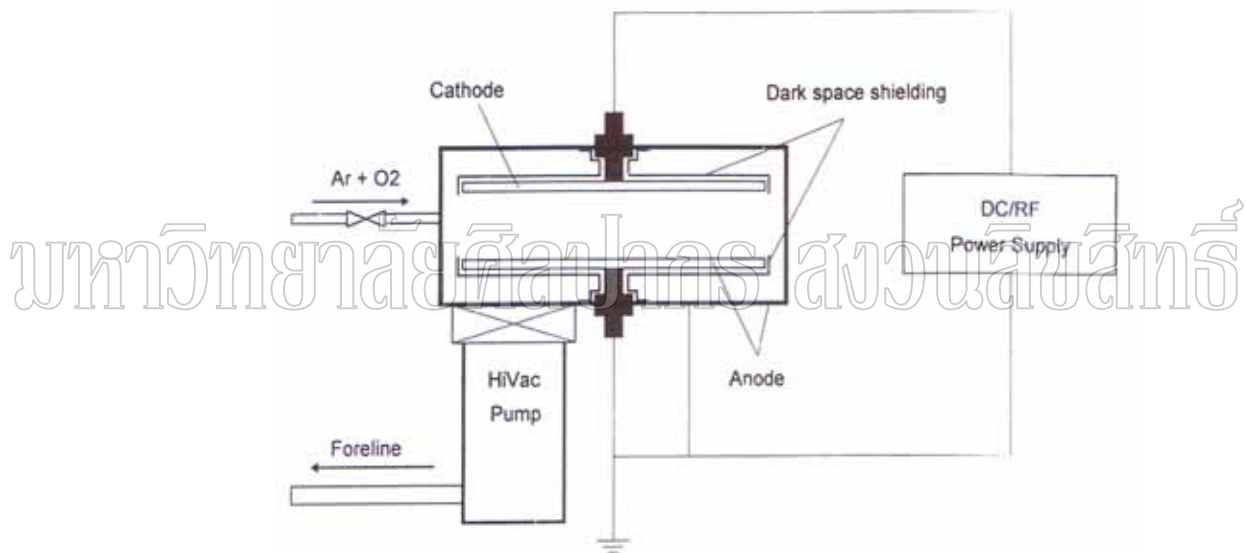
การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนวัสดุรองรับ โดยที่ คุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์มขึ้นกับวิธีการเคลือบฟิล์ม การเคลือบฟิล์มบางสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางเคมี (chemical vapor deposition process, CVD) เช่น วิธี plasma CVD, MOCVD และ laser CVD เป็นต้น และการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition process, PVD) เช่น วิธี ไอออนเพลตติง (ion plating) และ วิธีสเปตเตอริง เป็นต้น

#### 3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของสเปตเตอริง (Hummel and Guenther 1995:137-161; นฤมล ธรรมรักษ์-เจริญ 2546:6-10)

สเปตเตอริง (sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากในการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสเปตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากใช้กระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง (dc magnetron sputtering) เป็นต้น

### 3.2 กระบวนการโกลด์ิสชาร์จของก๊าซ

กระบวนการโกลด์ิสชาร์จของก๊าซ คือ กระบวนการคายประจุของระบบที่ประกอบด้วยก๊าซ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะมีการเรืองแสงของก๊าซเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของก๊าซอยู่ในสถานะกระตุ้นหรือเกิดการรวมตัวระหว่างไอออนกับอิเล็กตรอนภายในระบบ จากรูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในกระบวนการโกลด์ิสชาร์จ โดยเมื่อเริ่มให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระในระบบซึ่งเกิดจากอะตอมทำอันตรกิริยากับรังสีที่มีอยู่ในบรรยากาศ ถูกเร่งให้เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าและชนกับอะตอมของก๊าซบางส่วน ทำให้อะตอมนั้นแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนี้ว่า ทาวน์เซนต์ดิสชาร์จ (townsend discharge)

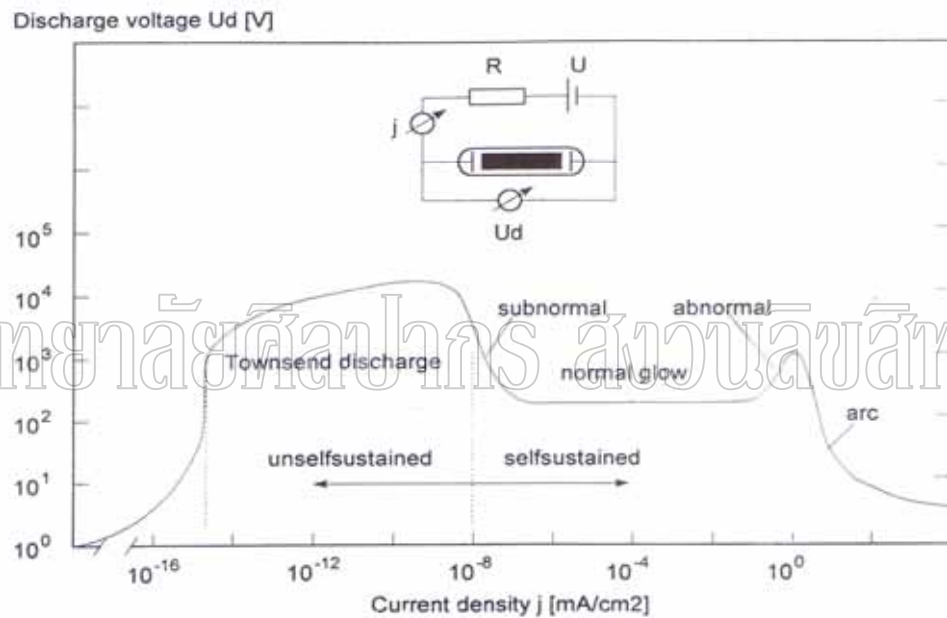


รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในกระบวนการ โกลด์ิสชาร์จของก๊าซ

(Hummel and Guenther 1995)

เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจนถึงศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage,  $V_B$ ) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงมากขึ้น ทำให้อะตอมของก๊าซมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้น และไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนรวมภายในระบบมากขึ้น เป็นผลให้ระบบช่วงนี้จะสามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จไว้ได้ หรือที่เรียกว่าเกิดกระบวนการอะวาลันซ์ (avalanche)

ระบบในช่วงดังกล่าวนี้ไอออนของก๊าซภายในระบบจะเกิดการเรืองแสง และศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าลดลงแต่กระแสไฟฟ้ามักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก กระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า การเรืองแสงปกติหรือนอร์มอลโกลว (normal glow) โดยสภาวะนี้มีอัตราส่วนระหว่างอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออนบวกมีค่าไม่สูงมาก ดังนั้นการเรืองแสงเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณแนวกลางแกนของการดิสชาร์จซึ่งค่าของสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูง การดิสชาร์จในช่วง นอร์มอลโกลวนี้เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่และแนวการชนของไอออนบวกบนพื้นผิวของขั้วคาโทดจะขยายพื้นที่โดยที่ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าคงที่



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของหลอดบรรจุก๊าซขณะเกิดสภาวะการ โกลวดิสชาร์จช่วงต่างๆ (Hummel and Guenther 1995)

เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับระบบหลังจากที่การชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของผิวส่วนหน้าคาโทดแล้ว จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามักมีค่าเพิ่มขึ้น และเกิดการเรืองแสงเปล่งจ้าขึ้นเรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงผิดปกติ หรือแอบนอร์มอลโกลว (abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้กับระบบสปัตเตอริง และระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการโกลวดิสชาร์จ ถ้าไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทด ความร้อนที่สะสมที่ผิว



คาโทดจะทำให้เกิดกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (thermionic electron emission) ขึ้น เมื่อรวมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากกระบวนการอะวาลานซ์ จะทำให้ความนำไฟฟ้าของก๊าซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าจะลดลงมากในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูง (ประมาณ  $0.1 \text{ A/cm}^2$ ) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การอาร์ค (arc discharge) โดยรูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ดิสชาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าของหลอดบรรจุก๊าซขณะเกิดสภาวะการโคลดิสชาร์จช่วงต่างๆ

ปริมาณกระแสจากกระบวนการโคลดิสชาร์จที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแอโนดและคาโทด จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพลาสมาประจุอิสระที่เกิดขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอน, ไอออนบวก และไอออนลบ และสมบัติต่างๆของโคลดิสชาร์จจะขึ้นกับกระบวนการหรือกลไกในระดับจุลภาค ได้แก่ กระบวนการเกิดพลาสมาประจุอิสระและกระบวนการรวมตัวของพลาสมาประจุอิสระซึ่งเกิดจากการชนแบบต่างๆของอนุภาคภายในระบบ และสมบัติของโคลดิสชาร์จต่างๆที่กำหนดโดยพฤติกรรมโดยรวมของพลาสมาต่างๆที่มีภายในระบบ ได้แก่ อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออน, กระบวนการเกิดซีท, ความถี่พลาสมา เป็นต้น

### 3.2.1 กระบวนการในระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นในโคลดิสชาร์จ

กระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดกระบวนการโคลดิสชาร์จแบบเรืองแสงนั้น ประกอบด้วยกระบวนการในระดับจุลภาค 2 กระบวนการ ได้แก่ การชนกันของอนุภาคต่างๆภายในระบบ และการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งทั้งสองกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการรักษาเสถียรภาพของดิสชาร์จ และทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริง

#### 3.2.1.1 กระบวนการของการชน (collision processes)

การชนที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาจะเป็นการชนกันระหว่างอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า, ไอออนต่างๆ และอิเล็กตรอน ซึ่งกระบวนการของการชนจะสามารถเป็นได้ทั้งการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น สำหรับการชนแบบยืดหยุ่นนั้นพลังงานจลน์รวมและโมเมนตัมรวมของระบบจะไม่เปลี่ยนแปลง (conservative) การชนแบบนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์และโมเมนตัมกันระหว่างอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดภาวะสมดุลทางความร้อนภายในระบบโคลดิสชาร์จ ปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทจากอนุภาคที่เข้าชนซึ่งให้กับอนุภาคของเป้าที่อยู่หนึ่ง สำหรับการชนแบบตรงจะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$ETF = \frac{4 M_i M_t}{(M_i + M_t)^2} \quad (3.1)$$

โดยที่ ETF คือ ฟังก์ชันของการถ่ายเทพลังงาน

$M_i$  คือ มวลของอนุภาคที่เข้าชน

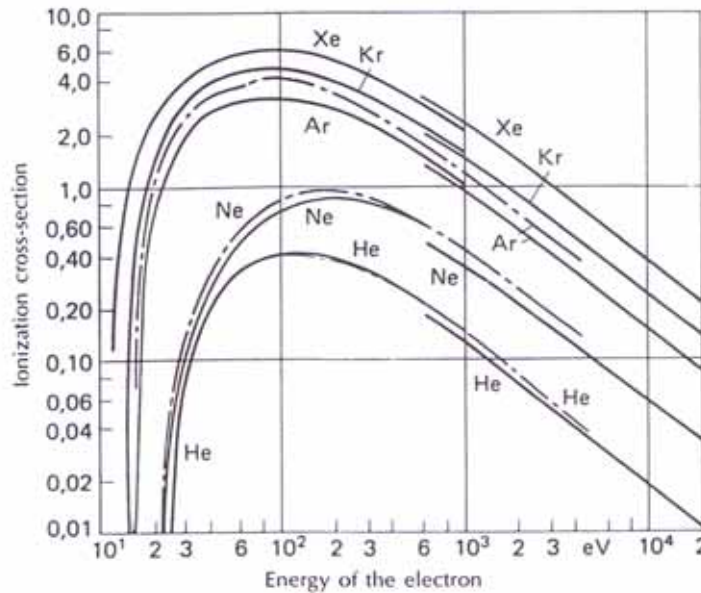
$M_t$  คือ มวลของอนุภาคที่เป็นเป้า

ในกรณีที่การชนเกิดจากอนุภาคซึ่งมีมวลเท่ากัน เช่น การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน หรือ การชนระหว่างไอออนกับไอออนชนิดเดียวกัน จะทำให้มีการถ่ายเทพลังงาน 100 เปอร์เซ็นต์ การชนแบบนี้จะทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สำหรับการชนที่เกิดจากอนุภาคที่มีมวลแตกต่างกันมาก เช่น การชนระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออน หรือ การชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หลังจากเกิดการชนพลังงานจลน์รวมจะสูญหาย ดังนั้นจึงอาจถือได้ว่าระบบดังกล่าวประกอบด้วยระบบย่อย 2 ระบบ คือ ระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและระบบที่ประกอบด้วยไอออนและอนุภาคซึ่งเป็นกลาง โดยที่ระบบทั้งสองเกือบจะถือได้ว่าเป็นอิสระต่อกัน และจะมีอันตรกิริยาต่อกันเฉพาะการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ระบบทั้งสองนี้จะเป็นอิสระต่อกันภายใต้เงื่อนไขสภาวะการโคจรดิซซาร์จเดียวกันที่ใช้ในการสปีดเทอร์ริง เช่น ความดัน ความหนาแน่นกระแสดิซซาร์จ เป็นต้น

ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานจลน์บางส่วนของกลุ่มอนุภาคที่ชนกันจะเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานศักย์ของอนุภาคตัวใดตัวหนึ่งของกลุ่มอนุภาคที่เกิดการชน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดสภาวะต่างๆของอนุภาคที่ถูกชน เช่น สภาวะถูกกระตุ้น, สภาวะการไอออไนซ์เซชัน เป็นต้น แต่กระบวนการต่างๆเหล่านี้จะสามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ โดยการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและไอออน (recombination process) ซึ่งทำให้ได้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เป็นต้น

โอกาสที่อะตอมจะถูกไอออไนซ์โดยการชนของอิเล็กตรอนกำหนดโดยค่าไอออไนซ์เซชันครอสเซกชัน ซึ่งขึ้นกับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นหลัก สำหรับอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ค่าไอออไนซ์เซชันครอสเซกชันจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออิเล็กตรอนที่เข้าชนมีค่าพลังงานเท่ากับหรือต่ำกว่าพลังงานไอออไนซ์เซชัน และเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าพลังงานไอออไนซ์ ค่าไอออไนซ์เซชันครอสเซกชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อ

พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 100 eV ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นค่าไอออไนซ์-เซชันครอสเซกชันก็จะเริ่มมีค่าลดลง เมื่อค่าพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าว



รูปที่ 3.3 แสดงค่าไอออไนซ์เซชันครอสเซกชันของอิเล็กตรอน สำหรับก๊าซบางชนิด (Hummel and Guenther 1995)

### 3.2.1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเริ่มปลดปล่อยออกมาจากพื้นผิวเมื่อถูกชนโดยอนุภาคต่างๆ เช่น อิเล็กตรอน, ไอออน, โฟตอน หรืออนุภาคที่เป็นกลาง เป็นต้น กระบวนการชนแล้วให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิในระบบโกลดิสซาร์จที่สำคัญคือการชนที่เกิดขึ้นที่ผิวคาโทดโดยไอออน โดยที่ผลผลิตของกระบวนการนี้ คือจำนวนอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ยที่หลุดออกมาจากผิวของคาโทดต่อจำนวนของไอออนที่เข้าชน ซึ่งขึ้นกับชนิดและพลังงานของไอออนที่เข้าชน และขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้เป็นขั้วคาโทดด้วย

การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการชนของไอออนกับพื้นผิวที่เป็นสารประกอบของโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ของโลหะ หรือสารประกอบไนไตรด์ของโลหะ จะมีค่ามากกว่าพื้นผิวที่เป็นโลหะธรรมดา เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของพลาสมามีค่าลดลง ดังนั้น

ถ้าขั้วคาโทดที่ใช้เป็นโลหะทำปฏิกิริยากับก๊าซ เช่น ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซไนโตรเจน อิมพีแดนซ์ของพลาสมาจะมีค่าลดลง ซึ่งพบในกระบวนการสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ

### 3.2.2 กระบวนการโดยรวมที่เกิดขึ้นในโกลด์ิสซาร์จ

3.2.2.1 ความหนาแน่นก๊าซและระยะปลอดการชน (gas density and mean free path )

ความหนาแน่นของก๊าซ ( $z$ ) ที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะเป็นฟังก์ชันของความดันก๊าซและอุณหภูมิคงที่

$$z = \frac{p}{kT} \quad (3.2)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันของก๊าซ ( $\text{N/m}^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )

และค่าระยะปลอดการชน (mean free path,  $l_m$ ) ของอะตอมก๊าซจะสัมพันธ์กับค่าความดันก๊าซภายในระบบ ตามสมการ

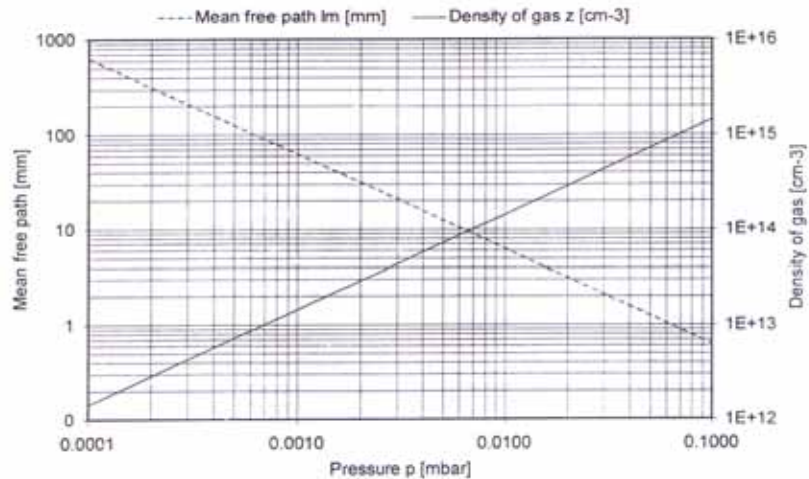
$$l_m = \frac{c}{p} \quad (3.3)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันของก๊าซ ( $\text{N/m}^2$ )

$c$  คือ ค่าคงที่ก๊าซ (สำหรับก๊าซอาร์กอน, ออกซิเจน และ อากาศ มีค่า

ประมาณ  $6.3 \times 10^{-3} \text{ cm} \times \text{mbar}$ )

รูปที่ 3.4 จะแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ ระยะปลอดการชนของก๊าซและความหนาแน่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของความดัน ของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 500 K โดยแสดงในช่วงความดันที่ใช้ในงานด้านการสปัตเตอริง



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะปลอดการชนและความหนาแน่นก๊าซกับค่าความดันก๊าซอาร์กอน (Hummel and Guenther 1995)

### 3.2.2.2 การนำกระแสไฟฟ้าในระบบดิสชาร์จ (current transport in the discharge)

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบดิสชาร์จจะประกอบด้วยส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้าจากพลาสมา 2 ชนิด ได้แก่ อิเล็กตรอน และไอออนบวก โดยพลาสมาทั้งสองจะมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดการรวมกันของกระแสไฟฟ้าที่ได้ในระบบโกลดิสชาร์จ สำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วนประกอบจะขึ้นกับขนาดประจุของอิเล็กตรอน, ความหนาแน่นของประจุ, ค่าโมบิลิตี และขนาดของสนามไฟฟ้า ตามสมการที่ 3.4

$$j_{\pm} = e n_{\pm} \mu_{\pm} E \quad (3.4)$$

โดยที่  $n$  คือ ความหนาแน่นของพลาสมาประจุ ( $m^{-3}$ )

$e$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (C)

$\mu$  คือ ค่าโมบิลิตีของพลาสมาประจุ ( $m^2/V.s$ )

$E$  คือ สนามไฟฟ้า (V/m) ; เครื่องหมาย + ประจุบวก , - อิเล็กตรอน

ค่าโมบิลิตี ( $\mu$ ) ของพาหะประจุ หมายถึงค่าความเร็วลอยเลื่อนของพาหะประจุที่เกิดขึ้นในพลาสมาของระบบ โกลวดิสชาร์จต่อค่าของสนามไฟฟ้าปริมาณหนึ่งหน่วย ซึ่งปริมาณนี้จะถูกกำหนดด้วยกระบวนการของการชนแบบต่างๆ และค่าครอสเซคชัน โดยทั่วไปแล้วค่าโมบิลิตีของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าค่าโมบิลิตีของไอออนหลายเท่า เช่น ที่ความดันก๊าซ 1 mbar ค่าโมบิลิตีของอิเล็กตรอนจะมีค่าประมาณ  $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  และค่าโมบิลิตีของไอออนจะมีค่าเท่ากับ  $10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

### 3.2.2.3 คุณสมบัติของดิสชาร์จพลาสมา (property of the discharge plasma)

บริเวณบางส่วนในโกลวดิสชาร์จจะก่อตัวเป็นพลาสมา โดยทั่วไปจะมีสภาพเป็นทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของอิเล็กตรอน, ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า คุณสมบัติของพลาสมาที่ถูกกำหนดด้วยอันตรกิริยาต่างๆระหว่างอนุภาคภายในพลาสมา และคุณลักษณะของพลาสมาจะกำหนดโดยตัวแปรพื้นฐาน ดังนี้

1. อุณหภูมิของอิเล็กตรอนหรือไอออน ( $T_{e,i}$ )
2. ความหนาแน่นพลาสมา ( $n$ )
3. ความยาวเดอรับายสกินนิง ( $L_D$ )
4. ความถี่พลาสมา ( $f_p$ )
5. ความหนาแน่นกระแสแบบสุ่มของอิเล็กตรอนหรือไอออน ( $j_{e,i}$ )

อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนเป็นปริมาณที่ใช้บ่งบอกค่าพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคชนิดนั้นๆในระบบ โดยที่เทอมของอุณหภูมิเป็นปริมาณที่ใช้กับกลุ่มของอนุภาคที่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ในกรณีนี้อนุภาคจะมีฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานเป็นแบบแมกซ์เวลล์-โบลซ์มานน์ แต่สำหรับกรณีไอออนและอิเล็กตรอนจะมีฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานแตกต่างไปจากรูปแบบของแมกซ์เวลล์-โบลซ์มานน์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนหรือไอออนสามารถใช้เป็นปริมาณที่บ่งบอกพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคนั้นๆโดยประมาณได้ ขณะที่อิเล็กตรอนและไอออนในระบบมีการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ระหว่างกันได้ยากนั้น ประกอบกับการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นน้อยในระบบดิสชาร์จที่สภาวะความดันของก๊าซมีค่าต่ำ ซึ่งใช้ในระบบสปีดเตอริงทั่วไป ดังนั้นกลุ่มของระบบอนุภาคทั้งสองจึงไม่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนซึ่งกันและกัน ทำให้อุณหภูมิของอนุภาคทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน

ในระบบโพลีดิสซาร์จ อิเล็กตรอนสามารถทำให้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 eV ได้ง่าย และค่าพลังงานดังกล่าวจะสอดคล้องกับอิเล็กตรอนที่มีอุณหภูมิถึง 23000 K และในตรงกันข้าม สำหรับไอออนจะมีอุณหภูมิประมาณ 500 K เท่านั้น

ความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดขึ้นในโพลีดิสซาร์จมีค่าระหว่าง  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  ถึง  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  ถ้าความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดขึ้นในโพลีดิสซาร์จมีค่าเท่ากับ  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  ความดันก๊าซของระบบดิสซาร์จจะมีค่าเป็น  $10^{-2} \text{ mbar}$  และอุณหภูมิของไอออนมีค่าเท่ากับ 500 K ค่าไอออนไนซ์เซชันดีกรีของก๊าซจะสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ 3.2 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า  $10^{-4}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ถ้าในพลาสมาที่มีค่าประจุรวมเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral plasma) ถูกรบกวนโดยการนำประจุไฟฟ้ามาวางไว้ในพลาสมาบริเวณใดบริเวณหนึ่ง พลาสมานั้นจะมีปฏิกิริยาตอบสนองเพื่อชดเชยโดยเกิดจากการรวมตัวและการจัดเรียงตัวใหม่ที่เกิดขึ้นรอบๆ ประจุที่ใส่เข้าไป ที่ระยะห่างเท่ากับ  $\lambda_D$  จากจุดประจุที่ใส่เข้าไปรบกวนระบบ ค่าสนามที่เกิดจากการรบกวนจะลดลงไป  $1/e$  เท่าของค่าความเข้มสนามเริ่มต้น ระยะดังกล่าวเรียกว่า ค่าเดอรับายเลนจ์ (Debye length) หาได้จากสมการที่ 3.5

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{e^2 n_e}} \quad (3.5)$$

โดยที่  $n_e$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $\text{m}^{-3}$ )

$e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (C)

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ (J/K)

$T_e$  คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (K)

$\epsilon_0$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (F/m)

สำหรับตารางที่ 3.1 แสดงค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน, ความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอน และค่าความยาวเดอรับายเลนจ์ สำหรับระบบดิสซาร์จแบบต่างๆ

Discharge	$T_e$ (K)	$n_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$l_D$ (cm)
Weak glow	$\geq 80000$	$10^8$	$\geq 0.1$
Medium glow	$= 40000$	$10^{10}$	$= 0.01$
Intense glow	$= 30000$	$10^{12}$	$= 0.0001$
Arc	$\leq 20000$	$\leq 10^{16}$	$\leq 10^{-5}$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบดิสชาร์จที่สภาวะการดิสชาร์จต่างๆ (Hummel and Guenther 1995)

ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในพลาสมาที่มีปริมาตรแน่นอนถูกทำให้เปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกทำให้กลับสู่ตำแหน่งเดิมโดยไอออนบวกในภายในระบบ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบออสซิลเลชันของอิเล็กตรอน โดยมีค่าความถี่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความถี่พลาสมา  $f_p$  โดยค่าความถี่นี้จะสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่างๆ ตามสมการที่ 3.6

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

$$2\pi f = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (3.6)$$

โดยที่  $n_e$  คือ ความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอน ( $\text{m}^{-3}$ )

$m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน (kg)

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (F/m)

$e$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (C)

สำหรับโกลวดิสชาร์จพลาสมาที่มีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  จะมีค่าความถี่พลาสมาประมาณ 1 GHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ขีดจำกัดบน ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถผ่านพลาสมานี้ได้ สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความถี่เท่ากับ 1 GHz หรือความถี่ที่มีค่ามากกว่านี้ จะเกิดสะท้อนกลับ



กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนแบบสุ่มที่เกิดขึ้นในพลาสมา เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่มีผลมาจากอุณหภูมิ แต่การเคลื่อนที่ของประจุต่างๆเหล่านี้มีลักษณะที่สมมาตร ทำให้กระแสรวมมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีของฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานแบบแมกเวลล์โบลซ์มานน์ ค่ากระแสแบบสุ่มนี้จะสอดคล้องกับสมการที่ 3.7 และ 3.8

- ในกรณีความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน

$$j_e = \frac{e n_e v_e}{4} \quad (3.7)$$

- ความหนาแน่นกระแสไอออน

$$j_i = \frac{e n_i v_i}{4} \quad (3.8)$$

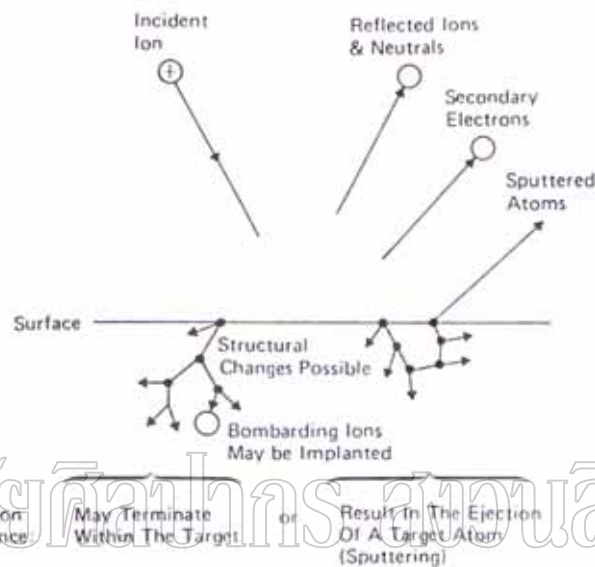
เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจะพบว่าค่ากระแสของ ไอออนจึงมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก เป็นผลให้เกิดสเปซชาร์จ์ขึ้น บริเวณผิวของภาชนะที่บรรจุพลาสมา

#### 3.2.2.4 กระบวนการในการเกิดชีท (sheath formation )

เมื่อวัสดุรองรับวางอยู่ในบริเวณพลาสมา จะถูกชนด้วยกระแสของอิเล็กตรอนและไอออน ซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่ม แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนมีค่าโมบิลิตีสูงกว่าค่าโมบิลิตีของไอออน ดังนั้นวัสดุรองรับจะถูกประจุด้วยอิเล็กตรอน เกิดเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าลอยตัวระหว่างวัสดุรองรับที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับบริเวณพลาสมา ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุรองรับจะมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อศักย์ไฟฟ้าลอยตัวที่เกิดขึ้นมีผลทำให้กระแสอิเล็กตรอนมีค่าลดลง และขณะเดียวกันกระแสไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นจนค่ากระแสของประจุทั้งสองหักล้างกันเป็นศูนย์ โดยกระแสไอออนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้เกิดชั้น (sheath) ของไอออนบวกขึ้นรอบๆวัสดุรองรับ และผลลัพท์เนื่องจากกรณีนี้ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าของผนัง (wall potential) ซึ่งปกติจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10 ถึง 20 โวลต์

### 3.3 กระบวนการสปีดเตอริง

สปีดเตอริงเป็นผลของลำดับชั้นการชน(collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากผิวเป้าถูกชนด้วยไอออนบวก อะตอมซึ่งเกี่ยวข้องกับการชนจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากเป้าไม่มากนัก โดยประมาณไม่เกิน 10 อังสตรอม และอะตอมของผิวเป้าซึ่งถูกสปีดเตอริงจะเป็นขั้นสุดท้ายในลำดับการชน



รูปที่ 3.5 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ (Chapman 1980)

อันตรกิริยาระหว่างผิวเป้าสารเคลือบกับไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยพลังงานต่างกันจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมของเป้าแบบยึดหยุ่นจะสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเป้า ซึ่งส่วนใหญ่รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบและสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า
2. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากเมื่อชนกับเป้าสารเคลือบอาจฝังตัวในเป้าสารเคลือบ โดยที่ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานของไอออนที่เข้าชน
3. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ เรียกกระบวนการนี้ว่า การสปีดเตอริง ดังแสดงในรูปที่ 3.5

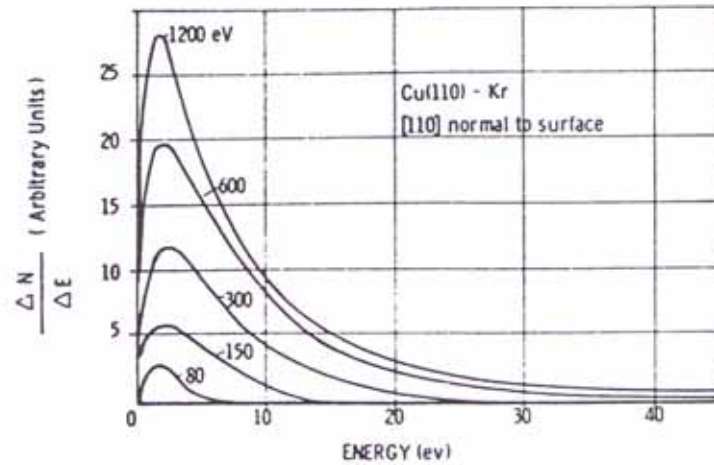
4. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ รวมทั้งมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ด้วย

ในการพิจารณาการชนระหว่างอนุภาคที่เกี่ยวข้องแต่ละคู่ที่ระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของเป้า และระหว่างอะตอมของเป้าด้วยกัน ยึดถือตามแบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่นของแบบจำลองลูกบิลเลียดซึ่งอธิบายด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน (สมการที่ 3.1) ระหว่างการชนโมเมนตัมจะถูกส่งผ่านจากอนุภาคที่เข้าชนไปยังอนุภาคที่ถูกชนในทิศของแนวลาที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองในขณะที่สัมผัสกัน

กลไกการถ่ายเทโมเมนตัมที่สามารถนำไปสู่การสปีดเตอริง เริ่มต้นจากไอออนบวกชนเป้าแล้วถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่นิ่ง อะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะการชนแบบพลังงานต่ำจะได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในแนวขนานกับผิวเป้าเป็นส่วนใหญ่จึงเคลื่อนตัวออกในแนวเฉียงด้านข้าง และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดจากผิวเป้าได้จากการชนเพียงลำดับแรก การชนกันระหว่างไอออนบวกกับอะตอมนี้เรียกว่า การชนปฐมภูมิ (Primary knock-on) ส่วนอะตอมที่ได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวลึกเข้าไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป และอาจสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกได้ หรือทำให้เกิดการชนกันอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมเป้าสารเคลือบ จนกระทั่งทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด

### 3.3.1 ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอริง

อะตอมที่หลุดออกจากผิวหน้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปีดเตอริงมีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50 - 100 เท่า โดย อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian distribution) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ถ้าไอออนบวกที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปีดเตอริงจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อไอออนบวกที่เข้าชนมีพลังงานมากกว่า 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปีดเตอริงจะมีค่าคงตัว เป้าสารเคลือบที่มีค่าการสปีดเตอริงสูงจะมีอนุภาคที่หลุดออกมามีจำนวนมาก ทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำทั้งนี้เนื่องจากไอออนบวกที่ชนจะเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมา ดังนั้นอะตอมแต่ละตัวจึงได้รับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนบวกน้อยลง



รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปัตเตอร์ริงโดยไอออนของก๊าซ Kr ที่ค่าพลังงานต่างๆ (Hummel and Guenther 1995)

### 3.3.2 อัตราการสปัตเตอร์ริง (Sputtering yield, Y)

อัตราการสปัตเตอร์ริง คืออัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบต่อปริมาณไอออนที่เข้าชน ดังสมการ

$$Y = N_a / N_i \quad (3.9)$$

โดยที่ Y คือ อัตราการสปัตเตอร์ริง

$N_a$  คือ จำนวนอะตอมโดยเฉลี่ยที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบ

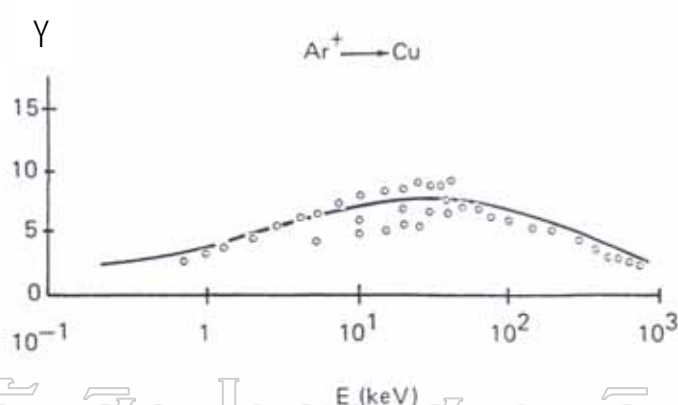
$N_i$  คือ จำนวนไอออนที่เข้าชน

อัตราการสปัตเตอร์ริงนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆ ในกระบวนการสปัตเตอร์ริง ดังนี้

#### 3.3.2.1 ค่าพลังงานของไอออนที่เข้าชน

ในการชนระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคแบบโดยตรง จะมีฟังก์ชันการถ่ายเทพลังงานดังสมการที่ 3.1 โดยไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากพอจนถึงระดับที่เริ่มทำให้เกิดขบวนการชนอย่างต่อเนื่องกับอะตอมสารเคลือบ และเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energies) ซึ่งปกติจะมีค่ามากกว่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิดอะตอมของสารชนิดเดียวกันออกจากผิวสารเคลือบ 1 อะตอม พลังงานขีดเริ่มนี้มีค่าต่างกัน

ขึ้นกับชนิดของไอออนบวกและอะตอมสารเคลือบแต่ละคู่ที่ชนกัน จากรูปที่ 3.7 เมื่อพลังงานของไอออนบวกมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้พลังงานขีดเริ่ม อัตราการสปีดเตอริงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แล้วเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อไอออนบวกมีพลังงานระหว่าง 0.1 ถึง 1 KeV หลังจากนั้นอัตราการสปีดเตอริงจะเพิ่มขึ้นช้าลงจนคงที่ เมื่อไอออนบวกมีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 100 KeV และเมื่อไอออนบวกมีพลังงานสูงมากกว่า 100 KeV อัตราการสปีดเตอริงกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไอออนที่พลังงานสูงมีแนวโน้มที่จะฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบมากขึ้น



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ 3.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการสปีดเตอริงของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออน

จากก๊าซอาร์กอนที่มีพลังงานค่าต่างๆ (Chapman 1980)

### 3.3.2.2 ชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ

นอกจากนี้อัตราการสปีดเตอริงเปลี่ยนแปลงตามชนิดและระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ โดยผิวเป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวจะมีอัตราการสปีดเตอริงมากที่สุด เมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นของอะตอมต่ำไอออนบวกที่เข้าชนจะมีแนวโน้มที่จะวิ่งเข้าฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าต่ำ สำหรับชนิดของสารเคลือบพบว่า ทองแดง สังกะสี ดีบุก มีอัตราการสปีดเตอริงใกล้เคียงกัน แต่มีค่ามากกว่าอะลูมิเนียมหรือไททานเนียมเมื่อใช้ไอออนชนิดเดียวกันและมีพลังงานเท่ากัน

### 3.3.2.3 ชนิดของไอออนบวก

เมื่อใช้ไอออนบวกต่างชนิดกันวิ่งเข้าชนจะมีค่าอัตราการสปีดเตอริงที่แตกต่างกันออกไป จากสมการที่ (3.1) แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคที่เกิดการชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากอะตอมบนผิวเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว

จึงพบว่าอัตราการสปีดเตอริงจะสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ

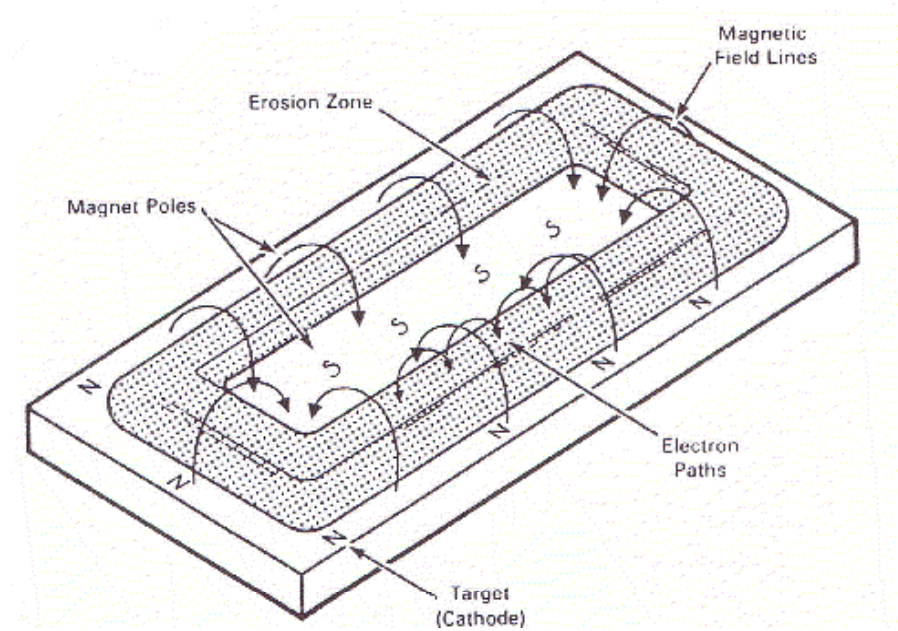
#### 3.3.2.4 มุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ

เมื่อทำการเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าให้มากขึ้นจะมีอัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาจะมีการเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (back scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่า จึงทำให้มีอัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมของการเอียงมากกว่า 45 องศา จากนั้นอัตราการสปีดเตอริงจะลดลงและเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90 องศา

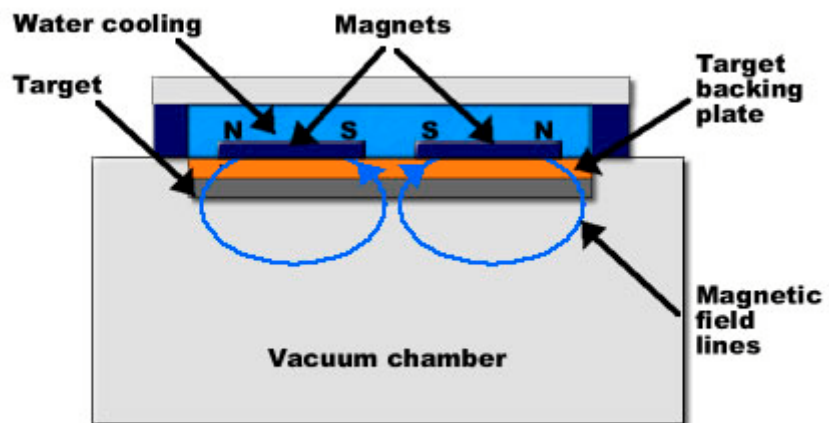
### 3.4 ดีซีแมกเนตรอนสปีดเตอริง (DC Magnetron Sputtering)

ในช่วงต้นของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปีดเตอริงใช้ระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริงซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยจัดตำแหน่งของอานอโดให้อยู่ในบริเวณเนกาทีฟโกลด์ และใช้ช่วงแอนออร์มอลโกลด์คิสซาร์จในการเคลือบฟิล์ม เนื่องจากอัตราการเกิดสปีดเตอริงแปรผันตรงกับอัตราสปีดเตอริงและปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบในระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริงสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและความดันก๊าซ โดยค่าความดันก๊าซที่ต้องใช้ในการทำงานมีค่าที่ค่อนข้างสูง ( $10^{-2}$  -  $10^{-1}$  mbar) ทำให้ค่าระยะปลอดภัยการชนเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่า 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นผลให้อะตอมจากเป้าที่หลุดออกมาเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซในระบบมาก และค่าอิมพีแดนซ์ของพลาสมามีค่าที่สูง ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับระบบจำเป็นต้องมีค่าสูงด้วย (อยู่ในระดับ kV) อัตราการสปีดเตอริงในการเคลือบฟิล์มจึงมีค่าที่ต่ำเมื่อใช้ระบบการสปีดเตอริงแบบนี้

ในการแก้ปัญหานี้จึงมีการใช้สนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้ระบบการคิสซาร์จดีขึ้น โดยสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่แบบไซคลอยด์ในพลาสมาก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปถึงขั้วอานอโด ซึ่งเป็นการทำให้เพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพลาสมา ทำให้โอกาสในการที่อิเล็กตรอนจะไปชนและเกิดการไอออไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และค่าความดันก๊าซที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่าความดันก๊าซที่ใช้ในระบบไดโอดคิสซาร์จโดยมีค่าความดันอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-4}$  mbar



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 รูปที่ 3.8 แสดงเส้นทางเดินของอิเล็กตรอน จากคาโทดเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (Hummel and Guenther 1995)



รูปที่ 3.9 แสดงระบบดัดชีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

### 3.5 การสเปตเตอริงแบบรีแอกทีฟ (Reactive Sputtering)

การสเปตเตอริงแบบรีแอกทีฟ เป็นขบวนการสเปตเตอริงที่มีสารที่ใช้เคลือบอย่างน้อยหนึ่งชนิดใส่เข้าไปในระบบโดยจะอยู่ในรูปของก๊าซ หรือเป็นการเพิ่มก๊าซรีแอกทีฟเข้าไปในระบบอย่างน้อย 1 ชนิด เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่ใช้ในการเคลือบ ทำให้ได้ฟิล์มของสารประกอบที่มีโลหะและชนิดของก๊าซที่ป้อนเข้าไปเป็นส่วนประกอบ อาทิเช่น สารประกอบออกไซด์ของโลหะ, สารประกอบโลหะไนไตรด์ เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้มีความสำคัญมากในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆในปัจจุบัน เช่น ZnO และ ITO ซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในโซลาเซลล์ หรือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , HfO,  $\text{TiO}_2$  ซึ่งใช้ในเป็นเกตไดอิเล็กทริกในทรานซิสเตอร์ประเภท MOSFET หรือใช้เป็นสารไดอิเล็กทริกในหน่วยความจำขนาดเล็ก เช่น DRAM ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ เป็นต้น สำหรับประโยชน์หรือข้อได้เปรียบที่ได้จากสเปตเตอริงแบบรีแอกทีฟ ได้แก่

1. สามารถเคลือบฟิล์มซึ่งเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนโดยการรีแอกทีฟเป่าโลหะ ซึ่งเป็นขบวนการที่สะดวกและง่าย
2. สามารถเคลือบฟิล์มของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มแบบสเปตเตอริงที่มีแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบกระแสตรงได้ แทนที่จะใช้แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบ RF (radio frequency)
3. สามารถควบคุมขบวนการในระหว่างการเคลือบฟิล์มได้สะดวกและง่าย ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติต่างๆตามต้องการได้

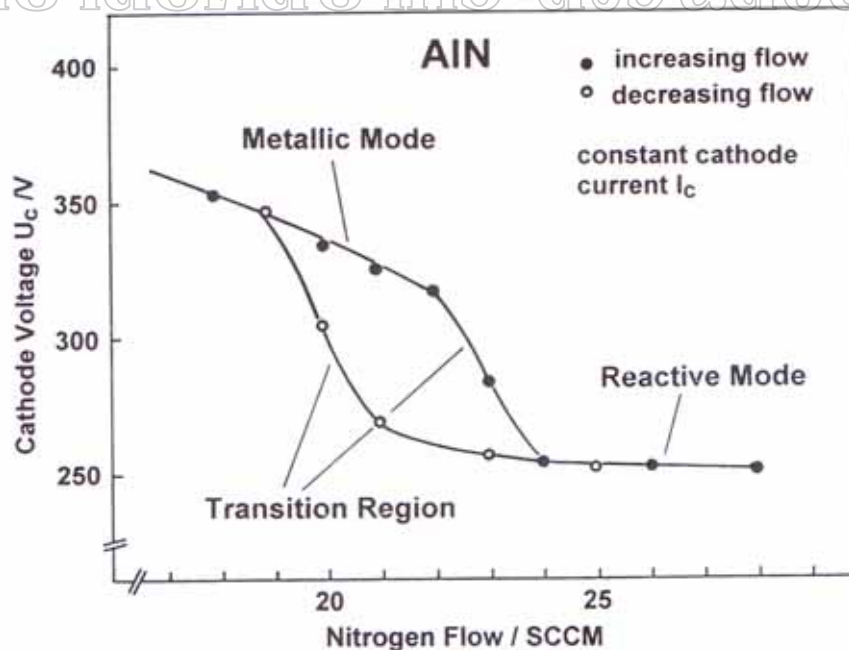
ขบวนการรีแอกทีฟสเปตเตอริงนั้นมีความแตกต่างจากการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีไอระเหยแบบรีแอกทีฟตรงที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของขบวนการรีแอกทีฟสเปตเตอริงนั้น จะเกิดขึ้นที่เป้าของโลหะที่ใช้ในการสเปตเตอริงด้วย นอกเหนือจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่วัสดุรองรับ เป็นผลให้โลหะที่เกิดปฏิกิริยาแล้วนั้น ถูกสเปตเตอริงออกมาด้วย เมื่อการสเปตเตอริงที่มีส่วนผสมของก๊าซรีแอกทีฟเข้ากับสเปตเตอริงก๊าซ ในขั้นตอนของการปฏิบัติงาน สิ่งหนึ่งที่ต้องควรระวังก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ กับอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่ให้กับระบบซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น และขึ้นกับรูปทรงและรูปแบบของระบบที่ใช้ค่อนข้างมาก รวมทั้งขึ้นกับขั้นตอนในระหว่างการปฏิบัติงานด้วย ซึ่งมาจากเหตุผลสองประการ ได้แก่ ประการแรก เมื่อฟิล์มในระหว่างการทำการสเปตเตอริงนั้นมีความอึดตัว หรือฟิล์มโลหะและก๊าซรีแอกทีฟทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ จะทำให้ฟิล์มนั้นประทุตัวคล้ายกับเป็นปัมที่เพิ่มเติมเข้ามาในระบบ (getter pump) ซึ่งจะทำให้ก๊าซรีแอกทีฟในระบบมีจำนวนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าฟิล์มนั้นยังไม่อึดตัวก็จะทำให้ก๊าซรีแอกทีฟในระบบนั้นมีจำนวนลดลง โดยอัตราเร็วในการปัมของเกตเตอร์ปัมนั้นจะขึ้นกับอัตราในการเคลือบ, ส่วนประกอบของฟิล์ม, โครงสร้างฟิล์มและอุณหภูมิของฟิล์มใน



ระหว่างการเคลือบ ประการที่สอง ปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะที่ใช้เป็นเป้าสามารถเปลี่ยนอัตราการสปีดเตอริงของเป้าโลหะนั้นๆ ในระบบดีซีไดโอดนี้โลหะที่ใช้เป็นเป้าจะทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทดด้วย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผิวของโลหะที่ใช้เป็นเป้าจะมีผลต่อพลาสมาดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในระบบ

ค่าความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในระบบของการสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ ในการปฏิบัติงานจะใช้หรือบันทึกค่าความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟก่อนที่ระบบจะมีความทำงาน ซึ่งจะทำให้ก๊าซในภาชนะสุญญากาศที่ใช้เคลือบสารอยู่ในสถานะของพลาสมา และทำให้ความดันมีค่าเปลี่ยนแปลงไป สำหรับค่าความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟอาจใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศแทนได้เพราะค่าทั้งสองจะเป็นสัดส่วนกัน

ในการสปีดเตอริงแบบรีแอกทีฟ มีความจำเป็นที่ต้องให้ความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟมีค่ามากเพื่อเพิ่มอัตราการชนของก๊าซรีแอกทีฟกับฟิล์มของโลหะในขณะก่อตัว ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาที่ผิวของสารที่ใช้เคลือบให้ได้ฟิล์มตามต้องการ แต่ขณะเดียวกันปริมาณของก๊าซรีแอกทีฟที่เพิ่มขึ้นในระบบนี้จะเข้าไปชนและทำปฏิกิริยากับเป้าโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทดด้วยนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นผิวของโลหะที่เป็นเป้าบางส่วนเปลี่ยนเป็นสารประกอบของโลหะ ซึ่งเป็นผลให้ผลลัพท์ของอัตราการสปีดเตอริงมีค่าลดลง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป้านี้ยังสามารถเป็นใช้ข้อกำหนดส่วนประกอบของฟิล์มแบบต่างๆที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ขั้วคาโทดกับความอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ ( $N_2$ ) (Hummel and Guenther 1995)

จากรูปที่ 3.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ที่ขั้วคาโทดเมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ ( $N_2$ ) ที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยควบคุมให้กระแสดิซชาร์จมีค่าคงที่

เมื่ออัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าน้อย ก๊าซรีแอกทีฟจะถูกขจัดออกจากระบบโดยเกตเตอร์ปั๊มหรือฟิล์มของโลหะที่เกิดขึ้นนั่นเอง เป็นผลให้ปริมาณความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟในภาชนะสุญญากาศมีค่าต่ำ ซึ่งการเคลือบฟิล์มในสภาวะที่อัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าต่ำนี้จะเป็นเคลือบฟิล์มในโหมดทำงานแบบโลหะ (metallic mode) และเมื่ออัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะที่วัสดุรองรับและเป่าโลหะกับก๊าซรีแอกทีฟมีความอึดตัว ก็จะทำให้ความดันย่อยของก๊าซรีแอกทีฟในภาชนะสุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ผลที่ตามมาคือจะทำให้บริเวณผิวหน้าของเป่าโลหะเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทนวน ซึ่งจะทำให้ขบวนการสปีดเตอริงในโหมดการทำงานแบบโลหะมีค่าลดลง และจะทำให้การสปีดเตอริงสารประกอบของโลหะลดลงตาม ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป่าโลหะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพของโลหะไปเป็นสารประกอบ ซึ่งส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Target

Poisoning

โดยปกติแล้วการเกิด Target Poisoning จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและก๊าซรีแอกทีฟที่ใช้ และขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในระหว่างเกิดการสปีดเตอริง และการลดลงของอัตราการสปีดเตอริงนี้เนื่องจากพลังงานพันธะของอะตอมในสารประกอบนี้ส่วนใหญ่มีค่าที่สูง และเนื่องจากมวลของไอออนของก๊าซรีแอกทีฟเหล่านี้จะมีค่าน้อยกว่ามวลของก๊าซอาร์กอนที่ใช้เป็นสปีดเตอริงไอออนปกติแล้วผิวของเป่าโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิสูง จะทำให้ความต่างศักย์ดิซชาร์จและไอออนซึ่งเป็นส่วนประกอบของกระแสดิซชาร์จมีค่าลดลง เช่น ในกรณีที่ใช้โลหะ Al, Ti และ Cr เป็นเป่าโลหะ และใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซรีแอกทีฟ

แต่ในกรณีที่ใช้โลหะทอง (Au) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าคงที่เป็นเป่าโลหะ เนื่องจากไม่เกิดสารประกอบของออกไซด์เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ไม่ผลต่อความต่างศักย์ดิซชาร์จและอัตราการเคลือบของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของอัตราการเคลือบในกรณีใช้เป่าโลหะที่สัมประสิทธิ์การให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าสูงจะไม่ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของขั้วคาโทดที่ใช้

การที่ผิวของขั้วคาโทดสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติจากโลหะไปเป็นฉนวนนั้นจะทำให้เกิดอนุภาคพลังงานสูงซึ่งประกอบด้วยอะตอมก๊าซรีแอกทีฟ, อะตอมที่สะท้อนจากผิวเป่า รวมทั้งส่วน

ที่เป็นสารประกอบที่เกิดบริเวณผิวของเป่า ที่เคลื่อนที่ไปตกเคลือบยังวัสดุรองรับ ทำให้เราสามารถเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ก๊าซรีแอคทีฟอื่นๆ เพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยากับโลหะที่ต้องการ ทำให้เราสามารถเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบได้มากมาย

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้ คือ ศึกษาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ การสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อฟิล์มบาง ศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับการดำเนินการวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนของการดำเนินงานเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ศึกษาเครื่องมือและส่วนประกอบต่างๆทั้งหมดที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งเป็น
  - 1.1 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง ของบริษัท ANS technology รุ่น EP280
  - 1.2 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
  - 1.3 เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM)
  - 1.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
  - 1.5 เครื่อง LCR Meter

นอกจากนี้ยังปรับปรุงเครื่องมือทดลอง โดยการเพิ่มช่องทางจ่ายก๊าซเข้าภาชนะสุญญากาศ ติดตั้งเครื่องวัดความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์ม (FTM7) และติดตั้งเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

2. หาค่าช่วงความดันของก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมโดยเตรียมการทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมและหาอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ที่ได้จากเครื่องวัดความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์ม (FTM7) ที่ค่าความดันก๊าซต่างๆ

3. หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสดีซิสชาร์จ ความต่างศักย์ดีซิสชาร์จ กำลังไฟฟ้า อัตราการเคลือบ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

4. สร้างฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยใช้สภาวะที่ได้ศึกษาจากการทดลองในหัวข้อที่ 3 และ 4 ลงบนแก้วที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ

5. วิเคราะห์สมบัติ และ โครงสร้างฟิล์มบางที่ได้ ด้วยวิธี X-ray diffraction

6. วิเคราะห์สมบัติ และ โครงสร้างฟิล์มบางที่ได้ ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope

7. วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มบางที่ได้ ด้วยวิธี Energy dispersive X-ray Spectroscopy โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

8. หาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยสร้างตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง ซึ่งมีอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นฟิล์มชั้นไดอิเล็กตริก

9. วิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างฟิล์มบางที่ได้ เมื่อนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยวิธี X-ray diffraction

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆ และการเตรียมฟิล์มบาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

## 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 4.2.1 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง

เครื่องเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นชุดเครื่องมือเคลือบฟิล์มบางของบริษัท ANS technology รุ่น EP280 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280

ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการสร้างระบบสุญญากาศ และส่วนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนีตรอน เครื่องเคลือบฟิล์มบางนี้ แบ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ 8 ส่วน ได้แก่

#### 4.2.1.1 ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber)

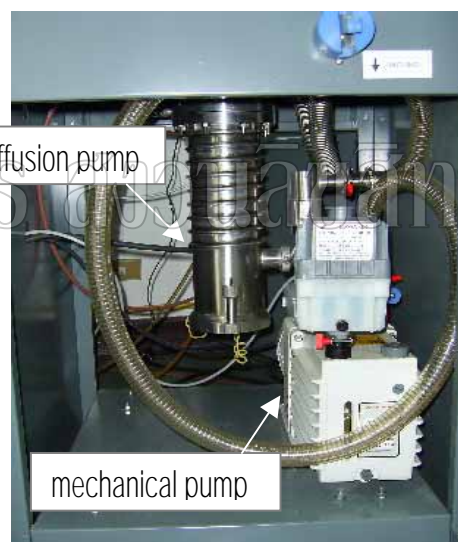
การเคลือบฟิล์มบางจะกระทำอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าโดยมีฝาปิด/เปิดเพื่อใส่ชิ้นงานอยู่ด้านบน มีช่องหน้าต่างกระจกเพื่อใช้สังเกตดูระหว่างกระบวนการสปีดเตอร์ริงเพื่อสามารถควบคุมการทำงานระหว่างกระบวนการสปีดเตอร์ริงได้

#### 4.2.1.2 ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ

ทำหน้าที่สูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบล 2 ชนิด คือเครื่องสูบลสุญญากาศโรตารี (rotary pump) รุ่น E2M 18 ของบริษัท EDWARDS มีหน้าที่ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้นให้กับภาชนะสุญญากาศและจับความดันต่ำของปั๊มแพร่ไอน้ำมัน สามารถสร้างสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันต่ำประมาณ  $10^{-2}$  mbar และเครื่องสูบลแพร่ไอน้ำมันทำหน้าที่สูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศลงได้ อยู่ในระดับ  $10^{-5} - 10^{-6}$  mbar



รูปที่ 4.2 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280



รูปที่ 4.3 ระบบปั๊มสุญญากาศของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP 280

#### 4.2.1.3 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Magnetron Drive , MDX 1K)

มีหน้าที่เป็นแหล่งให้กำลังงานไฟฟ้าแก่ส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด โดยจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 0 - 1000 V (1500 V open circuit voltage) เพื่อทำให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออนและสนามไฟฟ้านี้จะเร่งไอออนที่เกิดขึ้นนำไปสู่การเกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริง Magnetron Drive รุ่น MDX 1K นี้มีโมดการทำงานแบ่งเป็น 3 โมด คือ Power regulate , Current regulate และ

Voltage regulate ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1.0 A มีระบบ Power regulator, Interlock string, Remote interface ระบบป้องกันการอาร์คโดยการตรวจวัดสถานะของโหลด และระบบป้องกันการปิด/เปิดของวงจรไฟฟ้า โดยระบบ High frequency conversion ทำให้ไม่เกิดการสะสมพลังงานเป็นการช่วยลดการคายพลังงานเนื่องจากการคายประจุที่ทำให้เกิดสภาวะการอาร์ค



รูปที่ 4.4 แสดงส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอส่วนควบคุมแหล่งกำเนิดพลังงาน

## มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนลิขสิทธิ์

### 4.2.1.4 อิเล็กโทรดและหัวแมกนีตรอน

หัวแมกนีตรอนเป็นแบบทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 cm ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากทองแดง และส่วนทองแดงนี้จะใช้สำหรับติดตั้งเป้าสารเคลือบ โดยมีตัวยึดทำจากเหล็กกล้ามีลักษณะเป็นวงแหวนยึดด้วยสกรูโดยรอบจำนวน 6 จุด มีซิลด์ซึ่งทำจากเหล็กกล้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.5 cm ครอบอยู่เพื่อป้องกันหัวแมกนีตรอนระบายความร้อนด้วยน้ำโดยมีแผ่นปิดอยู่ด้านหลังของเป้าสารเคลือบ และใช้เป้าสารเคลือบและแท่นจับวัสดุรองรับเป็นอิเล็กโทรด

### 4.2.1.5 เครื่องควบคุมการป้อนก๊าซ (mass flow controller)

ทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราการไหลหรือการจ่ายก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีมอเตอร์ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วน Mass flow controller เป็นส่วนควบคุมการปิด/เปิดและอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้รุ่น 825 ของบริษัท EDWARDS และส่วนควบคุม/แสดงผลการทำงาน DATAMETRICS Controller type 1605 โดยมีหน้าจอเพื่อแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซในขณะนั้นๆด้วย Controller type 1605 นี้จะทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไปยังส่วน Mass flow controller และวาล์ว และ

ขณะเดียวกันจะแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซนี้ที่หน้าจอของเครื่องด้วย สำหรับค่าอัตราการไหลของก๊าซชนิดอื่นๆนอกเหนือจากอากาศ จะสามารถวัดหรืออ่านได้โดยตรงจากหน้าจอ แล้วปรับเทียบค่าได้จากตารางปรับเทียบของก๊าซแต่ละชนิด



รูปที่ 4.6 Mass flow controller รุ่น 825  
บริษัท EDWARDS



รูปที่ 4.7 หน้าจอส่วนควบคุมการปล่อยก๊าซและแสดง  
ค่าอัตราการไหลของก๊าซ

## มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

### 4.2.1.6 เครื่องวัดอัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์ม (FTM7 Film Thickness

Monitor)

สำหรับเครื่อง FTM7 ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดอัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์ม ในขณะที่ทำการเคลือบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัดปริมาณของพื้นผิวที่หลุดออกในขณะที่ทำการกัดกร่อนพื้นผิววัสดุ (etching)



รูปที่ 4.8 แสดงหน้าจอแสดงผลของเครื่อง FTM7



รูปที่ 4.9 แสดงส่วนหัววัดของเครื่อง FTM7



หลักการการทำงานของเครื่อง FTM7 จะใช้หั่ววัด (quartz crystal) จัดอยู่ในตำแหน่งที่มี พลาสติกที่ทำให้เกิดการเคลือบฟิล์ม และต่อหั่ววัดนี้เข้ากับแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ไฟฟ้า (oscillator units) โดยค่าความถี่จะเกิดการเปลี่ยนไปเมื่อเกิดการเคลือบ ดังนั้นเครื่องก็จะเปลี่ยนค่าที่วัดได้นี้ให้เป็นอัตราการเคลือบ และความหนาของฟิล์ม ในการเคลือบฟิล์มชนิดต่างๆ เครื่อง FTM7 จะใช้เทคนิคของ Crystal Microbalance ในการวัดความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบของฟิล์มมาตรฐาน ส่วนความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบของฟิล์มซึ่งเป็นสารชนิดอื่น จะสามารถคำนวณหาจากตารางมาตรฐาน โดยจะต้องรู้ค่าความหนาแน่นและค่าอะคลูสติคิมพีแดนซ์ของสารนั้นๆ

ความหนาจริงของฟิล์มจะได้จากการปรับแก้ค่า โดยการปรับเทียบค่าที่ได้จากเครื่องวัดความหนาจริง ในการทดลองนี้ใช้เครื่องวัด AFM วัดค่าความหนาจริงในการปรับเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง FTM7

#### 4.2.1.7 ระบบหล่อเย็น

ระบบหล่อเย็นนี้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยน้ำสามารถปรับอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำถึง 15 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเครื่องสูบแพร่ไอน้ำมัน หัวแมกนีตรอนและเป่าสารเคลือบ โดยการต่อท่อน้ำจากด้านหลังของถังน้ำหล่อเย็นเข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็นทางด้านล่างของระบบสุญญากาศ และปั๊มแพร่ไอน้ำมัน เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำเย็นระหว่างเครื่องสูบแพร่ไอน้ำมัน หัวแมกนีตรอนและเป่าสารเคลือบกับถังน้ำหล่อเย็น

#### 4.2.1.8 เป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับ

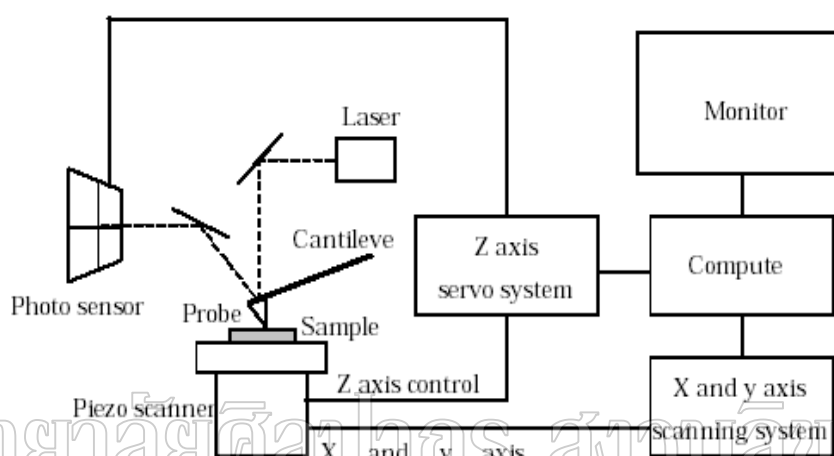
1. เป่าสารเคลือบเป็นอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.99 % มีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 1/4 นิ้ว
2. วัสดุรองรับเป็นวัสดุที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง ใช้แผ่นแก้วสไลด์ใสมีผิวเรียบขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร

#### 4.2.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)

เป็นเครื่องสำหรับวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสาร และทิศทางของระนาบผลึก ในการทดลองได้ใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ของภาควิชา ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

### 4.2.3 เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM)

ใช้ในการศึกษาพื้นผิวและความหนาจริงของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการวิจัย ในการทดลองได้ใช้เครื่อง AFM ของภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยเครื่อง AFM มีองค์ประกอบสำคัญได้แก่ คานซึ่งโค้งงอได้ (flexible cantilever), เข็ม (probe tip), Piezo electric tube scanner, โฟโตดีเทคเตอร์เซนเซอร์, เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน และชุดคอมพิวเตอร์และจอแสดงผล ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.10 รูปแสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM)

สำหรับการทำงาน เข็มที่ใช้ในการสแกนจะติดแน่นกับปลายด้านหนึ่งของคานซึ่งจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนว X และ Y โดย Piezo electric tube scanner โดยเริ่มต้นจะทำการปรับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนคาน และสะท้อนไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ซึ่งประกอบด้วยโฟโตไดโอด 4 ตัว และเมื่อเลื่อนชิ้นงานหรือเข็มมาสัมผัสหรือเข้าใกล้กันจะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมของเข็มกับอะตอมของชิ้นงานซึ่งมีขนาดในระดับนาโนนิวตัน คานจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนว Z ทำให้ตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง และสัญญาณนี้จะส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แล้วเครื่องคอมพิวเตอร์จะประมวลผลสัญญาณที่ได้รับออกมาเป็นภาพ 3 มิติบนจอแสดงผล สำหรับการทำงานของเครื่อง AFM นี้โดยทั่วไปจะแบ่งการทำงานเป็น 2 โหมด ได้แก่

1. Static mode การทำงานในโหมดนี้ เข็มที่ติดกับส่วนคานจะถูกสแกนไปบนพื้นผิวของวัตถุ โดยแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างเข็มกับวัตถุจะทำให้ส่วนของคานเกิดการเบี่ยงเบน และขนาดของการเบี่ยงเบนนี้จะเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำระหว่างเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ การทำงานในโหมดนี้ปลายเข็มอาจจะสัมผัสหรือไม่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุที่ถูกสแกนก็ได้

2. Dynamic mode การทำงานในโหมดนี้ ส่วนของคานจะสั้นที่ความถี่ธรรมชาติ และเมื่อเข็มสแกนไปบนพื้นผิว อันตรกิริยาระหว่างปลายเข็มกับพื้นผิวของวัตถุจะทำให้แอมพลิจูด, เฟส หรือความถี่ของการสั่นของส่วนคานมีการเปลี่ยนแปลง ในระหว่างสแกน ปลายเข็มอาจสัมผัส (tapping) หรือ ไม่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุ (non-contact)

#### 4.2.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เครื่อง SEM จัดเป็นเครื่องมือประเภท Electron microscope แบบหนึ่งซึ่งใช้สำหรับขยายภาพของพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบ โครงสร้าง และลักษณะโดยทั่วไปได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ทำการโฟกัสจนมีขนาด Spot size อยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 nm สแกนบนพื้นผิวที่ต้องการศึกษา เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนนี้ตกกระทบกับพื้นผิวจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอม และเกิดการกระเจิงของอนุภาคต่างๆ เช่น เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ Auger electron จากอะตอมของพื้นผิว การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอนที่เข้าชน และรังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอนภายในอะตอมที่ถูกชน ซึ่งรังสีเอกซ์ที่ได้จากกระบวนการหลังนี้ จะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุที่เป็นส่วนประกอบ ทำให้สามารถทราบส่วนประกอบของธาตุต่างๆของพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์ได้ โดยการใช้เอกซเรย์ดิฟแฟกชันซึ่งปกติจะมีมากับเครื่อง SEM

ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่อง SEM ของ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

#### 4.2.5 เครื่อง LCR Meter

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าของของตัวเก็บประจุในการทดลองได้ใช้เครื่องของห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 4.11 เครื่อง LCR Meter ของบริษัท HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A

### 4.3 การหาค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม

เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ใช้กระบวนการสปัตเตอริงจะทำในระบบสุญญากาศ และผ่านก๊าซที่ใช้สำหรับการสปัตเตอริงเข้าไปในระบบ เช่น ก๊าซอาร์กอน เป็นต้น ซึ่งค่าความดันก๊าซหรือปริมาณความหนาแน่นของก๊าซนี้จะเป็ปัจจัยสำคัญหนึ่งในการกำหนดสถานะโกลวดิสซาร์จของระบบและกระบวนการของการเคลือบฟิล์ม(จากหัวข้อ 3.2.2.1 ) ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วในการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการสปัตเตอริงนี้จะใช้ค่าความดันช่วงหนึ่งซึ่งเหมาะสมในการทำงาน เพราะถ้าความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าค่าในช่วงดังกล่าวจะทำให้ระบบไม่สามารถรักษาสภาพการโกลวดิสซาร์จไว้ได้ เนื่องจากจำนวนอะตอมที่ถูกไอออไนซ์มีจำนวนน้อยเกินไป ขณะเดียวกันถ้าความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่ามากเกินไปจะทำให้อะตอมที่ถูกสปัตเตอริงออกมาจากเป้านั้นมีโอกาสที่จะชนกับอะตอมก๊าซภายในภาชนะมีค่ามาก เป็นผลให้จำนวนอะตอมที่เคลื่อนที่ไปตกยังวัสดุรองรับมีจำนวนลดลง

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซที่สามารถใช้ในการสปัตเตอริงฟิล์มอะลูมิเนียม และนำค่าช่วงความดันก๊าซที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการสปัตเตอริงฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อไป โดยมีขั้นตอนของการทดลองดังนี้

1. เปิดระบบปั๊มสุญญากาศ ของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP280
2. สูบอากาศภายในห้องสุญญากาศ ให้มีความดันต่ำสุด (base pressure) เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar
3. เปิด Needle valve เพื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนจากถังบรรจุก๊าซเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยให้มีความดันก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ  $1.0 \times 10^{-3}$  mbar
4. เปิดแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า โดยตั้งค่ากระแสดิสซาร์จไว้ที่ 0.5 Amp
5. บันทึกค่าอัตราการเคลือบจากเครื่องวัด FTM7, ความต่างศักย์ดิสซาร์จ และค่ากำลังไฟฟ้า
6. เปลี่ยนค่าความดันก๊าซตามตารางบันทึกผล พร้อมบันทึกค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จากเครื่องวัด FTM7, ความต่างศักย์ดิสซาร์จ และค่ากำลังไฟฟ้า ทำการทดลองจนครบทุกค่าความดันก๊าซ
7. เปลี่ยนค่ากระแสดิสซาร์จเป็น 0.75 Amp
8. ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนในข้อ 5 ถึง 7 จนครบทุกค่ากระแสที่ตั้งไว้ (0.5 , 0.75 และ 1.0 Amp ตามลำดับ )
9. นำค่า ความต่างศักย์ดิสซาร์จ, ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับค่าความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศ โดยใช้แกน Y

แทนค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จ, ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ และแกน X แทนค่าความดันก๊าซ

#### 4.4 การหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟ

ในกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อเคลือบฟิล์มแบบใช้ก๊าซรีแอคทีฟนั้น พบว่าค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในระบบหรืออัตราการไหลของรีแอคทีฟนั้นจะมีผลโดยตรงต่อค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (จากหัวข้อ 3.5) ซึ่งได้แก่ ความต่างศักย์ดิสชาร์จ, กำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าวกับค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน โดยเตรียมการทดลองโดยมีขั้นตอนของการทดลองดังนี้

1. เปิดระบบปั๊มสุญญากาศ ของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP280
2. สูบอากาศภายในห้องสุญญากาศ ให้มีความดันต่ำสุด (base pressure) เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar
3. เปิด Needle valve เพื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนจากถังบรรจุก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยปรับวาล์วจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar
4. เปิดแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า โดยตั้งค่ากระแสดิสชาร์จไว้ที่ 0.5 Amp
5. บันทึกค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จ, กำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบจากเครื่องวัด FTM7
6. เปิดวาล์วจากเครื่อง Mass Flow Controller เพื่อปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ และปรับค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเริ่มต้นเท่ากับ 0.14 sccm (ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนตามตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.4 ภาคผนวกที่ 6)
7. บันทึกค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จ, กำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบจากเครื่องวัด FTM7
8. ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนในข้อ 6 ถึง 7 จนครบทุกค่าอัตราการไหลของออกซิเจนที่ต้องการ
9. เปลี่ยนค่ากระแสดิสชาร์จให้มีค่าเท่ากับ 0.75 Amp และ 1.0 Amp ตามลำดับ
10. ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนในข้อ 6 ถึง 7 จนครบทุกค่ากระแสดิสชาร์จที่ต้องการ
11. นำค่า ความต่างศักย์ดิสชาร์จ, ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์

ของแต่ละค่ากระแสคิซซาร์จมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน โดยใช้แกน Y แทนค่าความต่างศักย์, ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ และแกน X แทนค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

หมายเหตุ การทดลองในหัวข้อ 4.3, 4.4 นี้ อัตราการเคลือบฟิล์มจะใช้อัตราการเคลือบสัมพัทธ์ที่วัดค่าได้จากเครื่อง FTM7

#### 4.5 การสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

หลังจากที่ทราบค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม และความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสคิซซาร์จ ความต่างศักย์คิซซาร์จ กำลังไฟฟ้า อัตราการเคลือบ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟ ในขั้นตอนการทดลองที่ 4.3 และ 4.4 แล้วจากนั้นจะเริ่มขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับและเป่าสารเคลือบ และขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

### มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวนลิขสิทธิ์

#### 4.5.1 การทำความสะอาดวัสดุรองรับ และเป่าสารเคลือบ

ปกติแล้ววัสดุรองรับและเป่าสารเคลือบจะมีฝุ่นละออง คราบไขมัน หรือสิ่งสกปรกอื่น ๆ ติดอยู่ เพื่อให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีคุณภาพดี ดังนั้นเริ่มต้นจึงต้องทำความสะอาดวัสดุรองรับ และเป่าสารเคลือบ ก่อนขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังนี้

##### 4.5.1.1 การเตรียมอุปกรณ์

1. แผ่นแก้วสไลด์ขนาด 2.5 X 2.5 cm และเป่าสารเคลือบ (เป่าอะลูมิเนียม)
2. เครื่อง Ultrasonics Cleaner
3. บีกเกอร์ ขนาด 250 ml
4. น้ำกลั่น
5. น้ำสบู่
6. น้ำ DI
7. อะซีโตน
8. เมทานอลความเข้มข้น 95 %
9. ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจนและพร้อมหัวเป่า
10. ภาชนะเก็บแผ่นแก้วสไลด์ที่ทำความสะอาดแล้ว

#### 4.5.1.2 ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. นำแผ่นแก้วสไลด์ หรือเป่าสารเคลือบวางลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นผสมกับสบู่จนท่วม นำบีกเกอร์วางลงในภาชนะของเครื่อง Ultrasonics Cleaner แล้วเปิดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมันและฝุ่นละออง

2. ทำความสะอาดโดยใช้น้ำ DI โดยนำแผ่นแก้วสไลด์ หรือเป่าสารเคลือบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ใส่ลงในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำ DI จากนั้นนำบีกเกอร์วางลงในภาชนะของเครื่อง Ultrasonics Cleaner แล้วเปิดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที

3. ทำความสะอาดโดยใช้อะซิโตน โดยนำแผ่นแก้วสไลด์ หรือเป่าสารเคลือบที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ใส่ลงในบีกเกอร์ที่ใส่อะซิโตน จากนั้นนำบีกเกอร์วางลงในภาชนะของเครื่อง Ultrasonics Cleaner แล้วเปิดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที

4. ทำความสะอาดโดยใช้เมทานอล โดยนำแผ่นแก้วสไลด์ หรือเป่าสารเคลือบที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ใส่ลงในบีกเกอร์ที่ใส่มะทานอล จากนั้นนำบีกเกอร์วางลงในภาชนะของเครื่อง Ultrasonics Cleaner แล้วเปิดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที

5. ทำความสะอาดโดยใช้น้ำ DI โดยนำแผ่นแก้วสไลด์ หรือเป่าสารเคลือบที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ใส่ลงในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำ DI จากนั้นนำบีกเกอร์วางลงในภาชนะของเครื่อง Ultrasonics Cleaner แล้วเปิดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที

6. นำแผ่นแก้วสไลด์มาทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเป่าด้วยไดร้อีกครั้งหนึ่ง นำไปเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาดและมีฝาปิดอย่างดี เพื่อเตรียมนำไปทำการเคลือบฟิล์มต่อไป

#### 4.5.2 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

##### 4.5.2.1 การเตรียมอุปกรณ์

1. เครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP280 แบบ ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง
2. ก๊าซอาร์กอน 1 ถัง (ความบริสุทธิ์ 99.99%)
3. ก๊าซออกซิเจน 1 ถัง (ความบริสุทธิ์ 99.99%)
4. เป่าอะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว (ความบริสุทธิ์ 99.999%)
5. แผ่นแก้วสไลด์

#### 4.5.2.2 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง

1. นำวัสดุรองรับที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 4.5.1 มาวางไว้ที่แท่นวางวัสดุรองรับ ภายในภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบฟิล์ม หลังจากนั้นปิดฝาของภาชนะสุญญากาศ

2. เปิดเครื่องระบบหล่อเย็น รอจนอุณหภูมิของน้ำในระบบมีค่าประมาณ 19 องศาเซลเซียส

3. เปิดระบบปั๊มสุญญากาศ ของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง รุ่น EP280

4. สูบอากาศภายในห้องสุญญากาศ ให้มีความดันต่ำสุด (ประมาณ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar)

5. เปิด Needle valve เพื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนจากถังบรรจุก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยปรับวาล์วจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าตามที่ต้องการหรือที่ทำการทดลองไว้ในหัวข้อ 4.3

6. เปิดวาล์วจากเครื่อง Mass Flow Controller เพื่อปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ และปรับค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนมีค่าตามที่ต้องการหรือที่ทำการทดลองไว้ในหัวข้อ 4.4

7. เปิดแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงและการเคลือบฟิล์มที่ต้องการ โดยตั้งค่ากระแสดีสชาร์จให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

8. ระหว่างการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความต่างศักย์ดีสชาร์จกำลังไฟฟ้า อัตราการเคลือบฟิล์ม

นำฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้มาวิเคราะห์ ส่วนประกอบ โครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ต่อไป



## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 5.1 ค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 เรื่องการหาค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสมที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม เนื่องจากค่าความดันก๊าซหรือปริมาณความหนาแน่นของโมเลกุลก๊าซภายในระบบที่ใช้ในการสปัตเตอร์ริงมีผลต่อกระบวนการ โกลวดิซาร์จและต่อการเคลือบฟิล์ม

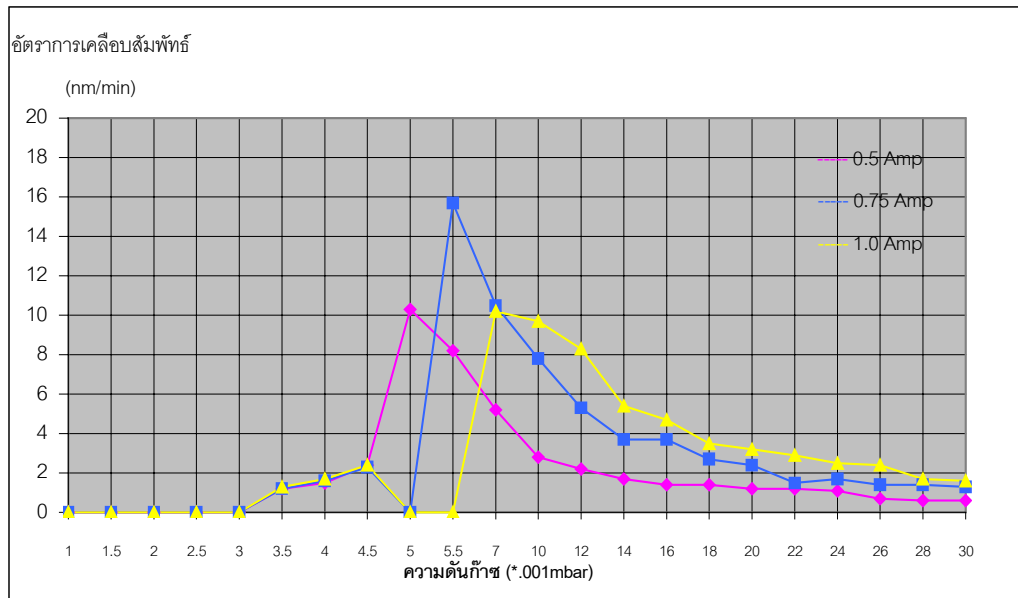
ในการทดลองได้สร้างภาวะสุญญากาศให้ภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุด (base pressure) เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar และทำการทดลองที่ค่ากระแสดิซาร์จต่างๆ คือ 0.5 A , 0.75 A และ 1.0 A ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า

1. ที่ค่ากระแสดิซาร์จเท่ากับ 0.5 A จะพบว่าเริ่มมีการเคลือบฟิล์มเกิดขึ้นเมื่อปรับค่าความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันเริ่มต้นเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-3}$  mbar โดยมีค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 1.2 nm/min และเมื่อเพิ่มความดันก๊าซให้มีความเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ของฟิล์มจะมีความเพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดที่ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar โดยมีอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 10.3 nm/min และระบบจะเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา หลังจากนั้นค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อความดันก๊าซมีค่ามากขึ้น สำหรับค่าความต่างศักย์ก่อนเกิดการ โกลวดิซาร์จจะมีค่าเท่ากับ 1602 V และค่ากำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 4 W เมื่อระบบเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา ค่าความต่างศักย์ดิซาร์จจะมีค่าเท่ากับ 280 โวลต์ และเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ดิซาร์จจะมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 232 โวลต์ เมื่อความดันก๊าซมีค่าเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-2}$  mbar สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อระบบอยู่ในสถานะพลาสมาจะมีค่าเท่ากับ 108 W และเมื่อความดันก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ (ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปกราฟที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 และภาคผนวกที่ 5 )

2. ที่ค่ากระแสดิซาร์จเท่ากับ 0.75 A จะพบว่าเริ่มมีการเคลือบฟิล์มเกิดขึ้นเมื่อปรับค่าความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันเริ่มต้นเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-5}$  mbar โดยมีค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 1.2 nm/min และเมื่อเพิ่มความดันก๊าซให้มีความเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ของฟิล์มจะมีความเพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดที่ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศเท่ากับ  $5.5 \times 10^{-5}$  mbar โดยมีอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 15.7 nm/min และระบบจะเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา หลังจากนั้นค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อความดันก๊าซมีค่ามากขึ้น สำหรับค่าความต่างศักย์ก่อนเกิดการ โกลวดิซาร์จจะมีค่าเท่ากับ 1626 V และค่ากำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 4 W และเมื่อระบบเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา ค่าความต่างศักย์ดิซาร์จจะมีค่าเท่ากับ 263 V

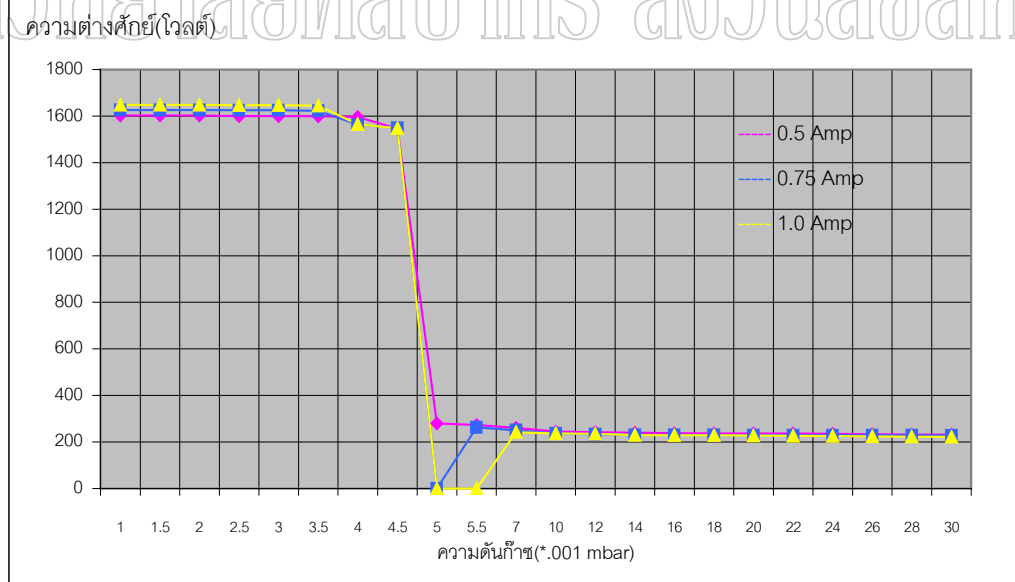
และเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จจะมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 227 V เมื่อความดันก๊าซมีค่าเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-2}$  mbar สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมาจะมีค่าเท่ากับ 163 W และเมื่อความดันก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ (ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปกราฟที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 และภาคผนวกที่ 5)

3. ที่ค่ากระแสดิสชาร์จเท่ากับ 1.0 A พบว่าเริ่มมีการเคลือบฟิล์มเกิดขึ้นเมื่อปรับค่าความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันเริ่มต้นเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-2}$  mbar โดยมีค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 1.3 nm/min เมื่อเพิ่มความดันก๊าซให้มีความเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ของฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดที่ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศเท่ากับ  $7.0 \times 10^{-3}$  mbar โดยมีอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เท่ากับ 10.2 nm/min และระบบจะเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา หลังจากนั้นค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อความดันก๊าซมีค่ามากขึ้น สำหรับค่าความต่างศักย์ก่อนเกิดการโกลดดิสชาร์จจะมีค่าเท่ากับ 1648 V และค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเกือบเท่ากับ 4 W เมื่อระบบเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมา ค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จจะมีค่าเท่ากับ 242 V และเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ดิสชาร์จจะมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 222 V เมื่อความดันก๊าซมีค่าเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-2}$  mbar สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อระบบเริ่มอยู่ในสถานะพลาสมาจะมีค่าเท่ากับ 220 W และเมื่อความดันก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ (ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปกราฟที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 และภาคผนวกที่ 5)

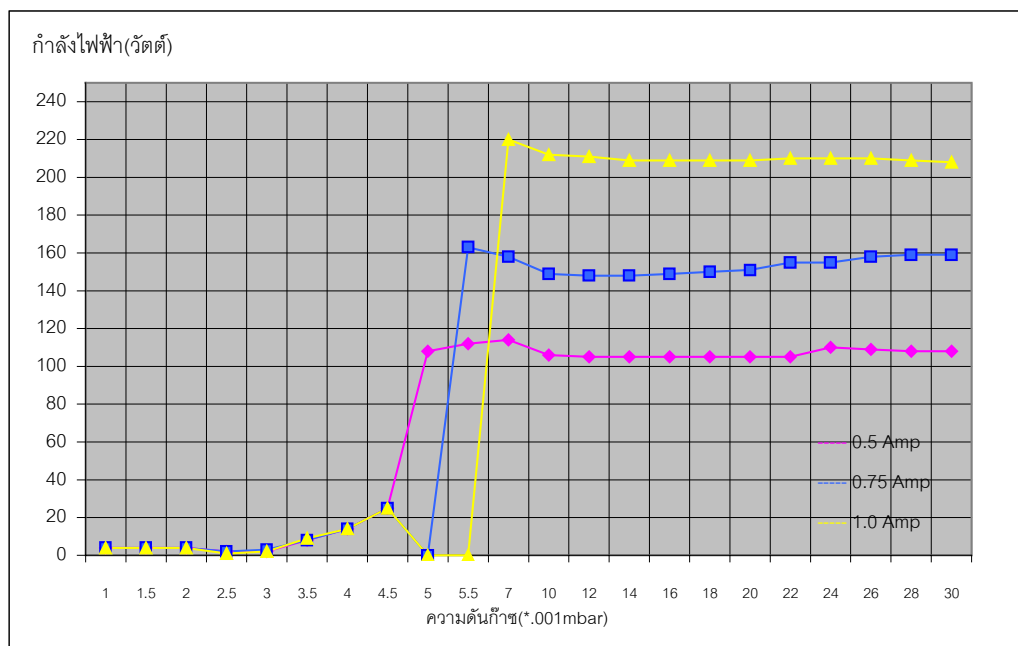


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับความดันก๊าซ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิซชาร์จกับความดันก๊าซ



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความดันก๊าซ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์  
ในงานวิจัยนี้ นำค่าช่วงความดันก๊าซที่ได้จากการทดลอง ไปใช้ในการสเปคเตอรึงฟิล์ม  
อะลูมิเนียมออกไซด์ต่อไป

## 5.2 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในกระบวนการโกล์วดีสซาร์จ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

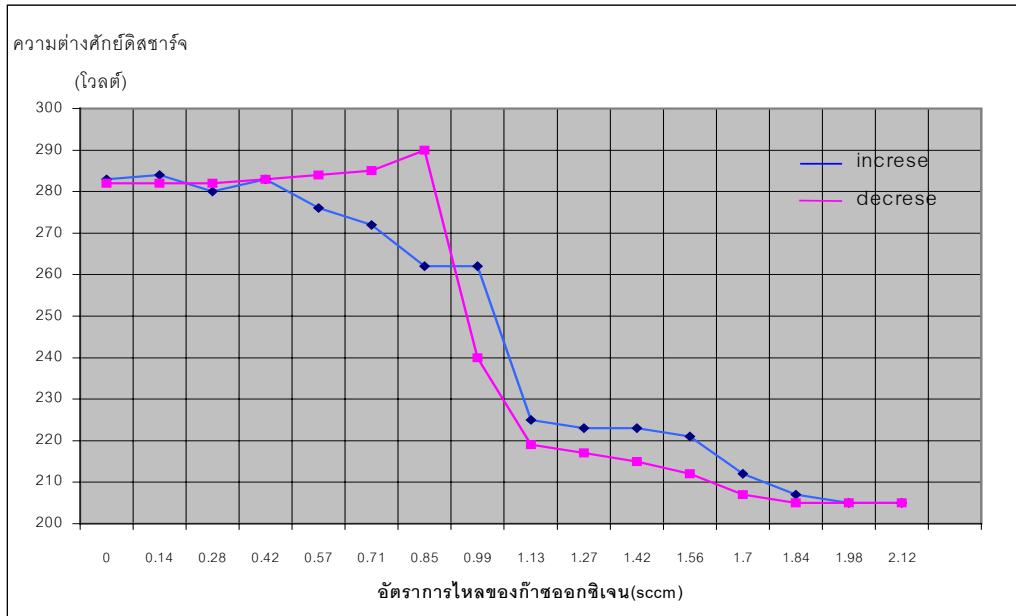
ในกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อเคลือบฟิล์มแบบใช้ก๊าซรีแอกทีฟนั้น พบว่าค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในระบบหรืออัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศนั้นจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆของก๊าซดีสซาร์จ ได้แก่ ความต่างศักย์ดีสซาร์จ กำลังไฟฟ้า และค่าอัตราการสปัตเตอริงหรืออัตราการเคลือบฟิล์ม ดังนี้

### 5.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดีสซาร์จกับอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

จากการทดลองที่ 4.4 ในการทดลองได้สร้างภาวะสุญญากาศ ให้ภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุด (base pressure) เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar และป้อนก๊าซอาร์กอนสำหรับการสปัตเตอริงจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศเท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar (ใช้ค่าจากการทดลองที่ 4.3) โดยการทดลองจะทำการทดลองที่ค่ากระแสดีสซาร์จคงที่ต่างๆ คือ 0.5 A, 0.75 A และ 1.0 A ตามลำดับ

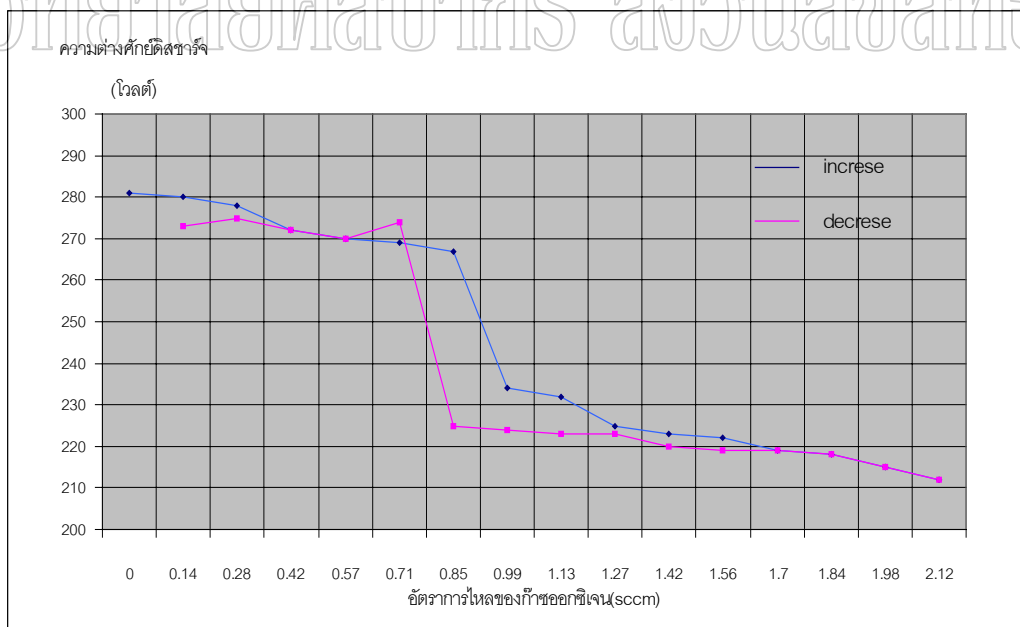
พบว่าเมื่อลักษณะความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ดีสซาร์จที่ค่ากระแสดีสซาร์จคงที่ค่าต่างๆ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีลักษณะที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 โดยเมื่อค่อยๆเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ ค่าความต่างศักย์ดีสซาร์จจะมีค่าลดลงตามอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่ม และเมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 1.13 sccm (กระแสคงที่ 0.5 A) ค่าความต่างศักย์ดีสซาร์จจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 262 V เป็น 225 V ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสปัตเตอริงแบบรีแอกทีฟ และเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟอีกจะทำให้ค่าความต่างศักย์ดีสซาร์จมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.4

และเมื่อลดค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศลง ค่าความต่างศักย์ดีสซาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างทันทีทันใดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่าเท่ากับ 0.85 sccm โดยมีค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจาก 240 V เป็น 290 V

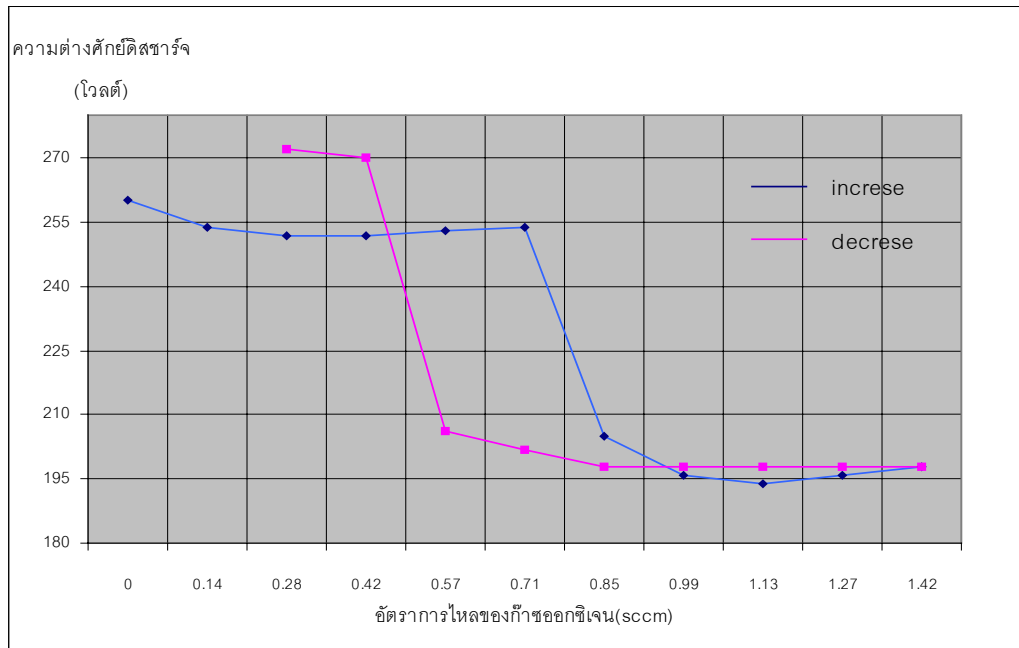


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวนวัฒนวิทยา



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

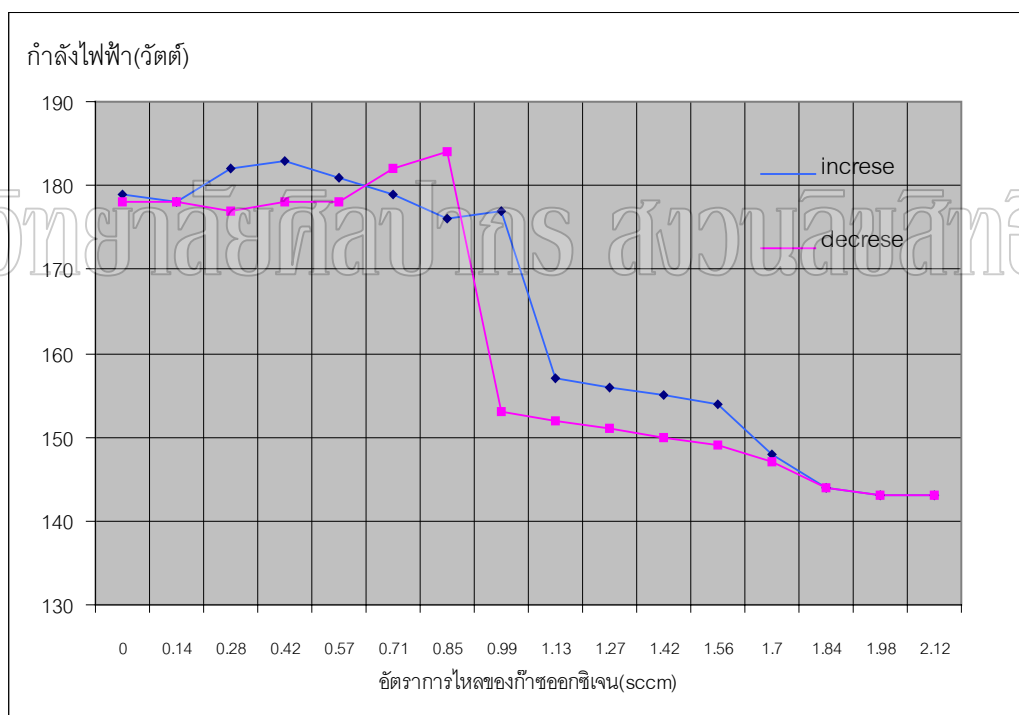
กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

### 5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

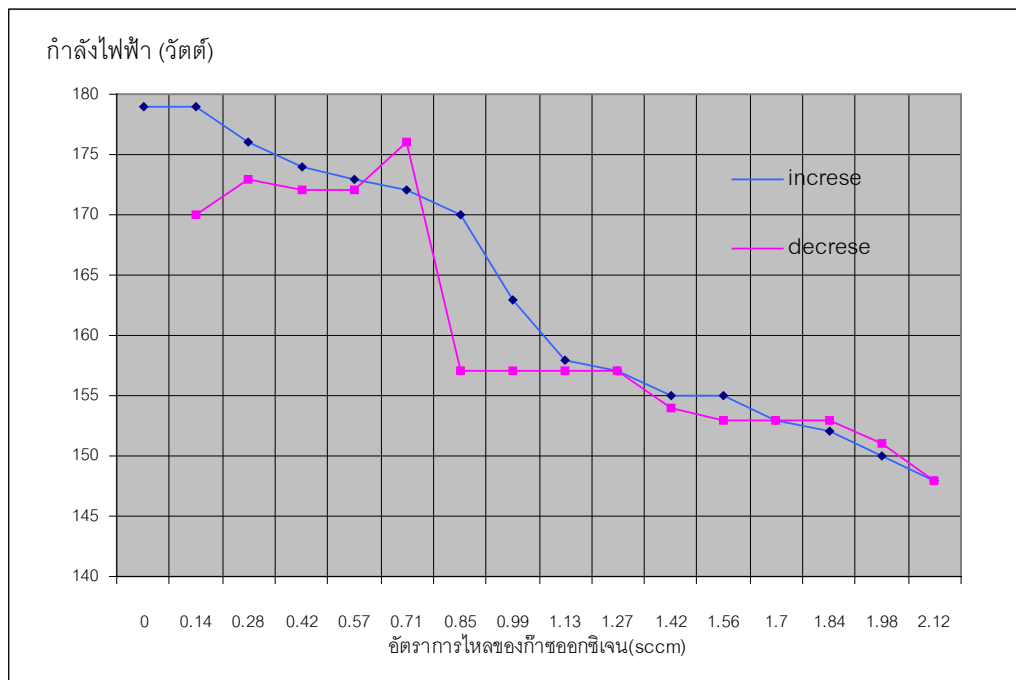
พบว่าเมื่อลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ค่ากระแสสวิตซ์จคงที่ค่าต่างๆ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีลักษณะที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 5.7 , 5.8 และ 5.9 โดยเมื่อค่อยๆเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากดังแสดงในรูป และเมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 1.13 sccm (กระแสคงที่ 0.5 A) ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 177 W เป็น 157 W และเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟอีกจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.7

และเมื่อลดค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศลง ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างทันทีทันใดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่าเท่ากับ 0.85 sccm โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 153 W เป็น 184 W



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน กระแสสวิตซ์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์

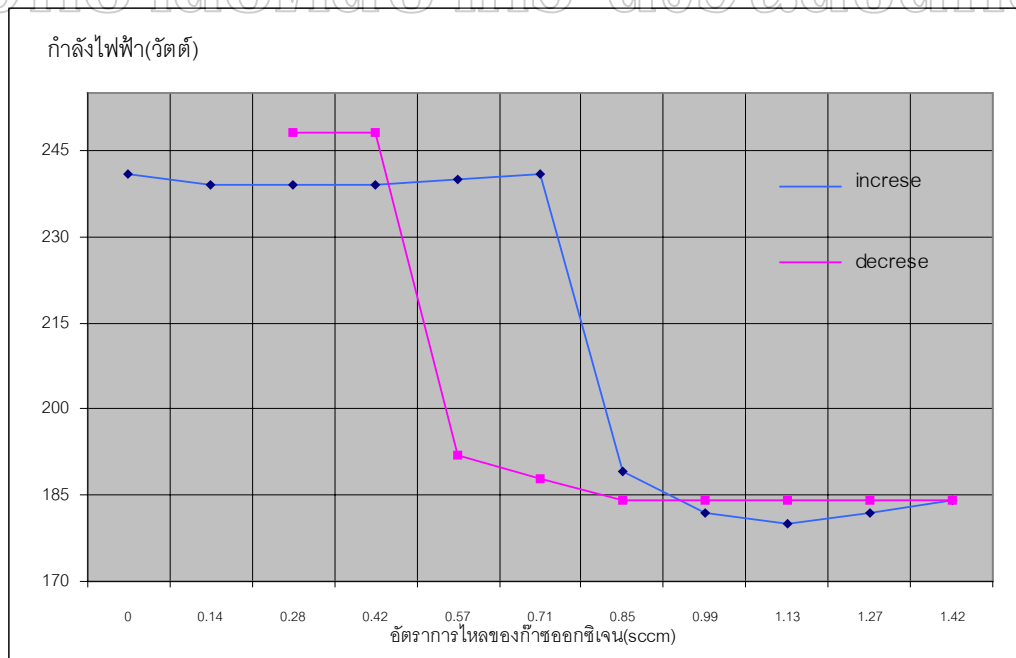




รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

กระแสดีซิสอาร์คคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



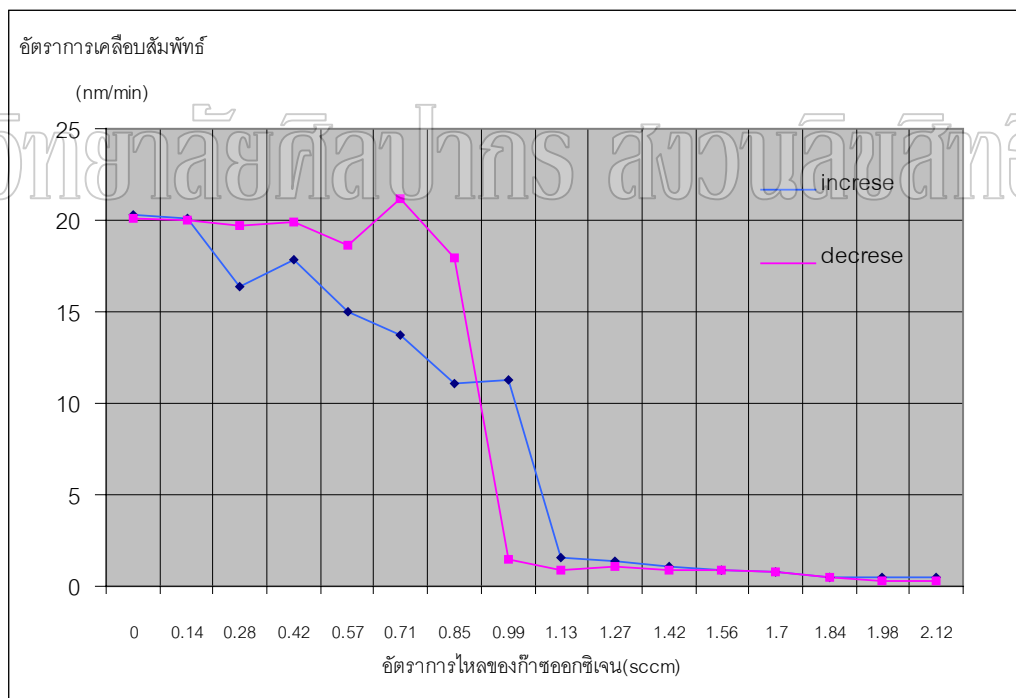
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

กระแสดีซิสอาร์คคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์

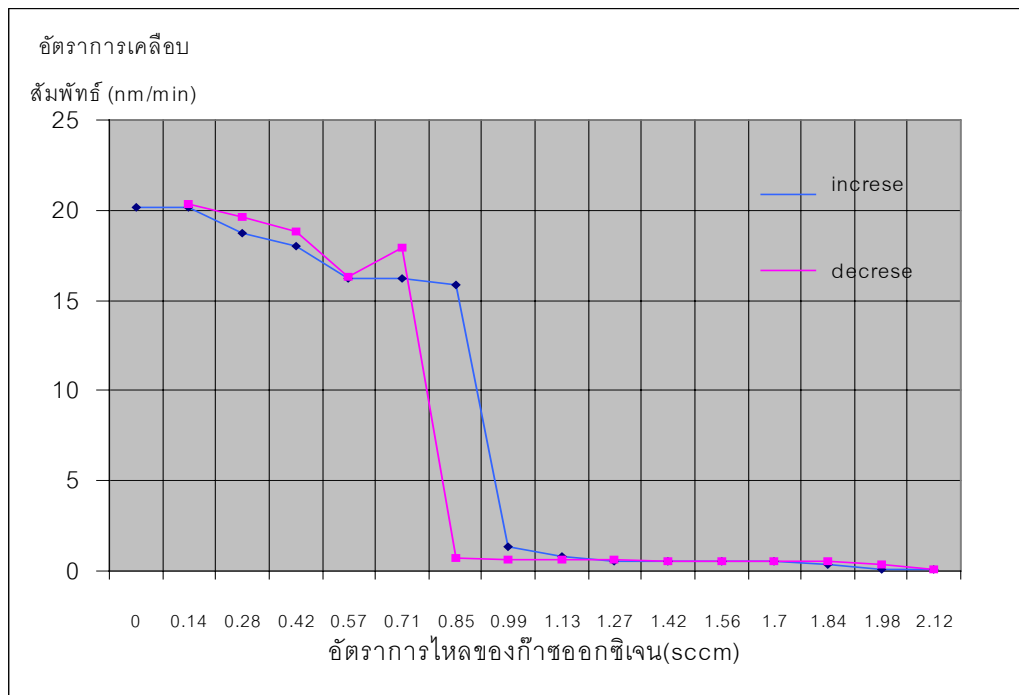
### 5.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเคลือบฟิล์มสัมพัทธ์ที่ค่ากระแสดีซาร์จคงที่ค่าต่างๆ กับอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีลักษณะที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 5.10 , 5.11 และ 5.12 โดยเมื่อค่อยๆเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงตามอัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่ม และเมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 1.13 sccm (กระแสดีซาร์จที่ 0.5 A) ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงอย่างมากจาก 11.3 nm/min เป็น 1.6 nm/min และเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟอีกจะทำให้ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.10

และเมื่อลดค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศลง ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างทันทีทันใดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่าเท่ากับ 0.85 sccm โดยมีค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจาก 1.5 nm/min เป็น 17.9 nm/min



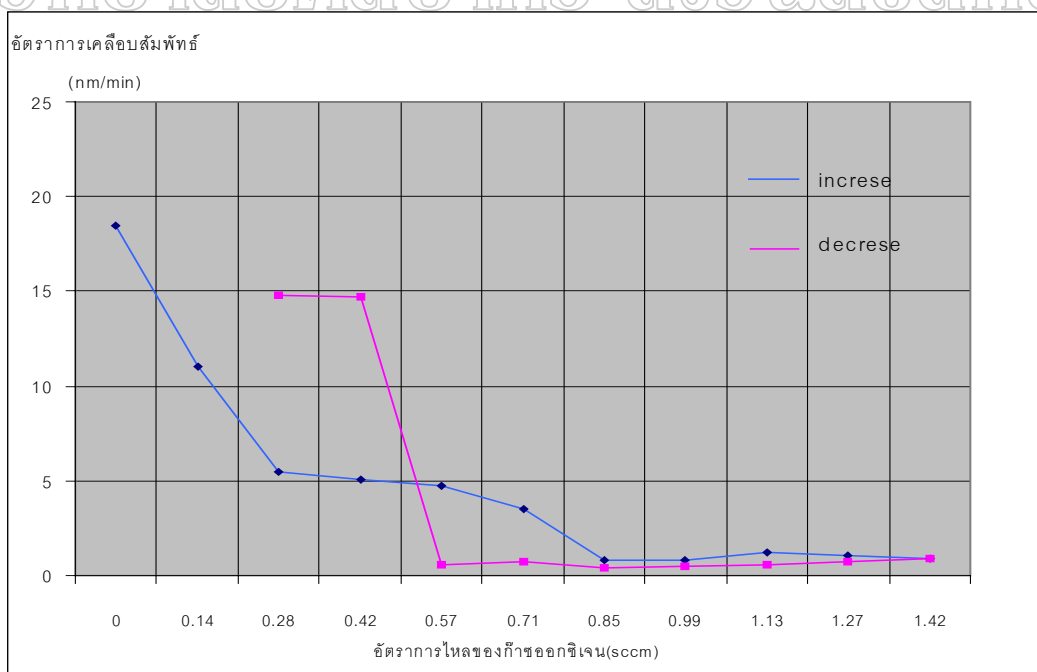
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน กระแสดีซาร์จคงที่ เท่ากับ 0.5 แอมแปร์



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 แอมแปร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบสัมพัทธ์กับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

กระแสดิสชาร์จคงที่ เท่ากับ 1.0 แอมแปร์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์คิซซาร์จ ค่ากำลังไฟฟ้า อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ค่ากระแสคงที่ต่างๆ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ พบว่าสภาวะการเคลื่อนที่หรือการสปัตเตอริงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีการสปัตเตอริงส่วนใหญ่เป็นการสปัตเตอริงโลหะอะลูมิเนียม โดยฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็นเงามัน นำไฟฟ้าได้ดี และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าสูง หรือที่เรียกว่า การสปัตเตอริงในโหมดเมททัล สำหรับการสปัตเตอริงในช่วงที่สองจะเป็นการสปัตเตอริงในโหมด เมททัลออกไซด์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ใส และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการเคลื่อนที่ในโหมดแรก

### 5.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

หลังจากที่ทราบค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม และความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสคิซซาร์จ ความต่างศักย์คิซซาร์จ กำลังไฟฟ้า อัตราการเคลื่อนที่ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ ในขั้นตอนการทดลองที่ 4.3 และ 4.4 แล้วจากนั้นจะเริ่มขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ 4.5.2 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุรองรับและเป่าสารเคลือบ และขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ในการศึกษาฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากการทดลองนั้น ได้แบ่งเป็นหัวข้อที่ต้องการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาสมบัติ และ โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้เมื่อใช้ปริมาณก๊าซรีแอกทีฟแตกต่างกัน
2. ศึกษาสมบัติทั่วไป และ โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์
3. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์
4. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติ และ โครงสร้างของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

### 5.3.1 การศึกษาสมบัติ และโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้เมื่อใช้ปริมาณก๊าซรีแอคทีฟแตกต่างกัน

จากการศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของกระบวนการ โกลด์ดิสซาร์จกับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟในหัวข้อ 5.2 นั้นพบว่าสภาวะการเคลือบหรือการสปีดเตอริงแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ การสปีดเตอริงในโหมดเมททัด และการสปีดเตอริงในโหมดเมททัดลอกไซด์ ซึ่งการสปีดเตอริงในโหมดแรกนั้นจะให้ค่าอัตราการเคลือบสูงกว่าในโหมดหลังค่อนข้างมาก โดยมีค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟที่ต่ำกว่าหรือมีปริมาณก๊าซออกซิเจนในระบบน้อยกว่าในโหมดหลังและนอกจากนี้การสปีดเตอริงยังสามารถทำที่ใกล้ๆจุดเปลี่ยนสภาวะการสปีดเตอริง ซึ่งจะให้อัตราการเคลือบฟิล์มที่สูงกว่าการสปีดเตอริงในโหมดเมททัดลอกไซด์

ในหัวข้อนี้ จะทำการสร้างฟิล์มบางออกไซด์ของอะลูมิเนียม 2 วิธี คือสปีดเตอริงในโหมดเมททัดลอกไซด์ และสปีดเตอริงที่ทำที่ใกล้ๆจุดเปลี่ยนสภาวะการสปีดเตอริงซึ่งใช้ปริมาณหรืออัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟน้อยกว่า โดยเตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 4.5.2 ดังนี้

1. กระจกสไลด์ ขนาด  $2.5 \times 2.5$  cm จำนวน 2 ชิ้น
2. ควบคุมค่ากระแสดิสซาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 A
3. ค่าความดันก๊าซภายในภาชนะต่ำสุด เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-3}$  mbar
4. ความดันก๊าซภายในภาชนะสูญญากาศขณะมีก๊าซอาร์กอน เท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar
5. เวลาที่ใช้เคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

ในการเตรียมฟิล์มบางในหัวข้อนี้ สำหรับชิ้นงานที่ 1 ใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.78 sccm ความต่างศักย์ดิสซาร์จจะมีค่าระหว่าง 260 V ถึง 273 V โดยค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าระหว่าง 185 W ถึง 194 W ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.1 nm/min และฟิล์มบางมีความหนาเมื่อวัดจากเครื่อง FTM7 เท่ากับ 491.5 nm

สำหรับชิ้นงานที่ 2 ใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.92 sccm ความต่างศักย์ดิสซาร์จจะมีค่าระหว่าง 225 V ถึง 244 V โดย ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าระหว่าง 158 W ถึง 172 W ค่าอัตราการเคลือบสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.4 nm/min และฟิล์มบางมีความหนาเมื่อวัดจากเครื่อง FTM7 เท่ากับ 41.2 nm

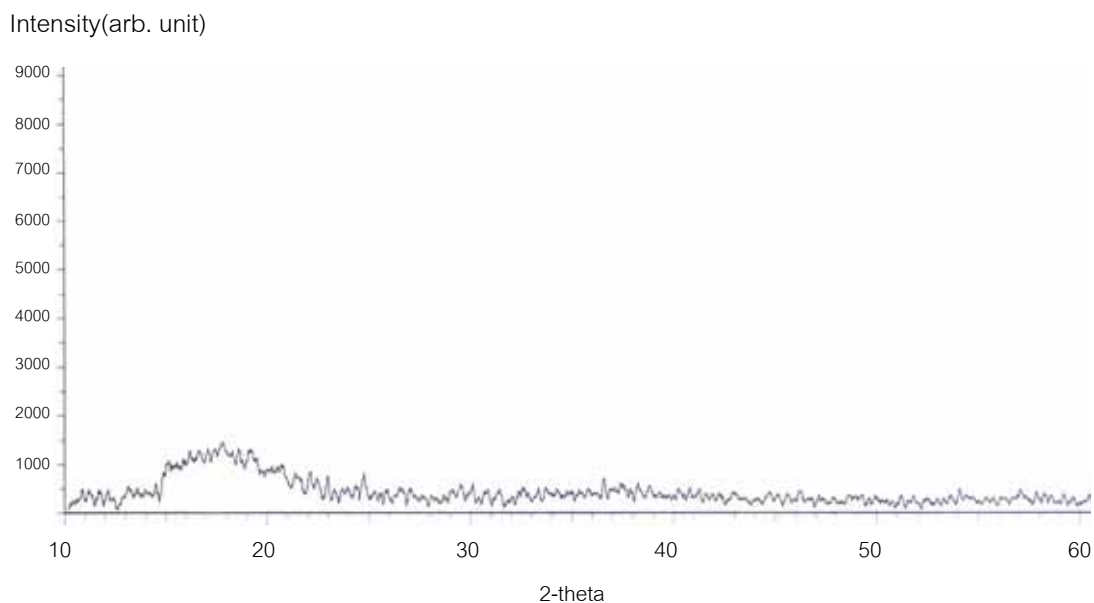
คุณสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมได้ สำหรับชิ้นงานที่ 1 มีลักษณะค่อนข้างทึบแสง ไม่นำไฟฟ้า เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ จะมีฟิค 1 ฟิค โดยลักษณะฟิคที่ได้มีลักษณะกว้างเริ่มที่มุมประมาณ  $14.8^\circ$  และสิ้นสุดฟิคที่มุมประมาณ  $25^\circ$  และตรงกลาง

ของพีคจะอยู่ในตำแหน่งที่มุมเท่ากับ  $17.9^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะของฟิล์มที่มีความเป็นอะมอร์ฟัส และบางส่วนมีความเป็นผลึก

สำหรับชิ้นงานที่ 2 มีลักษณะเป็นฟิล์มโปร่งแสง ไม่นำไฟฟ้า เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จะมีพีค 1 พีค โดยลักษณะพีคที่ได้มีลักษณะกว้างเริ่มที่มุม  $15^\circ$  และตรงกลางของพีคจะอยู่ในตำแหน่งที่มุมเท่ากับ  $18.3^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.14 สำหรับฟิล์มที่ 2 นี้จะเห็นว่ามีความเข้มของรังสีที่กระเจิงมีค่ามากกว่า ซึ่งแสดงว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มแรกแม้ว่าฟิล์มที่ได้มีความหนาน้อยกว่าฟิล์มแรก

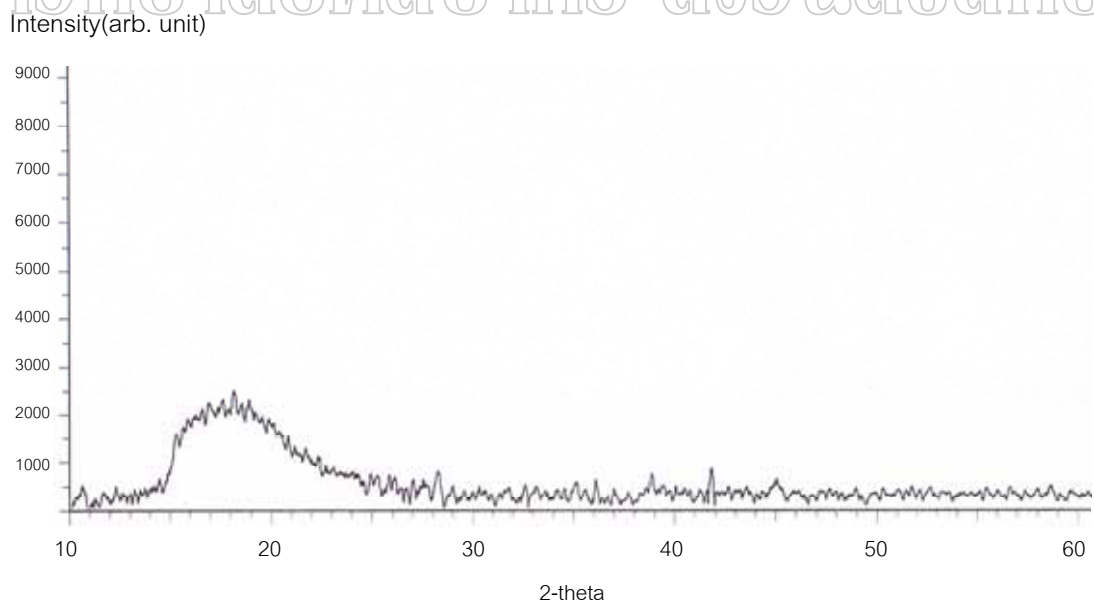
จากการศึกษาสมบัติ และโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้เมื่อใช้ปริมาณก๊าซรีแอคทีฟแตกต่างกัน พบว่าเมื่อการสปัตเตอริงในโหมดเมทัลลอกไซด์จะให้ฟิล์มที่มีความเป็นผลึก และมีโครงสร้างทางเคมีที่สมบูรณ์กว่าแบบแรก ซึ่งในงานวิจัยต่อไปนี้จะเลือกทำการสปัตเตอริงในโหมดเมทัลลอกไซด์ทั้งหมดในการศึกษาสมบัติทั่วไป สมบัติทางไฟฟ้า และโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 5.13 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 491.5 nm เคลือบบนกระจกใส โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.78 sccm

## มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



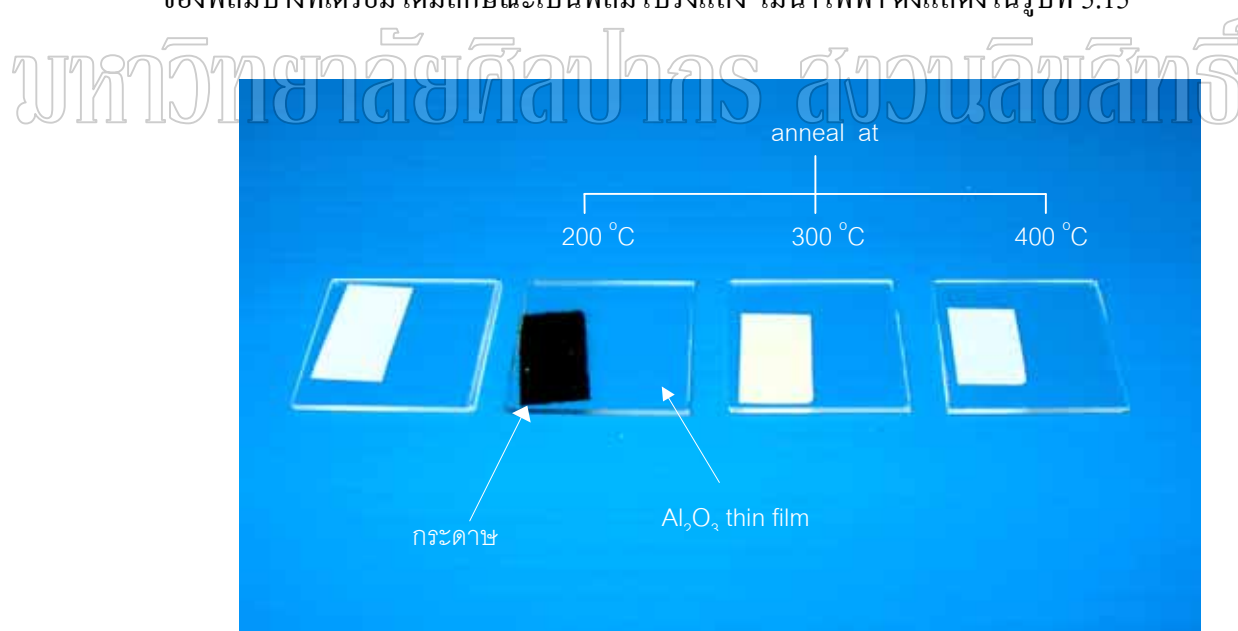
รูปที่ 5.14 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 41.2 nm เคลือบบนกระจกใส โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.92 sccm

### 5.3.2 การศึกษาสมบัติทั่วไป และโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ในหัวข้อนี้ได้เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 4.5.2 ดังนี้

1. กระจกสไลด์ ขนาด  $2.5 \times 2.5$  cm จำนวน 1 ชิ้น
2. ควบคุมค่ากระแสดิซชาร์จคงที่เท่ากับ 0.75 A
3. ค่าความดันก๊าซภายในภาชนะต่ำสุด เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar
4. ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศขณะมีก๊าซอาร์กอน เท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar
5. อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.27 sccm
6. เวลาที่ใช้เคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

ในการเตรียมฟิล์มบางในหัวข้อนี้ ระหว่างทำการสปัตเตอร์ริงค่าความต่างศักย์ดิซชาร์จจะมีค่าระหว่าง 232 V ถึง 237 V และค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าระหว่าง 163 W ถึง 165 W ค่าอัตราการเคลือบเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.0 nm/min และฟิล์มบางมีความหนารวม 466.9 nm โดยคุณสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นฟิล์มโปร่งแสง ไม่นำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm เคลือบบนกระจกสไลด์

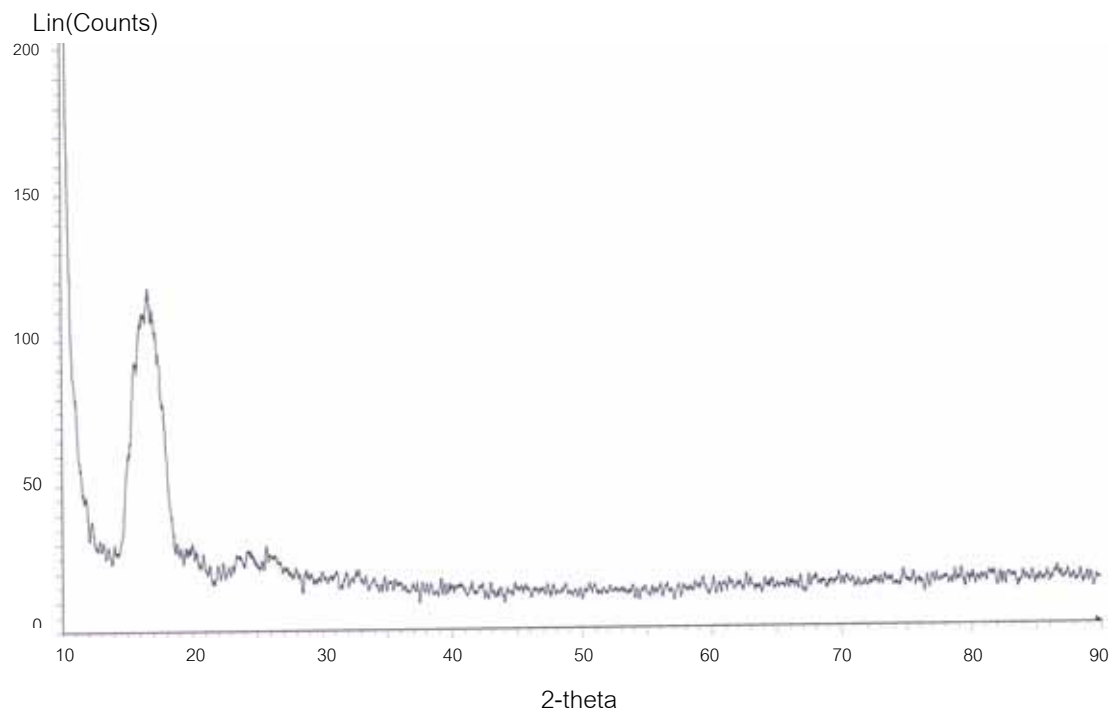
หมายเหตุ 1. ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นฟิล์มโปร่งแสง

2. กระดาษที่ติดด้านหลังกระจกสไลด์ ใช้สำหรับแสดงหมายเลขและด้านของฟิล์ม

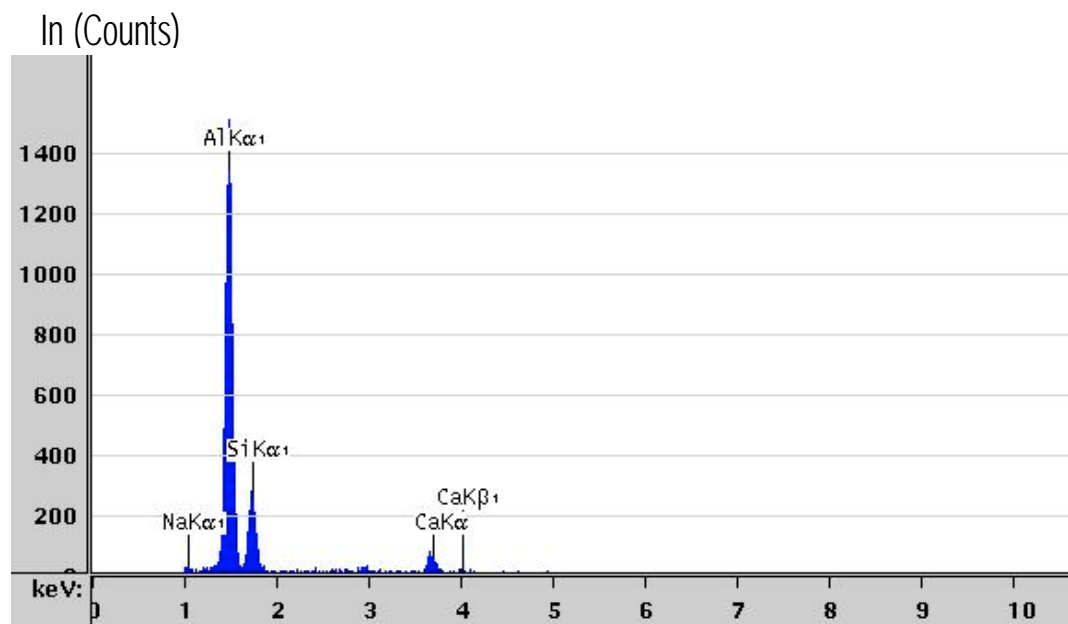


เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเอกซเรย์คิฟแฟร็กโตมิเตอร์ รูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีพีค 1 พีค โดยลักษณะพีคที่ได้มีลักษณะกว้างเริ่มที่มุมประมาณ  $15^{\circ}$  จนถึงมุม  $19^{\circ}$  และตรงกลางของพีคจะอยู่ในตำแหน่งที่มุมเท่ากับ  $16.8^{\circ}$  แสดงในรูปที่ 5.16 และเมื่อเปรียบเทียบ XRD Pattern ของฟิล์มที่สร้างได้กับ Powder XRD Pattern ของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสต่างๆ แสดงให้เห็นว่าพีคของฟิล์มที่สร้างได้มีโอกาสเกิดจากพีคของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสต่างๆที่มาเสริมกัน ได้แก่ พีค  $d = 5.10$  (112) และพีค  $d = 5.53$  (111) ของอะลูมิเนียมออกไซด์เคลต้าเฟส และพีค  $d = 5.45$  (001) ของอะลูมิเนียมออกไซด์เทต้าเฟส ดังนั้นแสดงว่าฟิล์มที่สร้างได้เป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเคลต้าเฟส หรือเทต้าเฟส หรือมีทั้งสองเฟสผสมกัน โดยที่ระนาบต่างๆเหล่านี้จะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆขนานไปกับผิวของวัสดุรองรับ

และจากการวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่ทำจากกระจกสไลด์ ด้วยวิธี Energy dispersive X-ray Spectroscopy จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงให้เห็นสเปกตรัมของธาตุต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.17 ได้แก่ พีค Al  $K\alpha$ , Na  $K\alpha$ , Si  $K\alpha$ , Ca  $K\alpha$  และ Ca  $K\beta$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ของธาตุอะลูมิเนียม โดยพีคของธาตุออกซิเจนในรูปนี้จะตัดออกเพื่อให้เห็นส่วนประกอบของธาตุอื่นได้ชัดเจน และสำหรับพีคของธาตุ Na, Si และ Ca จะเป็นพีคของวัสดุรองรับซึ่งในการทดลองนี้ใช้กระจกสไลด์เป็นวัสดุรองรับ



รูปที่ 5.16 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm เคลือบลงบนกระจกสไลด์ โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.27 sccm

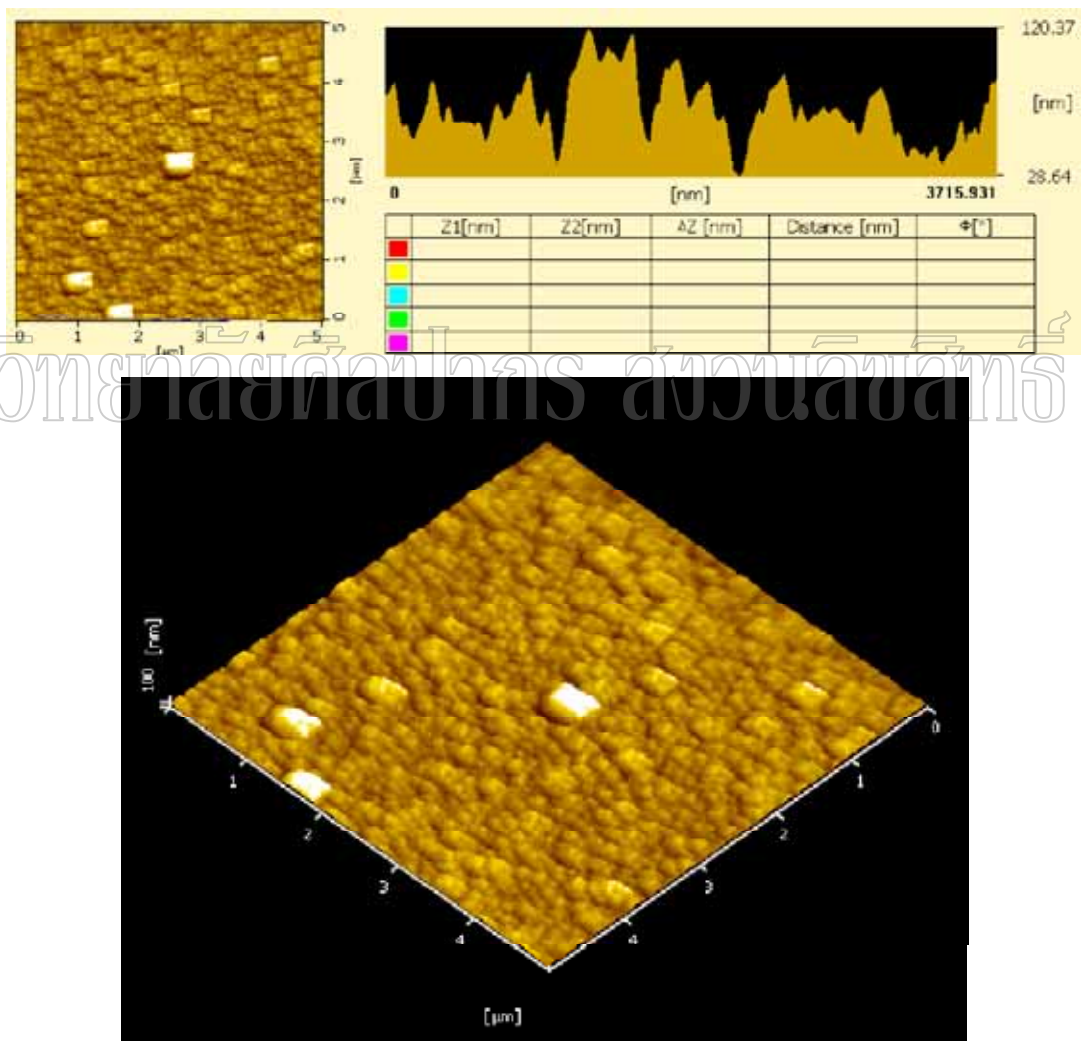


รูปที่ 5.17 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยใช้วิธี Energy dispersive X-ray spectroscopy จากเครื่อง SEM

เมื่อนำฟิล์มที่สร้างได้ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) พบว่าฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงแบบรีแอคทีฟนี้ มีค่าความขรุขระของพื้นผิวหน้า ดังนี้

1. ค่า Average Roughness (Ra) =  $1.204E+01$  nm
2. ค่า Roughness (Rz) =  $1.263E+02$  nm
3. ค่า RMS Roughness (RMS) =  $1.587E+01$  nm

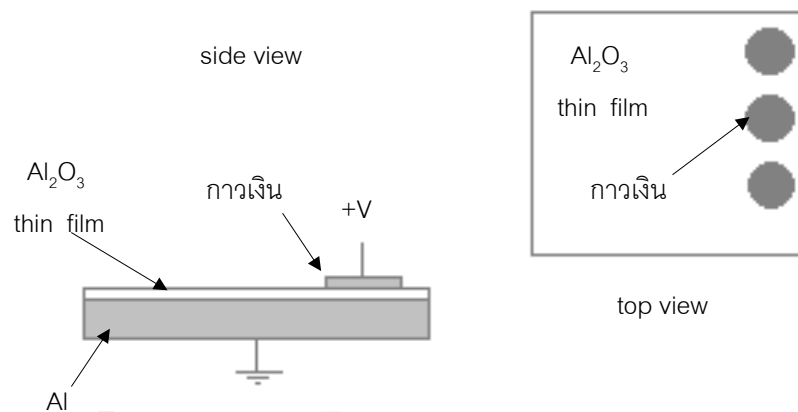
นอกจากนี้ยังใช้เครื่อง AFM นี้ในการวัดค่าความหนาจริงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับเครื่องวัดความหนา (FTM7) ที่ติดตั้งในภาชนะสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์ม



รูปที่ 5.18 ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์  
จากเครื่อง Atomic Force Microscope

### 5.3.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ในหัวข้อนี้ทำการสร้างตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางโดยใช้แผ่นโลหะบางอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดขั้วหนึ่ง และทำการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ลงบนขั้วโลหะดังกล่าว ซึ่งชั้นของฟิล์มนี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ สำหรับขั้วอิเล็กโทรดที่เหลือจะใช้กาวเงิน ดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แสดงตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางที่มีฟิล์มบาง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นชั้นไดอิเล็กตริก

ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบางที่สร้างขึ้นนี้ จะมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นสารไดอิเล็กตริก ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารเท่ากับ  $\epsilon_r$  โดยถูกประกบด้วยแผ่นโลหะอะลูมิเนียมและแผ่นชั้นกาวเงิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าขนานกับสารดังกล่าว โดยมีพื้นที่  $A$  และระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ  $d$  ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสาร ( $\epsilon_r$ ) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์นี้จะหาได้จากสมการ

$$\epsilon_r = C d / \epsilon_0 A \quad (5.1)$$

โดยที่  $C$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (F)

$d$  คือ ความหนาของชั้นสารไดอิเล็กตริก (m)

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (F/m)

$A$  คือ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ ( $\text{m}^2$ )

สำหรับขั้นตอนในการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นสารไดอิเล็กตริกนี้ จะเตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 4.5.2 ดังนี้

1. แผ่นอะลูมิเนียมบาง ขนาด  $3.0 \times 5.0$  cm
2. ควบคุมค่ากระแสดีคาร์จคงที่ เท่ากับ 0.75 A
3. ค่าความดันก๊าซภายในภาชนะต่ำสุด เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar
4. ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศขณะมีก๊าซอาร์กอน เท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar
5. อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.27 sccm
6. เวลาที่ใช้เคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

ในการเตรียมฟิล์มบางในหัวข้อนี้ ระหว่างทำการสปัตเตอร์ค่าความต่างศักย์ดีคาร์จจะมีค่าระหว่าง 232 V ถึง 237 V และค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าระหว่าง 163 W ถึง 165 W ค่าอัตราการเคลือบเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.0 nm/min และฟิล์มบางมีความหนารวม 466.9 nm

จากการวัดค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นสารไดอิเล็กตริก ด้วยเครื่องวัด LCR Meter จำนวน 3 ชิ้นงาน และคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างได้นี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.53 ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตัวเก็บประจุ	พื้นที่ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2$ )	ความจุ (Farad)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
C1	1.038	165.00	8.39
C2	2.295	370.26	8.51
C3	2.112	348.27	8.70
		$\epsilon_r$ (average)	= 8.53

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

### 5.3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติ และโครงสร้างของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

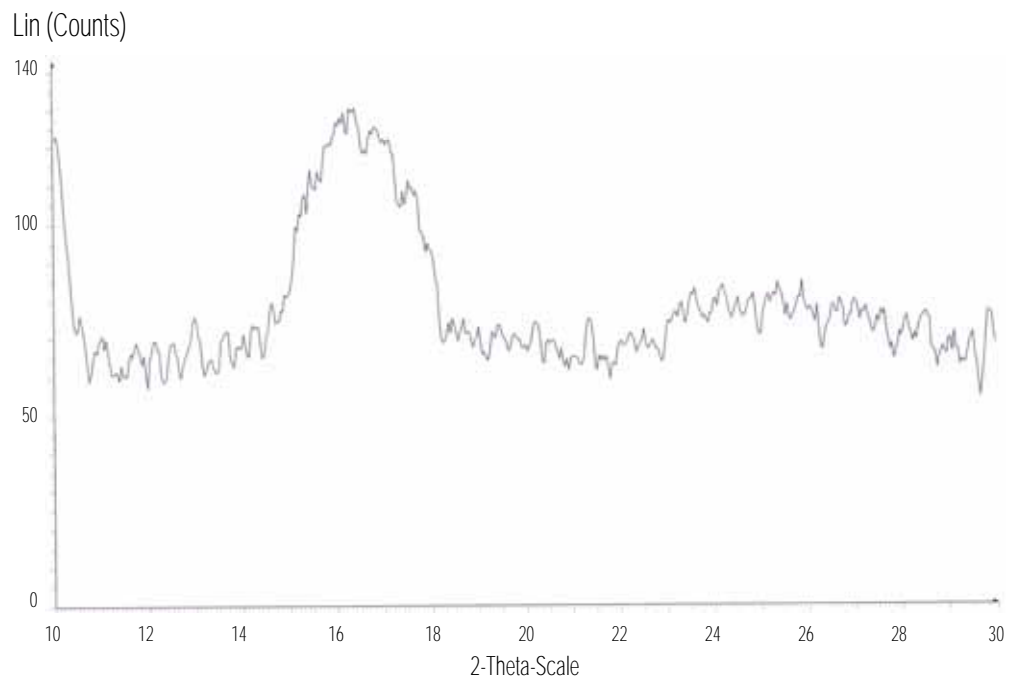
ในหัวข้อนี้ได้เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 4.5.2 ดังนี้

1. กระจกใสได้ ขนาด  $2.5 \times 2.5$  cm จำนวน 4 ชิ้นงาน
2. ควบคุมค่ากระแสดีสชาร์จคงที่เท่ากับ 0.75 A
3. ค่าความดันก๊าซภายในภาชนะต่ำสุด เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar
4. ความดันก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศขณะมีก๊าซอาร์กอน เท่ากับ  $5.5 \times 10^{-3}$  mbar
5. อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.27 sccm
6. เวลาที่ใช้เคลือบฟิล์ม เท่ากับ 2 ชั่วโมง

ในการเตรียมฟิล์มบางในหัวข้อนี้ ระหว่างทำการสเปคโตรริงค่าความต่างศักย์ดีสชาร์จจะมีค่าระหว่าง 232 V ถึง 237 V และค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าระหว่าง 163 W ถึง 165 W ค่าอัตราการเคลือบเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.0 nm/min และฟิล์มบางมีความหนารวม 466.9 nm

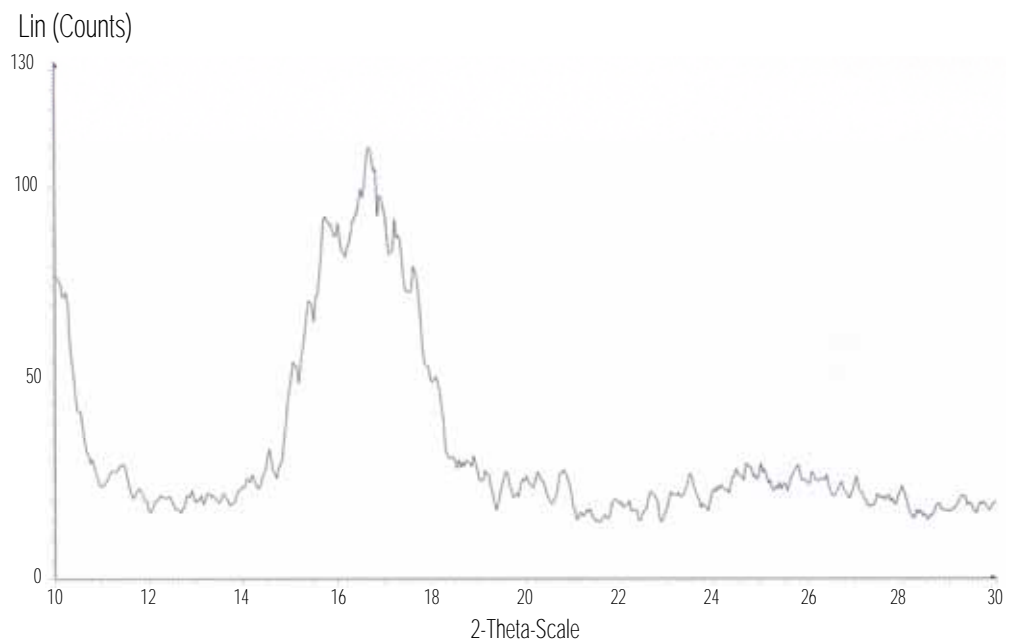
หลังจากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปให้ความร้อน โดยอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 200 °C, 300 °C, 400 °C ตามลำดับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ พบว่าโครงสร้างของฟิล์มบางเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิช่วงค่าดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 5.20, 5.21 และ 5.22

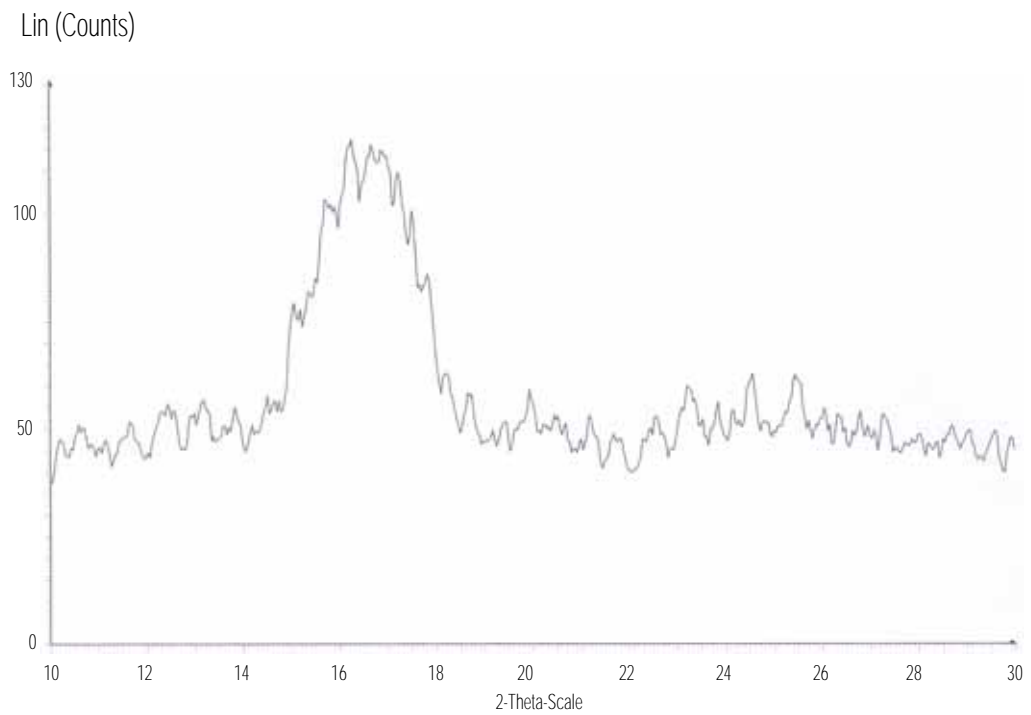


รูปที่ 5.20 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm  
ที่เคลือบบนกระดาษโพลีเอทิลีน ออบที่อุณหภูมิ 200 °C 1 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 5.21 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm  
ที่เคลือบลงบนกระดาษโพลีเอทิลีน ออบที่อุณหภูมิ 300 °C 1 ชั่วโมง



รูปที่ 5.22 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ความหนา 466.9 nm

ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ อบที่อุณหภูมิ 400 °C 1 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



## บทที่ 6

### สรุปผล

การศึกษาเทคนิคการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นรีแอกทีฟก๊าซนี้ แบ่งการศึกษาเป็น 6 ขั้นตอนได้แก่

1. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล ได้แก่ เครื่องเคลือบฟิล์มบางของบริษัท ANS technology รุ่น EP280, เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์, เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM), เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer จากเครื่อง SEM และเครื่อง LCR Meter

2. หาค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม โดยการเตรียมการทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมและหาอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ที่ได้จากเครื่องวัดความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์ม(FTM7) ที่ค่าความดันก๊าซต่างๆ

3. หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสดีสชาร์จ ความต่างศักย์ดีสชาร์จ กำลังไฟฟ้า อัตราการเคลือบ กับค่าอัตราการไหลของก๊าซรีแอกทีฟ

4. เคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้สภาวะที่ได้ศึกษาจากการทดลองในข้อ 2 และ 3

5. วิเคราะห์สมบัติทั่วไป โครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบ โดยวิธี เอกซเรย์ดิฟแฟร็กชัน, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Atomic Force Microscopy และหาคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์จากตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง

6. เคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ลงบนกระจกสไลด์ หลังจากนั้นนำฟิล์มไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกัน ในเตาอบ วิเคราะห์สมบัติทั่วไป โครงสร้างโดยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟร็กชัน

จากการศึกษาค่าความต่างศักย์ดีสชาร์จ ค่ากำลังไฟฟ้า และอัตราการเคลือบสัมพัทธ์ที่ค่ากระแสคี่ต่างๆ มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลของรีแอกทีฟก๊าซ และพบว่าสภาวะการเคลือบหรือการสปีดเตอริงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีการสปีดเตอริงส่วนใหญ่เป็นการสปีดเตอริงโลหะอะลูมิเนียม โดยฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็นเงามัน นำไฟฟ้าได้ดี และอัตราการเคลือบสัมพัทธ์มีค่าสูง หรือที่เรียกว่า การสปีดเตอริงในโหมดเมททัล สำหรับการสปีดเตอริงในช่วงที่สองจะเป็นการสปีดเตอริงในโหมด เมททัลออกไซด์ ทำให้เกิดการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม

ออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ใส และอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการเคลือบในโมดแรก

เมื่อสร้างฟิล์มนี้โดยใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกัน พบว่าคุณสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนน้อยกว่า ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างทึบแสง ไม่นำไฟฟ้า เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จะมีพีค 1 พีค โดยลักษณะพีคที่ได้มีลักษณะกว้างและมีความเข้มต่ำ ซึ่งแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะของฟิล์มที่มีความเป็นอะมอร์ฟัส และบางส่วนมีความเป็นผลึก

สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อใช้ค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนมากกว่า ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นฟิล์มโปร่งแสง ไม่นำไฟฟ้า เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จะมีพีค 1 พีค โดยลักษณะพีคที่ได้มีลักษณะกว้างเริ่มที่มุม 15 องศา และตรงกลางของพีคจะอยู่ในตำแหน่งที่มุมเท่ากับ 18.3 องศา สำหรับฟิล์มที่ 2 นี้จะเห็นว่ามีความเข้มของรังสีที่กระเจิงมีค่ามากกว่าซึ่งแสดงว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มแรกแม้ว่าฟิล์มที่ได้มีความหนาน้อยกว่าฟิล์มแรก

สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีทั้งสองนี้ เมื่อเปรียบเทียบ XRD Pattern ของฟิล์มที่สร้างได้กับ Powder XRD Pattern ของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสต่างๆ แสดงให้เห็นว่า พีคของฟิล์มที่สร้างได้มีโอกาสเกิดจากพีคของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสต่างๆที่มาเสริมกัน ได้แก่ พีค  $d = 5.10$  (112) และพีค  $d = 5.53$  (111) ของอะลูมิเนียมออกไซด์เคลต้าเฟส และพีค  $d = 5.45$  (001) ของอะลูมิเนียมออกไซด์เทต้าเฟส แสดงว่าฟิล์มที่สร้างได้เป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเคลต้าเฟส หรือเทต้าเฟส หรือมีทั้งสองเฟสผสมกัน โดยที่ระนาบต่างๆเหล่านี้จะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆขนานไปกับผิวของวัสดุรองรับ

เมื่อนำฟิล์มที่สร้างได้ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM พบว่าฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีดิวซ์สปีดเตอริงแบบรีแอคทีฟนี้ มีค่า Average Roughness =  $1.204E+01$  nm, Roughness (Rz) =  $1.263E+02$  nm และค่า RMS Roughness =  $1.587E+01$  nm

และเมื่อใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นสารไดอิเล็กตริก ในตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มบาง และคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สร้างได้นี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.53

จากศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติ และโครงสร้างของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ,  $300^{\circ}\text{C}$  ,  $400^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ พบว่าโครงสร้างของฟิล์มบางเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิช่วงค่าดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลง

แนวทางการพัฒนาต่อไปของการสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ก็การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ได้แก่ ค่ากระแสรั่วไหลเมื่อนำมาใช้เป็นเกตไดอิเล็กตริกในทรานซิสเตอร์ประเภท MOS และค่าความต่างศักย์พังทลายเมื่อฟิล์มมีความหนาไม่เท่ากัน

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

## บรรณานุกรม

Butler I.S. and Harrod J.F., **Inorganic Chemistry Principles and Applications**, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., California, (1989).

Catherine E. and Alan G. Sharp, **Inorganic Chemistry**, Prentice Hall International (UK) Ltd.,(2001).

Chapman B., **Glow Discharge Process**, John Wiley & Sons, New York, (1980).

Cotton F.A., Wikinson G., Murillo C.A. and Bochmann M.,**Advanced Inorganic Chemistry**, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc. ,USA ,(1999).

**DRAM Technology, Semiconductor Technology** [Online]. Accessed 13 January 2006.

Available from <http://www.semitechonline.com/index.html>

Ferendeci A.M., **Physical Foundation of Solid State and Electron Devices**, McGraw-Hill, Inc., New York, (1991).

Hebert M., **Get the Roll Surface Right**, Plastic Technology Articles [Online]. Accessed 21 February 2006. Available from <http://ptonline.com/index.html>.

**High purity activated aluminas**[Online]. Accessed 20 December 2005. Available from <http://www.sasol.com/>

Hummel R.E. and Guenther K.H., **Optical Properties Volume 1 Thin Films for Optical Coatings**, Boca Raton, London, (1995) p 137-161.

Jeong C.W., Lee B.I. and Joo S.K., **Growth and characterization of Aluminium oxide films by plasma-assisted atomic layer deposition**, Material Science and Engineering, (2001) p.59-64.

Klein C. and Hurlburt C.S., Jr., **Manual of Mineralogy**, John Wiley & Sons, Inc., (1999).

Lagowski J.J., **Modern Inorganic Chemistry**, MARCEL DEKKER, INC., New York,(1973).

Leaver K.D. and Chapman B.N., **Thin Films**, WYKEHAM PUBLICATION LTD., London, (1971).

Mackay K.M., Mackay R.A and Henderson W., **Introduction to Inorganic Chemistry**, 5th Edition, Chapman & Hall, London, (1996).

Matacotta F.C. and Ottaviani G., **Science and Technology of Thin Films**, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., Singapore, (1995).

McGuire G.E., **Semiconductor Materials and Process Technology Handbook**, Noyes Publications, New Jersey, (1988).

Ogita Y.I., Iehara S. and Tomita T., **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> formation on Si by catalytic chemical vapor deposition**, Thin Solid Films 430, (2003) p.161-164.

Purcell K.F. and Kotz J.C., **Inorganic Chemistry**, W.B. SAUNDERS COMPANY, USA, (1977).

Santos et al., **Standard Transition Aluminas Electron Microscopy Studies**, Material Research, Vol. 3, (2000) p.104-114.

Shamala K.S., Murthy L.C.S. and Roa K.N., **Studies on optical and dielectric properties of  $Al_2O_3$  thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method**, Material Science and Engineering B, (2004) p.269-274.

Vossen J.L. and Kern W., **Thin Film Process 2**, Academic Press, Inc., Boston, (1991) p.191-199.

Winarski T.Y., **Dielectric in MOS Devices, DRAM Capacitors and Inter-Metal Isolation**, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17, No.6, (2001).

ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไณย, **ฟิล์มสื่และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ**, โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.

นฤมล ธรรมรักษ์เจริญ, **การศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสง**, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2546) p. 6-10.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์**, สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตร, กรุงเทพฯ, (2547).

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก 1

#### วิธีการปฏิบัติงานในการใช้เครื่องสปัตเตอร์ EP 280

##### 1. การเปิดการสร้างภาวะสุญญากาศ

1. ตรวจสอบว่าลวทุกตัวอยู่ในสถานะปิด
2. เปิดเครื่องสูบลูกโรตารี (หากเครื่องสูบลูกโรตารีทำงานปกติจะให้ความดันต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar)
3. เปิดวาล์วท้าย เพื่อสูบลูกอากาศออกจากเครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอ ผ่านท่อท้ายจนกระทั่งได้ความดันต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar
4. ดมน้ำมันของเครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอ (การดมน้ำมันของเครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอจะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที เครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอจึงพร้อมทำงาน)
5. ช่วงแรกเป็นการสร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้น หรือที่เรียกว่าเป็นการสูบลูกแบบหยาบ (ความดันมีค่ามากกว่า  $10^{-2}$  mbar) ในภาวะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบลูกโรตารีซึ่งจะสูบลูกอากาศภายในภาวะสุญญากาศออกสู่บรรยากาศ มีขั้นตอนดังนี้คือ
  - 5.1 ปิดวาล์วท้าย (backing valve)
  - 5.2 เปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) เพื่อให้เครื่องสูบลูกโรตารีสูบลูกอากาศออกจากภาวะสุญญากาศ
  - 5.3 เมื่อความดันในภาวะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $10^{-2}$  mbar จึงปิดวาล์วหยาบและเปิดวาล์วท้าย
6. ขั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างภาวะสุญญากาศสูงภายในภาวะสุญญากาศ (ให้มีค่าต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar) โดยใช้เครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอ มีขั้นตอนดังนี้คือ
  - 6.1 ตรวจสอบความดันภายในภาวะสุญญากาศว่ายังคงต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar หรือไม่ (โดยขั้นนี้ให้ปิดวาล์วท้ายและเปิดวาล์วหยาบ เพื่อตรวจสอบความดัน)
  - 6.2 ถ้าความดันภายในภาวะสุญญากาศต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar จึงเริ่มสูบลูกอากาศในภาวะสุญญากาศด้วยเครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอ ทำได้โดยปิดวาล์วหยาบ เปิดวาล์วท้าย เพื่อให้เครื่องสูบลูกแบบแพร์ไอทำงานต่อเนื่องกับเครื่องสูบลูกโรตารี

6.3 จากนั้นจึงเปิดวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) เพื่อลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ โดยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอจะสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านเครื่องสูบกลโรตารีออกสู่อากาศภายนอก

6.4 หลังจากเปิดวาล์วสุญญากาศสูงแล้วความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะลดลงอย่างรวดเร็ว

7. ความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะต่ำลงไปเรื่อยๆ จนได้ความดันที่ต้องการ เรียกความดันที่อ่านได้ขณะนี้ว่า ความดันต่ำสุด (base pressure)

## 2. ขั้นตอนการเคลือบฟิล์ม

1. ปลดยก๊าซอาร์กอนและก๊าซอื่นๆที่ต้องการเข้าภาชนะสุญญากาศ โดยควบคุมความดันและอัตราการไหลของก๊าซด้วย Mass flow controller (Edward model 825) ผ่านหน้าจอส่วนควบคุม DATAMETRICS controller 1605

2. เปิดสวิทช์แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่อง MDX-1K ทำการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจนเกิดการโคล์ดีสชาร์จ(คายประจุแบบเรืองแสง) ซึ่งไฟหน้าจอของเครื่องจะแสดงสถานะ Plasma

3. เคลือบฟิล์มตามระยะเวลาที่ต้องการ

4. ปิดสวิทช์ OUTPUT และสวิทช์ POWER ตามลำดับ

5. ปิดสวิทช์การทำงานของ Mass flow controller ทั้งหมดเพื่อไม่ให้มีก๊าซไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

## 3. การปิดการสร้างภาวะสุญญากาศ

1. ตรวจสอบการปิด-เปิดวาล์วต่างๆ ดังนี้

1.1 ปิดวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve)

1.2 ปิดวาล์วหยาบ (roughing valve)

1.3 เปิดวาล์วท้าย (backing valve)

2. หยุดการทำงานของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยการหยุดคัมน์้ำมันของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอเพื่อลดความร้อนของน้ำมัน (จะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที)

3. ขณะที่รอเครื่องสูบบแบบแพร่ไอหยุดทำงาน เครื่องสูบกลโรตารียังต้องทำงาน ห้ามปิด

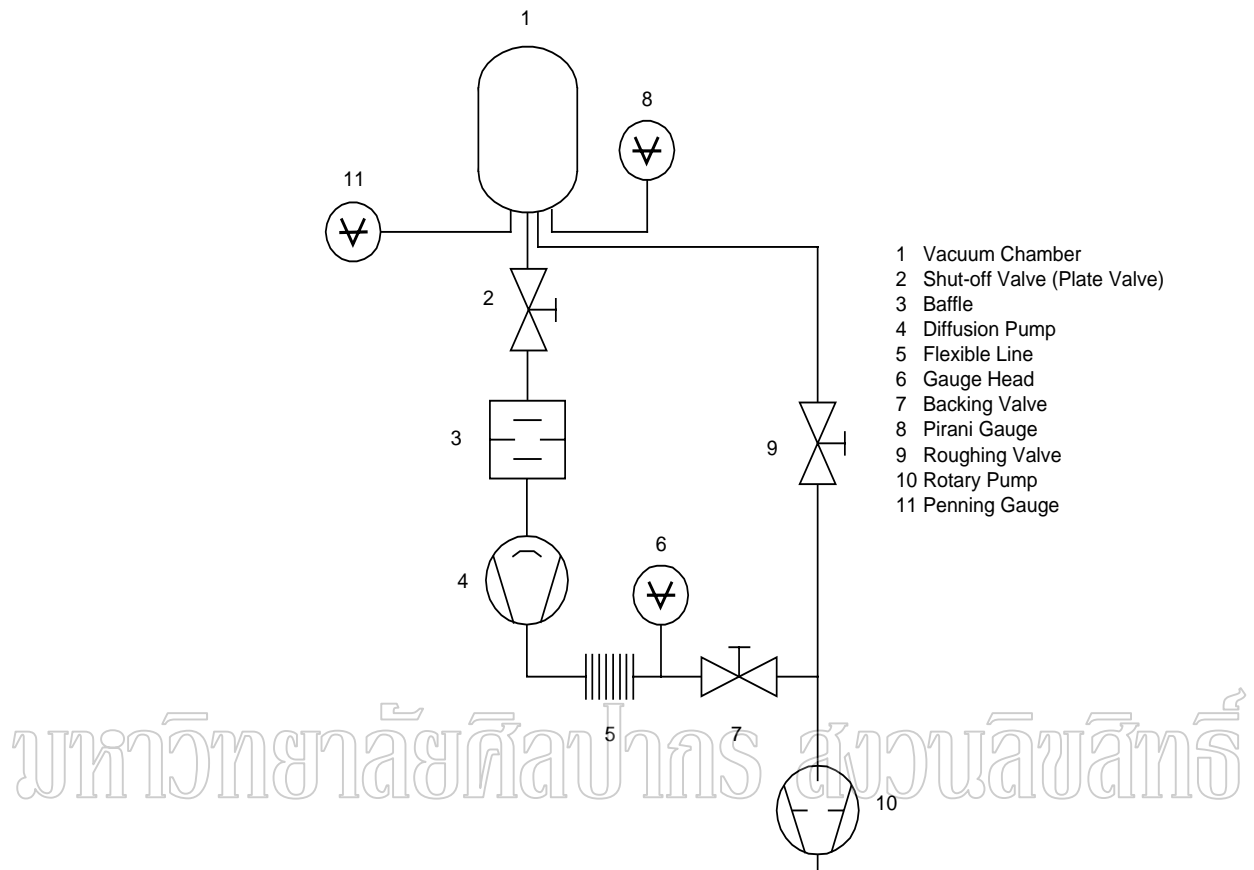
4. รอจนเครื่องสูบบแบบแพร่ไอหยุดทำงาน ปิดวาล์วท้าย (backing valve)



5. จากนั้นปิดเครื่องสูบลมโรตารี
6. เปิดวาล์วปล่อย (vent valve) ของเครื่องสูบลมโรตารี เพื่อเพิ่มความดันใน backing line

#### 4. ข้อสังเกตสำหรับการสร้างภาวะสุญญากาศ

1. เงื่อนไขเริ่มต้นของระบบสุญญากาศ ก่อนสร้างภาวะสุญญากาศจะต้องมีภาวะดังนี้
  - 1.1 วาล์วทุกตัวอยู่ในสถานะปิด
  - 1.2 มาตรวัดความดันอยู่ในสถานะปิด
  - 1.3 ระบบทั้งหมดอยู่ที่ความดันบรรยากาศ
2. ห้ามจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อนของเครื่องสูบบางประเภท ในขณะที่เครื่องสูบลมโรตารียังไม่ทำงาน
3. การภาวะสุญญากาศโดยการสูบลมออกจากภาชนะสุญญากาศ เริ่มจากเปิดเครื่องสูบลมโรตารี และตรวจสอบความดันท่อท้ายของเครื่องสูบบางประเภทให้ต่ำกว่า  $10^{-1}$  mbar เปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องสูบบางประเภทและจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อน เมื่อเครื่องสูบบางประเภทเริ่มทำงานไปประมาณ 20 นาที เปิดมาตรวัดสุญญากาศสูงจะสังเกตเห็นความดันในระบบสุญญากาศจะอยู่ในระดับสุญญากาศสูง
4. ในขั้นตอนการปิดการสร้างภาวะสุญญากาศมีอีกวิธีหนึ่งที่ทำได้คือ เมื่อปิดเครื่องสูบบางประเภท เราอาจแยกเครื่องสูบบางประเภท ในทันทีโดยปิดวาล์วท้าย และยังคงหล่อเย็นจนกว่าน้ำมันเย็นลง
5. โดยปกติวาล์วท้ายและวาล์วหยาบ จะไม่เปิดในเวลาเดียวกัน เพราะถ้าเปิดพร้อมกันจะทำให้ มีปัญหากับการทำงานของเครื่องสูบบางประเภท



รูป ผ1 แสดงระบบของเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง รุ่น EP 280

## ภาคผนวก 2

### วิธีการใช้เครื่อง MDX-1K

#### 1. หน้าที่และระบบการทำงานของเครื่อง Magnetron Drive ( MDX 1K ) โดยทั่วไป

1. เป็นแหล่งให้กำลังงานไฟฟ้าแก่ส่วน Magnetron Cathode
2. มีโหมดการทำงานแบ่งเป็น 3 โหมด คือ Power regulate , Current regulate และ Voltage regulate
3. มีระบบ Power Reglator , Interlock String , Remote Interface
4. มีระบบป้องกันการอาร์คโดยการตรวจวัดสถานะของ โหลด และมีระบบป้องกันการปิด/เปิดของวงจรไฟฟ้า
5. มีระบบ High Frequency conversion ทำให้ไม่เกิดการสะสมพลังงาน เป็นการช่วยลดการคายพลังงานเนื่องจากการคายประจุที่ทำให้เกิดสภาวะการอาร์ค

#### 2. คุณสมบัติทั่วไป

1. Input Voltage	208 V(ac) $\pm$ 10% 50 Hz
2. Input Current	10 A nominal @ 1 KW ( Full power )
	0.92 Power Factor
	15 A Circuit breaker
3. Output Power	0 - 1000 W
4. Output Voltage	0 - 1000 V ( 1500 V Open circuit voltage )
5. Output Current	0 - 1.0 A
6. Output ripple	5 % rms max ( Ripple frequency 50 KHz )
7. Colling	0 - 45° ambient
8. Humidity	0 - 92 % non-condensing

### 3. การใช้งาน

1. ปุ่ม POWER ใช้ ปิด/เปิด การทำงานของเครื่อง MDX-1K

2. OUTPUT ใช้ ปิด/เปิด ไฟที่จ่ายไปที่ Magnetron Drive

3. LEVEL ใช้ปรับค่า ความต่างศักย์, กำลังไฟฟ้า หรือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง

Magnetron Drive และใช้สำหรับปรับตั้งค่าในกรณีที่ต้องการค่าเอาต์พุตที่ต้องการโดยใช้ร่วมกับ ปุ่ม Setpoint

4. REGURATION ( Power, Current and Voltage ) ใช้เลือกโหมดสำหรับค่าที่ต้องการให้คงที่ เช่น ต้องการให้แหล่งจ่ายไฟไปยัง Magnetron Drive โดยมีค่ากระแสคงที่(regurate) เท่ากับ 0.75 A เป็นต้น

4.1 ปุ่ม CURRENT ใช้เลือกโหมดการทำงานแบบ Current regulation

4.2 ปุ่ม POWER ใช้เลือกโหมดการทำงานแบบ Power regulation

4.3 ในการเลือกโหมดการทำงานแบบ Voltage regulation ให้กดปุ่ม CURRENT และ ปุ่มPOWER พร้อมกันผู้ใช้งานจะสามารถปรับเลือกโหมดต่างๆเหล่านี้ได้เฉพาะเมื่อเอาต์พุตถูกปิดการใช้งานอยู่ (OFF)

5. ปุ่ม SETPOINT ใช้สำหรับปรับตั้งค่า(program) ล่วงหน้า โดยใช้ปุ่มนี้ร่วมกับ ปุ่ม REGURATION เพื่อเลือกโหมดที่ต้องการ ให้มีค่าคงที่และปรับปุ่ม LEVEL ให้ค่าของเอาต์พุตมีค่าตามต้องการ ซึ่งระหว่างปรับเลือกค่านี้อาจจะแสดงที่หน้าจอ Right Display

นอกจากนี้ ถ้ากดปุ่ม Setpoint นี้ซ้ำอีกครั้ง จะเข้าสู่การโปรแกรมค่า Ramp time ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ปรับไว้ก่อนหน้านี้

6. LEFT DISPLAY คือหน้าจอสำหรับแสดงค่าเอาต์พุตต่างๆ ตามโหมดที่ต้องการปรับค่าคงที่

7. RIGHT DISPLAY เป็นหน้าจอสำหรับแสดงค่าเอาต์พุต โดยแสดงทั้งค่าเอาต์พุตจริงหรือค่าเอาต์พุตที่ทำการโปรแกรมไว้ล่วงหน้า

8. STATUS INDICATORS

8.1 ARC จะแสดงเมื่อระบบอยู่ในสภาวะการอาร์ค

8.2 SETPOINT จะแสดงค่าเมื่อเอาต์พุตมีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตที่โปรแกรมตั้งค่าไว้ล่วงหน้า

8.3 RAMP จะแสดงโดยการกระพริบต่อเนื่อง ระหว่างที่เอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น และจะหยุดกระพริบเมื่อค่าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับค่าที่ได้ตั้งไว้

8.4 PLASMA จะแสดงเมื่อกระแสที่จ่ายแก่โพลด์มีค่าต่ำสุด

### ภาคผนวก 3

#### วิธีการใช้เครื่อง FTM7 (Film Thickness Monitor)

##### 1. หลักการทำงานโดยทั่วไป

หลักการทำงานของหัววัดที่ใช้สำหรับวัดค่าความหนาของฟิล์มของเครื่อง FTM7 นี้ จะใช้หลักการออสซิลเลทของผลึกควอทซ์ สำหรับผลึกควอทซ์ที่ใช้จะมีลักษณะเป็น Plano-convex plate ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 14 mm และหนา 3 mm และจะถูกระงับในโหมดตามแนวขวางของผลึกโดยออสซิลเลเตอร์ซึ่งมีค่าความถี่ประมาณ 3 MHz ความถี่ของการออสซิลเลทนี้ จะถูกกำหนดโดยมวลของสารที่เคลือบลงบนผิวของผลึกควอทซ์ และในระหว่างที่ทำการเคลือบอยู่นี้ มวลของสารที่เคลือบลงบนผิวของผลึกควอทซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และค่าความถี่ของการออสซิลเลทจะมีค่าลดลง จากค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้จะทำให้ทราบค่ามวลของสารที่ทำการเคลือบ และเมื่อทราบค่าความหนาแน่นของฟิล์ม และปริมาตรของฟิล์มที่ได้ ก็จะสามารหาค่าความหนาของฟิล์มได้

สำหรับเครื่อง FTM7 ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดหรือแสดงอัตราการเคลือบ ( Deposition ) และความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ในระบบสุญญากาศ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัดปริมาณของพื้นผิวที่หลุดออกในขณะที่ทำการกัดกร่อนพื้นผิววัสดุ ( Etching )

##### 2. ส่วนควบคุมและแสดงผล

Date/Rate Display (1)	แสดงอัตราการการเคลือบ, ชนิดของสาร และสถานะการทำงาน ของเครื่อง FTM7
Thickness Display (2)	แสดงค่าความหนาของฟิล์มในระหว่างที่ทำการเคลือบ หรือ แสดงค่าความหนาของฟิล์มที่ต้องการเคลือบ (โดยการตั้งค่าไว้)
Units LEDs	แสดงหน่วยของความหนาของฟิล์ม
Status LEDs	จะแสดงตัวเลือกที่ต้องการ เช่น แสดงอัตราการเคลือบ, แสดง ค่าความหนาของฟิล์มที่บันทึกค่าไว้
Sensor LEDs	แสดงหัววัดที่ใช้ในการทำงานอยู่
Decrement and Increment	ใช้สำหรับปรับเพิ่มหรือลดค่า
Data Button (6)	ใช้แสดงข้อมูล
Test Button (7)	ใช้ทดสอบการทำงานของเครื่อง
Run Button (5)	ใช้เลือกการทำงาน ปิด/เปิด ชัตเตอร์ด้วยระบบแมนนวล

### 3. การปรับค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในเครื่อง FTM7

Layer	ใช้เก็บค่าตัวแปรต่างๆสำหรับแต่ละฟิล์ม(Layer)
Density	ใช้เก็บค่าความหนาแน่นของฟิล์มแต่ละชนิดที่ต้องการเคลือบ
Z-Value	เก็บค่าอะคลูสติคิมพีแดนซ์ของฟิล์มแต่ละชนิดที่ต้องการเคลือบ
Terminate	ใช้ตั้งค่าความหนาของฟิล์มที่ต้องการเคลือบ
Tooling	ใช้สำหรับตั้งค่า Tooling Factor เนื่องจากความหนาที่เคลือบได้จริงกับความหนาที่วัดได้จากหัววัดมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งมีผลมาจากระยะห่างระหว่างหัววัดกับเป้าไม่เท่ากับระยะห่างระหว่างชั้นสเตรทกับเป้า และยังขึ้นกับค่ามุมที่หัววัดกระทำกับหัวแมกนีตรอนด้วย
x-tal	ใช้เลือกหัววัด
Usage	แสดงสถานะภาพหรืออายุการใช้งานของหัววัด

### 4. การใช้งานเครื่อง FTM7

สำหรับการเคลือบฟิล์มในแต่ละครั้ง ถ้าต้องการค่าอัตราการเคลือบหรือค่าความหนาของฟิล์มที่ถูกต้อง จะต้องทำการตั้งค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง FTM7 นี้ ซึ่งรายการของตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.3 แล้ว

#### 3.4.1 การเลือกข้อมูลที่ต้องการแสดง

จากรูปที่ 1 ไฟแสดงสถานะ (11) จะแสดงตัวเลขปัจจุบันที่เครื่องกำลังทำงานอยู่ และถ้าต้องการเปลี่ยนตัวเลขเพื่อแสดงหรือตั้งค่าให้ตัวแปรอื่นๆ จะทำโดยการเลือกปุ่ม Data (6)

#### 3.4.2 ขั้นตอนการใส่ค่าข้อมูลของตัวแปรต่างๆที่ใช้กับเครื่อง FTM7

1. จากรูปที่ 1 (ในคู่มือการใช้เครื่อง) กดปุ่มหมายเลข 6 จนกระทั่งไฟแสดงสถานะ " layer " ติด
2. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อเลือก Layer ที่ต้องการ ( 1 ถึง 11 )หรือ Sequence Layer ( 12 1 ถึง 19 6 ) ที่แสดงหน้าจอ Data/Rate
3. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " Density " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " Density "
4. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อทำการเพิ่มค่าหรือลดค่าความหนาแน่นฟิล์มที่เครื่อง FTM7ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ โดยให้ตรงกับค่าความหนาแน่นของฟิล์มที่ต้องการเคลือบ

5. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " Z-value " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " Z-value "

6. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อทำการเพิ่มค่าหรือลดค่า Z-value ของฟิล์มที่เครื่อง FTM7ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ โดยให้ตรงกับค่า Z-value ของฟิล์มที่ต้องการเคลือบ

7. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " Terminate " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " Terminate "

8. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อทำการเพิ่มค่าหรือลดค่าความหนาของฟิล์มที่ต้องการเคลือบ

9. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " Tooling " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " Tooling "

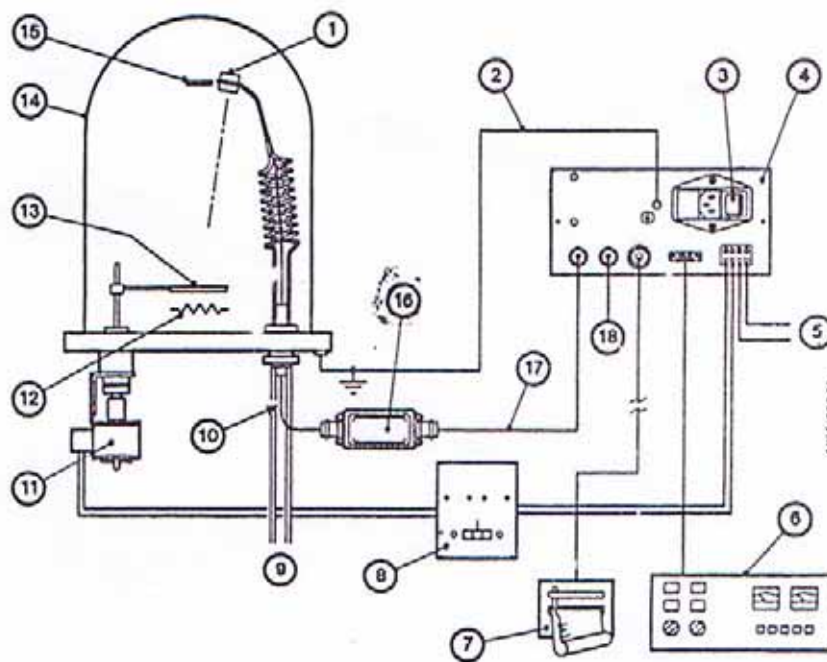
10. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อทำการเพิ่มค่าหรือลดค่า Tooling Factor ของการเคลือบ

11. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " xtal " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " xtal "

12. กดปุ่ม Increment หรือ Decrement เพื่อเลือกหัววัดที่ต้องให้ทำงาน

13. กดปุ่ม Data อีกครั้ง เพื่อเลือกใส่ค่าตัวแปร " usage " โดยไฟแสดงสถานะหมายเลข 11 จะแสดงที่ " usage " และเครื่องจะแสดงอายุการใช้งานของหัววัด

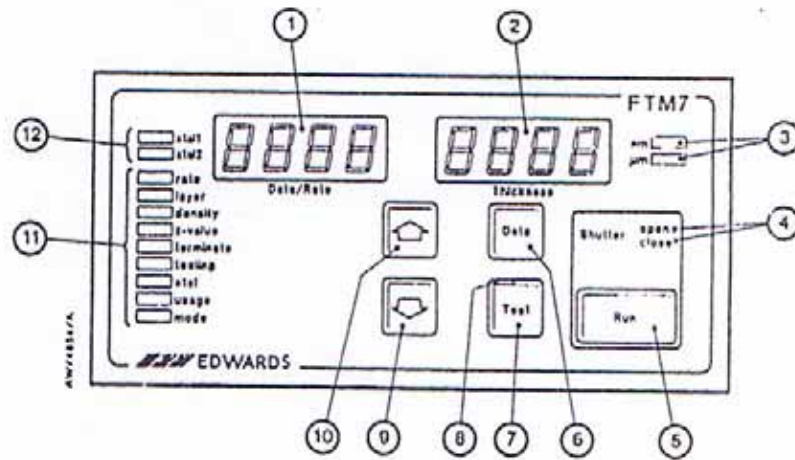
14. เมื่อตั้งค่าตามขั้นตอนดังกล่าวเสร็จแล้ว เครื่องวัด FTM7 ก็จะพร้อมในการทำงาน



- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. Crystal (in holder)          | 10. Short coaxial cable                     |
| 2. Earth (ground) wire          | 11. Shutter actuator                        |
| 3. On/Off switch                | 12. Source                                  |
| 4. FTM7                         | 13. Shutter                                 |
| 5. Shutter 2 connections        | 14. Bell jar                                |
| 6. Control/monitoring equipment | 15. Substrate                               |
| 7. Analogue device              | 16. Oscillator unit                         |
| 8. Shutter control panel        | 17. Long coaxial cable                      |
| 9. Cooling-water connections    | 18. Long coaxial cable to oscillator unit 2 |

รูป ผ2 แสดงระบบการติดตั้งเครื่อง FTM7





- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 1. Data/Rate display   | 7. Test button       |
| 2. Thickness display   | 8. Test LED          |
| 3. Units LEDs          | 9. Decrement button  |
| 4. Shutter status LEDs | 10. Increment button |
| 5. Run button          | 11. Status LEDs      |
| 6. Data button         | 12. Sensor LEDs      |

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงอนดิขสิทธิ์

รูป ผ3 แสดงหน้าจอส่วควบคุมการทำงานของเครื่อง FTM7

## ภาคผนวก 4

### การใช้ Mass flow Controller

#### 1. หลักการทำงานโดยทั่วไป

อุปกรณ์ MFC นี้จะใช้ในการควบคุมอัตราการไหลหรือการจ่ายก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศโดยมีการควบคุมการไหล , การเปิด-ปิด ด้วยวาล์ว และมีหน้าจอเพื่อแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซ ในขณะนั้นๆด้วย นอกจากนี้ยังสามารถปรับตั้งค่าเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซโดยใช้สัญญาณที่ให้จากภายนอก ซึ่งสัญญาณอ้างอิงจากภายนอกนี้สามารถใช้โหมดควบคุมแบบสัดส่วน โดยคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณจากภายนอก

สวิตช์ที่หน้าจอในแต่ละช่องควบคุมจะให้ override ของ flow control setpoint เพื่อบังคับให้วาล์วเปิดให้ก๊าซไหลผ่านทั้งหมด หรือปิดไม่ให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้เลย สำหรับค่าอัตราการไหลของก๊าซอื่นๆ ที่ไม่ใช่อากาศ จะทำได้โดยการตั้งค่าที่ด้านหลังของเครื่อง

#### 2. คุณสมบัติทั่วไปของเครื่อง MSC type 1511

1. หน้าจอแสดงผลแบบ 3 1/2 digits ( meter reads to 1999 )
2. ความแม่นยำของหน้าจอแสดงผล มีค่าเป็น 0.05% ของการอ่าน  $\pm 1$  count
3. สัญญาณเข้า ( แต่ละช่องสัญญาณ )
  - 3.1 Transducer signal : 0 - 5 Volts or 0 - 10 Volts
  - 3.2 External Reference : 0 - 5 Volts or 0 - 10 Volts range
4. สัญญาณออก ( แต่ละช่องสัญญาณ )
  - 4.1 DC output สามารถเลือกจาก Conditioned sensor signal ( 0 or 5 Volts full scale ) หรือสัญญาณปรับเทียบสำหรับก๊าซอื่นๆ ( สำหรับอากาศ สัญญาณจะอยู่ในช่วง 0 - 1 Volts )
  - 4.2 ความต่างศักย์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซจะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซให้มีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอ
  - 4.3 Valve off turns on transistor clamp จะทำให้ก๊าซไม่สามารถไม่ผ่านได้เลย
  - 4.4 + 15 VDC @ 40 MA
  - 4.5 -15 VDC @ 200 MA

**ภาคผนวก 5**  
**ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการ**  
**เคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม**

ตาราง ผ1 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม  
 อะลูมิเนียม กระแสดีสชาร์จคงที่เท่ากับ 0.5 A

Current	0.5A						
Pressure ( $\times 10^{-3}$ mbar)	Dep.Rate (nm/min)	Voltage (V)	Power (W)	Pressure ( $\times 10^{-2}$ mbar)	Dep.Rate (nm/min)	Voltage (V)	Power (W)
1.0	0	1602	4	1.0	2.8	245	106
1.5	0	1602	4	1.2	2.2	242	105
2.0	0	1602	4	1.4	1.7	240	105
2.5	0	1600	2	1.6	1.4	238	105
3.0	0	1600	2	1.8	1.4	237	105
3.5	1.2	1599	8	2.0	1.2	236	105
4.0	1.5	1596	14	2.2	1.2	236	105
4.5	2.4	1545	25	2.4	1.1	235	110
5.0	10.3	280	108	2.6	0.7	233	109
5.5	8.2	273	112	2.8	0.6	232	108
7.0	5.2	260	114	3.0	0.6	232	108

N.A. = ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากเกิดการอาร์ค และไม่อยู่ในสถานะพลาสมา

ตาราง ๗2 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม  
อะลูมิเนียม กระแสอิเล็กซาร์จคงที่เท่ากับ 0.75 A

Current	0.75A						
Pressure ( $\times 10^{-3}$ mbar)	Dep.Rate	Voltage	Power	Pressure ( $\times 10^{-2}$ mbar)	Dep.Rate	Voltage	Power
1.0	0	1626	4	1.0	7.8	237	149
1.5	0	1626	4	1.2	5.3	233	148
2.0	0	1626	4	1.4	3.7	231	148
2.5	0	1625	2	1.6	3.7	231	149
3.0	0	1625	3	1.8	2.7	230	150
3.5	1.2	1623	8	2.0	2.4	229	151
4.0	1.6	1563	14	2.2	1.5	229	155
4.5	2.3	1549	25	2.4	1.7	229	155
5.0	N.A.	N.A.	N.A.	2.6	1.4	228	158
5.5	15.7	263	163	2.8	1.4	228	159
7.0	10.5	250	158	3.0	1.3	227	159

N.A. = ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากเกิดการอาร์ค และไม่อยู่ในสถานะพลาสมา

ตาราง ผ3 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม  
อะลูมิเนียม กระแสดีสชาร์จคงที่เท่ากับ 1.0 A

Current	1.0A						
Pressure ( $\times 10^{-3}$ mbar)	Dep.Rate	Voltage	Power	Pressure ( $\times 10^{-2}$ mbar)	Dep.Rate	Voltage	Power
1.0	0	1648	4	1.0	9.7	237	212
1.5	0	1648	4	1.2	8.3	235	211
2.0	0	1648	4	1.4	5.4	230	209
2.5	0	1647	1	1.6	4.7	229	209
3.0	0	1646	2	1.8	3.5	228	209
3.5	1.3	1644	9	2.0	3.2	227	209
4.0	1.7	1565	14	2.2	2.9	226	210
4.5	2.4	1547	25	2.4	2.5	225	210
5.0	N.A.	N.A.	N.A.	2.6	2.4	224	210
5.5	N.A.	N.A.	N.A.	2.8	1.7	223	209
7.0	10.2	242	220	3.0	1.6	222	208

N.A. = ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากเกิดการอาร์ค และไม่อยู่ในสถานะพลาสมา

## ภาคผนวก 6

ผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการโกล์วดีสชาร์จ์  
กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ

ตาราง ผ4 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการโกล์วดีสชาร์จ์  
กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสดีสชาร์จ์คงที่เท่ากับ 0.5 A

O2 Flow Rate (sccm)	Voltage (V)	Power (W)	Dep. Rate (nm/min)	Voltage*	Power*	Dep. Rate*
0	283	179	20.3	282	178	20.1
0.14	284	178	20.1	282	178	20
0.28	280	182	16.4	282	177	19.7
0.42	283	183	17.8	283	178	19.9
0.57	276	181	15	284	178	18.6
0.71	272	179	13.7	285	182	21.2
0.85	262	176	11.1	290	184	17.9
0.99	262	177	11.3	240	153	1.5
1.13	225	157	1.6	219	152	0.9
1.27	223	156	1.4	217	151	1.1
1.42	223	155	1.1	215	150	0.9
1.56	221	154	0.9	212	149	0.9
1.70	212	148	0.8	207	147	0.8
1.84	207	144	0.5	205	144	0.5
1.98	205	143	0.5	205	143	0.3
2.12	205	143	0.5	205	143	0.3

\* ช่วงลดค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

ตาราง ผ5 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการ โกล์วดีสชาร์จ์  
กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสดีสชาร์จ์คงที่เท่ากับ 0.75 A

O2 Flow Rate (sccm)	Voltage (V)	Power (W)	Dep. Rate (nm/min)	Voltage*	Power*	Dep. Rate*
0	281	179	20.2	N.A.	N.A.	N.A.
0.14	280	179	20.2	273	170	20.3
0.28	278	176	18.7	275	173	19.6
0.42	272	174	18	272	172	18.8
0.57	270	173	16.2	270	172	16.3
0.71	269	172	16.2	274	176	17.9
0.85	267	170	15.9	225	157	0.7
0.99	234	163	1.3	224	157	0.6
1.13	232	158	0.8	223	157	0.6
1.27	225	157	0.5	223	157	0.6
1.42	223	155	0.5	220	154	0.5
1.56	222	155	0.5	219	153	0.5
1.70	219	153	0.5	219	153	0.5
1.84	218	152	0.4	218	153	0.5
1.98	215	150	0.1	215	151	0.4
2.12	212	148	0.1	212	148	0.1

\* ช่วงลดค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

N.A. ไม่สามารถบันทึกผลการทดลองได้ เนื่องจากอยู่ในสภาวะอาร์ค

ตาราง ผ6 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการ โกล์วดีสชาร์จ์  
กับค่าอัตราการไหลของรีแอคทีฟก๊าซ เมื่อกระแสดีสชาร์จ์คงที่เท่ากับ 1.0 A

O2 Flow Rate (sccm)	Voltage (V)	Power (W)	Dep. Rate (nm/min)	Voltage*	Power*	Dep. Rate*
0	260	241	18.5	N.A.	N.A.	N.A.
0.14	254	239	11	N.A.	N.A.	N.A.
0.28	252	239	5.5	272	248	14.8
0.42	252	239	5.1	270	248	14.7
0.57	253	240	4.7	206	192	0.6
0.71	254	241	3.5	202	188	0.7
0.85	205	189	0.8	198	184	0.4
0.99	196	182	0.8	198	184	0.5
1.13	194	180	1.2	198	184	0.6
1.27	196	182	1.1	198	184	0.7
1.42	198	184	0.9	198	184	0.9

\* ช่วงลดค่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

N.A. ไม่สามารถบันทึกผลการทดลองได้ เนื่องจากอยู่ในสภาวะอาร์ค



## ภาคผนวก 7

ตารางแสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์มาตรฐานเฟสต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Phases																			
Chi			Eta			Gamma			Kappa		Theta			Delta			Alpha (Corundum)		
d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl
2.40	40	311	4.6	40	111	4.56	40	111	6.2	30	5.70	2	200	7.6	4	101	3.479	75	012
2.27	20	222	2.8	20	220	2.80	20	220	4.5	20	5.45	10	001	6.4	4	102,004	2.552	90	104
2.11	30	321	2.40	60	311	2.39	80	311	4.2	10	4.54	18	201	5.53	4	111	2.379	40	110
1.98	20	400	2.27	30	222	2.28	50	222	3.04	40	2.837	80	400,401	5.10	8	112	2.165	<1	006
1.53	10	311 333	1.97	80	400	1.997	100	400	2.79	60	2.730	65	202,002	4.57	12	113	2.085	100	113
1.39	100	440	1.52	20	333	1.520	30	511	2.70	20	2.566	14	111	4.07	12	114,105	1.964	1	202
			1.40	100	440	1.395	100	440	2.57	80	2.444	60	111	3.61	4	115	1.740	45	024
			1.21	10	533	1.140	20	444	2.41	30	2.315	45	401,310	3.23	4	116	1.601	80	116
			1.14	20	444	1.027	10	731	2.32	40	2.257	35	402,202	3.05	4	107,214	1.546	3	211
			1.03	10	553	0.989	10	800	2.26	10	2.019	45	311,112	2.881	8	117	1.514	5	122
						0.884	10	840	2.16	10	1.9544	8	601	2.728	30	222	1.510	7	018
						0.806	20	844	2.11	80	1.9094	30	600,312	2.601	25	302,118	1.404	30	124
									2.06	30	1.7998	14	510	2.460	60	312	1.374	50	030
									1.99	40	1.7765	6	602,402	2.402	16	313	1.337	1	125
									1.95	20	1.7376	4	403	2.315	8	314,305	1.276	3	208
									1.87	60	1.6807	2	601	2.279	40	226	1.293	15	1.0.10
									1.82	30	1.6216	6	203,511	2.160	4	1.1.10	1.2343	7	119
ICDD n <sup>o</sup> 34-0493 13-0373 04-0880			ICDD n <sup>o</sup> 21-0010			ICDD n <sup>o</sup> 29-1486 29-0063 10-0425			1.74	20	1.5715	2	113	1.986	75	400	1.1898	7	220
									1.64	60	1.5426	25	313	1.953	40	0.0.12	1.1600	1	306
									1.54	10	1.5120	6	603	1.914	12	318	1.1470	5	223
									1.49	30	1.4883	25	113,801	1.827	4	319,2.2.10	1.1382	1	311

ตาราง ผ7 แสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์มาตรฐานเฟสต่างๆ (Santos et al , 2000:107)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Phases																			
Chi			Eta			Gamma			Kappa		Theta			Delta			Alpha (Corundum)		
d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl	d(A)	I/I <sub>0</sub>	hkl
									1.45	30	1.4526	25	020	1.810	8	426,3.1.11	1.1255	5	312
									1.43	80	1.4264	10	800,710	1.628	8	1.1.14	1.1246	3	128
									1.39	100	1.3883	100	712,512	1.604	4	513	1.0988	7	0.2.10
									1.34	30				1.538	8	1.1.15	1.0831	3	0.0.12
									1.12	10				1.517	16	523,516	1.0781	7	134
									1.06	10				1.456	8	440	1.0426	13	226
									1.04	5				1.407	50	4.0.12	1.0175	1	402
									1.02	5				1.396	100		0.9976	11	1.2.10
									1.01	40							0.9857		1.1.12
									0.994	20							0.9819	3	404
																	0.9431	<1	321
																	0.9413	<1	1.2.11
																	0.9345	3	318
																	0.9178	3	229
																	0.9076	13	324
																	0.9052	3	0.1.14
																	0.8991	7	410
																	0.8884	<1	235
											ICDD n <sup>0</sup>		ICDD n <sup>0</sup>			ICDD n <sup>0</sup>			ICDD n <sup>0</sup>
											04-0878		35-0121			16-0394			43-1484
													11-0517			04-0877			42-1468
													23-1009						10-0173

ตาราง ผ7(ต่อ) แสดงค่าสเปคตรัมของอะลูมิเนียมออกไซด์มาตรฐานเฟสต่างๆ (Santos et al , 2000:107)

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	ร.อ.พัฒนา เทพชโลธร
ที่อยู่	249/266 ม.11 ต.คูคต อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี
ที่ทำงาน	ภาควิชาฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ กองบัญชาการฝึกศึกษาทหารอากาศ ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 0-2534-4371
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2523	สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จาก โรงเรียนจันทร์ศึกษา
พ.ศ. 2529	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จาก โรงเรียนประจวบวิทยาลัย
พ.ศ. 2531	สำเร็จการศึกษาจาก โรงเรียนจ่าอากาศ
พ.ศ. 2537	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2544	ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2531	ช่างสื่อสาร หมวดแวนบิน บ.ใบพัด กองฝึก โรงเรียนการบิน กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2538	ผู้ช่วยนายทหารห้องปฏิบัติการฯ ภาควิชาฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ
พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน	นายทหารห้องปฏิบัติการฯ ภาควิชาฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ กองบัญชาการฝึกศึกษา ทหารอากาศ