



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่มีต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและ
สมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB

**Influence of DC Magnetron Sputtering on Structural and Magnetic Properties
of CoFeB Thin Films**

นายราชศักดิ์ ตักदानุภาพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)//.....อิทธิพลของกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่มีต่อสมบัติ
เชิงโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB.....
แหล่งเงิน//.....โครงการวิจัยเงินรายได้ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล.....
ประจำปีงบประมาณ.....2556.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....150,000.....บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556.....
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
นายราชศักดิ์ สักดานุภาพ (หัวหน้าโครงการ) สังกัดวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางแม่เหล็ก CoFeB ถูกเตรียมขึ้นสภาวะเงื่อนไขของกระบวนการดีซี แมกนีตรอนสเป็คเตอรืง ลงบน
แผ่นรองรับ กระจกและ Si-wafer ภายใต้สภาวะสนามแม่เหล็กในขณะที่เคลือบฟิล์ม เพื่อศึกษาผลกระทบที่
เกิดขึ้นต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สภาพการยึดติดของฟิล์ม สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติแม่เหล็ก
ของฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในขณะที่เคลือบโดย
ฟิล์มจะเปลี่ยนโครงสร้างจาก อสัณฐานไปเป็นโครงสร้างแบบผลึกบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมมีพลังงาน
จลน์สูงขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นผลึก การเตรียมฟิล์มลงแผ่นรองรับ Si-wafer ให้สมบัติเชิงโครงสร้างที่
ดีกว่าการเตรียมลงบนกระจก จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่า ฟิล์มบาง CoFeB
ที่เคลือบลงบนกระจกให้ผลต่อลักษณะฟิล์มที่เรียบ ขนาดของเกรนที่เล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบลง
บนแผ่นรองรับ Si-wafer ผลการทดสอบสภาพการยึดติดของฟิล์มบาง CoFeB พบว่า ฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่น
รองรับกระจก หลุดลอกออกได้ง่ายกว่าฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับ Si wafer นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าที่
เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อสภาพการยึดติดที่ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม การใส่
สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแผ่นรองรับในขณะที่เคลือบฟิล์ม ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเป็น
แม่เหล็กให้กับฟิล์ม CoFeB โดยที่สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามทิศทาง
ของสนามแม่เหล็กกับส่งผลโดยตรงต่อ สมบัติพื้นผิวและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB โดยอิทธิพล
ของสนามแม่เหล็กทำให้ฟิล์มมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น และค่าความต้านทานไฟฟ้าลดต่ำลง สรุปได้ว่าเรา
สามารถเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB สำหรับประยุกต์ใช้ ในงานต่าง ๆ ได้เหมาะสม

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง CoFeB, ดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง, ความต้านทานไฟฟ้า

Research Title: Influence of DC Magnetron Sputtering on Structural and Magnetic Properties of CoFeB Thin Films

Researcher: Mr. Rachsak Sakdanuphab

College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

Amorphous CoFeB magnetic thin films have attracted increasing attention owing to their use in magnetic heads, magnetic sensors, and planar inductors at high-frequency range that involve giant magnetoresistance (GMR), tunneling magnetoresistance (TMR), and magnetoresistance random access memory (MRAM). In this work, we investigate the influence of sputtering parameters and applied magnetic directions on the CoFeB film properties. CoFeB thin films were prepared on Ti coated on glass and Si substrates by unbalanced dc magnetron sputtering. It was found that the structure of a substrate affects to crystal formation, surface morphology and adhesion of CoFeB thin films. The X-Ray diffraction patterns reveal that as-deposited CoFeB thin film at low sputtering power was amorphous and would become crystal when the power increased. The increase in crystalline structure of CoFeB thin film is attributed to the crystalline substrate and the increase of kinetic energy of sputtering atoms. Atomic Force Microscopy images of CoFeB thin film clearly show that the roughness, grain size, and uniformity correlate to the sputtering power and the structure of substrate. The CoFeB thin film on glass substrate shows a smooth surface and a small grain size whereas the CoFeB thin film on Si substrate shows a rough surface and a slightly increases of grain size. Sticky Tape Test on CoFeB thin film deposited on glass substrate indicates the adhesion failure with the high sputtering power. The results suggest that the sputtering power affects to intrinsic stress of CoFeB thin film. The different magnetic directions, both in plane and out of plane were treated during the deposition processes. The films with and without applied magnetic fields, show the similar manner of amorphous structure on both substrate. However, the substrates and magnetic directions obviously affect to surface morphology and electrical resistivity. The films deposited on glass substrate show smooth surface and high resistivity compared with that on Si substrate. The surface roughness and the electrical resistivity of the films decrease with the applied magnetic field in plane and out of plane.

Keywords : CoFeB thin films, dc magnetron sputtering, electrical resistivity, surface roughness

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์.ดร. อภินันท์ ธนชยานนท์ คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ
ข้อมูล ที่เล็งเห็นถึงความสำคัญและให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และความเอาใจใส่ของผู้ช่วย
ศาสตราจารย์.ดร.ศิริเดช บุญแสง ที่ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหาเรื่องงานวิจัยมาโดยตลอด ตลอดจน
ขอขอบคุณบุคลากรของวิทยาลัยฯ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และสุดท้ายขอขอบคุณ ดร.อาภาภรณ์ สกุลกา
ระเวก ที่อยู่เคียงข้าง เข้าใจและเป็นกำลังใจในการทำงาน การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ วิทยาลัยนวัตกรรมการ
จัดการข้อมูลประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

นายราชศักดิ์ สักดานภาพ
(.....)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	7
2.2 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron Sputtering).....	8
2.3 ปรากฏการณ์ MR.....	11
2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม.....	20
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	42
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	54
4.1 ค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดลองหาอัตราการเคลือบของฟิล์มบาง CoFeB.....	58
4.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB.....	65
4.4 การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB.....	69
4.5 สมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB	72
4.6 ศึกษาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางที่มีการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางต่างกัน.....	76
4.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	92
ประวัตินักวิจัย.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ MR ชนิดต่าง ๆ.....	16
3.1 สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการเคลือบเพื่อศึกษาผลของกำลังไฟฟ้า.....	50
3.2 สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการเคลือบเพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็ก.....	51
4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้ในสภาวะเงื่อนไข.....	55
4.2 แสดงตารางสภาวะเงื่อนไขเพื่อหาเวลาในการเตรียมฟิล์ม.....	59
4.3 ค่าอัตราการเคลือบที่คำนวณได้จากค่าความหนาของฟิล์มบางที่วัดได้ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน.....	63
4.4 เวลาที่คำนวณได้เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางตามความหนาที่ต้องการ.....	63
4.5 สภาวะเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน.....	67
4.6 แสดงค่าความหยาบที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบาง CoFeB.....	72
4.7 แสดงผลของปริมาณอนุภาคฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เหลืออยู่บนวัสดุรองรับ.....	75
4.8 แสดงค่าความหยาบ (R_q ; nm) ที่วัดได้จาก AFM ของฟิล์มบาง CoFeB.....	81
4.9 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB.....	87

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ.....	7
2.2 กลไกการเกิดสปีดเตอริง.....	9
2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....	10
2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก.....	11
2.5 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	12
2.6 แสดงการกระเจิงของอิเล็กตรอน ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร.....	13
2.7 แสดงทิสแมกนีไคเซชันของฟิล์มบางหลายชั้น เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์.....	14
2.8 โคอะแกรมแสดงการทะลุผ่านที่ขึ้นกับสปินของอิเล็กตรอน.....	14
2.9 แสดงออกไซด์ของแมงกานีสที่เจือด้วยโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์.....	15
2.10 แสดงส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีเซนเซอร์ GMR เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก.....	18
2.11 หัวอ่าน GMR และ หัวอ่าน TMR.....	19
2.12 โครงสร้างของหัวอ่าน GMR และ หัวอ่าน TMR.....	20
2.13 ตำแหน่งในการวางตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD.....	20
2.14 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายใน โครงผลึก.....	21
2.15 a) X-ray diffraction b) Intensity peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุ.....	22
2.16 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์.....	22
2.17 แสดงหลักการเกิดรังสีเอ็กซ์.....	23
2.18 แสดงโครงสร้างหลักของ VSM (Vibrating Sample Magnetometer).....	24
2.19 แสดงส่วนประกอบต่างๆในการทำงานของเครื่อง AFM.....	25
2.20 แสดง Constant Current Source.....	25
2.21 แสดง Digital Multimeter.....	26
2.22 แสดง 4-point probe.....	26
3.1 ชุดเครื่องเคลือบฟิล์มบางสปีดเตอริง.....	33
3.2 อ่างล้างความถี่สูง Elmasonic.....	36
3.3 ตู้ดูดอากาศ.....	37
3.4 ตู้ดูดความชื้น.....	38

3.5 เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน	39
3.6 เครื่องวัดความหนาฟิล์ม	39
3.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	40
3.8 เครื่องวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	41
3.9 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น	41
3.10 ชุดเครื่องมือวัดโพรบวัดสัขั้ว	42
3.11 วัสดุรองรับกระจกสไลด์ และวัสดุรองรับซิลิกอน	43
3.12 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะอาดกระจกขึ้นงาน	45
3.13 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะอาดชิ้นงานซิลิกอน เวเฟอร์	46
3.14 แสดงระบบบิตชีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	49
3.15 แสดงไดอะแกรมการเตรียมฟิล์มภายใต้สภาวะเงื่อนไขการใส่สนามแม่เหล็ก	52
4.1//กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน	56
4.2//กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน	57
4.3 การทดสอบสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB	58
4.4 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง W001	60
4.5 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง W002	60
4.6 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง W003	61
4.7 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง W004	61
4.8 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง W004	62
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้า	64
4.10 กราฟแสดงการจำลองความสัมพันธ์เพื่อหาความหนาของฟิล์มที่กำลังไฟฟ้า	65
4.11 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์	67
4.12 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์	68
4.13 แสดงลักษณะเกรนของฟิล์มบาง CoFeB เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์	71
4.14 แสดงลักษณะเกรนของฟิล์มบาง CoFeB เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน	71
4.15 ผลการยึดเกาะฟิล์มบางบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์	74
4.16 ผลการยึดเกาะฟิล์มบางบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์	75
4.17 กราฟ XRD ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบน Ti/กระจกสไลด์	77
4.18 กราฟ XRD ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบน Ti/ซิลิกอนเวเฟอร์	78

4.19 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บน Ti/กระจกสไลด์	79
4.20 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน	81
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB	83
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB	86
4.23 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ)	88
4.24 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ)	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive Industry) เป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเป็นที่ต้องการเป็นอย่างมากสำหรับผู้บริโภค เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้เพียงในคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ยังมีการนำไปใช้ในอุปกรณ์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องดิจิทัล เป็นต้น เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในการใช้ประโยชน์จากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทางผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องลดขนาดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ลงรวมถึงเพิ่มขีดความสามารถในการบันทึกข้อมูลให้มากขึ้น ซึ่งได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใช้ โดยหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่น่าสนใจอยู่ก็คือ การพัฒนาเทคโนโลยีหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสเทนซ์ (Magnetoresistance Effect) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า ปรากฏการณ์ MR ซึ่งกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุประเภทโลหะตัวนำในสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ MR ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางด้านเทคโนโลยีบันทึกข้อมูล เช่น หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่ม (Random access memories) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้ในอุปกรณ์แมกเนติกเซนเซอร์ (Magnetic Sensors) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีจุดเด่นที่สำคัญ เช่น

- มีความแม่นยำสูง เนื่องจากเซนเซอร์ MR มีฮิสเทอรีซิสน้อย และมีความเป็นเชิงเส้นสูง ทำให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- มีความแน่นอนของสัญญาณสูง และอายุการใช้งานยาวนาน เนื่องจากเป็นเซนเซอร์แบบของแข็งที่สามารถรับสัญญาณได้โดยไม่ต้องสัมผัสสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย
- มีความไวสูง เซนเซอร์ MR มีความไว และมีสัญญาณขาออกสูงกว่า เซนเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall-effect sensor) ทำให้เซนเซอร์ MR สามารถนำไปใช้วัดขนาดของสนามแม่เหล็กโลกได้

ปัจจุบันเซนเซอร์ MR ได้มีการนำไปใช้เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก จากแผ่นบันทึกข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเซนเซอร์ MR ได้ทำให้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีความก้าวหน้าที่สำคัญ และเพิ่มขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้มากขึ้น การพัฒนาของหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์แบบ MR นั้นเริ่มต้นจากเซนเซอร์การเหนี่ยวนำ โดยหัวอ่านแบบแรกเป็นแบบ Anisotropic MR ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมระหว่างกระแสไฟฟ้า และทิศทางแมกนีโตเซชันของวัสดุ อันเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างสปินและออร์บิต ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ต่อมาได้มีการพัฒนาหัวอ่านเป็นแบบ Giant MR โดยมีโครงสร้างแบบฟิล์มบางหลายชั้นที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โร ที่

สลัดด้วยฟิล์มโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โร แต่ละชั้นจะมีทิศสวนทางกัน และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้ทิศแมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โร จัดเรียงไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางลดลง ในปัจจุบันหัวข้อนี้ได้พัฒนาเป็นแบบ TMR โดยมีข้อได้เปรียบกว่าหัวอ่านแบบ GMR คือให้สัญญาณที่ดีกว่า ความไวที่สูงกว่า และที่สำคัญมีขนาดเล็กกว่ามาก ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของสื่อบันทึกข้อมูลเพิ่มสูงมาก ซึ่งปรากฏการณ์ TMR นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่เป็นฉนวน (Insulator) บางในระดับนาโนเมตรแทรกระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โร

ชั้นของฟิล์มบางที่เป็นหัวใจสำคัญของ TMR คือ ฟิล์มบางแม่เหล็กเฟอร์โร และฟิล์มบางฉนวนไฟฟ้าของ ซึ่งจากการวิจัยพบว่าโครงสร้างของฟิล์มบางฉนวน MgO ที่มี $CoFeB$ เป็นฟิล์มบางแม่เหล็กเฟอร์โรนั้นให้ค่า Tunnel Magneto Resistance (TMR) ที่กว้างมาก และมีศักยภาพสูงมากในการนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ TMR สิ่งสำคัญที่จะทำให้อัตราส่วนของ TMR มีค่าสูงนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการเตรียมได้เช่น สมบัติในเชิงโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มบาง เป็นต้น โดยทางผู้วิจัยเองได้สนใจในกระบวนการการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบโดยใช้เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering) และมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง $CoFeB$ ที่เหมาะสมและให้ผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างสมบัติพื้นผิว สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มบาง รวมถึงการศึกษาถึงผลของวัสดุรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $CoFeB$ ที่มีต่อสมบัติดังกล่าวข้างต้น ด้วยการเคลือบโดยใช้เทคนิคดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ที่อุณหภูมิห้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง $CoFeB$ โดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง $CoFeB$ ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สภาวะเงื่อนไขในกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง $CoFeB$ ที่เหมาะสมต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง $CoFeB$ เช่น สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวและสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น

1.2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลของวัสดุรองรับที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง $CoFeB$ เช่น สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวและสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรริงที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB
- 1.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้และเกี่ยวข้องในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB
- 1.3.3 ศึกษาขั้นตอนและหลักการในกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปสเตอริง
- 1.3.4 ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ (สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติการยึดเกาะ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติแม่เหล็ก) ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์และวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปสเตอริง ที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะเงื่อนไขการเตรียมที่ทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ กำลังไฟฟ้า ความดัน และการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเข้าไป ในขณะที่ทำการเตรียมฟิล์ม ศึกษาเงื่อนไขสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำอุปกรณ์ TMR
- 1.3.5 ศึกษาและวิเคราะห์ผลของวัสดุรองรับ (Substrate) ในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางเพื่อใช้ทำอุปกรณ์ TMR
- 1.3.6 ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB เช่น เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เทคนิควัดทางแม่เหล็กโดยอาศัยการสั่นตัวอย่าง (VSM) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบาง CoFeB ได้

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ทบทวนและสำรวจวรรณกรรม
- 1.4.2 เตรียมฟิล์มบาง Ti ลงบนกระจกขนาด 1" x 1" และบน Si wafer โดยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสเปสเตอริงสำหรับเป็นแผ่นรองรับฟิล์มบาง CoFeB
- 1.4.3 เตรียมฟิล์มบาง CoFeB โดยใช้เงื่อนไขของการเตรียมที่แตกต่างกัน ได้แก่ กำลังไฟฟ้า ความดัน และอุณหภูมิ
- 1.4.4 ตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างและองค์ประกอบโดยเทคนิค XRD และ EDX ของฟิล์มบาง CoFeB/Ti
- 1.4.5 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1
- 1.4.6 ตรวจสอบสมบัติของพื้นผิวโดยเทคนิค SEM และ AFM ของฟิล์มบาง CoFeB
- 1.4.7 ตรวจสอบสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB
- 1.4.8 ศึกษาอิทธิพลของการอบร้อนในสุญญากาศ (annealing) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

แม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB													
สรุปและเขียน รายงานโครงการ													

1.5 กรอบแนวคิดการวิจัย

ฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ CoFeB เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับหัวอ่านสัญญาณแม่เหล็ก เนื่องจากให้ค่า MR ที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร่า ในสภาวะและเงื่อนไขของการเตรียมที่แตกต่างกัน ได้แก่ กำลังไฟฟ้า และความดันเป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นในการเตรียมฟิล์มนั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการเลือกสภาวะและเงื่อนไขที่ดีและเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในงานนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้ ดังนั้นกรอบแนวคิดในงานวิจัยนี้คือ การปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติการยึดเกาะและสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มค่า MR โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางหรือการเตรียมฟิล์มภายใต้สนามแม่เหล็กนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวของฟิล์มบาง CoFeB ได้ ซึ่งสมบัติต่าง ๆ นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ภายในโครงสร้างของตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างที่มีอยู่ในฟิล์มบาง CoFeB และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติเชิงโครงสร้างผลึกและระนาบของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.4.2 การตรวจวิเคราะห์ความหยาบพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว

1.4.3 การตรวจวิเคราะห์การยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นรองรับด้วยเทคนิคการลอกฟิล์มด้วยเทปกาว (Sticky Tape Test) ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดเชิงคุณภาพ (Qualitative measure) การยึดเกาะของการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ที่ง่ายและรวดเร็วที่สุดวิธีหนึ่ง

1.4.4 การตรวจวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มเคลือบด้วยเทคนิคแบบสี่จุด (4-point probe) เป็นการวัดกระแสเพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB ด้วยโพรบวัดกระแส (Current probe) โดยให้กระแสในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก ผ่านการจ่ายกระแสจากเครื่อง Current Source

1.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample Magnetometer: VSM) ใช้เพื่อศึกษาหาสมบัติฮิสเทอรีซิสเชิงแม่ของฟิล์มบาง CoFeB ในการตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กของสารตัวอย่าง

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าในฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง นั้นสามารถวิเคราะห์หาสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติไฟฟ้า สมบัติการยึดเกาะและสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้จากทั้ง 5 เทคนิคดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นหากเราสามารถทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมขึ้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกันได้ เราก็จะสามารถเลือกเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้งานในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบ TMR ได้ด้วย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 พัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลให้กับประเทศ

1.6.2 พัฒนานวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ในระดับปริญญาโท

1.6.3 องค์ความรู้ใหม่ด้านวัสดุศาสตร์ของแมกนีตริกเซนเซอร์

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

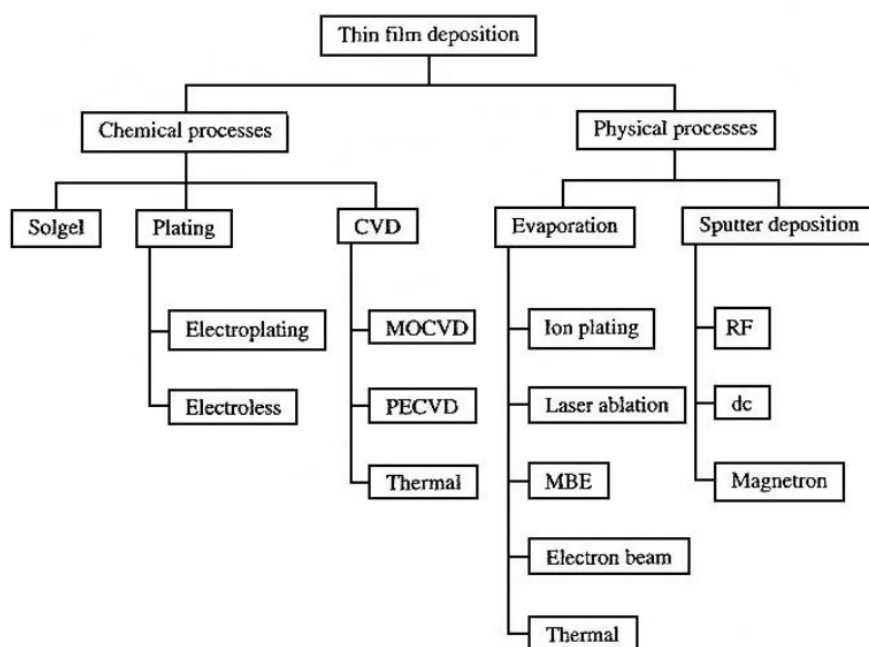
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.1.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง

วิธีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายแบบ (กมล เอี่ยมพนากิจ. 2547: 9) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี ปริมาณ และคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางนั้นแบ่งได้ 2 วิธีดังรูป 2.1 คือ

1. วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซ และเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นรองรับ ซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition) และวิธี โซลเจล (Sol-gel)

2. วิธีทางกายภาพ (Physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับ โดยการใช้ความร้อน (Thermal) และระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสูญญากาศ

ที่มา: Milton Ohring. (1997). *The Materials Science of Thin Films*. p 2. 12

ในส่วน of วิธีทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งไอสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนไปเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับจะไม่สูง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริง ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไอออนสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งชนแผ่นรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อไอออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นรองรับก็ฝังตัวแน่นลงในแผ่นรองรับมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับดีกว่า

2.2 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron Sputtering)

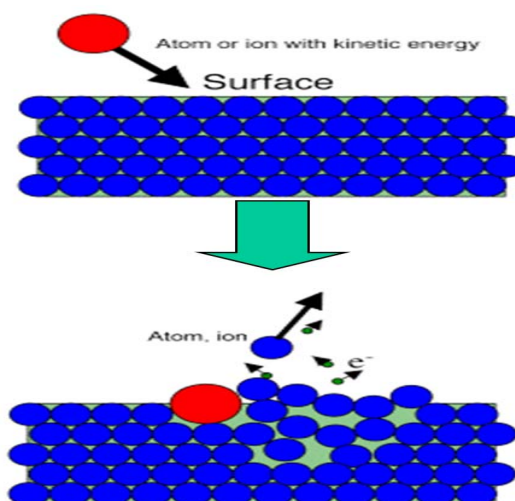
2.2.1 กระบวนการเกิดการสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุที่ต้องการทำฟิล์มบางถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังรูปที่ 2.2 (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547: 10) แต่เนื่องจากในการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากใช้กระบวนการโกลดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (dc magnetron sputtering) เป็นต้น ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการ สปัตเตอริง คือ

- มีสารเคลือบเป็นเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ
- มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูง

เกิน 10 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เพื่อใช้ในกระบวนการสเปตเตอริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมทั่วไป คือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการการสเปตเตอริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์ การชนระหว่าง 2 อนุภาค ที่ให้การส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

- อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มบางเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Iron gun) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูง และให้ไอออนได้ในพื้นที่แคบ กระบวนการสเปตเตอริงทั่ว ๆ ไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharge) ในการให้ไอออนในกระบวนการเคลือบ



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดสเปตเตอริง

ที่มา: G.J. Mankey, Lecture 9. Sputter Deposition

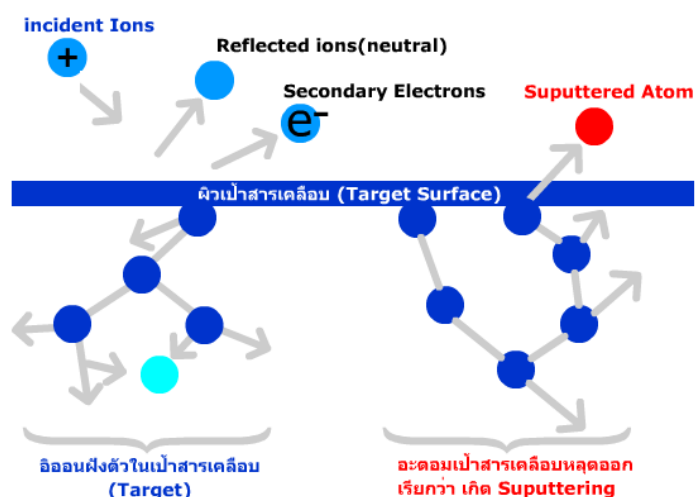
2.2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.3 ดังนี้

- การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ
- การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron emission) จากการชนของ

ไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

- การฝังตัวของไอออน (Ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน (1 keV) สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวบนเป้าสารเคลือบ CoFeB
- การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นว่า Altered surface layers
- การสปีดเตอร์ การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการ สปีดเตอร์

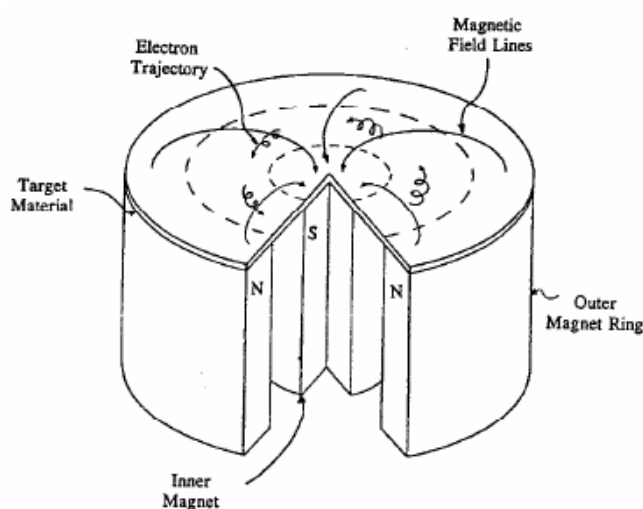


รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

ที่มา: Chapman, B. (1980). Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching.

ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB นั้นจะอาศัยการสปีดเตอร์ดังกล่าวข้างต้น โดยมีเป้าสารเคลือบเป็น วัสดุ CoFeB สำหรับก๊าซที่ใช้ในระบบคือก๊าซอาร์กอนโดยที่ไอออนของก๊าซเฉื่อยอาร์กอนจะมีหน้าที่ทำให้เกิดการสปีดเตอร์ขึ้น โดยหากเราจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางขนานกับผิวหน้าของเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าจะช่วยกักทางเดินของอิเล็กตรอนให้อยู่บนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ อำนาจของสนามแม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นแนวโค้ง ดังรูปที่ 2. 4 ทำให้การไอออไนซ์ที่เกิดจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับก๊าซเฉื่อยมีค่า

สูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้เกิดความต่อเนื่องที่มากขึ้นในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นลักษณะการชนผิวเป้าสารเคลือบซ้ำ ๆ ทำให้เกิด Secondary electron ในปริมาณที่มากขึ้น และยังพบว่าการเพิ่มสนามแม่เหล็กด้วยความเข้มสนามเพียง 500 เกาส์ ทำให้ไอออนในระบบเพิ่มขึ้นผลคือระบบมีอัตราการเคลือบสูงกว่าเดิม เท่า ในขณะที่ 10^{-3} ถึง 10^{-2} สภาวะดิสชาร์จเกิดได้ที่มีความดันต่ำประมาณ ถึง 10^{-2} ทอร์ อันมีผลทำให้ฟิล์มมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น มีปริมาณก๊าซเฉื่อยแทรกตัวในฟิล์มน้อยลง การเพิ่มสนามแม่เหล็กให้กับระบบการเคลือบแบบนี้เรียกว่า แมกนีตรอน สปัตเตอริง (Magnetron Sputtering)



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ที่มา: Vossen, J.L.; & Kerns W. (1978). Thin Film Processes. p 552

2.3 ปรากฏการณ์ MR

เป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนสามารถทำให้สมบัติทางกายภาพรวมทั้งความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้สนามแม่เหล็กก็สามารถทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเพิ่มขึ้น หรือลดลงได้ เช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุประเภทโลหะตัวนำในสนามแม่เหล็ก เป็นที่รู้จักกันมานานกว่า ปี เมื่อมีการค้นพบ 150 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (Magnetoresistance Effect) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า ปรากฏการณ์ MR ซึ่งการพบครั้งแรกเป็นการเพิ่มขึ้นของความต้านไฟฟ้าในโลหะตัวนำเมื่อวางในสนามแม่เหล็กและต่อมาได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ MR ชนิดอื่น ๆ อีกหลายชนิด ซึ่งขนาดของปรากฏการณ์ MR คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

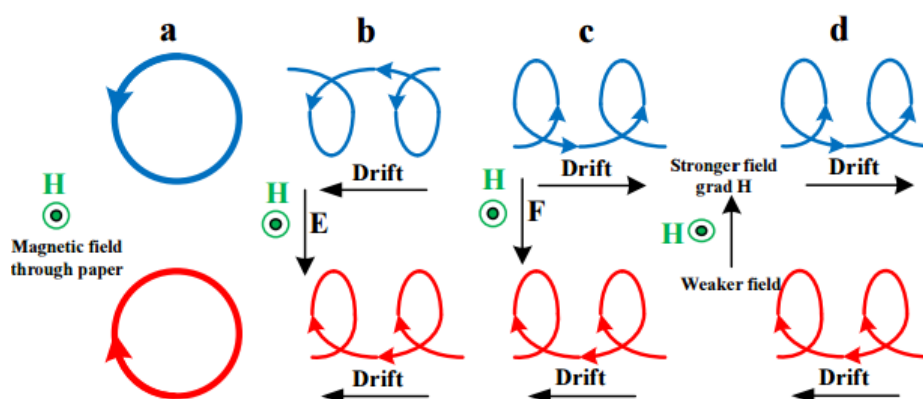
$$\%MR = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ $R(0)$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือ สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ และ $R(H)$ คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุภายใต้สนามแม่เหล็ก

2.3.1 ชนิดของปรากฏการณ์ MR

ปรากฏการณ์ MR แต่ละชนิดพบในวัสดุที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านไฟฟ้าในแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือโครงสร้างในวัสดุ และกลไกในการเกิดปรากฏการณ์ MR แต่ละชนิดก็แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถแบ่งชนิดของปรากฏการณ์ MR ตามกลไกการเกิดได้ ชนิด ดังนี้ 5

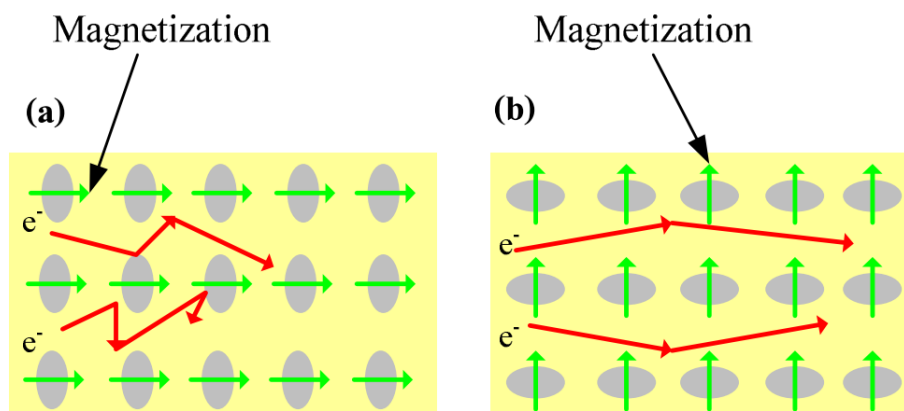
1. ปรากฏการณ์ OMR (Ordinary MR) เกิดจากแรงลอเรนซ์ของสนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน ทำให้มีเส้นทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป การลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.12 นั่นคือเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนที่มากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการชนในโครงผลึกที่มากขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานของวัสดุตัวนำเพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดในวัสดุตัวนำ กึ่งตัวนำและวัสดุที่มีสารตัวนำเป็นองค์ประกอบ และเปอร์เซ็นต์ของการเกิดปรากฏการณ์ OMR นี้มีค่าไม่มากนัก



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ที่มา: วัชร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 22

1. ปรากฏการณ์ AMR (Anisotropic MR) ขนาดของปรากฏการณ์ MR ชนิดนี้จะขึ้นกับมุมระหว่างกระแสไฟฟ้าและทิศทางการแมกนีไทเซชัน (Magnetization) ของวัสดุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสปินและออร์บิต (Spin-orbit interaction) ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ทำให้อัตราการกระเจิงของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป กลไกการเกิดปรากฏการณ์ AMR สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.13 เมื่อทิศทางการแมกนีไทเซชันขนานกับทิศกระแสไฟฟ้า (ดังรูป 2.13(a)) จะเกิดการกระเจิงมากขึ้น ทำให้ความต้องการของระบบมีค่ามากขึ้น และเมื่อทิศทางการแมกนีไทเซชันตั้งฉากกับทิศกระแสไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีค่าลดลง

เนื่องจากการเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนน้อยลง (ดังรูป 2.13(b))

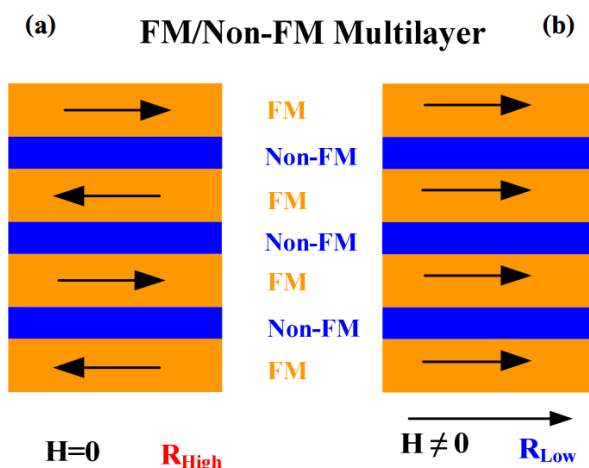


รูปที่ 2.6 แสดงการกระเจิงของอิเล็กตรอน ในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เมื่อ

(a) แมกนีไทเซชันขนานกับทิศของกระแส และ (b) แมกนีไทเซชันตั้งฉากกับทิศของกระแส

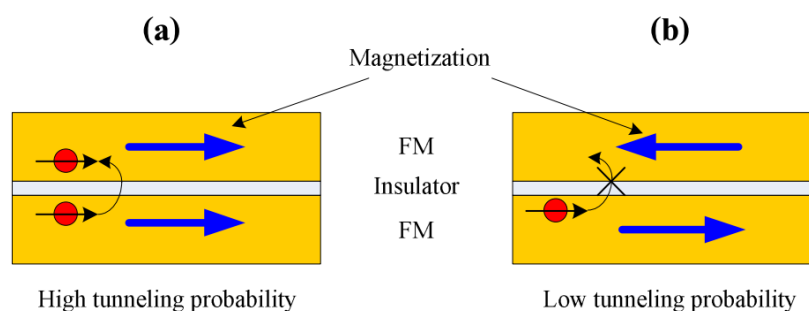
ที่มา: วชิร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 23

2. ปรากฏการณ์ GMR (Giant MR) ในฟิล์มบางหลายชั้นที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โร (FM) ที่สลับด้วยแม่พิมพ์โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Non-FM) ฟิล์มบางหลายชั้น เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ทิศทางการแมกนีไทเซชันของชั้น FM แต่ละชั้นจะมีทิศสวนทางกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14(a) และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับฟิล์มบางหลายชั้น ดังรูปที่ 2.14(b) ทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FM จะจัดเรียงกันไปในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางหลายชั้นลดลง การลดลงของความต้านทานไฟฟ้าในปรากฏการณ์ GMR เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่ต่างกันของสปินอัพ (Spin up) และสปินดาวน์ (Spin down) หรือ เรียกว่า การกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน (Spin dependent scattering) โดยความต้านทานไฟฟ้าที่วัสดุลดลงได้มากถึง 80% ในสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 แสดงทิศแมกนีไตเซชันของฟิล์มบางหลายชั้น เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ และ (b) ในสนามแม่เหล็กมีค่าใด ๆ ที่มา: วชิร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 24

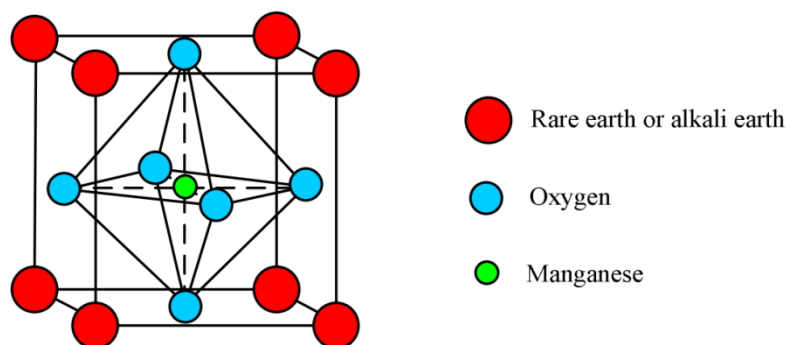
3. ปรากฏการณ์ TMR (Tunnel MR) ถูกพบในวัสดุที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่เป็นฉนวน (Insulator) บาง ๆ ประมาณ 1 นาโนเมตรแทรกระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าในปรากฏการณ์ TMR มีขนาดสูงถึง 100% การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ TMR เกิดจากการทะลุผ่านที่ขึ้นกับสปิน (Spin-dependent tunneling) ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นในการทะลุผ่านชั้นฉนวนของอิเล็กตรอนสปินอัพและสปินดาวน์ที่มีค่าแตกต่างกัน สามารถแสดงไดอะแกรมการเกิดปรากฏการณ์ TMR ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยความน่าจะเป็นของการทะลุผ่านชั้นฉนวนของอิเล็กตรอน จะขึ้นกับทิศแมกนีไตเซชันของชั้น FM นั่นคือ อิเล็กตรอนจะสามารถทะลุผ่านชั้น FM หนึ่งไปยังชั้น FM อีกชั้นหนึ่งได้ง่าย เมื่อชั้น FM ที่อยู่ถัดไปมีทิศแมกนีไตเซชันเดียวกันกับชั้นแรกแสดงดังรูปที่ 2.15(a) และอิเล็กตรอนจะไม่มีโอกาสทะลุผ่านไปยังชั้น FM ถัดไป หากชั้น FM ถัดไปมีทิศแมกนีไตเซชันที่สวนทิศกันดังรูปที่ 2.15(b)



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมแสดงการทะลุผ่านที่ขึ้นกับสปินของอิเล็กตรอน เมื่อ (a) แมกนีไตเซชันชั้น FM ขนานกัน และ (b) แมกนีไตเซชันของชั้น FM สวนทิศกัน

ที่มา: วชิร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 25

4. ปรากฏการณ์ CMR (Colossal MR) พบในวัสดุที่เป็นออกไซด์ของแมงกานีสที่เจือด้วยโครงสร้างแบบสารเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ CMR แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยวัสดุ CMR จะเป็นฉนวนที่อุณหภูมิสูง แต่จะเปลี่ยนมาเป็นโลหะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างโลหะ-ฉนวน (Metal-insulator transition temperature: T_p) ในเฟสโลหะและอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) วัสดุ CMR จะมีพฤติกรรมเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุ CMR ในสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าในวัสดุ GMR และ TMR แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ CMR มีข้อจำกัดคือ จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ปรากฏการณ์ CMR เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน-โฟนอน ทำให้เกิดการบิดรูปแบบจาห์น-เทลเลอร์ (Jahn-Teller distortion) ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสแม่เหล็กเฟอร์โรไปเป็นเฟสแม่เหล็กพารา



รูปที่ 2.9 แสดงออกไซด์ของแมงกานีสที่เจือด้วยโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

ที่มา: วชิร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 26

โดยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า กลไกการเกิดและโครงสร้างวัสดุของปรากฏการณ์ MR ชนิดต่าง ๆ แสดงเชิงเปรียบเทียบในตารางที่ 2.1

ปรากฏการณ์	ความต้านทาน	โครงสร้างวัสดุ	กลไกการเกิด
OMR	เพิ่มขึ้น	โลหะและสารกึ่งตัวนำ	แรงลอเรนซ์
AMR	เพิ่มขึ้น/ ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก	การเข้าคู่กันของสปิน-ออร์บิต
GMR	ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก/โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก	การกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน

TMR	ลดลง	สารเฟอร์โรแมกเนติก/ฉนวน	การทันเนลผ่านที่ขึ้นกับ สปีน
CMR	ลดลง	แมงกานีสออกไซด์	การเปลี่ยนเฟสโลหะ ฉนวน

ตาราง 2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ MR ชนิดต่าง ๆ

ที่มา: วัชร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 26

2.3.2 การประยุกต์ปรากฏการณ์ MR ในเซนเซอร์

เซนเซอร์ MR มีจุดเด่นหลายอย่างจึงทำให้มีการวิจัยวัสดุ MR อย่างกว้างขวางและต่อเนื่อง ซึ่งข้อเด่นของเซนเซอร์ MR มีดังนี้

- มีความแม่นยำสูง เนื่องจากเซนเซอร์ MR มีฮิสเตอร์ีซิสน้อย และมีความเป็นเชิงเส้นสูง ทำให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เหมาะสำหรับการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง และให้สัญญาณที่มีคุณภาพดีกว่าเซนเซอร์แบบเก่า ไม่ว่าจะเป็นนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวัดมุม ความยาว หรือวัดกระแสไฟฟ้าก็ตาม
- ความละเอียดสูง เซนเซอร์ MR มีความละเอียดสูงซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการควบคุมคุณภาพความละเอียดสูง เช่น เป็นตัวเข้ารหัสสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อน ประกอบกับเป็นเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณรบกวนต่ำและให้สัญญาณขาออกที่สูง ทำให้ได้ค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise-ratio) ที่ดีเยี่ยม
- มีความแน่นอนของสัญญาณสูง และอายุการใช้งานยาวนาน เซนเซอร์ MR เป็นเซนเซอร์ที่เชื่อถือได้ เนื่องจากเป็นเซนเซอร์แบบของแข็งที่สามารถรับสัญญาณได้โดยไม่ต้องสัมผัส และจากการทดสอบคุณภาพในช่วงสัญญาณในย่านต่าง ๆ ตามมาตรฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ จึงเป็นที่ยืนยันได้ถึงเสถียรภาพและเชื่อถือได้ของสัญญาณจากเซนเซอร์ MR
- ทนต่อความชื้น ฝุ่นละออง และน้ำมันสูง เซนเซอร์ MR ทนทานต่อทั้งอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำรวมไปถึงน้ำมัน สิ่งสกปรก หรือ แรงสั่นสะเทือน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้กับสารกัมมันตรังสี หรือในสุญญากาศ เช่น ที่ระยะ 400 กิโลเมตร บนผิวดาวอังคารซึ่งมีอุณหภูมิ -120 องศาเซลเซียส และหรือที่ก้นบ่อน้ำมันที่ระยะ 10 กิโลเมตร ใต้พื้นผิวโลกที่มีอุณหภูมิสูง 200 องศาเซลเซียส
- ความไวสูง เซนเซอร์ MR มีความไว และมีสัญญาณขาออกสูงกว่าเซนเซอร์ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall-effect sensor) ทำให้เซนเซอร์ MR สามารถนำไปใช้วัดขนาดสนามแม่เหล็กโลกที่ประยุกต์ใช้เป็นเข็มทิศ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เนื่องจากสามารถตรวจรับสัญญาณได้โดยไม่ต้องสัมผัส

- ประหยัดพลังงาน เซนเซอร์ MR สามารถออกแบบได้ มีความต้านทานภายในสูง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับแบตเตอรี่ที่มีขายทั่วไป และสามารถออกแบบให้ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย ๆ โดยใช้หลักการวัดแบบชดเชย ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยและให้ประสิทธิภาพของพลังงานสูง

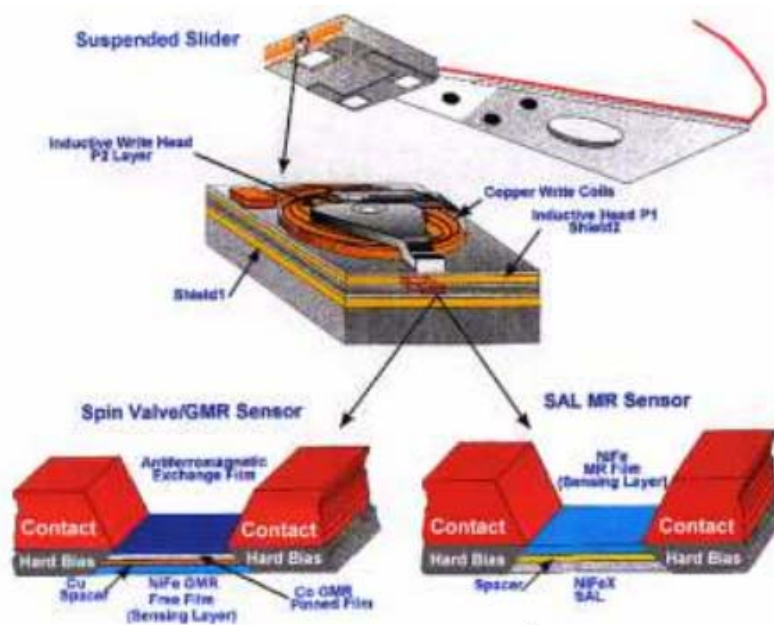
2.3.3 การประยุกต์ใช้การวัดปริมาณ

ในปัจจุบันนี้เซนเซอร์ MR นั้นสามารถนำไปประยุกต์ในการใช้วัดปริมาณหลัก ๆ ได้ 4 ปริมาณด้วยกันคือ

1. เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic field measurement) ซึ่งสามารถนำไปวัดสนามแม่เหล็กค่าน้อย ๆ ได้อย่างแม่นยำ ที่ประมาณ 50A/m หรือ 62.5 ไมโครเทสลา เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเข็มทิศในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ สวิตช์แบบไม่สัมผัส โดยส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ด้านธรณีวิทยา ใช้ในการสำรวจแก๊ส น้ำมันและทรัพยากรธรรมชาติอื่น ๆ รวมไปถึงการเป็นเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กของเข็มทิศที่เป็นฟังก์ชันในนาฬิกาข้อมือ
2. เซนเซอร์วัดความยาวและตำแหน่ง (Displacement and position measurement) สามารถใช้วัดความยาวหรือการเปลี่ยนแปลงความยาว และตำแหน่งที่มีความแม่นยำในย่านไมโครเมตร เซนเซอร์ประเภทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกล้องถ่ายภาพ ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ และทางด้านการศึกษา
3. เซนเซอร์วัดกระแส (Current measurement) เป็นเซนเซอร์วัดกระแสโดยสามารถวัดกระแสสูงสุดได้ถึง 100 แอมป์ ส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
4. เซนเซอร์วัดมุม (Angle measurement) สามารถนำไปวัดค่ามุมที่แน่นอน การเพิ่มขึ้นของมุม การเปลี่ยนแปลงมุม หรือความเร็วรอบความละเอียดในการวัดน้อยกว่า 0.5 องศา เซนเซอร์วัดมุมส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังมีการนำเซนเซอร์ MR ไปใช้เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก จานแผ่นบันทึกข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเซนเซอร์ MR ได้ทำให้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์มีความก้าวหน้าที่สำคัญ และเพิ่มขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้มากขึ้น หัวอ่านในฮาร์ดดิสก์เริ่มต้นจากเซนเซอร์จากการเหนี่ยวนำ โดยเริ่มใช้หัวอ่านแบบ MR ในปี 1996 โดยหัวอ่าน MR แบบแรกจะเป็นแบบ AMR เนื่องจากสามารถอ่านค่าสัญญาณสนามแม่เหล็กในปริมาณน้อย ๆ ได้ดีกว่าการเหนี่ยวนำ ดังนั้นทำให้มีงานวิจัยและพัฒนาหัวอ่านแบบ MR อย่างต่อเนื่องโดยมุ่งให้ความสนใจการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเซนเซอร์แบบ CMR และ GMR แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ CMR แม้จะให้สัญญาณที่สูง แต่มีข้อจำกัด คือเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน งานวิจัยจึงยังอยู่ใน

ระดับห้องปฏิบัติการ และยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม หัวอ่านยุคต่อมาได้เปลี่ยนมาเป็นแบบ GMR ด้วยเหตุผลที่สำคัญคือหัวอ่าน GMR ให้สัญญาณขาออกและความไวมากกว่าหัวอ่านแบบ AMR มาก และล่าสุดปัจจุบันเป็นหัวอ่านแบบ TMR โดยข้อได้เปรียบของหัวอ่านแบบ TMR เทียบกับหัวอ่าน GMR คือให้สัญญาณที่ดีกว่า ความไวสูงกว่าและที่สำคัญมีขนาดเล็กกว่า ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ผิวของสื่อบันทึกข้อมูลเพิ่มสูงมากในปัจจุบัน โดยในรูปที่ 2.17 แสดงถึงโครงสร้างหลักของฮาร์ดดิสก์แสดงส่วนของหัวอ่าน และหัวเขียนที่ใช้หัวอ่านแบบ GMR



รูป 2.10 แสดงส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีเซนเซอร์ GMR เป็นหัวอ่านสัญญาณสนามแม่เหล็ก
ที่มา: วัชรวิ รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 27

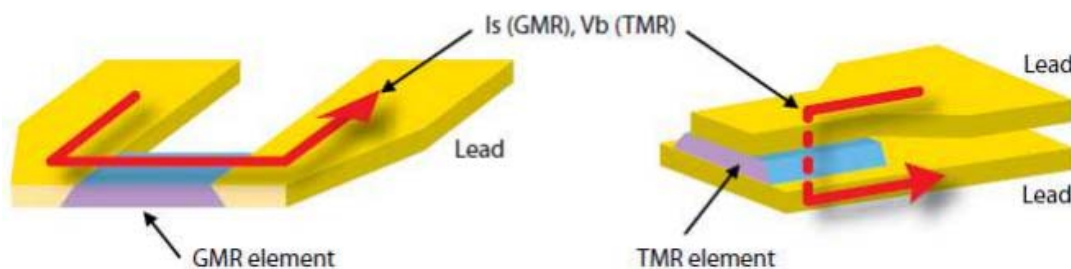
(a)

CIP element (GMR (Spin-Valve))

(b)

CPP element (TMR)

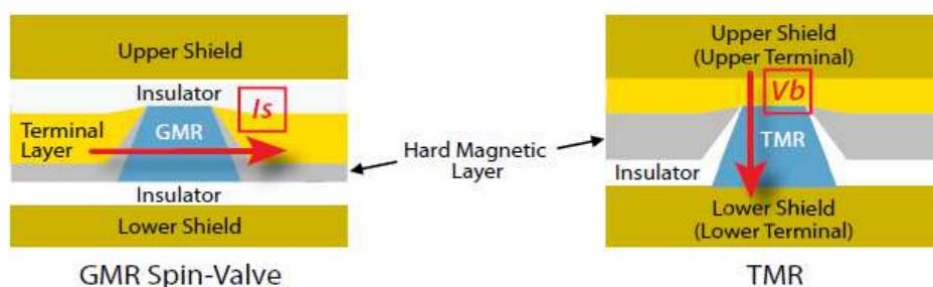
Current Perpendicular to plane



รูป 2.11 (a) หัวอ่าน GMR ที่มีกระแสในระนาบเดียวกับ GMR เซนเซอร์ และ
(b) หัวอ่าน TMR ที่มีกระแสตั้งฉากกับ TMR เซนเซอร์

ที่มา: วัชรวิ รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก: ปรากฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 27

บริษัท IBM ได้นำหัวอ่านแบบ MR มาใช้เป็นครั้งแรกเนื่องจากความสามารถในการอ่านข้อมูลของเซนเซอร์ MR ทำให้เกิดการพัฒนามหาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์เพิ่มขึ้นประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ต่อมาในปี 2000 ได้มีการพัฒนาหัวอ่านแบบ GMR มาแทนหัวอ่านแบบ MR จากงานวิจัยของบริษัท ฮิตาชิ (Hitachi) พบว่าทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยฮาร์ดดิสก์ขนาดประมาณ 11 GB และในปี 2005 บริษัทเซ็กเทได้เริ่มใช้หัวอ่านแบบ TMR กับฮาร์ดดิสก์ขนาด 400 GB ทั้งนี้ในปี 2006 ทางบริษัทฟูจิซี (Fujitsu) ได้เผยแพร่ผลงานเกี่ยวกับการออกแบบหัวอ่าน TMR ที่ออกแบบให้กระแสตั้งฉากกับระนาบ (CPP) ของฟิล์มเซนเซอร์เปรียบเทียบกับหัวอ่าน GMR ที่เป็นแบบกระแสในระนาบ (CIP) ของฟิล์มเซนเซอร์ ซึ่งรูปที่ 2.18 แสดงถึงลักษณะหัวอ่าน GMR แบบ CIP และหัวอ่าน TMR แบบ CPP โดยโครงสร้างส่วนประกอบของหัวอ่านทั้งสองแบบดังรูปที่ 2.19 ทางฟูจิซีได้ทดสอบประสิทธิภาพหัวอ่าน TMR ที่ออกแบบพบว่าหัวอ่าน TMR มีขนาดเล็กลง มีความไวสูงขึ้น มีความละเอียดสูง และลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้ดี อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในอนาคตอาจจะมีหัวอ่านแบบใหม่ที่มีความสามารถและประสิทธิภาพดีกว่าหัวอ่านแบบเดิม หรือต่อไปอาจจะเป็นยุคของหัวอ่าน GMR แบบ CPP ก็อาจจะเป็นไปได้



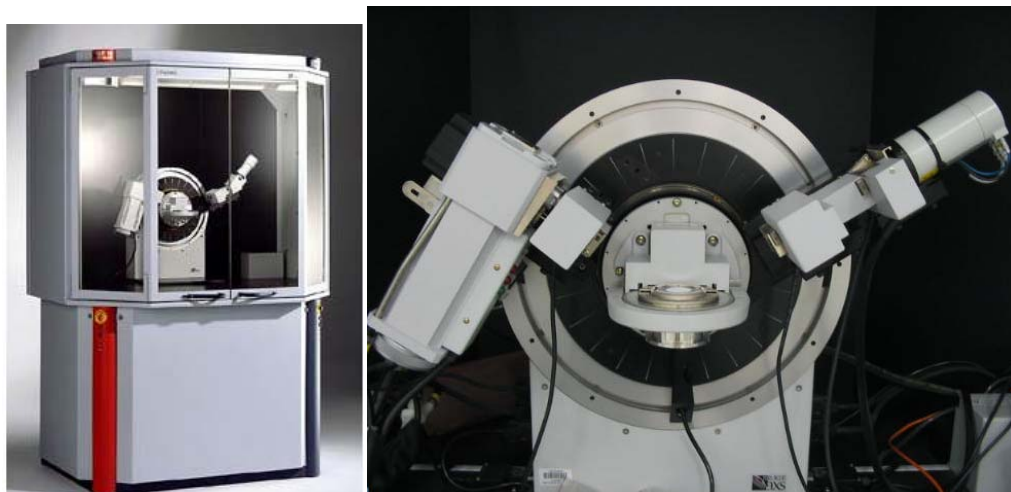
รูป 2.12 โครงสร้างของ (a) หัวอ่าน GMR ที่มีกระแสในระนาบ และ
 (b) หัวอ่าน TMR ที่มีกระแสตั้งฉากกับระนาบ
 ที่มา: วัชร รัตนสกุลทอง. (2555). การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุในสนามแม่เหล็ก:
 ปραฏการณ์ MR, วารสารฟิสิกส์ไทย, หน้า 28

2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มที่เตรียมได้จากการทดลองจะนำมาวัดสมบัติต่างๆดังนี้

2.4.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกันโดยการวางตัวอย่างชิ้นงานตามตัวอย่างดังรูปที่ 2.20 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งในการวางตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

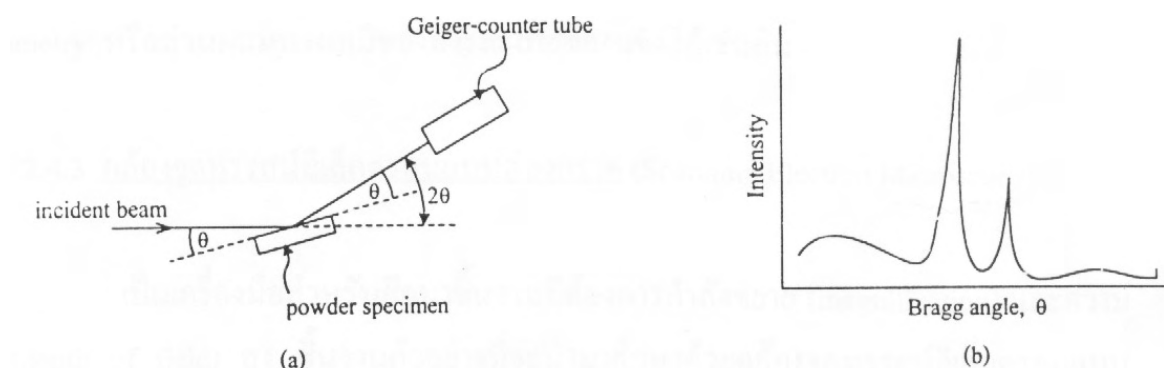
ที่มา: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/Picture_XRD1.htm

1. หลักการและวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน เท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ได้ถูกเสนอในรูปแบบสมการ ของ Bragg's Law

ในปี พ.ศ. 2549 Oliver Kluth และคณะ (Oliver Kluth; et al. 2006: 311-316) ได้ศึกษาเปรียบเทียบฟิล์ม CoFe ที่เตรียมด้วยเทคนิค อาเอฟ และ ดีซี แมกนีตรอน สเปดเตอริงบนกระจก เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของฟิล์ม พบว่าฟิล์ม AZO ที่ใช้เทคนิค อาเอฟ สเปดเตอริง ความหนาของฟิล์มและอุณหภูมิของแผ่นรองรับมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความดันและออกซิเจนในการสเปดเตอริง สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปดเตอริงในระบบสถิต (Static) ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วง $2.3 - 5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ในช่วงความดัน $0.04 - 4 \text{ Pa}$ โดยออกซิเจนที่ใส่เข้าไปในปริมาณน้อยแทบจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยฟิล์มมีความโปร่งใสสูงที่อุณหภูมิแผ่นรองรับต่ำ และพบมีการกระเจิงของแสงหลังจาก การกัดฟิล์มบางให้ขรุขระโดยวิธีทางเคมี ฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปดเตอริงระบบพลวัต (Dynamic) ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วง $8 - 40 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระบบสถิต

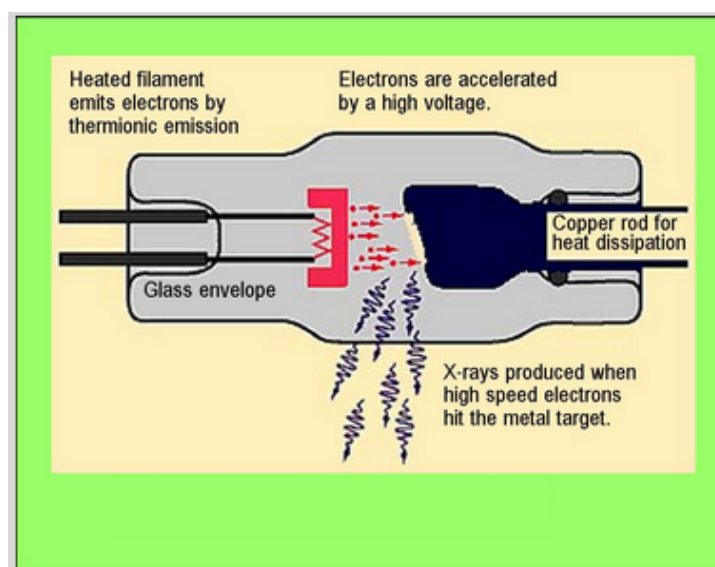
ในปี พ.ศ. 2549 S. U. Jen และคณะ (S. U. Jen และ Y. D. Yao, Y. T. Chen, J. M. Wu, และ C. C. Lee, T. L. Tsai และ Y. C. Chang, 2006: JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 99, 053701) ได้ทำการศึกษาฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคสเปดเตอริงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD ได้ว่าโครงสร้างหลักของฟิล์มบางตัวอย่งนั้นเป็นโครงสร้างออสถุฐาน แต่ยังมีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนอยู่เป็นบางส่วนซึ่งในฟิล์มบางตัวอย่างดังกล่าวได้แสดงพีกสูงสุดโครงสร้างผลึกของ CoFe ที่ระนาบ 110 แต่เนื่องจากในงานการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัยนั้นพบว่าโครงสร้างออสถุฐานของฟิล์มบางนั้น ส่งผลทำให้ค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้านั้นมีค่าสูงกว่ามาตรฐานทั่วไปที่ $100 \mu\Omega\text{cm}$ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางให้ดีขึ้นจึงได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มที่ความดันก๊าซอาร์กอนต่างกันจนได้ความดันก๊าซอาร์กอนที่สามารถทำให้ฟิล์มบาง แสดงโครงสร้างผลึกของ CoFe ที่ $P_{Ar} = 5 \times 10^{-3}$ ทอร์ และจากค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (Temperature coefficient) ของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นพบว่าที่สภาวะเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม ที่อุณหภูมิทั้งสองที่มากกว่าอุณหภูมิห้องนั้น ($T_1=61^\circ\text{C}$ และ $T_2=172^\circ\text{C}$) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างออสถุฐานที่เป็นโครงสร้างหลักในฟิล์มบาง CoFeB ให้เป็นโครงสร้างแบบผลึกได้นอกจากนั้นยังพบอีกว่าความหนาของฟิล์มส่งผลต่อสภาพการอ้อมตัวทางแม่เหล็ก (M_s) ค่าแมกนีโตสตริกชันสูงสุด (λ_s) และค่าโคเออร์ซิวิตี (H_c) อีกด้วยและจากการวัดความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดโอเจอร์ (Auger Depth Profile analysis) นั้นพบว่าฟิล์มบางตัวอย่าง CoFeB นั้นเกิดชั้นออกไซด์ CoO_x ความหนาประมาณ $15 \text{ \AA}$ ขึ้นที่บริเวณผิวบนสุดของฟิล์มบาง CoFeB และยังพบชั้นออกไซด์ CoO_x ความหนาประมาณ $20 \text{ \AA}$ อีกหนึ่งชั้นที่บริเวณใกล้กับชั้นประสานระหว่าง CoFeB กับวัสดุรองรับกระจกสไลด์อีกด้วย โดยออกไซด์ CoO_x นั้นอาจจะแสดงสมบัติพาราแมกเนติกได้ แต่เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity effect) ขึ้นระหว่างชั้นของ



รูป 2.15 a) X-ray diffraction b) Intensity peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนแสง ที่มา: P. P. Ewald. (1999). The principal of X-Ray diffraction. หน้า 82

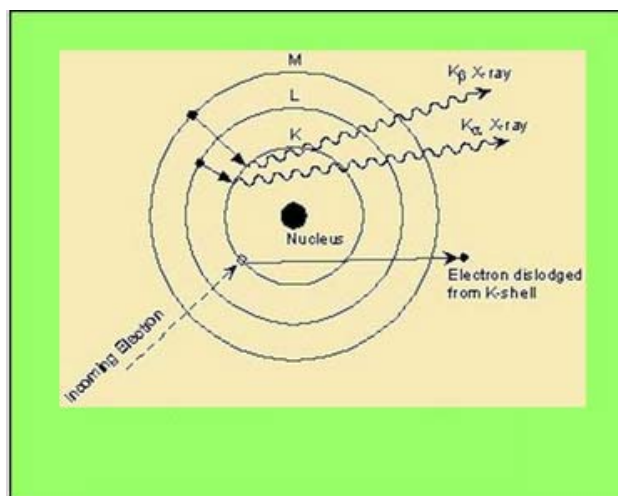
2. X-ray เกิดขึ้นได้อย่างไร

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (รูปที่ 2.23) โดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้หัวในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.24 รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วย อุปกรณ์ตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ (detector)



รูป 2.16 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm



รูป 2.17 แสดงหลักการเกิดรังสีเอกซ์

ที่มา: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm

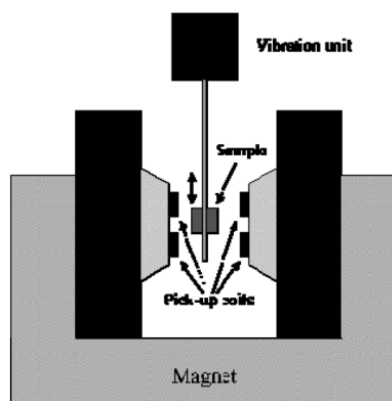
2.4.2 เทคนิคแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating sample magnetometer :VSM)

1. หลักการทำงานของเครื่อง VSM

สมบัติฮิสเทอรีซิสเชิงแม่เหล็กโดยใช้เครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) กำหนดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกแก่สารตัวอย่างสูงสุด $10 \pm \text{kG}$ ที่อุณหภูมิห้อง

2. เทคนิค Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

เทคนิค VSM เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่าง ในการตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กของสารตัวอย่างโดยเทคนิคนี้ สารตัวอย่างที่บรรจุในแท่งทรงกระบอกที่เรียกว่า Sample Holder จะถูกวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กส่งผ่านตลอดเวลา โดยสนามแม่เหล็กนี้ถูกสร้างขึ้นและควบคุมโดยแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ที่อยู่ด้านข้าง ดังรูปที่ 2.25 เมื่อสารตัวอย่างอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดสภาพแม่เหล็ก หรือเรียกว่าถูกแมกนีไทซ์ โดยสารตัวอย่างที่ถูกแมกนีไทซ์จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่าน Pick-up coil ดังนั้น (ตามกฎหมายของฟรายเดย์) VSM จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในการหาค่าแมกนีไทเซชันของสารตัวอย่างโดยอาศัยการสั้นของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ VSM ยังสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในขณะที่มีการแมกนีไทเซชันได้อีกด้วย เมื่อมีการให้สนามที่คงที่ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคนี้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์แม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไป (Applied Field) ซึ่งข้อมูลที่ต้องการนำไปใช้ในการวิเคราะห์จึงเป็นค่าแมกนีไทเซชัน ดังนั้นจึงต้องมีการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างทุกครั้ง และนำมาหารกับค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่วัดได้ จึงจะได้ค่าแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไป (Applied Field)



รูป 2.18 แสดงโครงสร้างหลักของ VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

ที่มา: <http://www.teco-rene-koch.com/highlights.html>

2.4.3 เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)

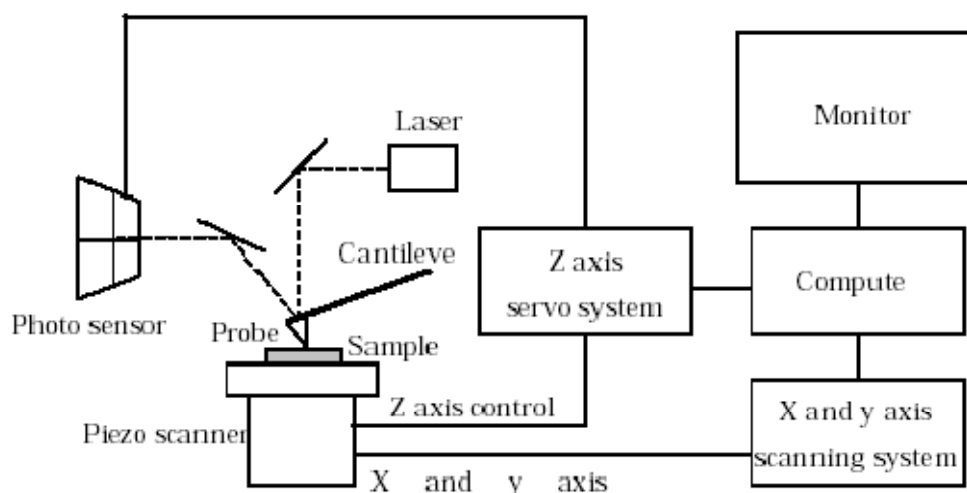
ใช้ในการศึกษาพื้นผิวและความหนาจริงของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการวิจัย สำหรับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.26 นั้นแสดงให้เห็นถึงเข็มที่ใช้ในการสแกนจะติดแน่นกับปลายด้านหนึ่งของคานซึ่งจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนว X และ Y โดยเริ่มต้นจะทำการปรับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนที่คาน และสะท้อนไปยังโฟโตดีเทกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยโฟโตไดโอด 4 ตัวและเมื่อเลื่อนชิ้นงานหรือเข็มมาสัมผัสหรือเข้าใกล้กันจะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมของเข็มกับอะตอมของชิ้นงานซึ่งมีขนาดในระดับนาโนนิวตัน คานจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนว Z ทำให้ตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลง และสัญญาณนี้จะส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แล้วเครื่องคอมพิวเตอร์จะประมวลผลสัญญาณที่ได้รับออกมาเป็นภาพ 3 มิติบนจอแสดงผลสำหรับการทำงานของเครื่อง AFM นี้โดยทั่วไปจะแบ่งการทำงานเป็น 2 โมด ได้แก่

1. Static mode

การทำงานในโหมดนี้ เข็มที่ติดกับส่วนคานจะถูกสแกนไปบนพื้นผิวของวัตถุ โดยแรงดึงดูดและแรงผลักที่กระทำต่อเข็มจะทำให้ส่วนของคานเกิดการเบี่ยงเบน และขนาดของการเบี่ยงเบนนี้จะเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำระหว่างเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ การทำงานในโหมดนี้ปลายเข็มอาจจะสัมผัสหรือไม่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุที่ถูกสแกนก็ได้

2. Dynamic mode

การทำงานในโหมดนี้ ส่วนของคานจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ และเมื่อเข็มสแกนไปบนพื้นผิว อันตรกิริยาระหว่างปลายเข็มกับพื้นผิวของวัตถุจะทำให้แอมพลิจูด, เฟสหรือความถี่ของการสั่นของส่วนคานมีการเปลี่ยนแปลง ในระหว่างสแกน ปลายเข็มอาจสัมผัส (tapping) หรือไม่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุ (non-contact)



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบต่างๆในการทำงานของเครื่อง AFM

ที่มา: พัฒนา เทพชโลธร (2548). การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน
สปีดเตอริง, หน้า 36

2.4.4 เทคนิคโพรบวัดสี่ขั้ว (4-point probe)

โพรบวัดสี่ขั้วนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดสภาพความต้านทานของฟิล์มตัวอย่างที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างของโพรบวัดสี่ขั้วประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเรียงกัน 4 ขั้วซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากัน ซึ่งชุดโพรบวัดสี่ขั้วมาตรฐานที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้เป็นของบริษัท Signatone โดยการป้อนกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าคู่นอกด้วยแหล่งกำเนิดกระแสอิมพีแดนซ์สูงแล้วทำการวัดโวลต์เตจตกคร่อมขั้วไฟฟ้าคู่ในจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานของพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ ซึ่งในการทำงานของโพรบวัดสี่ขั้วนี้ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งหมด 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. Constant Current Source เป็นเครื่องที่ผลิตจาก Keithley รุ่น Model 220 Programmable Current Source ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยหลักการทำงานของเครื่องนี้คือ เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับจ่ายกระแสโดยต่อกับโพรบคู่นอก กระแสที่ค่าของกระแสมากที่สุดที่สามารถใช้ได้จะขึ้นอยู่กับสมการ $V=IR$



รูป 2.20 แสดง Constant Current Source ที่มา: วตาพร ลีลาพตะ (2553). การพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วย 4-Point Probe, หน้า 22

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัยโดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลอง ได้แก่ เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี วิธีการเตรียมฟิล์มบาง การศึกษา การวัดและการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
2. ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์(H_2O_2)
3. อะซิโตน (Acetone)
4. น้ำสบู่
5. น้ำยาล้างจาน
6. แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ (99.999%) จากบริษัท ที ไอ จี จำกัด ซึ่งจะใช้เป็นแก๊สสำหรับ สปีตเตอร์ (Sputter Gas)
7. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) หรือทั่วไปเรียกกันว่าน้ำ DI เป็นน้ำที่ผ่านการ กรองไอออน ใช้เรซินเป็นตัวกรอง โดยผ่าน Ion Exchange เพื่อจับทั้งไอออนบวกและไอออนลบออกจากน้ำ จึงทำให้ได้น้ำที่ไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ และเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอย่างแท้จริง เพราะ โมเลกุลที่เหลืออยู่จะมีเพียงโมเลกุลของน้ำ H_2O เท่านั้น โดยใช้น้ำชนิดนี้ในขั้นตอนการทำความสะอาด แผ่นรองรับแก้วและซิลิกอนในห้องปฏิบัติการ เพราะเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์ขนาดต่างๆ
2. ถังมือยางแบบไม่มีแปรง (ไร้ฝุ่น)
3. กระดาษทรายเบอร์ 100
4. คีมปากคีบ
5. ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจนพร้อมหัวเป่า
6. ภาชนะเก็บชิ้นงาน
7. นาฬิกาจับเวลา
8. มัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeter)

9. วัสดุรองรับเป็นวัสดุที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง ใช้กระจกสไลด์ใสและซิลิกอน เวเฟอร์ (100) มีผิวเรียบขนาด 1x1 นิ้ว
10. เป้าสารเคลือบ CoFeB (Target) ในอัตราส่วน Co: Fe:B เท่ากับ 40:40:20 มีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 1/4 นิ้ว มีความบริสุทธิ์ 99.995%
11. เป้าสารเคลือบไทเทเนียม (Ti) ในอัตราส่วน Co:Fe:B เท่ากับ 40:40:20 มีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 1/4 นิ้ว มีความบริสุทธิ์ 99.995%
12. เครื่องสเปกโตรริง ระบบ ดีซี แมกนีตรอน สเปกโตรริง ของวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องเคลือบฟิล์มบางสเปกโตรริง

ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มีส่วนประกอบสำคัญ คือ

ก. ระบบเครื่องสูบลูญากาศ

ระบบเครื่องสูบลูญากาศทำหน้าที่สูบลูอากาศออกจากภาชนะลูญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบลู 2 ชนิด คือเครื่องสูบลูญากาศโรตารี (Rotary pump) มีหน้าที่ในการสร้างลูญากาศขั้นต้นให้กับภาชนะลูญากาศและลูบลความดันต่ำของปั้มแพร่ไอน้ำมัน สามารถสร้างลูญากาศภายในภาชนะ

สุญญากาศให้มีความดันต่ำประมาณ 10^{-2} mbar และเครื่องสูบลมไอน้ำมีหน้าที่สูบลมอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศลงได้ อยู่ในระดับ $10^{-5} - 10^{-6}$ mbar

ข. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber)

การเคลือบฟิล์มบางจะกระทำอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าโดยมีฝาปิด/เปิดเพื่อให้ชิ้นงานอยู่ด้านบน มีช่องหน้าต่างกระจกเพื่อใช้สังเกตระหว่างกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อสามารถควบคุมการทำงานระหว่างกระบวนการสปัตเตอริงได้

ค. อิเล็กโตรดและหัวแมกนีตรอน

หัวแมกนีตรอนเป็นแบบทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและขั้วอิเล็กโตรดซึ่งทำจากทองแดง และส่วนทองแดงนี้จะใช้สำหรับติดตั้งเป้าสารเคลือบโดยมีตัวยึดทำจากเหล็กกล้ามีลักษณะเป็นวงแหวนยึดด้วยสกรูโดยรอบจำนวน 6 จุด มีซิลด์ซึ่งทำจากเหล็กกล้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว ครอบอยู่เพื่อป้องกันหัวแมกนีตรอนระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยมีแผ่นปิดอยู่ด้านหลังของเป้าสารเคลือบ และใช้เป้าสารเคลือบและแท่นจับวัสดุรองรับเป็นอิเล็กโตรด

ง. ระบบหล่อเย็น

ระบบหล่อเย็นนี้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยน้ำสามารถปรับอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำถึง 15 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเครื่องสูบลมไอน้ำ หัวแมกนีตรอนและเป้าสารเคลือบ โดยการต่อท่อน้ำจากด้านหลังของถังน้ำหล่อเย็นเข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็นทางด้านล่างของระบบสุญญากาศ และปั๊มไอน้ำขึ้น เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำเย็นระหว่างเครื่องสูบลมไอน้ำ หัวแมกนีตรอนและเป้าสารเคลือบกับถังน้ำหล่อเย็น

จ. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบฟูลเวฟ สามารถปรับความต่างศักย์ได้ 0-700 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0-2 แอมแปร์ ใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด เพื่อทำให้เกิดการ โกลดติสซาร์จ (ก๊าซอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออน (และสนามไฟฟ้านี้จะเร่งไอออนที่เกิดขึ้นนำไปสู่การเกิดกระบวนการสปัตเตอริง) มีโหมดการทำงานแบ่งเป็น 3 โหมด คือ Power regulate, Current regulate และ Voltage regulate มีระบบป้องกันการอาร์คโดยการตรวจวัดสถานะของโพล

ฉ. ระบบป้อนแก๊ส

ประกอบด้วยวาล์ว 2 ทางทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราการไหลหรือเปิด/ปิดการจ่ายก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีส่วน Mass flow controller ที่ควบคุมการทำงานโดยผ่านตัว Control Unit ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่เข้าสู่ระบบจะถูกป้อนจากถังแก๊สผ่านวาล์ว 2 ทางไปยัง Mass Flow Controller ก่อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ซึ่งแก๊สทั้งสองชนิดจะไหลผ่านท่อที่แยกออกจากกัน แก๊สอาร์กอนจะไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศบริเวณอิเล็กโทรดและหัวแมกนีตรอน ทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าเป่าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดกระบวนการสเปคโตรริงที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างทั่วถึง ส่วนแก๊สออกซิเจนจะไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศบริเวณแท่นรองชิ้นงานเพื่อที่สามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบที่ตกไปยังชิ้นงานที่ได้ดียิ่งขึ้น

13. อ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic Bath) ยี่ห้อ Elmasonic รุ่น E30H วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นระบบทำความสะอาดอุปกรณ์เครื่องใช้โดยใช้ระบบเสียง Ultrasound ซึ่งเป็นเสียงที่อยู่ในระดับความถี่ 15-400 KHz และต้องใช้สารละลายที่เหมาะสมพร้อมกันด้วย การทำความสะอาดโดยระบบนี้จำเป็นต้องมีสารละลายทำความสะอาดที่เหมาะสมเพราะหลักการทำงานของเครื่องคือ การช่วยให้สารละลายที่จะทำการชะล้างทำความสะอาดมีประสิทธิภาพสูงสุด เครื่อง Ultrasonic นั้นมีหลักการทำงานคือ ส่งคลื่นความถี่สูงลงสู่สารละลายที่ใช้ชะล้าง การส่งคลื่นความถี่สูงลงไปนั้นของเหลวนั้นส่งผลให้โมเลกุลของของเหลวเกิดการบีบอัดสั้นสะเทือน เป็นผลให้มีฟองอากาศสุญญากาศเล็ก ๆ จำนวนมากผุดขึ้น เรียกลักษณะดังกล่าวว่ากระบวนการ Cavitation แต่เนื่องจากฟองอากาศดังกล่าวไม่ใช่ฟองอากาศที่เกิดจากการดีน้ำธรรมชาติ เพราะเกิดจากคลื่นความถี่สูง จากรายงานพบว่าจะทำให้ฟองอากาศ Collapse ต้องใช้อุณหภูมิ 10,000K ความดัน 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพราะฉะนั้นฟองอากาศเล็ก ๆ ดังกล่าวจึงมีพลังงานแฝงอยู่ ซึ่ง (สามารถจะชะล้างคราบหรือสิ่งฝังที่อยู่บนผิวอุปกรณ์ได้โดยไม่ทำลายชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากฟองอากาศมีเป็นจำนวนมาก จึงสามารถเข้าซอกซอนในทุกซอกมุมเล็ก ๆ ได้ด้วย เครื่องที่สามารถผลิตคลื่นความถี่ได้สูงเท่าไร มีผลให้เกิดฟองอากาศดังกล่าวได้มากและพลังแฝงมาก ซึ่งก็จะมีผลให้การทำทำความสะอาดดีขึ้นด้วย



รูปที่ 3.2 อ่างล้างความถี่สูง Elmasonic รุ่น E30H

ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

14. ตู้ดูดอากาศ (Fume Hood) วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการที่ทำหน้าที่ ป้องกันผู้ปฏิบัติการจากอันตรายของสารเคมีหรือสารระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) อาทิเช่น Acetone และ Ethanol เป็นต้น ระหว่างการทำงานไม่ว่าจะเป็นจากการสัมผัสกับผิวหนังโดยตรง หรือทางการหายใจก็ตาม อีกวัตถุประสงค์รองลงมาคือเพื่อป้องกันผลกระทบของการหกหรือกระเด็นในส่วนพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยมีหลักการทำงานคือเริ่มจากการดูดอากาศภายในบริเวณที่เครื่องนี้ตั้งอยู่ ผ่านทางด้านบนของเครื่องไปทางผนังด้านหลัง และไหลไปตามท่อลมออกเครื่อง จนส่งออกสู่ภายนอกอาคารในที่สุด



รูปที่ 3.3 ตู้ดูดอากาศ ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

15. ตู้ดูดความชื้น (Electronic Dry Cabinet) ยี่ห้อ WEIFO รุ่น DRY-60 วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภายในตู้ดูดความชื้นประกอบด้วย Shape memory alloy & IC Timer และซีโอไลต์(Zeolite) เมื่อค่าความชื้นภายในตู้ไม่เป็นไปตามค่าที่กำหนด IC Timer ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับความชื้นภายในตู้ จะสั่งการให้ Shape memory alloy ทำปฏิกิริยากับกระแสไฟฟ้า ทำให้ขดลวดคลายตัว และวาล์วเปิดออกให้อากาศภายในตู้เข้ามาที่กล่องดูดความชื้น เพื่อเข้ากระบวนการดูดซับ โดยซีโอไลต์จะทำหน้าที่ในการดูดซับความชื้นและปล่อยออกนอกตู้ เมื่อค่าความชื้นเป็นไปตามค่าที่เรากำหนด IC Timer จะสั่งให้ Shape memory alloy หยุดทำงาน ขดลวดจะหดตัว เพื่อให้วาล์วปิด การทำงานจะวนเวียนอยู่แบบนี้อย่างอัตโนมัติ เพื่อรักษาระดับความชื้นภายในตู้ ขั้นตอนในการลดความชื้นทั้งหมดจะไม่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง และไม่เกิดหยดน้ำขึ้นภายในตู้ จึงทำสิ่งของที่เราเก็บคงสภาพอยู่ได้อย่างยาวนาน โดยไม่เสื่อมสภาพ



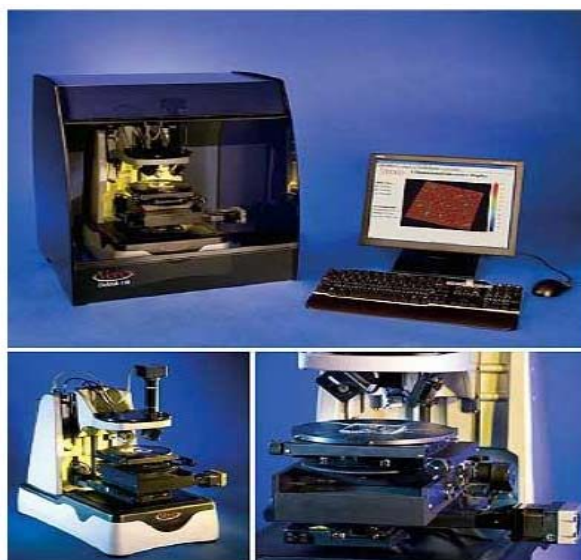
รูปที่ 3.4 ตู้ดูดความชื้น ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

16. เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน (Deionization Water) ยี่ห้อ WATER PRO PS รุ่น LABCONCO 9000502 วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาศัยหลักการของไฟฟ้าเพื่อสร้างให้เกิดความต่างศักย์ที่ปลายขั้วทั้งสองข้างของแผ่น Anode และ Cathode โดยมีสารกรอง Mixed Resin ซึ่งถูกประกบด้วย Cation Membrane และ Anion Membrane วางเรียงซ้อนกันเหมือนแซนวิชประกบเป็นคู่ ๆ เมื่อน้ำไหลผ่านเข้าไปในช่องของ Mixed Resin สนามไฟฟ้าประจุบวกจะดึงดูดประจุลบในน้ำผ่าน Anion Membrane และสนามไฟฟ้าประจุลบจะดึงดูดประจุบวกผ่าน Cation Membrane ประจุของสารละลายจะมารวมกันในช่องของ Concentrate ซึ่งจะให้น้ำในส่วนนี้มีความเข้มข้นสูงขึ้นและปล่อยออกทิ้ง ขณะเดียวกันจะเกิดการแตกตัวของ H^+ และ OH^- ในโมเลกุลของน้ำในบริเวณที่ Cation Resin และ Anion Resin สัมผัสกันทำให้เกิดการล้างคืนรูปสารกรอง Resin ไปพร้อมกัน ทำให้น้ำที่ออกจากส่วนของสารกรองเป็นน้ำบริสุทธิ์ไม่จำเป็นต้องล้างคืนรูปสารกรองอีกต่อไป



รูปที่ 3.5 เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

17. เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) รุ่น Veeco Dektak 150 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าคุณสมบัติความหนาของพื้นผิว (Surface thickness) โดยใช้ปลายวัด (Stylus) ซึ่งทำด้วยเพชรลากไปยังบริเวณพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคุณสมบัติของผิว (Surface parameter) :ซึ่งเครื่องจะทำการคำนวณและแปลผลออกมาให้อยู่ของกราฟ



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนาฟิล์ม ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

18. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy) รุ่น Park system XE 100 วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ที่มา: หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

19. เครื่องวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



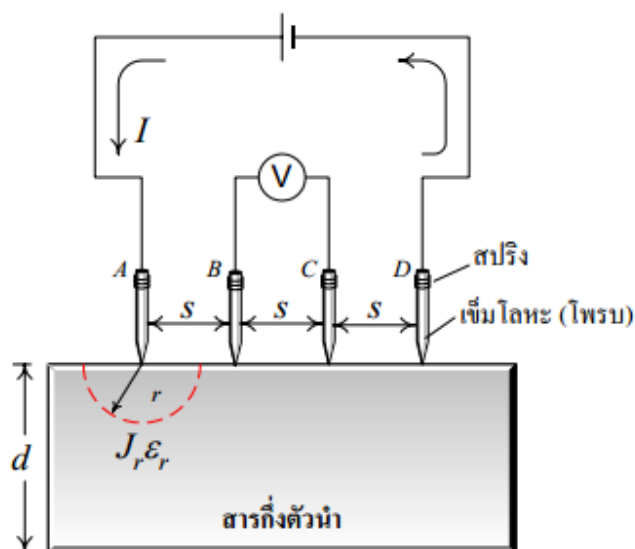
รูป 3.8 เครื่องวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่มา: ศูนย์เครื่องวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

20. เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (Vibrating Sample Magnetometer) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งใช้วิเคราะห์สมบัติฮิสเทอรีซิสเชิงแม่เหล็กโดยการกำหนดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกแก่สารตัวอย่างสูงสุด ± 10 kG ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น ที่มา: หน่วยวิจัยเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

21. ชุดเครื่องมือวัดโพรบวัดสี่ขั้ว (4-point probe) พร้อมชุดจับยึดและขับเคลื่อนที่ได้ โดยการคิดค้นและพัฒนาของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โพรบวัดสี่ขั้วนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างที่เป็นสารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดลอง ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน เข็ม มี 4 ปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่เคลือบฟิล์มบางของชิ้นงานสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ 4A, B, C และเข็ม D อยู่ห่างกันเป็นระยะ s เท่า ๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป จะมีค่าราว มม ดังแสดงในรูปที่ 1 - 0.53.10 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่เข้าไปที่เข็มด้านนอกสุด คือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C หลังจากนั้นนำค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.10 ชุดเครื่องมือวัดโพรบวัดสี่ขั้ว ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1. วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ศูนย์เครื่องวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. หน่วยวิจัยเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
5. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

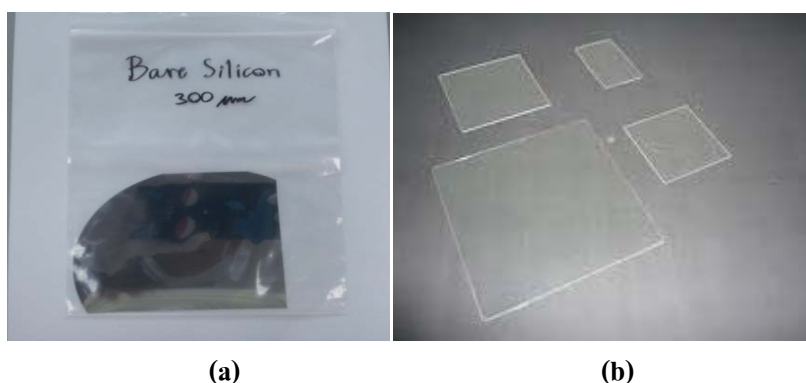
โครงการงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB โดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering) การเตรียมฟิล์มบาง CoFeB และศึกษาผลของกำลังไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่มีต่อสมบัติฟิล์มบาง ซึ่งได้แก่ สมบัติโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติการยึดเกาะ สมบัติ

การนำไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนของการดำเนินการทดลอง โดยรวมดังนี้

1. การเตรียมวัสดุรองรับ
2. การเตรียมฟิล์มบาง CoFeB
 - ภายใต้อากาศเฉื่อยในการเตรียมฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน
 - ภายใต้อากาศเฉื่อยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในระหว่างเตรียม
3. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง CoFeB

1. การเตรียมวัสดุรองรับ

วัสดุรองรับที่ใช้ในการทดลองเป็นกระจกสไลด์ขนาด 1x1 นิ้ว หนา 0.10 เซนติเมตร และซิลิกอน เวเฟอร์ ขนาด 1x1 นิ้ว หนา 300 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (a) และ (b) ตามลำดับ



รูป 3.11 (a) วัสดุรองรับกระจกสไลด์ (b) วัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ ที่มา: วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซึ่งวัสดุรองรับเหล่านี้ก่อนนำมาศึกษาหรือเคลือบฟิล์มจะต้องนำมาทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวของวัสดุรองรับให้ปราศจากคราบฝุ่นไขมัน สารอินทรีย์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผิวกระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์ที่สะอาดทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิววัสดุรองรับทั้งสอง ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติที่ดีของฟิล์มด้วย ดังนั้นจึงมีขั้นตอนการทำความสะอาดแบ่งตามประเภทของวัสดุรองรับ ดังนี้

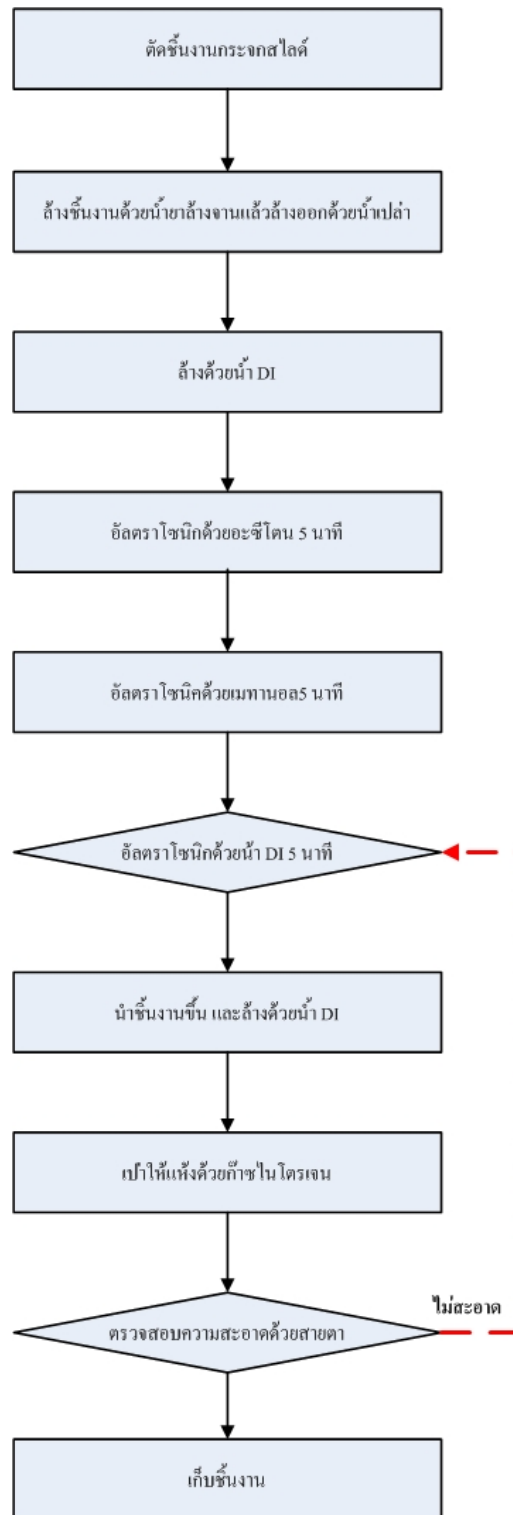
1.1 การทำความสะอาดวัสดุรองรับกระจกสไลด์

เริ่มจากตัดชิ้นงานกระจกสไลด์ให้มีขนาด 1x1 นิ้ว นำชิ้นกระจกสไลด์ล้างด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อขจัดฝุ่นและคราบไขมันแล้วล้างออกด้วยน้ำเปล่า แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น (DI) อัลตราโซนิก ด้วยอะซิโตน 5 นาทีเพื่อล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกที่ติดแน่นที่ไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ แล้ว

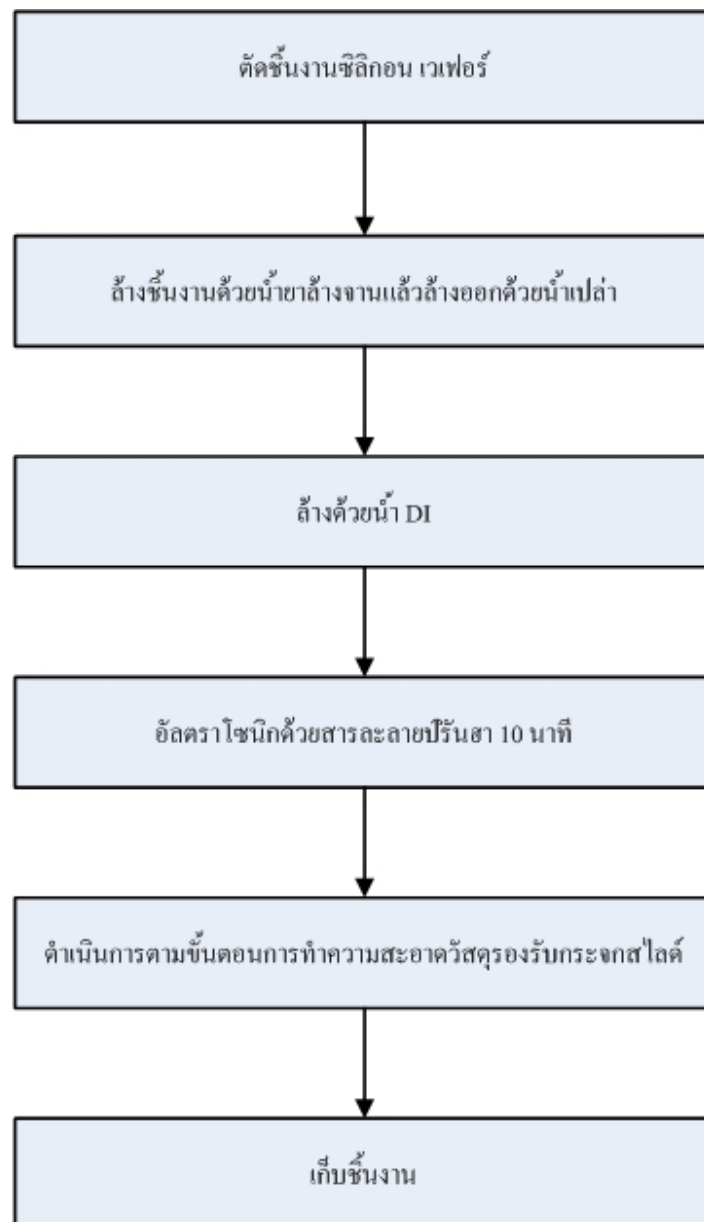
นำไปอัลตราโซนิกด้วยเมทานอลอีก 5 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอัลตราโซนิกด้วยน้ำกลั่น เป็นเวลา 5 นาที นำชิ้นงานขึ้นโดยใช้มิกซ์ติบและล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง นำแผ่นแก้วสไลด์มาทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นเก็บแผ่นรองรับที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วไว้ในกล่องนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อรอทำการเคลื่อนต่อไป (หากยังมีคราบสกปรกอยู่ ให้นำกลับไปทำความสะอาดใหม่ในขั้นตอนการอัลตราโซนิกด้วยน้ำ DI อีกครั้งเป็นเวลา 5 นาที) โดยขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับกระจกสไลด์แสดงดังรูปที่ 3.12

1.2 การทำความสะอาดวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์

เริ่มจากตัดชิ้นงานซิลิกอน เวเฟอร์ให้มีขนาด 1x1 นิ้ว นำชิ้นกระจกสไลด์ล้างด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อขจัดฝุ่นและคราบไขมันแล้วล้างออกด้วยน้ำเปล่า แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น (DI) จากนั้นนำชิ้นงานไปอัลตราโซนิกด้วยสารละลายปิรันฮา (Piranha solvent) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในอัตราส่วน ($H_2SO_4 : H_2O_2 = 3:1$) เพื่อกำจัดอนุภาคปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ออกจากพื้นผิวแผ่นซิลิกอน เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันกับการทำความสะอาดวัสดุรองรับกระจกสไลด์ดังกล่าวข้างต้นในหัวข้อที่ 1.1 (การทำความสะอาดวัสดุรองรับกระจกสไลด์) โดยขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์แสดงดังรูปที่ 3.13



รูป 3.12 แผนภาพไคอะแกรมแสดงการทำความสะอาดกระจกชิ้นงาน ที่มา: ชุติรัตน์ อิบูกิ



รูป 3.13 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะอาดชิ้นงานซิลิกอน เวเฟอร์ที่มา: ชุติรัตน์ อินุกิ

หมายเหตุ ควรนำวัสดุรองรับที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว ไปทำการเคลือบฟิล์มทันทีหากเป็นไปได้ ไม่ควรเก็บวัสดุรองรับที่ทำความสะอาดแล้วไว้เป็นเวลานานเกินไป เพราะอาจมีสิ่งปนเปื้อนต่าง เช่น ฝุ่นชนิดต่างๆ ไขมัน และสารเคมีจับผิวหน้าวัสดุรองรับได้ แม้จะเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันอย่างดีก็ตาม

2. การเตรียมฟิล์มบาง CoFeB

การเตรียมฟิล์มบาง CoFeB โดยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering) จากเป้า CoFeB เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์ และใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) 99.995 % เป็นก๊าซพลาสมา โดยควบคุมการไหลของก๊าซด้วยวาล์วเข็ม (Needle valve) ในการทดลองจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ของการเคลือบฟิล์มที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความดันก๊าซอาร์กอน กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุ และระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยได้ควบคุมระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับที่ 11 เซนติเมตร แล้วนำฟิล์มที่เตรียมตามสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ ไปศึกษาสมบัติโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติการยึดเกาะ สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยมีรายละเอียดการเตรียมฟิล์มดังนี้

1. ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศ (Chamber) โดยเก็บเศษฝุ่นผง และเช็ดทำความสะอาดคราบสกปรกภายในที่เกิดขึ้นขณะสปัตเตอริงในครั้งที่ผ่านมาออกให้หมด ใช้อลูมิเนียมฟอยล์บุผนังด้านในภาชนะสุญญากาศเพื่อป้องกันคราบติดตามผนังขณะสปัตเตอริง

2. นำวัสดุรองรับที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มาวางไว้บนแท่น (ทั้งกระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์) วางวัสดุรองรับ ซึ่งขึ้นงานรองรับ ซึ่งอยู่ด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ และเป็นขั้วบวก (Anode) เพื่อใช้เป็นชิ้นงานเคลือบ โดยมีเป้า CoFeB ที่ติดอยู่ด้านบนและเป็นขั้วลบ (Cathode) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 กำหนดระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับเป็น 11 เซนติเมตร ก่อนทำการสปัตเตอริงต้องปิดเป้าด้วยชัตเตอร์ (Shutter) ที่ทำจากอลูมิเนียมเพื่อป้องกันการเคลือบ แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท

3. เปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็นและระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump : DF) และขั้วลบ (Cathode) ขณะทำการสปัตเตอริง

4. เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องสปัตเตอริง เปิดระบบปั๊มเริ่มจากเปิดสวิตช์เครื่องสูบลูกกลิ้ง (Rotary pump : RP) เปิดเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump : DF) สร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศจนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 8.5×10^{-6} mbar ซึ่งจะใช้เป็นค่าความดันเริ่มต้น (Base Pressure) ของระบบก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์ม

5. เปิดระบบก๊าซอาร์กอน (Ar) หมุนเปิดวาล์วที่ถึงก๊าซและปรับปริมาตรการปล่อยก๊าซ เพื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนจากถังบรรจุก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยปรับวาล์วจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าตามสภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ โดยการปรับวาล์วเข็ม (Needle valve) ควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนจนกว่าจะคงที่

6. เปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หมุนปรับเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt) แล้วปรับกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่คาโทด จนกระทั่งเกิดกระบวนการโคล์

ดิสชาร์จขึ้นในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยชัตเตอร์ยังคงปิดกั้นระหว่างคาโทดกับชิ้นงาน

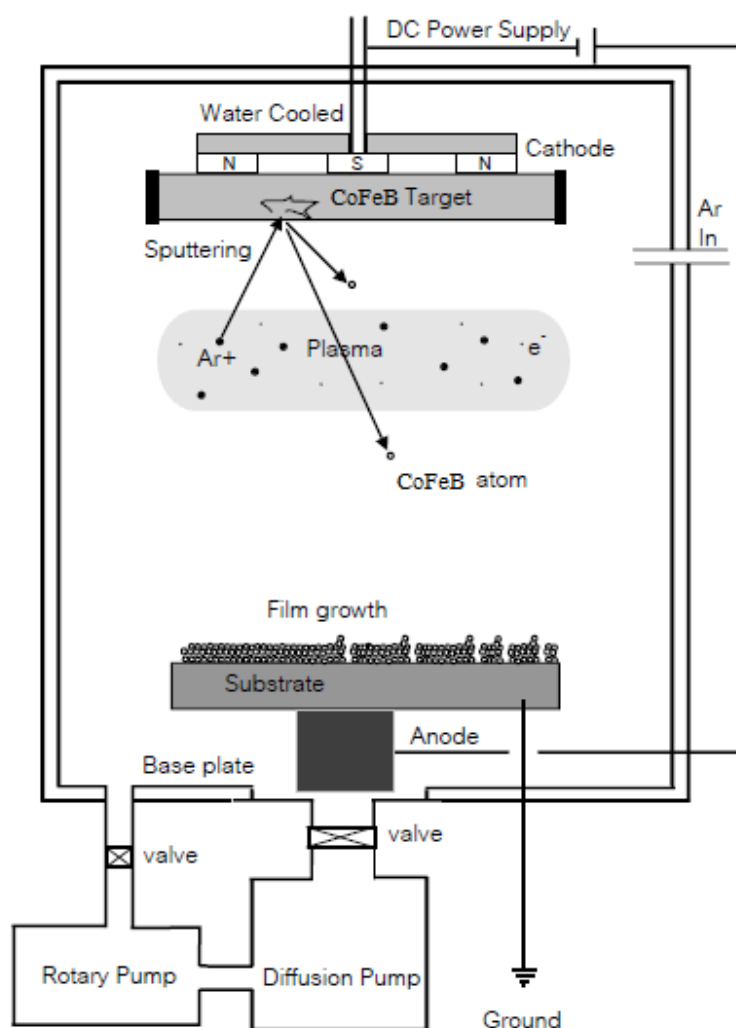
7. ทำการพรีสพัตเตอร์ (Pre-sputtering) บริเวณผิวหน้าของเป้า CoFeB โดยไม่ต้องเปิด ชัตเตอร์ เพื่อเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าเป้าก่อนการเคลือบเป็นเวลาประมาณ 5 นาที หรือรอจนกว่าค่าความดันก๊าซอาร์กอนที่ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 5 นั้นจะคงที่ บันทึกผลค่า (V_{pre}) และ (I_{pre}) ที่เกิดขึ้นจากโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์แสดงบนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

8. เริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB โดยทำการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่คาโทดตามสภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ และทำการเปิดชัตเตอร์ที่ปิดหน้าเป้าสารเคลือบออก เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มลงบนชิ้นงาน พร้อมทั้งบันทึกผลค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และความดัน (P_{coat}) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มทำการเคลือบฟิล์ม

9. ทำการเคลือบฟิล์มตามเวลา (t) ที่กำหนด

10. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดชัตเตอร์ ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดระบบน้ำหล่อเย็น และปิดแก๊สอาร์กอน รอให้ภายในภาชนะสุญญากาศค่อย ๆ เย็นลงแล้วจึงเปิดอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศเพื่อเปิดเอาชิ้นงานออกมา

11. นำชิ้นงานฟิล์มบางออกจากภาชนะสุญญากาศ และทำการวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



รูป 3.14 แสดงระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มา: ชุติรัตน์ อินุกิ

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาถึงสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ ในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่จะส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ โดยสภาวะเงื่อนไขที่สนใจ ทำการศึกษาเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ประกอบด้วย

ก. สภาวะเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน

ทำการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้ตามขั้นตอนการเตรียมฟิล์มข้างต้นบนวัสดุรองรับ กระดาษไคต์และซิลิกอนเวเฟอร์ ภายใต้สภาวะเงื่อนไขตามตารางที่ 3.1 โดยทำการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าในการเคลือบดังต่อไปนี้

ความดันก๊าซอาร์กอน (RUN PRESSURE) : 5×10^{-3} MBAR			
ความดันเริ่มต้น (BASE PRESSURE) : 8.5×10^{-6} MBAR			
ความหนาฟิล์มบาง CoFeB : 5000Å			
ชิ้นงาน	วัสดุรองรับ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (นาท)
A100G/A100S	แก้ว/ซิลิกอน	100	29
A150G/A150S	แก้ว/ซิลิกอน	150	22
A200G/A200S	แก้ว/ซิลิกอน	200	15
A250G/A250S	แก้ว/ซิลิกอน	250	11

ตาราง 3.1 สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการเคลือบเพื่อศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติฟิล์มบาง CoFeB

หมายเหตุ ค่าความดันก๊าซอาร์กอน ความหนาฟิล์มบางและเวลาที่ใช้ในการเคลือบนั้นสามารถหาได้จากการศึกษาทดลองตามขั้นตอนและวิธีการดังแสดงในภาคผนวก

ข. สภาวะเงื่อนไขการใส่สนามแม่เหล็กในระหว่างเตรียม

อีกหนึ่งวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาผลของสนามแม่เหล็ก ที่ใส่เข้าไปขณะดำเนินการเตรียมฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์แมกเนติกเซนเซอร์ (Magnetic Sensors) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไป

ทำการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้ตามขั้นตอนการเตรียมฟิล์มข้างต้นดังกล่าวบนวัสดุรองรับทั้งสอง ภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการใส่สนามแม่เหล็ก (กระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์) ความเข้มข้น 300 Oe ในทิศทางขนาน (In plane) และทิศทางตั้งฉาก (Out of plane) เข้าไปในขณะดำเนินการเตรียมฟิล์มที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และเนื่องจาก

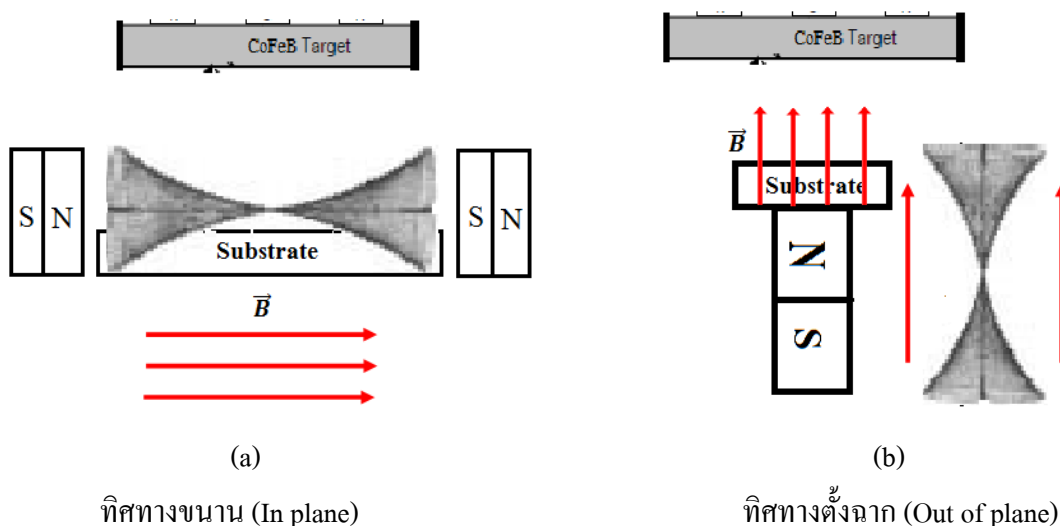
ลักษณะบริเวณในการจัดวางวัสดุรองรับของเครื่องสเปคโตริงนั้น มีข้อจำกัดอยู่ทำให้ไม่สามารถเตรียมฟิล์มบางในสถานะเงื่อนไขได้อย่างปกติทั่วไป ดังนั้นจึงมีการประยุกต์และออกแบบอุปกรณ์ในการยึดติดวัสดุรองรับเข้ากับแท่นวางเพื่อให้สามารถดำเนินการเตรียมฟิล์ม CoFeB ภายใต้สถานะเงื่อนไขการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะที่ทำการเคลือบได้ ดังรูปที่ 3.14 (a) และ (b) สำหรับไดอะแกรมอุปกรณ์การจัดวางวัสดุรองรับและการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนาน (In plane) และสนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก (Out of plane) ตามลำดับ

หมายเหตุ ในการเคลื่อนที่อนุภาคในสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปขณะดำเนินการเคลือบฟิล์มบางนั้น จำเป็นต้องใช้การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเข้าไปช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าวด้วย ดังนั้น เพื่อที่จะช่วยการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า จึงต้องทำการเคลือบวัสดุรองรับทั้งสอง กระบอกสไลด์และ)ซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วยไททาเนียม ((Ti) ที่กำลังไฟฟ้า 150W เป็นเวลา 10 นาทีภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 เพื่อทำให้เป็นชั้นสัมผัส ก่อนที่จะทำการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ต่อไป

ความดันก๊าซอาร์กอน (RUN PRESSURE) : 5×10^{-3} MBAR		
ความดันเริ่มต้น (BASE PRESSURE) : 8.5×10^{-6} MBAR		
ความหนาฟิล์มบาง CoFeB : 5000Å		
กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ : 200W		
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ : 15 นาที		
ชิ้นงาน	วัสดุรองรับ	เงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม
M01G/M01S	แก้ว/ซิลิกอน	ไม่ใส่สนามแม่เหล็ก
M02G/M02S	แก้ว/ซิลิกอน	ใส่สนามแม่เหล็กทิศทางขนาน
M03G/M03S	แก้ว/ซิลิกอน	ใส่สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก

ตาราง 3.2 สถานะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการเคลือบเพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อสมบัติฟิล์มบาง CoFeB

หมายเหตุ จากตาราง 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มซึ่งได้แก่ ความดันก๊าซอาร์กอน ความดันเริ่มต้น ความหนาฟิล์มบาง กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบนั้น ได้มาจากการวิเคราะห์สภาวะเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน (ตามข้อ กซึ่งทำให้สมบัติ (โครงสร้าง สมบัติพื้นผิว และสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบางที่ดีที่สุด



รูป 3.15 แสดงไดอะแกรมการเตรียมฟิล์มภายใต้สภาวะเงื่อนไขการใส่สนามแม่เหล็กระหว่างดำเนินการเคลือบฟิล์ม ที่มา: ชูลิรัตน์ อิบูกิ

3. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง CoFeB

หลังจากเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์แล้ว นำฟิล์มบางที่ได้มาทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB โดยแบ่งการวิเคราะห์ตามสภาวะเงื่อนไขในการเตรียมทั้ง 2 สภาวะดังต่อไปนี้

3.1 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าต่างกัน

- การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)
- การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)
- การวิเคราะห์สมบัติการยึดเกาะ ด้วยเทคนิคการลอกของเทปกาว (Sticky Tape Test)

3.2 พิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการใส่สนามแม่เหล็กในขณะดำเนินการเคลือบ

- การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)
- การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)
- การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า (HP Digital Multimeter) ชนิด 4 โพรบ (4-point probe)
- การวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็ก ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (Vibrating Sample Magnetometer: VSM)

โดยในการศึกษานี้แบ่งการวิเคราะห์เปรียบเทียบออกเป็น 2 วัตถุประสงค์ด้วยกัน วัตถุประสงค์แรกคือเปรียบเทียบสภาวะเงื่อนไขที่สามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ให้มีสมบัติที่ดีและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน และอีกวัตถุประสงค์คือเปรียบเทียบผลของวัสดุรองรับทั้งสอง ฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้มีสมบัติที่ดีและเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาและทดลองในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB วิเคราะห์หาเวลาที่สามารถเคลือบฟิล์มให้ได้ที่มีความหนาที่ต้องการ ($5000\text{\AA}$) หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในการเตรียมฟิล์มและวัสดุรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) การศึกษาสมบัติพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy :AFM) การหาสมบัติการยึดเกาะด้วยเทคนิคการลอกเทปขาว (Sticky Tape Test) การหาความต้านทานไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงสมบัติด้านไฟฟ้าด้วยเทคนิคชุดเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว (Four point probe) และการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample Magnetometer) เป็นต้น

4.1 ค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB

จากการทดลองในบทที่ 3 ก่อนที่จะเริ่มทำการศึกษาในเงื่อนไขต่าง ๆ ผู้วิจัยต้องทำการศึกษาถึงช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ดีและเหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและต่อเครื่องเคลือบฟิล์มอีกด้วย เนื่องจากค่าความดันก๊าซหรือปริมาณความหนาแน่นของโมเลกุลก๊าซภายในระบบที่ใช้ในการสปัตเตอริงนั้นมีผลต่อกระบวนการโกลดดิซารจ์และมีผลต่อการเคลือบฟิล์ม

ในการทดลองได้สร้างภาวะสุญญากาศให้ภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุด (Base pressure) เท่ากับ 8.5×10^{-6} mbar และทำการทดลองที่ค่าช่วงความดันก๊าซอาร์กอนต่าง ๆ คือ 3×10^{-5} mbar, 5×10^{-5} mbar, 7×10^{-5} mbar และ 9×10^{-5} mbar ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Current) ที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งศึกษาหาความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้า : 150 W

เวลาในการเคลือบ : 15 นาที

ความดัน Base Pressure (Bp) : 8.5×10^{-6} mbar

ชิ้นงาน	ความดันก๊าซอาร์กอน (mbar)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)
PR001	3×10^{-3}	426	0.31
PR002	5×10^{-3}	419	0.36
PR003	7×10^{-3}	416	0.38
PR004	9×10^{-3}	404	0.39

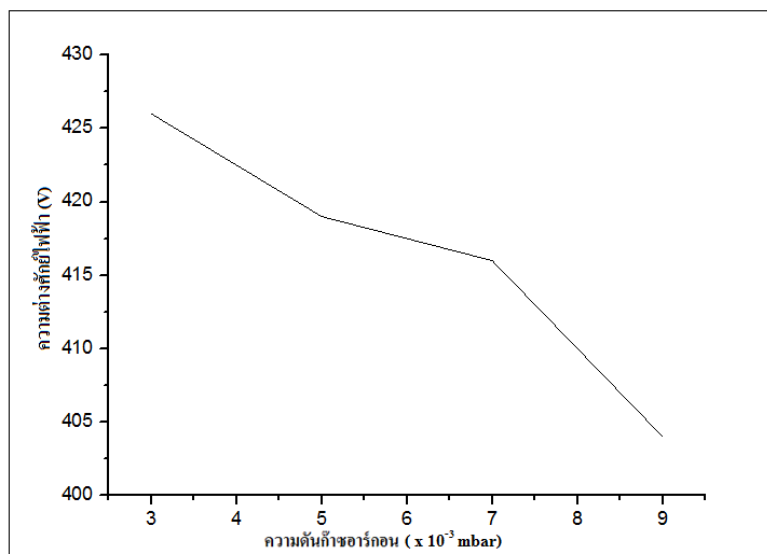
ตาราง 4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้ในสภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง การเคลือบเพื่อหาช่วงความดันก๊าซที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB

1. ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์และสมบัติต่าง ๆ ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB

ในกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อเคลือบฟิล์มแบบดีซีแมกนีตรอน สปัตเตอริงนั้น พบว่าค่าความดันก๊าซอาร์กอนที่เข้าสู่ระบบหรือที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศนั้นจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการเคลือบซึ่งได้แก่ ความต่างศักย์ดีสชาร์จและกระแสไฟฟ้า

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน

จากกราฟที่ 4.1 พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอนนั้นมีความแปรผกผันกันอยู่ โดยเมื่อเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบการเคลือบฟิล์ม ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามความดันก๊าซอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความดันก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นไปถึง 9×10^{-3} mbar ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 416 V เป็น 404 V ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสปัตเตอริงแบบดีซี แมกนีตรอน ที่กล่าวไว้ ($P = IV$) ดังนั้นจะได้จากการทดลองนี้ความดันก๊าซอาร์กอนที่ใส่เข้าไปในระบบสุญญากาศในขณะเคลือบนั้นมีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอน สปัตเตอริง

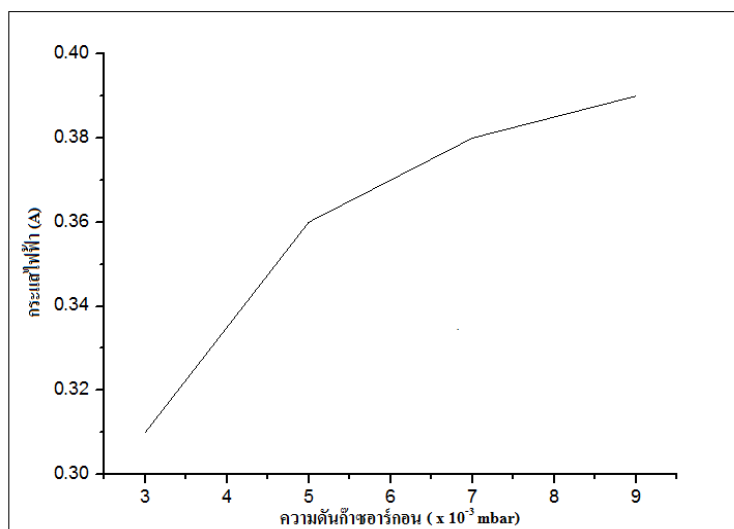


รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน

เมื่อทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอนจะได้ว่าเมื่อเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนให้สูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นจะได้ว่าจากการศึกษานี้ความดันก๊าซอาร์กอนที่ใส่เข้าไปในระบบสุญญากาศในขณะเคลื่อนนั้น มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบดังกล่าว

ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าความดันก๊าซอาร์กอนที่ใส่เข้าไปในระบบสุญญากาศขณะเคลื่อนนั้น มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง อันเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนในระบบสุญญากาศให้สูงขึ้นปริมาณก๊าซอาร์กอนก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้เกิดการแตกตัวระหว่าง Ar^+ และอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นซึ่งเมื่อมีปริมาณอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงค่ากระแสไฟฟ้าในระบบก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งในทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าความต้านทานที่อยู่ระหว่างเป้าสารเคลือบกับฐานของวัสดุรองรับนั้นลดลงซึ่งส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ในตำแหน่งดังกล่าวลดลงด้วย ดังนั้นจะได้ว่าจากการทดลองนี้ความดันก๊าซอาร์กอนที่ใส่เข้าไปในระบบสุญญากาศในขณะเคลื่อนนั้น มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง ที่วัดได้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (กระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า) CoFeB ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอน สปัตเตอริง

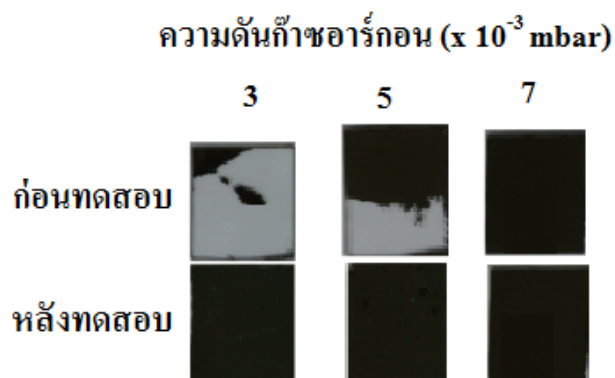


รูป 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความดันก๊าซอาร์กอน

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเกาะของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับกับความดันก๊าซอาร์กอน

จากการนำฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่ช่วงความดันก๊าซอาร์กอนต่าง ๆ กันไปทำการศึกษาสมบัติการยึดเกาะ (Adhesion property) ด้วยเทคนิคการลอกของเทปกาว (Sticky Tape Test) นั้นจะพบว่าหลังจากใช้เทคนิคการลอกเทปกาวแล้ว ฟิล์มบาง CoFeB ที่ถูกเคลือบที่ความดันก๊าซอาร์กอน 3×10^{-5} mbar, 5×10^{-5} mbar และ 7×10^{-5} mbar นั้นเหลือติดอยู่ที่แผ่นแก้วเรียงจากน้อยที่สุดไปจนถึงมากที่สุดตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าสมบัติการยึดเกาะระหว่างฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันก๊าซอาร์กอนในการเคลือบซึ่งอาจจะได้ว่าความดันก๊าซอาร์กอนนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างฟิล์มบางเคลือบ CoFeB กับวัสดุรองรับ

หมายเหตุ ที่ช่วงความดันก๊าซอาร์กอนที่ 9×10^{-5} mbar นั้นไม่สามารถทำการเคลือบได้จนครบเวลาในการทดลองได้เนื่องจากเกิดการอาร์ค และไม่อยู่ในสถานะพลาสมา



ฟิล์มบาง CoFeB เคลือบบนแผ่นแก้ว

รูป 4.3 การทดสอบสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB ที่ความดันก๊าซอาร์กอนต่างกัน

จากการทดลองจะได้ว่าในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่ความดันของก๊าซอาร์กอน 5×10^{-5} mbar นั้นเป็นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB เนื่องจากสามารถทำให้ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นทำงานได้อย่างเสถียรและเกิดความคลาดเคลื่อนได้น้อยที่สุดในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าความดันที่มีค่าต่ำและสูงมากเกินไป (3×10^{-5} mbar, 7×10^{-5} mbar และ 9×10^{-5} mbar**) นั้นจะทำให้เกิดความไม่เสถียรของระบบและความคลาดเคลื่อนของความดันในขณะเตรียมฟิล์มอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการทำงานของเครื่องเคลือบฟิล์มที่ใช้อยู่ และอีกนัยหนึ่งความดันที่น้อยจนเกินไปจะทำให้ก๊าซอาร์กอนที่เข้าไปปลั๊กดันอะตอม CoFeB ให้เคลื่อนที่ไปเกาะบนแผ่นรองรับช้าและน้อยส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความบางมากจนเกินไปและในทางตรงกันข้ามความดันที่ใช้หากมากเกินไปจะทำให้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปปลั๊กดันอะตอม CoFeB ให้เคลื่อนที่ไปเกาะบนแผ่นรองรับเร็วและมากเกินไปส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความหนาจนเกินไปได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะนำค่าช่วงความดันก๊าซที่ได้จากการทดลองคือ 5×10^{-5} mbar ไปใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ต่อไป

4.2 การทดลองหาอัตราการเคลือบของฟิล์มบาง CoFeB

ในการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ด้วยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม และสอดคล้องระหว่างเครื่องมือหรือเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์สมบัติ อาทิ) เช่น เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์

แบบแรงอะตอม และเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น เป็นต้นและฟิล์มตัวอย่างที่นำไปศึกษา (วิเคราะห์) และเพื่อให้ฟิล์มตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์นั้นมีความสอดคล้องกับเครื่องมือหรือเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ฟิล์มตัวอย่าง CoFeB ที่เตรียมไว้นั้นต้องมีความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ที่ $5000\text{\AA}$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการเตรียมฟิล์ม CoFeB ด้วยการเคลือบแบบวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงให้มีความหนาเท่ากับ $5000\text{\AA}$ และพบว่าการที่จะเตรียมฟิล์มเพื่อให้ได้ความหนาดังกล่าว ต้องทำการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการเคลือบซึ่งได้แก่ ค่าความดันก๊าซอาร์กอน กำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม เป็นต้น

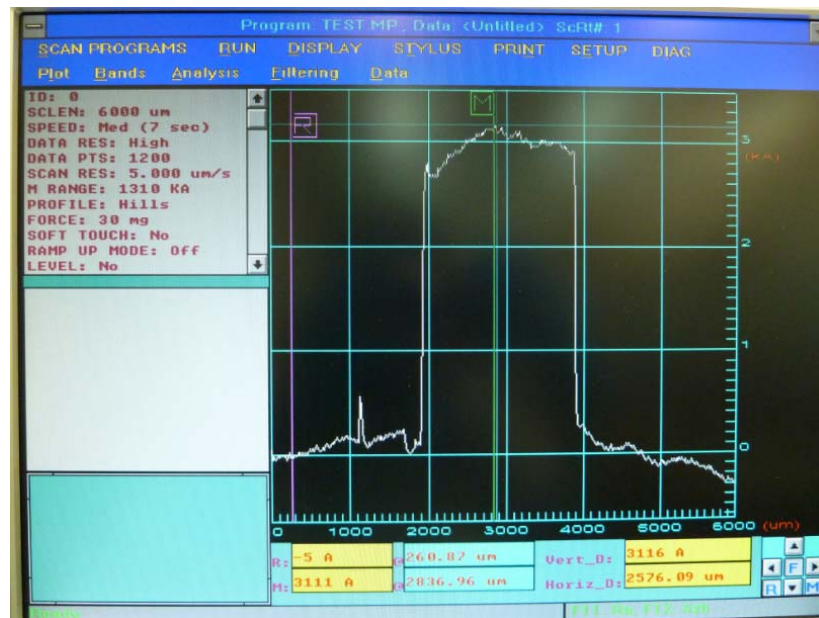
ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองตามสภาวะเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นดังตารางที่ 4.2 เพื่อทำการวิเคราะห์หาความหนาในแต่ละกำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB .5 แล้วทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ความดันก๊าซอาร์กอน (Run pressure) : 5×10^{-3} mbar				
ความดัน Base Pressure (Bp) : 8.5×10^{-6} mbar				
ชิ้นงาน	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลาในการเคลือบ (Sec)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)
W001	50	1800	339	0.15
W002	100	1800	340	0.3
W003	150	900	386	0.4
W004	200	900	393	0.53

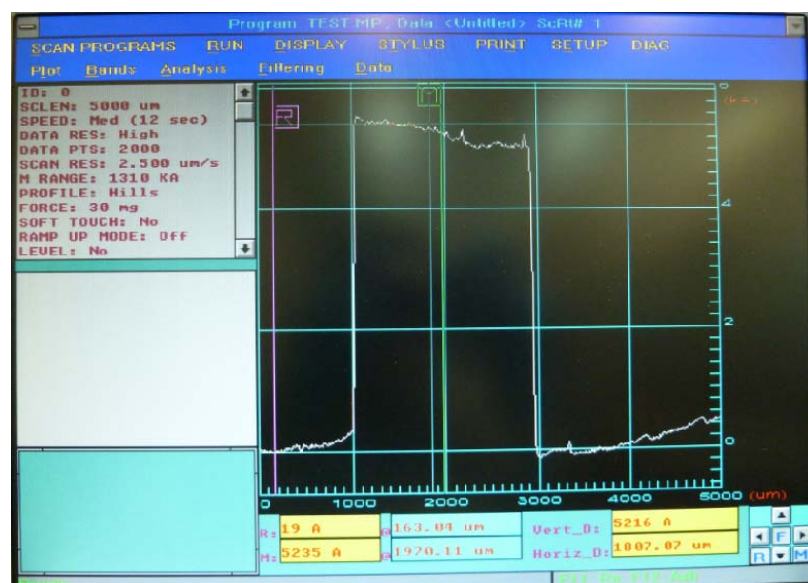
ตาราง 4.2 แสดงตารางสภาวะเงื่อนไขเพื่อหาเวลาในการเตรียมฟิล์มเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ ($5000\text{\AA}$)

หลังจากนำฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมได้จากสภาวะเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น ไปวัดความหนา (Thickness) ด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ได้ผลความหนาดังแสดงในรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ โดยในรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าความหนาของฟิล์มบาง W001 ที่วัดได้จากเครื่อง Surface profiler ซึ่งจะเห็นระยะของกราฟในแนวตั้งจากเส้นระนาบพื้นผิว (ระนาบแผ่นรองรับ) ได้เป็นระยะทางเท่ากับ (ระนาบของฟิล์ม) ขึ้นถึงจุดสูงสุดของเส้นกราฟ 3116 นั่นคือค่าความหนา $\text{\AA}$

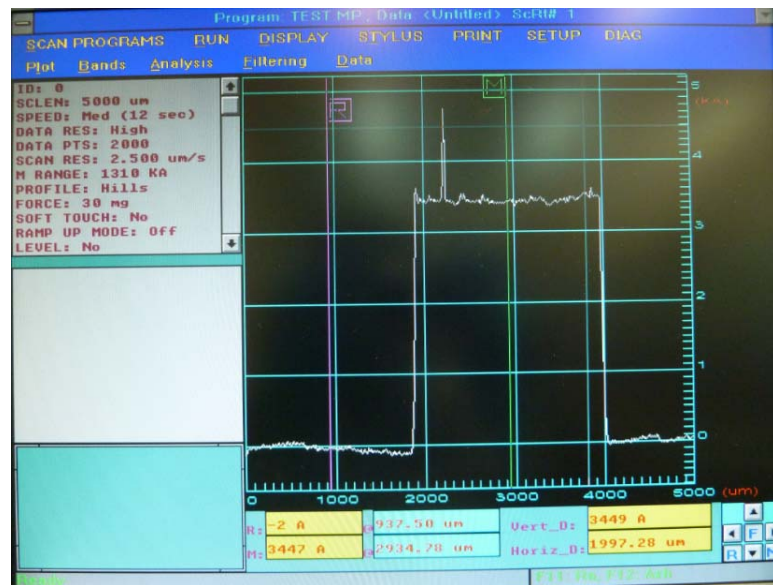
ของฟิล์มบาง CoFeB (W001) ที่เคลือบได้ และเท่ากับ 5216 Å, 3449 Å, 4884 Å และ 5209 Å สำหรับฟิล์มบาง W002, W003, W004(1) และ W004(2) ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่าความหนาที่วัดได้ไปหาความหนาเฉลี่ยและนำไปหาอัตราการเคลือบ (Deposited rate : Å/sec) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3



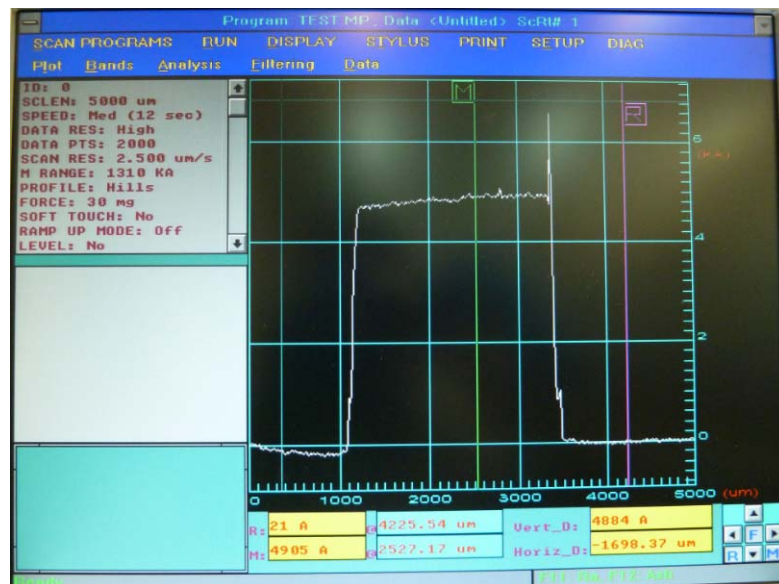
รูป 4.4 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ของฟิล์มบาง W001



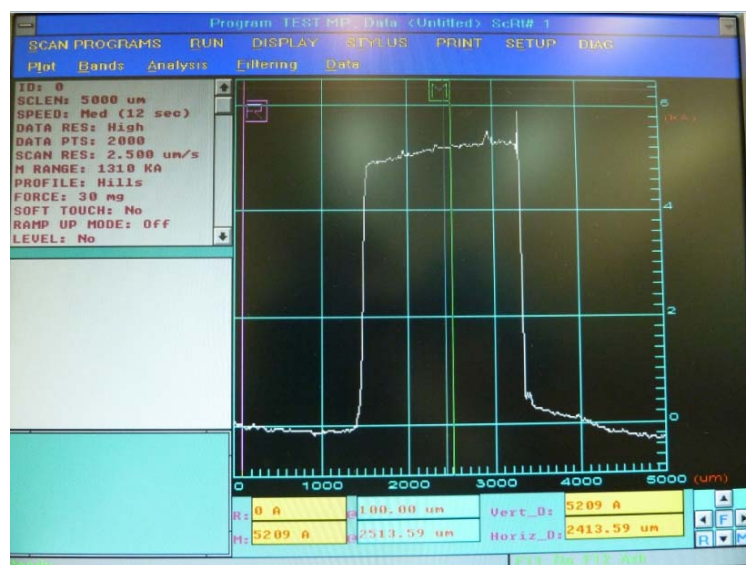
รูป 4.5 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ของฟิล์มบาง W002



รูป 4.6 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ของฟิล์มบาง W003



รูป 4.7 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ของฟิล์มบาง W004 ครั้งที่ 1



รูป 4.8 ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ของฟิล์มบาง W004 ครั้งที่ 2

จากตารางที่ 4.3 จะได้ว่าที่การเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 50W, 100W, 150W และ 200W นั้นมีค่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มที่วัดได้เป็น 3138.5 Å , 5216 Å, 3475.5 Å และ 5046.5 Å หลังจากนั้นนำความหนาดังกล่าวไปคำนวณหาอัตราการเคลือบได้เป็น 1.744, 2.898, 3.862 และ 5.607 Å/sec ตามลำดับ

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง

ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเคลือบฟิล์มกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงตามรายละเอียดที่ได้จากตารางที่ 4.3 สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.3 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบจะทำให้อัตราการเคลือบเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจจะมาจากกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดโมเมนตัมสูงของไอออนบวกเข้าไปชนกับอะตอมเป้าสารเคลือบ CoFeB ทำให้อะตอมหลุดออกมามากขึ้นและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น ทำให้อะตอมที่ตกลงมานั้นมีพลังงานที่ได้รับจากโมเมนตัมในการชนที่สูงขึ้นส่งผลให้อะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Surface Mobility) ที่สูงเพิ่มขึ้นด้วย

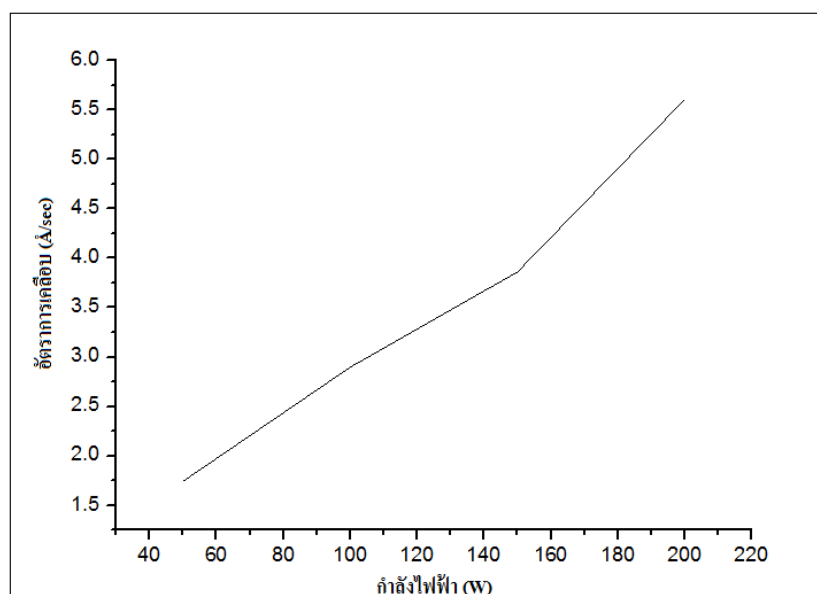
หลังจากนั้นนำอัตราการเคลือบของฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้มาคำนวณหาเวลาที่จะใช้ในการเคลือบ เมื่อต้องการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ให้มีความหนาเท่ากับ 5000 Å โดยเวลาที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4

ความดันก๊าซอาร์กอน (Run pressure) : 5×10^{-3} mbar						
ความดัน Base Pressure (Bp) : 8.5×10^{-6} mbar						
รหัสฟิล์มบาง	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลาการเคลือบ (s)	ความหนาที่วัดได้ (Å)			อัตราการเคลือบ (Å/sec)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
W001	50	1800	3161	3116	3138.5	1.744
W002	100	1800	5216	-	5216	2.898
W003	150	900	3449	3502	3475.5	3.862
W004	200	900	5209	4884	5046.5	5.607
***	250	900			6618	7.353

ตาราง 4.3 ค่าอัตราการเคลือบที่คำนวณได้จากค่าความหนาของฟิล์มบางที่วัดได้ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน

รหัสฟิล์มบาง	กำลังไฟฟ้า (W)	ความหนา (Å)	อัตราการเคลือบ (Å/sec)	เวลา (mins)
W001	50	5000	1.744	48
W002	100	5000	2.898	29
W003	150	5000	3.862	22
W004	200	5000	5.607	15
***	250	5000	7.353	11

ตาราง 4.4 เวลาที่คำนวณได้เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางตามความหนาที่ต้องการ



รูป 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB

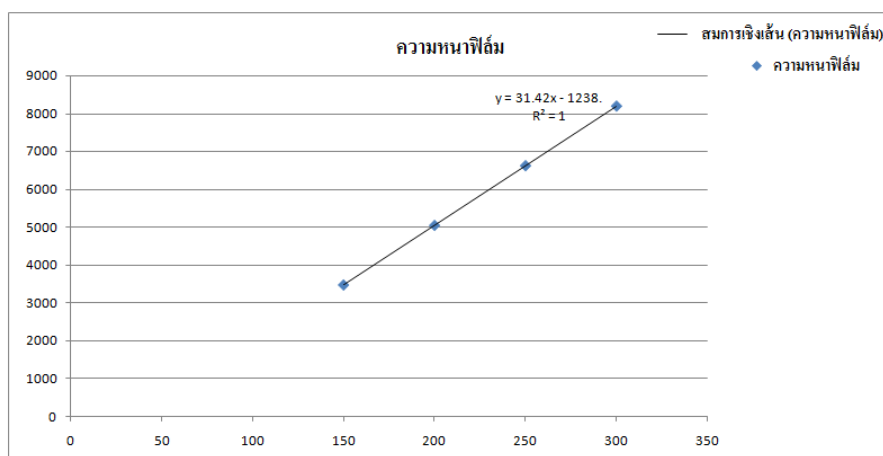
หมายเหตุ เนื่องจากต้องการทำการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 250W ด้วยดังนั้น จึงทำการหาค่าความหนาที่กำลังไฟฟ้างกล่าวเพิ่มเติมโดยการจำลองกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับกำลังไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.4 โดยหาแนวโน้มความน่าจะเป็นของความหนาฟิล์มได้จากสมการกราฟเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$y = 31.42x - 1238 \quad (4.1)$$

เมื่อ $R^2 = 0.99$; โดยที่ $x =$ กำลังไฟฟ้า (W)

$$y = \text{ความหนาฟิล์ม (Å)}$$

จากสมการ (4.1) ดังกล่าวข้างต้น เมื่อกำหนดให้ กำลังไฟฟ้า (x) = 250W จะได้ว่าความหนาฟิล์ม (y) = 6618Å และนำความหนาฟิล์มที่จำลองได้ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 250W ไปคำนวณค่าอัตราการเคลือบได้เป็น 7.353 Å/sec และได้เวลาที่จะใช้ในการเคลือบฟิล์มบางให้มีความหนาเป็น 5000Å เท่ากับ 11 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูป 4.4 กราฟแสดงการจำลองความสัมพันธ์เพื่อหาความหนาของฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 250W

เมื่อได้เวลาในการเคลือบที่เหมาะสมในแต่ละกำลังไฟฟ้างดตารางที่ 4.4 แล้วจะได้สภาวะเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์ ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน สเปคเตอร์เพื่อให้ได้ความหนาที่ 5000 Å ที่กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50W, 100W, 150W, 200W และ 250W นั้นจะต้องใช้เวลาในการเคลือบเป็น 48, 29, 22, 15 และ 11 นาที ตามลำดับ แต่เนื่องจากการเคลือบที่กำลังไฟฟ้า 50W นั้นใช้เวลาในการเคลือบนานเกินไป 48 นาทีซึ่งไม่เหมาะสมกับ (เครื่องสเปคเตอร์ที่ใช้เนื่องจากอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรและความไม่แน่นอนของระบบได้ ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดลองตั้งแต่กำลังไฟฟ้าที่ 100W เป็นต้นไป

4.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB

4.3.1 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์

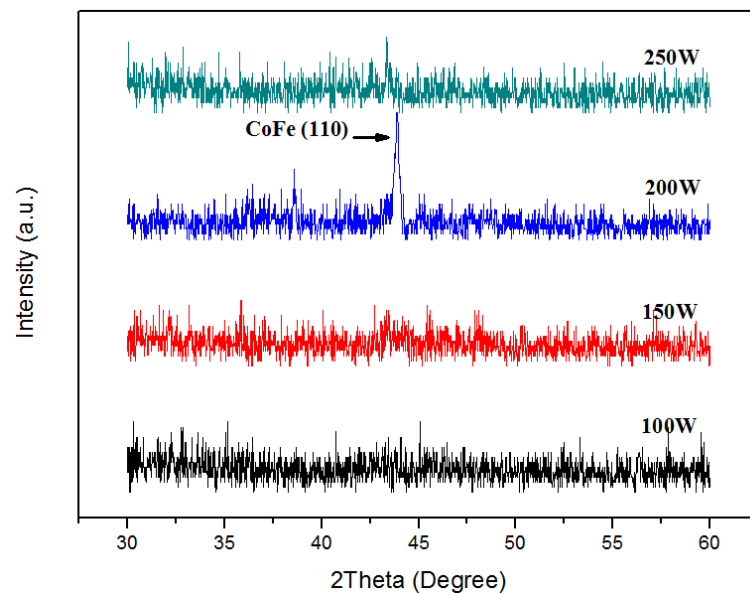
เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการเคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ภายใต้สภาวะตามตาราง 4.5 ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ (DC Magnetron Sputtering) ที่อุณหภูมิห้อง (Room Temperature) มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) จะได้ผลดังแสดงตามรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ โดยเมื่อดูจากกราฟจะเห็นได้ว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100W และ 150W นั้นไม่แสดงพีกของความเป็นผลึกใด ๆ จนกระทั่งกราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เริ่มแสดงพีกความเป็นผลึกของ CoFe บนระนาบ 110 ให้เห็นที่มุมประมาณ 44.36° เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบเป็น 200W ซึ่งเมื่อนำไปอ้างอิงกับมาตรฐานของ JCP2:00-044-433 ที่พีกความเป็นผลึกของ CoFe ปรากฏอยู่บนระนาบ 110 ที่มุม 44.83° จะพบได้ว่ามุมที่เกิดพีกความเป็น

ผลึกของ CoFe ที่วัดได้จากฟิล์มตัวอย่างกับมาตรฐานการอ้างอิงนั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อยทั้งนี้อาจจะเกิดจากผลของการที่มีอะตอมของธาตุโบรอน (B) เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึก CoFe จึงทำให้มุมที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีเล็กน้อย และเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มให้สูงขึ้นไปอีกถึง 250W พบว่าไม่มีพิตความเป็นผลึกของ CoFe ปรากฏให้เห็นในกราฟอีก จากคำอธิบายกราฟข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในสถานะการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ด้วยการเคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง ที่กำลังไฟฟ้าในการเคลือบต่ำจะให้ฟิล์มบาง CoFeB ที่มีสมบัติเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าไปในการเคลือบเป็น 200W พบว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้นั้นเริ่มมีโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline) แต่โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นนั้นกลับไม่เสถียรและหายไปเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบให้สูงขึ้นไปเป็น 250W ซึ่งโดยปกติแล้วการที่จะเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ให้ได้เป็นโครงสร้างผลึกบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งมีสมบัติเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปดเตอร์ริงโดยไม่มีการให้ความร้อนหรืออบร้อนนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยากเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของฟิล์มจะเป็นไปตามลักษณะโครงสร้างวัสดุรองรับและพลังงานความร้อนนั้นมีผลสำคัญต่อการกระตุ้นให้เกิดโครงสร้างผลึก แต่จากการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถหาสถานะเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่มีการอบร้อนหรือให้ความร้อนใด ๆ ให้เป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline) โดยการควบคุมสถานะเงื่อนไขในการเคลือบดังนี้

- ความดันก๊าซอาร์กอน (Run pressure) : 5×10^{-3} mbar
- ความดัน Base Pressure (Bp) : 8.5×10^{-6} mbar
- กำลังไฟฟ้า 200W
- เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 15 นาที

เป้าสารเคลือบ : CoFeB					
วัสดุรองรับ : กระดาษสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์					
ความดันก๊าซอาร์กอน (RUN PRESSURE) : 5×10^{-3} MBAR					
ความดันเริ่มต้น BASE PRESSURE (BP) : 8.5×10^{-6} MBAR					
ชิ้นงาน	กำลังไฟฟ้า (W)	วัสดุรองรับ	เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (MINS)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)
A100G/A100S	100	กระดาษ/ ซิลิกอน	29	403	0.26
A150G/A150S	150	กระดาษ/ซิลิกอน	22	423	0.36
A200G/A200S	200	กระดาษ/ซิลิกอน	15	439	0.46
A250G/A250S	250	กระดาษ/ซิลิกอน	11	450	0.56

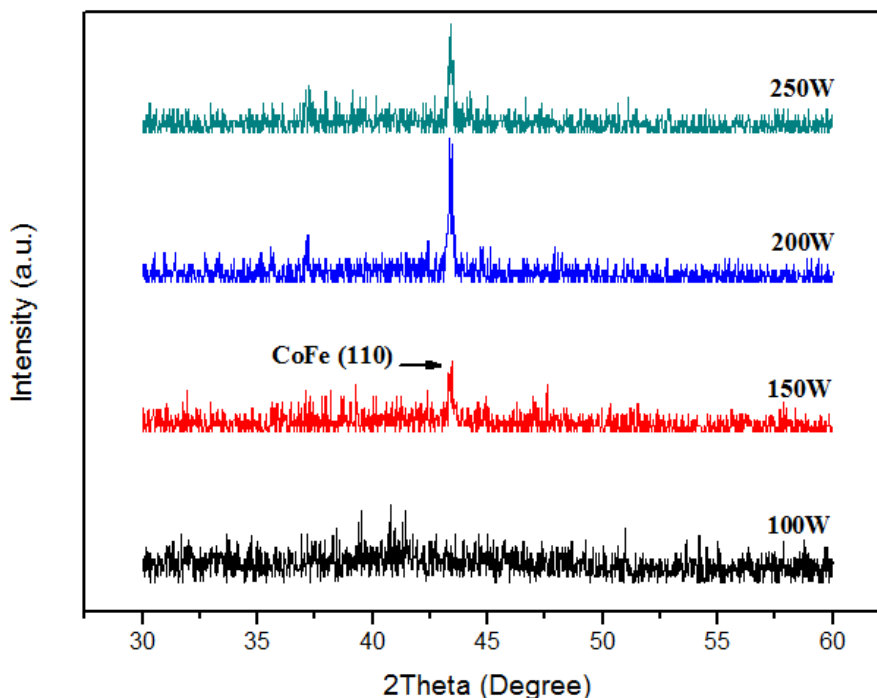
ตาราง 4.5 สภาวะเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน



รูป 4.11 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระดาษสไลด์

4.3.2 फिल्मบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์

ภาพแสดงกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในการวัดวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่เตรียมด้วยสภาวะเงื่อนไขเดียวกันกับฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ดังกล่าวข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 นั้นแสดงให้เห็นว่ากราฟของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้า 100W นั้นไม่แสดงพิกความเป็นผลึกใด ๆ แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 150W กราฟของฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้เริ่มแสดงพิกของโครงสร้างผลึกโดยพิกที่ปรากฏนั้นเป็นพิกโครงสร้างผลึก CoFe บนระนาบ 110 ที่มุมเดียวกันกับพิกโครงสร้างผลึก CoFe ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ (44.36°) และกราฟยังคงแสดงพิกความเป็นผลึกอยู่บนระนาบเดิมที่และที่ตำแหน่งมุมเดิมเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ต่อไปเป็น 200W และ 250W ตามลำดับ จากผลของกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ให้มีโครงสร้างผลึกบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ (100) ซึ่งเป็นวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างผลึกนั้นสามารถทำได้ง่ายและเสถียรกว่าการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับอสัณฐาน (กระจกสไลด์) นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นอีกว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มนั้นมีผลต่อสมบัติโครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์



รูป 4.12 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์

ดังนั้นจากการวัดวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับทั้งสองทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. เราสามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB เพื่อให้ฟิล์มบางนั้นมีสมบัติเชิงโครงสร้างที่เป็นผลึกได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอร์ ได้ทั้งบนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่อุณหภูมิห้องโดย (กระจกสไลด์) และวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (ซิลิกอน เวเฟอร์) ไม่จำเป็นต้องใช้การอบร้อนโดยใช้สถานะเงื่อนไขคือ
 - ความดันก๊าซอาร์กอน (Run pressure) : 5×10^{-3} mbar
 - ความดัน Base Pressure (Bp) : 8.5×10^{-6} mbar
 - กำลังไฟฟ้า 200W
 - เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 15 นาที
2. การเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ที่อุณหภูมิห้องนั้นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติโครงสร้างของฟิล์ม โดยฟิล์มจะแสดงโครงสร้างที่เป็นผลึกของ CoFeB บางส่วนในระนาบ 110 ที่มุม 44.36° เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นเนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบแล้วจำนวนและโมเมนตัมของอนุภาคที่สเปตเตอร์นั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ไปรวมตัวกันได้เร็วขึ้นและยังทำให้อัตราการระเหิดอนุภาคที่ผิวของเป้าสารเคลือบสูงขึ้นอีกด้วย

4.4 การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB

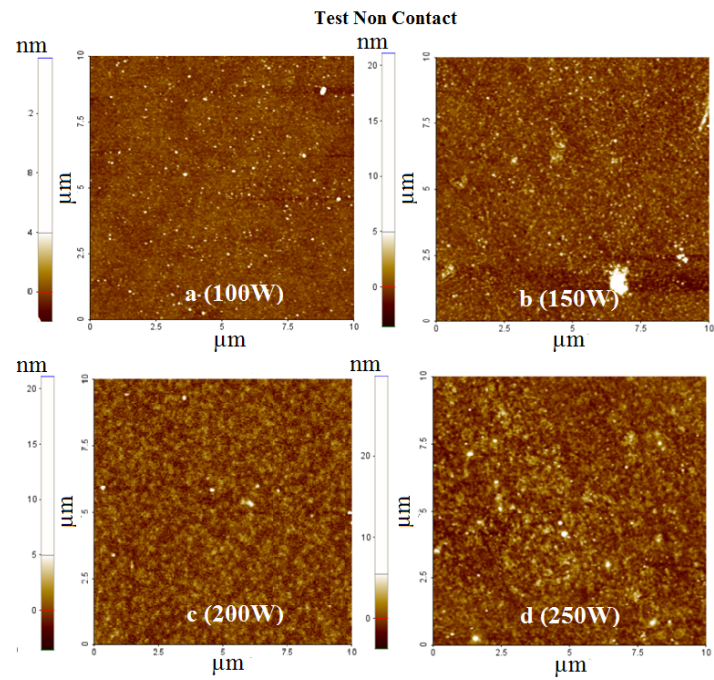
4.4.1 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์

ภาพของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) โดยใช้โหมดแบบไม่สัมผัส (Non contact mode) ที่มีขนาดในการสแกน (Scan size) เท่ากับ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ดังรูปที่ 4.7 นั้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง CoFeB ซึ่งเคลือบที่กําลังไฟฟ้าต่ำนั้นมีลักษณะเกรนเล็กละเอียดและมีพื้นผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 4.7 (a) และ 4.7 (b) แต่เมื่อเพิ่มกําลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบไปถึง 200W ขนาดเกรนของฟิล์มบาง CoFeB เริ่มขยายใหญ่ขึ้นพื้นผิวมีลักษณะที่หยาบมากขึ้นดังรูปที่ 4.7 (c) และขนาดเกรนกับพื้นผิวก็มีขนาดใหญ่และหยาบมากขึ้นไปอีกอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มกําลังไฟฟ้าในการเคลือบต่อไปอีกจนถึง 250W แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อเกรนขยายใหญ่ขึ้นถึงระดับหนึ่งลักษณะของพื้นผิวจะหยาบจนสูญเสียความเป็นเอกรูป (Uniformity) ดังรูปที่ 4.7 (d) ในทางกลับกันจะเห็นได้ว่าหากพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์นั้นมีลักษณะเกรนที่ขยายใหญ่ขึ้น ค่าความหยาบที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ก็จะมีค่าเพิ่ม

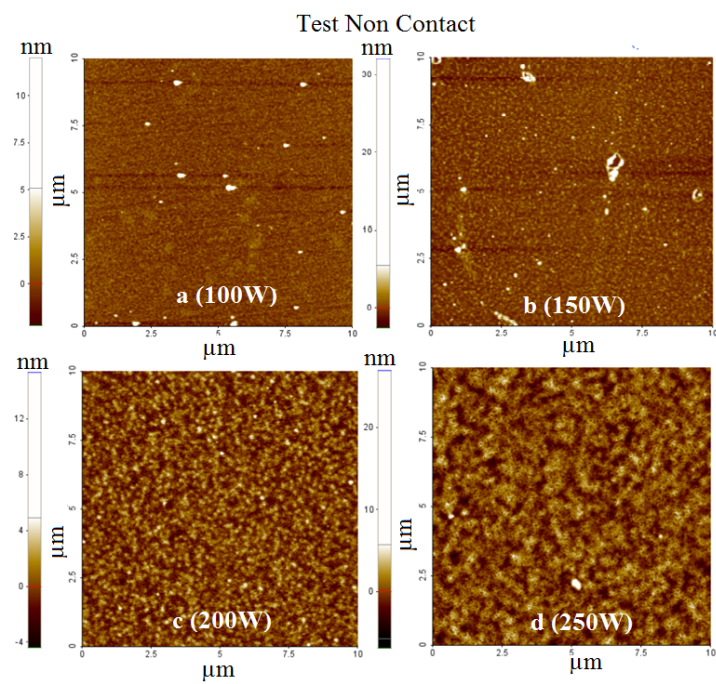
สูงขึ้นด้วยตามที่ได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.6 โดยจะเห็นได้ว่าการเคลือบที่กัลังไฟฟ้าต่ำเท่ากับ 100W ผิวของฟิล์มบาง CoFeB มีความละเอียด เท่ากับ 0.653 nm แต่เมื่อเพิ่มกัลังไฟฟ้าในการเคลือบให้สูงขึ้นไปเป็น 150W, 200W และ 250W พื้นผิวจะมีค่าความหยาบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 1.052 nm, 1.168 nm และ 1.215 nm ตามลำดับ

4.4.2 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์

ในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ ซึ่งพบว่าผลที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกันกับผลที่จากการวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ โดยพบว่าที่ภาวะการเคลือบที่ใช้กัลังไฟฟ้าในการเคลือบที่ต่ำลักษณะขนาดของเกรนบนพื้นผิวมีขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) และ 4.8 (b) และเมื่อเพิ่มกัลังไฟฟ้าในการเคลือบไปเป็น 200W และ 250W ขนาดเกรนบนพื้นผิวก็จะขยายใหญ่และชัดเจนมากขึ้นไปตามลำดับดังแสดงรูปที่ 4.8 (c) และรูปที่ 4.8 (d) ในเรื่องของค่าความหยาบของพื้นผิวฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์นั้นก็มีการแสดงผลไปในทิศทางเดียวกันกับฟิล์มบางที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่าพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์นั้นมีความละเอียดมากกว่าเมื่อใช้กัลังไฟฟ้าในการเคลือบที่ต่ำและพื้นผิวจะมีลักษณะหยาบมากขึ้นเมื่อกัลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าความหยาบเป็น 0.850 nm ในการเคลือบที่กัลังไฟฟ้าเท่ากับ 100W และมีค่าความหยาบเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 1.152 nm, 1.339 nm และ 1.617 nm เมื่อเพิ่มกัลังไฟฟ้าในการเคลือบเป็น 150W, 200W และ 250W ตามลำดับ



รูป 4.13 แสดงลักษณะเกรนของฟิล์มบาง CoFeB เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกใสด์ที่กำลังไฟฟ้า
ต่างกัน



รูป 4.14 แสดงลักษณะเกรนของฟิล์มบาง CoFeB เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่กำลังไฟฟ้า
ต่างกัน

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ (W)	ค่าความหยาบ : Rq (nm)	
	กระจกสไลด์	ซิลิกอน เวเฟอร์
100	0.653	0.850
150	1.052	1.152
200	1.168	1.339
250	1.215	1.617

ตาราง 4.6 แสดงค่าความหยาบที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบาง CoFeB

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับทั้งสองทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. เราสามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB เพื่อให้ฟิล์มบางนั้นมีสมบัติพื้นผิวตามต้องการได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง บนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ซิลิกอน เวเฟอร์ (กระจกสไลด์) และวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (ได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้การอบร้อนโดยเลือกใช้สภาวะเงื่อนไขตามตารางที่ 4.5 ได้เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับความละเอียดและความหยาบที่ต้องการโดยทำการเปรียบเทียบผลจากรูปที่ 4.7 และ 4.8
2. ภาพจาก AFM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับทั้งสองด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงที่อุณหภูมิห้องนั้นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม โดยฟิล์มที่ได้จะมีพื้นผิวที่หยาบมากขึ้นและขนาดเกรนก็จะขยายใหญ่และชัดเจนมากขึ้นเมื่อให้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบที่สูงขึ้น เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมที่ กำลังไฟฟ้าสูง อะตอมจะมีพลังงานในการทับถมสูง พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้เคลื่อนที่ไปได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ส่งผลให้ได้เกรนขนาดใหญ่

4.5 สมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB

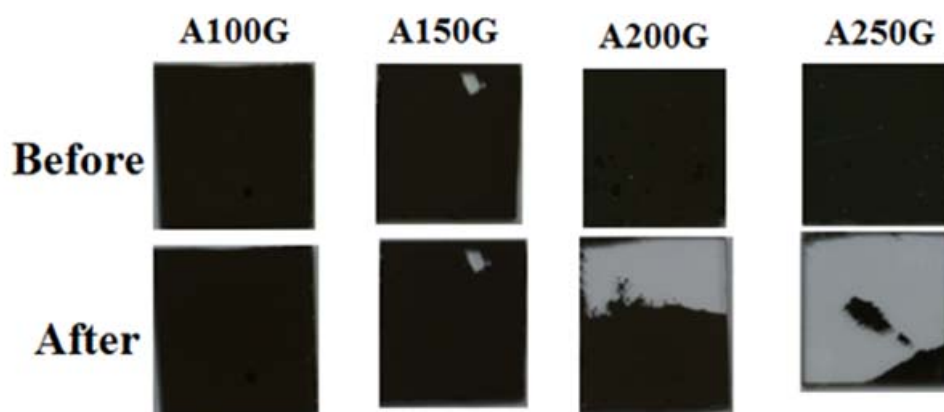
จากการวัดสมบัติการยึดเกาะระหว่างฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับ กระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์ ด้วยเทคนิคการลอกเทปขาว ((Sticky Tape Test) โดยการนับปริมาณอนุภาคฟิล์มบางที่เหลืออยู่บนวัสดุรองรับหลังจากการทดสอบ ซึ่งข้อดีของเทคนิคการลอกเทปขาวนี้คือเป็นวิธีการเชิงคุณภาพที่สามารถทำได้ง่ายและทำได้อย่างรวดเร็วในการวัดสมบัติการยึดเกาะของวัสดุเคลือบหรือฟิล์ม

เคลือบ และโดยปกติแล้วผลและลักษณะการยึดเกาะที่เกิดขึ้นของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยด้วยกันคือ

- 1) พันธะยึดเหนี่ยวที่ประสานกันระหว่างพื้นผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบและวัสดุที่ถูกเคลือบ
- 2) ประเภทของพื้นผิวที่วัสดุที่เคลือบและวัสดุที่ถูกเคลือบ
- 3) กลไกการแตกหักของฟิล์มบาง [10]

4.5.1 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์

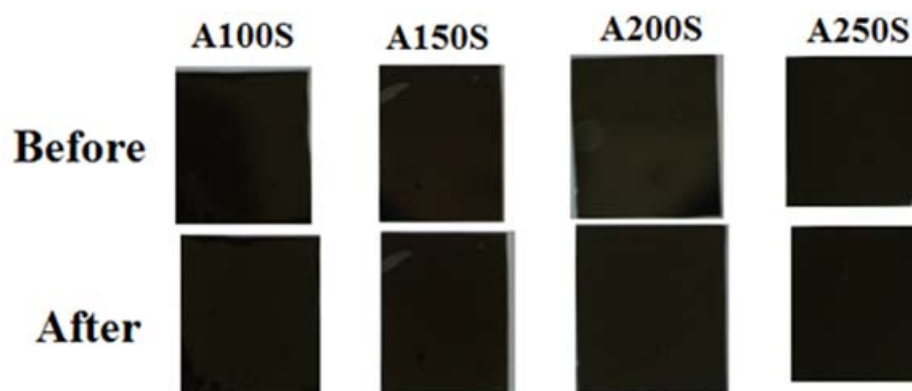
หลังจากการทดสอบด้วยเทคนิคการลอกเทปขาวเพื่อศึกษา และวิเคราะห์สมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ ซึ่งเคลือบด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงที่สภาวะเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มที่แตกต่างกัน (A100G, A150G, A200G, and A250G) พบว่าฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เตรียมภายใต้สภาวะเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าต่ำตั้งแต่ 100W ไปจนถึง 150W นั้นไม่มีการหลุดลอกออกจากวัสดุรองรับ แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบไปถึง 200W ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบอยู่บนวัสดุรองรับนั้นเริ่มที่จะหลุดลอกออกมาประมาณ 50% ของปริมาณอนุภาคฟิล์มบาง CoFeB ทั้งหมดที่เคลือบอยู่บนวัสดุรองรับ และหลุดลอกออกเกือบหมดประมาณ 90% เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB สูงไปจนถึง 250W ดังแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.7 ซึ่งจากการทดสอบด้วยเทคนิคการลอกเทปขาว พบว่าสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์นั้นยังไม่มีดีเท่าที่ควร ทั้งนี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก พันธะระหว่างฟิล์มบาง CoFeB ด้วยกันนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะที่อยู่ระหว่างพื้นผิวประสานของฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับกระจกสไลด์ ดังนั้นจึงได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์จะทำให้พันธะระหว่างอนุภาคฟิล์มบาง CoFeB ด้วยกันเองมีความแข็งแรงมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่แข็งแรงมากกว่าพันธะที่อยู่ระหว่างพื้นผิวประสานของฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับกระจกสไลด์ นอกจากนั้นประเภทของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่มีโครงสร้างอสังฐานนั้นก็มีส่วนสำคัญต่อสมบัติการยึดเกาะด้วยเช่นกัน



รูป 4.15 ผลการกัดเกาะฟิล์มบางบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและ
หลังการทดสอบด้วยเทคนิคการลอกเทปกาว

4.5.2 ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวัดสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ ด้วยเทคนิคการทดสอบเดียวกันกับการทดสอบสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ข้างต้น กลับพบว่าผลที่ได้นั้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการไม่มีการหลุดลอกใด ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบอยู่บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์เลยในทุก ๆ สภาวะเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ ตั้งแต่ 100W ไปจนถึง 250W ดังแสดงผลในรูปที่ 4.10 ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบไปแสดงในรูปอัตราส่วนร้อยละ จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์นั้นมีความแข็งแรงมากถึงแม้ว่าจะเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบไปจนถึง 250W เนื่องจากการไม่มีการหลุดลอกของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ ในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในการเคลือบ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากเนื่องจาก พันธะพื้นผิวประสานของฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับกระจกสไลด์นั้นมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะที่เชื่อมอยู่ระหว่างฟิล์มบาง CoFeB ด้วยกัน ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าไปในการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์นั้นไม่มีผลใด ๆ ต่อสมบัติการยึดเกาะระหว่างฟิล์มบางกับวัสดุรองรับซิลิกอนเวเฟอร์



รูป 4.16 ผลการยึดเกาะฟิล์มบางบนวัสดุรองรับซิลิคอน เวเฟอร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและ
หลังการทดสอบด้วยเทคนิคการลอกเทปกาว

กำลังไฟฟ้า (W)	อนุภาคฟิล์มบางที่เหลืออยู่บนวัสดุรองรับ	
	กระจกสไลด์ (%)	ซิลิคอน เวเฟอร์ (%)
100	100	100
150	100	100
200	50	100
250	10	100

ตาราง 4.7 แสดงผลของปริมาณอนุภาคฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เหลืออยู่บนวัสดุรองรับ จากการ
ทดสอบสมบัติการยึดเกาะด้วยเทคนิคการลอกเทปกาวเป็นอัตราส่วนร้อยละ

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับทั้งสองเราจึงสามารถสรุปได้ว่า

1. เราสามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB เพื่อให้ฟิล์มบางนั้นมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปดเตอริง บนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (ซิลิคอน เวเฟอร์) (กระจกสไลด์) และวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างอสัณฐานแต่หากต้องการเตรียมฟิล์มบนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างอสัณฐานต้องทำการเตรียมภายใต้เงื่อนไขที่กําลังไฟฟ้าในการเคลือบต่ำไม่เกิน 200W โดยไม่จำเป็นต้องใช้การอบร้อน
2. การเพิ่มกําลังไฟฟ้าในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอน สเปดเตอริงส่งผลต่อสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจากฟิล์มบาง CoFeB จะเริ่มสูญเสียการยึดเกาะเมื่อกําลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมมากกว่า 200W ทั้งนี้จะเป็นเพราะว่ากําลังไฟที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การรวมตัวและการจัดวางโครงสร้างของอะตอมนั้นมีมาก แข็งแรงและเป็นระเบียบมากขึ้นจนทำให้พันธะระหว่างฟิล์มบาง CoFeB

ด้วยกันนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกำลังไฟฟ้าในการเคลือบที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความแข็งแรงดังกล่าวเริ่มที่จะมากกว่าพันธะที่อยู่ระหว่างพื้นผิวประสานของฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับกระจกสไลด์ซึ่งมีสมบัติโครงสร้างเป็นอสัณฐาน โดยที่การจัดวางตัวของฟิล์มบางเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบเข้าไปจะทำให้โครงสร้างของฟิล์มบาง มีความเป็นผลึกและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อไปอยู่บนวัสดุรองรับที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานที่มีความหนาแน่นน้อย จึงยากต่อการที่จะยึดติดกันได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างในแบบที่ต่างกัน จึงทำให้สูญเสียสมบัติการยึดเกาะไป แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบกลับไม่มีผลต่อสมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมบนวัสดุรองรับซิลิกอนเวเฟอร์ ซึ่งถึงแม้ว่ากำลังไฟฟ้าในการเคลือบที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้พันธะระหว่างฟิล์มบาง CoFeB ด้วยกันนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ก็ยังไม่มากไปกว่าพันธะที่อยู่ระหว่างพื้นผิวประสานของฟิล์มบาง CoFeB กับวัสดุรองรับซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีสมบัติโครงสร้างแบบผลึกซึ่งมีการจัดวางโครงสร้างแบบเดียวกันกับโครงสร้างของฟิล์มบางที่เป็นแบบผลึกเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการเคลือบ ดังนั้นฟิล์มบาง CoFeB จึงยังสามารถยึดเกาะอยู่บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ได้ถึงแม้จะมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบก็ตาม

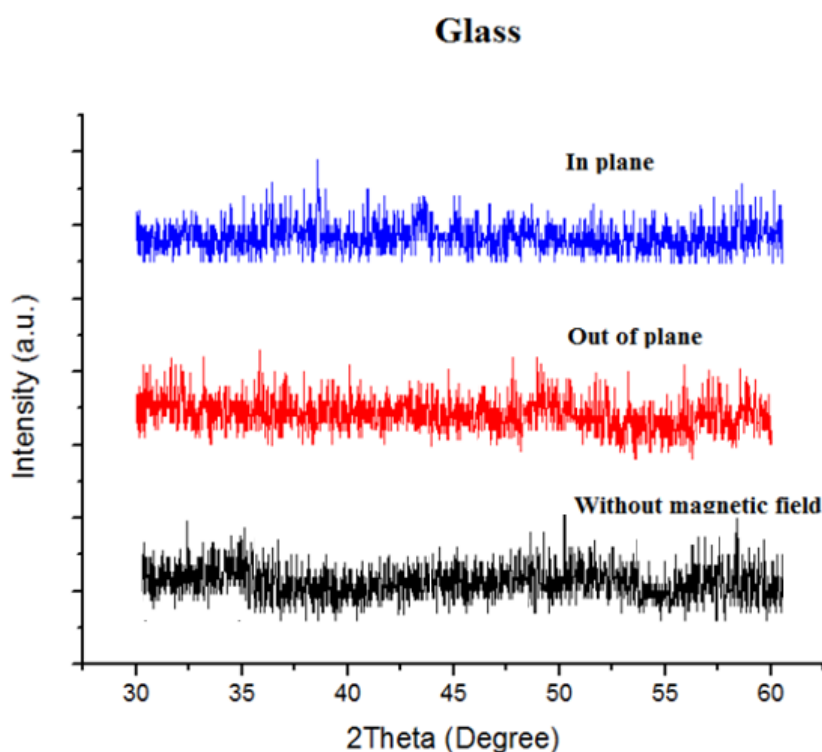
4.6 สภาวะเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางที่มีการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางต่างกัน

เมื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติด้านพื้นผิว สมบัติการยึดเกาะของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมขึ้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ต่างกันนั้นทำให้ทราบว่า การเตรียมฟิล์ม CoFeB ด้วยเทคนิคซีเอ็มแกนีตรอนสปัตเตอริงที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 200W ที่อุณหภูมิห้องนั้น เป็นสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมฟิล์ม CoFeB เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติที่ดีและเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่ต้องการต่อไป ดังนั้นในการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมด้วยเทคนิคเดียวกันโดยทำการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางที่ต่างกันเข้าไปในระหว่างการเคลือบฟิล์มนั้นจึงได้เลือกสภาวะเงื่อนไขดังกล่าว (กำลังไฟฟ้าในการเคลือบเท่ากับ 200W) มาใช้เป็นสภาวะเงื่อนไขในการเตรียมเบื้องต้นและเพิ่มสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางต่างกันในระหว่างการเคลือบฟิล์มบางดังตารางที่ ซึ่งในการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างของฟิล์มบาง CoFeB ในสภาวะเงื่อนไขดังกล่าวนี้ จะทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลดังต่อไปนี้

1. ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เตรียมขึ้นโดยไม่มีการใส่สนามแม่เหล็ก (Without magnetic field)
2. ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เตรียมขึ้นภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก (Out of plane)
3. ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เตรียมขึ้นภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กทิศทางขนาน (In plane)

4.6.1 สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์



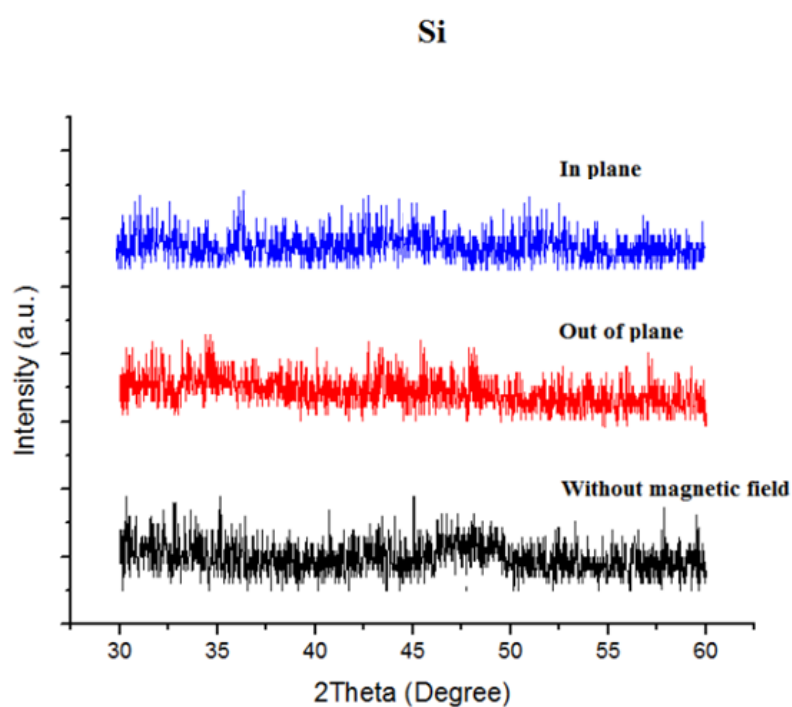
รูป 4.17 กราฟ XRD ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์

จากผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 นั้นแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักโครงสร้างของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่ได้หลังการเตรียมภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปทั้งสองทิศทาง (ทิศทางตั้งฉากและทิศทางขนาน) และภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นโครงสร้างอสัณฐานทั้งหมด เนื่องกราฟ XRD ที่ได้นั้นไม่แสดงพีคที่ตำแหน่งใด ๆ ดังนั้นจะได้ว่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ ในการเตรียม (ทั้งทิศทางตั้งฉากและทิศทางขนาน) ต่อสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางอสัณฐาน ฟิล์มนั้นไม่ส่งผลใด ๆ CoFeB ที่เตรียมได้ นั้นหมายถึง

ว่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในระหว่างเตรียมฟิล์มนั้นไม่มีผลทำให้โครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB ก่อตัวไปเป็นโครงสร้างผลึกได้

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบด้วย Ti บนซิลิกอนเวเฟอร์

จากรูปที่ 4.12 แสดงว่าผลของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เคลือบด้วย Ti บนซิลิกอนเวเฟอร์ที่ได้จาก XRD นั้นได้ผลเช่นเดียวกันกับผลของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ดังกล่าวไปข้างต้น นั่นคือการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในการเตรียมฟิล์มไม่ได้ส่งผลใด ๆ ที่จะไปเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง CoFeB ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจากกราฟ XRD ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นไม่ได้แสดงพีกที่ตำแหน่งใด บนระนาบใด ๆ ในกราฟเลย



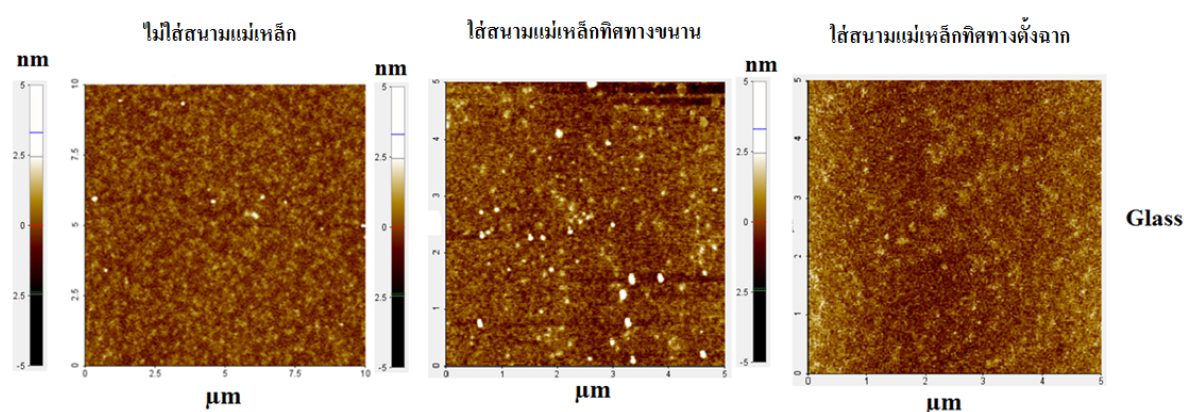
รูป 4.18 กราฟ XRD ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เคลือบด้วย Ti บนซิลิกอนเวเฟอร์

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับทั้งสองเราจึงสามารถสรุปได้ว่า

1. ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ให้มีโครงสร้างแบบผลึกด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริงภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียม บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์ได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงเพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกที่ต้องการต่อไป
2. ในการทดลองนี้การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอน สเปคโตรริงนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางที่เตรียมบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์ ซึ่งจะได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงสถานะเงื่อนไขให้ได้สมบัติเชิงโครงสร้างที่ต้องการต่อไป ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องมาจากความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปยังไม่มากพอที่จะเปลี่ยนทิศทางแมกนีไทเซชัน (Magnetization) ของแต่ละอนุภาคที่จะดึงดูดให้เข้าไปรวมกันกลายเป็นอนุภาคนาโดใหญ่ขึ้นหรือกลายเป็นผลึกได้

4.6.2 สมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง CoFeB

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์



รูป 4.19 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ จาก AFM

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) โดยใช้โหมดแบบไม่สัมผัส (Non-contact mode) ที่มีขนาดสแกนเท่ากับ $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ พบว่าขนาดเกรนของฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มโดยไม่ได้ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียมจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.13 และขนาดเกรนดังกล่าวจะเล็กลงเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไป ทั้งในทิศทางตั้งฉากและทิศทางขนาน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์ม (บาง CoFeB) ที่ได้จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง ภายใต้เงื่อนไขของการใส่สนามแม่เหล็กทิศทางขนานกับฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้จากการเตรียมภายใต้สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉากกลับพบว่าลักษณะขนาดเกรนนี้นั้นไม่ได้แสดงความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเท่าใดนัก แต่หากพิจารณาอย่างละเอียดแล้วจะพบได้ว่าลักษณะเกรนของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศทางขนานนั้นจะใหญ่กว่าขนาดเกรนของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย Ti ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก

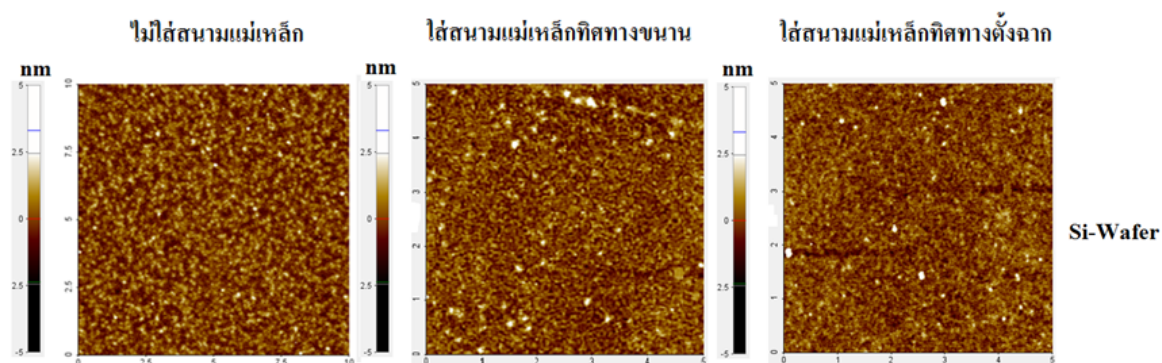
นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ยังแสดงถึงค่าความหยาบของพื้นผิว (R_q : nm) ของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะได้ว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมด้วยการเคลือบโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปนั้นมีค่าความหยาบของพื้นผิวอยู่ที่ 1.052 nm และเมื่อใส่สนามแม่เหล็กทิศทางขนานเข้าไปในการเคลือบค่าความหยาบที่ได้นั้นจะลดลงอยู่ที่ 0.508 nm และลดลงไปอีกเป็น 0.465 nm เมื่อเปลี่ยนใช้สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉากในการเคลือบ ดังนั้นจึงได้ว่าเมื่อเคลือบฟิล์มบาง CoFeB โดยใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะได้ฟิล์มบาง CoFeB ที่มีพื้นผิวที่ละเอียดมากขึ้นและเมื่อทำการเปรียบเทียบการเคลือบฟิล์มบาง CoFeB ที่ใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางที่ต่างกันเข้าไปจะพบว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบโดยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานนั้นจะมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบกว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉาก

วัสดุรองรับ	ค่าความหยาบจากการวัด AFM		
	เคลือบโดยไม่มีสนามแม่เหล็ก	เคลือบภายใต้สนามแม่เหล็กทิศทางขนาน	เคลือบภายใต้สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก
Ti/ซิลิกอน เวเฟอร์	1.339	0.704	0.633
Ti/กระจกสไลด์	1.052	0.508	0.465

ตาราง 4.8 แสดงค่าความหยาบ (R_q : nm) ที่วัดได้จาก AFM ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมภายใต้ สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางต่างกัน (ทิศทางขนานกับทิศทางตั้งฉาก)

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ ที่เคลือบด้วย Ti ด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับการวิเคราะห์ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ จะพบว่าผลของขนาดของเกรนและลักษณะพื้นผิวที่ได้ นั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ขนาดเกรนของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบด้วยสภาวะเงื่อนไข เดียวกันกับการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ดังกล่าวข้างต้น จะ มีขนาดที่เล็กลงเมื่อมีการใส่สนามแม่เหล็ก เข้าไปในระบบการ (ทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉาก) เคลือบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กที่มี ทิศทางที่ต่างกันพบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีขนาดของเกรนที่ไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อได้ทำการพิจารณาอย่าง ละเอียดพบว่าฟิล์มบางที่ได้จากการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานนั้นมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าฟิล์ม บางที่ได้จากการเคลือบภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉากอยู่เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูป 4.20 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์ จาก AFM

เช่นเดียวกันกับฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอะตอม (AFM) ดังตารางที่ 4.8 นั้นแสดงค่าความหยาบของพื้นผิวที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสภาวะการเคลือบที่ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบนั้นจะได้ฟิล์มที่มีค่าความละเอียดที่มากกว่ามาก จาก 1.339 nm ไปเป็น 0.704 nm และ 0.633 nm สำหรับฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบโดยไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ไปเป็นฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบด้วยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานและในทิศทางตั้งฉาก ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้ว่าเมื่อเคลือบฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์โดยไม่ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะได้ฟิล์มบาง CoFeB ที่มีพื้นผิวที่ละเอียดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางที่ต่างกันเข้าไปจะพบว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้นั้นแสดงค่าความหยาบที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยการเคลือบด้วยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานนั้นจะให้ฟิล์มบางที่มีลักษณะพื้นผิวที่หยาบกว่าฟิล์มบางที่เคลือบภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า

1. เราสามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB เพื่อให้ฟิล์มบางนั้นมีสมบัติพื้นผิวตามต้องการได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สเปคเตอร่าภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียม บนวัสดุรองรับทั้งสอง (ซิลิกอน เวเฟอร์ และกระจกสไลด์) (ที่ถูกเคลือบทับด้วย Ti ได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้การอบร้อน เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับความละเอียดและความหยาบที่ต้องการ
2. ภาพจาก AFM แสดงให้เห็นว่าการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับทั้งสองด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร่าที่อุณหภูมิห้องนั้นส่งผลต่อสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม โดยฟิล์มที่ได้จะมีพื้นผิวที่ละเอียดมากขึ้นเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในการเตรียมฟิล์ม แต่ความละเอียดของพื้นผิวจะแตกต่างกันไม่ชัดเจนมากเมื่อใส่สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางต่างกัน (ขนานและตั้งฉาก)

4.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB

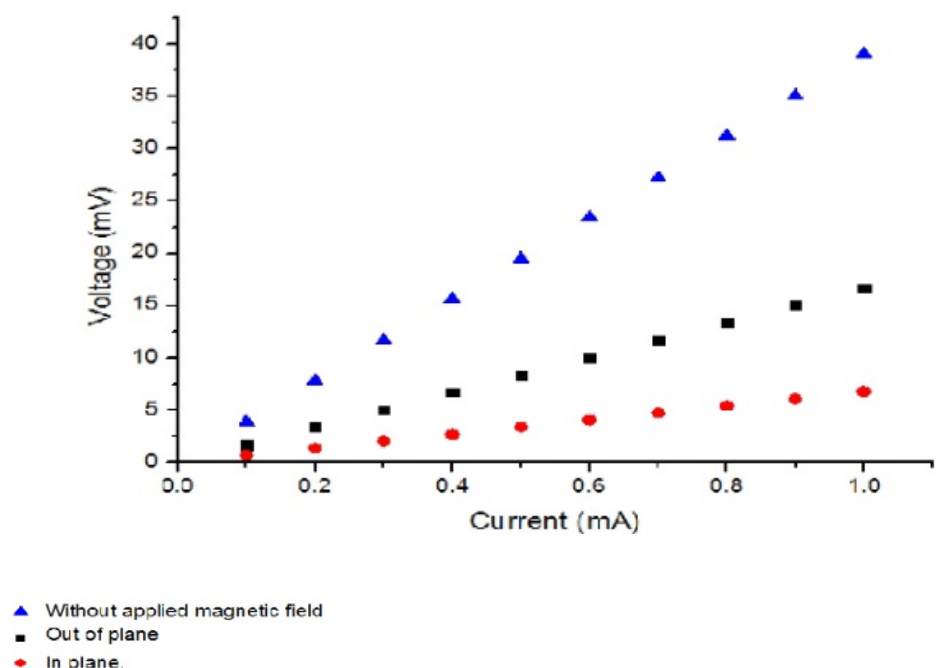
ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB โดยใช้เทคนิคของชุดเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว (Four point probe) พร้อมชุดจับยึดและขับเคลื่อนที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่าง

ศักย์ไฟฟ้า (Voltage) กับกระแสไฟฟ้า (Current) ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฟิล์มบาง CoFeB ซึ่งเตรียมบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์และซิลิกอน เวเฟอร์ที่ถูกเคลือบด้วย Ti โดยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางต่างกัน (ทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉาก)

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB บนชั้นสัมผัสของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว โดยเมื่อป้อนค่ากระแสไฟฟ้าจาก 0.1 mA ไปจนถึง 1.0 mA จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 โดยที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้านั้นมีความแปรผันตรงต่อกันซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของโอห์มที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าและความต้านทานในวงจรไฟฟ้า โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการควบคุมการจ่ายค่าความต้านทานไฟฟ้า



รูป 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว

เมื่อทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกับมีสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากจะได้ผลของความสัมพันธ์ดังในกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งจะได้ว่าเมื่อป้อนค่ากระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็ก และเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็กแต่มีทิศทางที่แตกต่างกัน จะได้ว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15

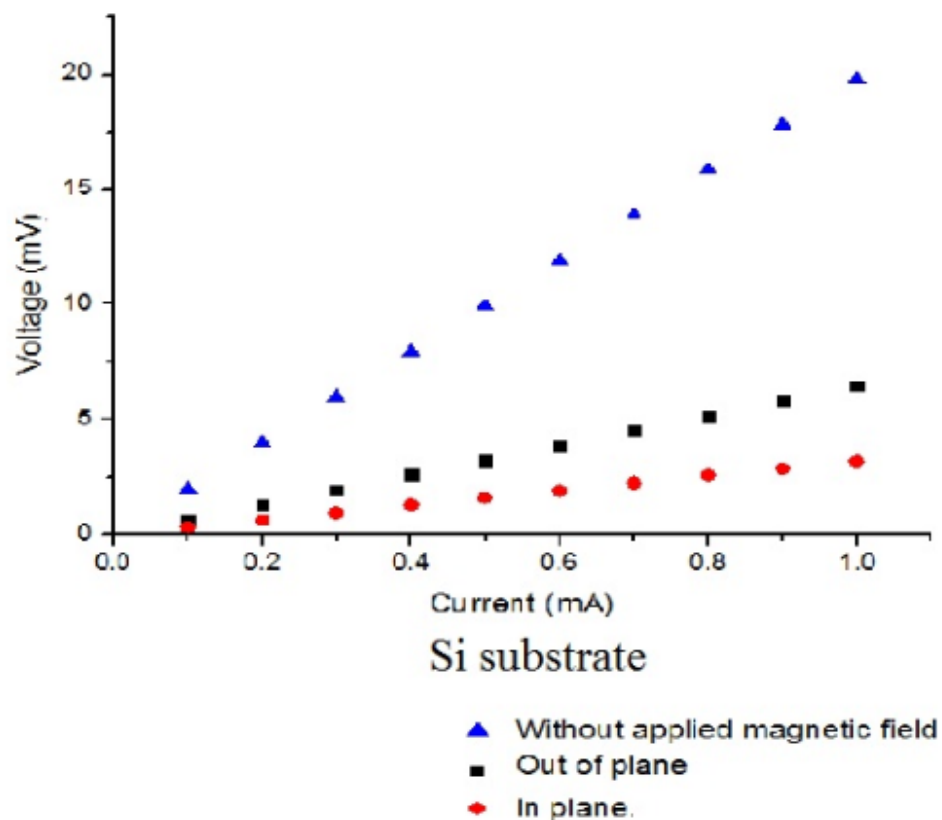
ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์

นอกจากนั้นยังได้ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์โดยการป้อนค่ากระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว หลังจากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB ที่ได้ดังกล่าวเช่นเดียวกับที่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์กับฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ไปก่อนหน้านี้ โดยเมื่อทำการป้อนค่ากระแสไฟฟ้าจาก 0.1 mA ไปจนถึง 1.0 mA ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.16 โดยที่เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นค่าความต่างศักย์ที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยผลที่ได้นั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับผลความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB บนชั้นสัมผัสของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่แสดงในรูปที่ 4.15

เช่นเดียวกันเมื่อทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ทำการเคลือบโดยไม่มีสนามแม่เหล็กกับมีสนามแม่เหล็กแต่ในทิศทางที่ต่างกันจะได้ผลของความสัมพันธ์ในกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะได้ว่าเมื่อป้อนค่ากระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็ก และเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็กแต่มีทิศทางที่แตกต่างกัน จะได้ว่า

ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนาน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

โดยสรุปแล้วจะได้ว่าจากการวัดผลความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB ทั้ง 2 ที่เตรียมบนชั้นสัมผัสของวัสดุรองรับกระจกสไลด์และวัสดุรองรับซิลิกอนเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบทับด้วย Ti ด้วยเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้วนั้นให้ผลความสัมพันธ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสนั้นมีความแปรผันตรงต่อกันซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของโอห์มที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ และเมื่อทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางเคลือบ CoFeB ที่ได้ดังกล่าวภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ทำการเคลือบโดยไม่มีสนามแม่เหล็กกับมีสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางต่างกันจะได้ว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีสนามแม่เหล็กนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็ก และเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีสนามแม่เหล็กแต่มีทิศทางที่แตกต่างกัน จะได้ว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากนั้นจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูป 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB บนบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนซิลิกอน เวเฟอร์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรมิซ์

2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์และวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่ถูกเคลือบทับด้วย Ti

ทิศทางสนามแม่เหล็ก	วัสดุรองรับ	ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)	สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\mu\Omega.m$)
ไม่ใส่สนามแม่เหล็ก	ซิลิกอน เวเฟอร์	19.85	44.98
ไม่ใส่สนามแม่เหล็ก	กระจกสไลด์	38.91	88.18
ใส่สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉาก	ซิลิกอน เวเฟอร์	6.45	14.62

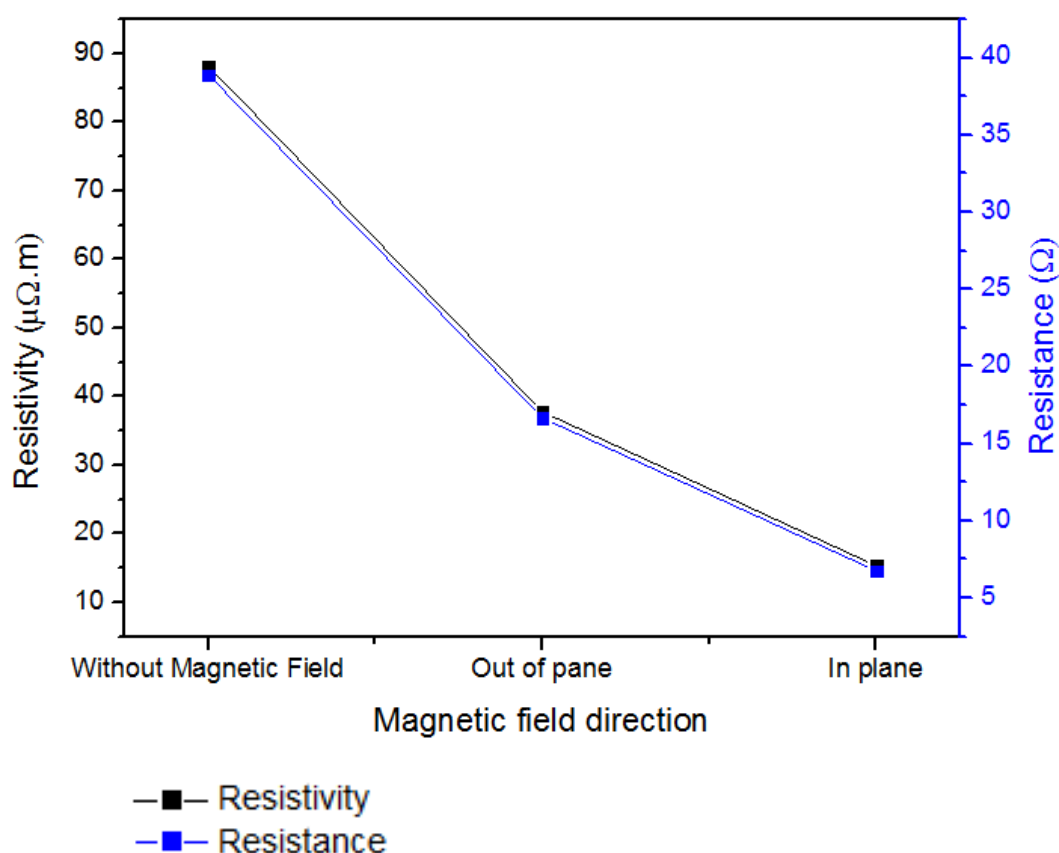
ใส่สนามแม่เหล็กทิศทางตั้ง ฉาก	กระจกสไลด์	16.68	37.79
ใส่สนามแม่เหล็กทิศทาง ขนาน	ซิลิกอน เวเฟอร์	3.2	7.25
ใส่สนามแม่เหล็กทิศทาง ขนาน	กระจกสไลด์	6.76	15.3

ตาราง 4.9 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรบสี่ขั้ว

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย Ti

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมขึ้นโดยไม่มีสนามแม่เหล็กและมีสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากบนวัสดุรองรับที่เคลือบ Ti บนกระจกสไลด์ ทำให้ได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB ในแต่ละเงื่อนไขการเตรียมนั้นค่อนข้างมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่าฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยไม่มีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบการสปีดเตอริงนั้นจะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่มากที่สุด และฟิล์มบางที่เตรียมภายใต้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานนั้นจะให้ค่าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด

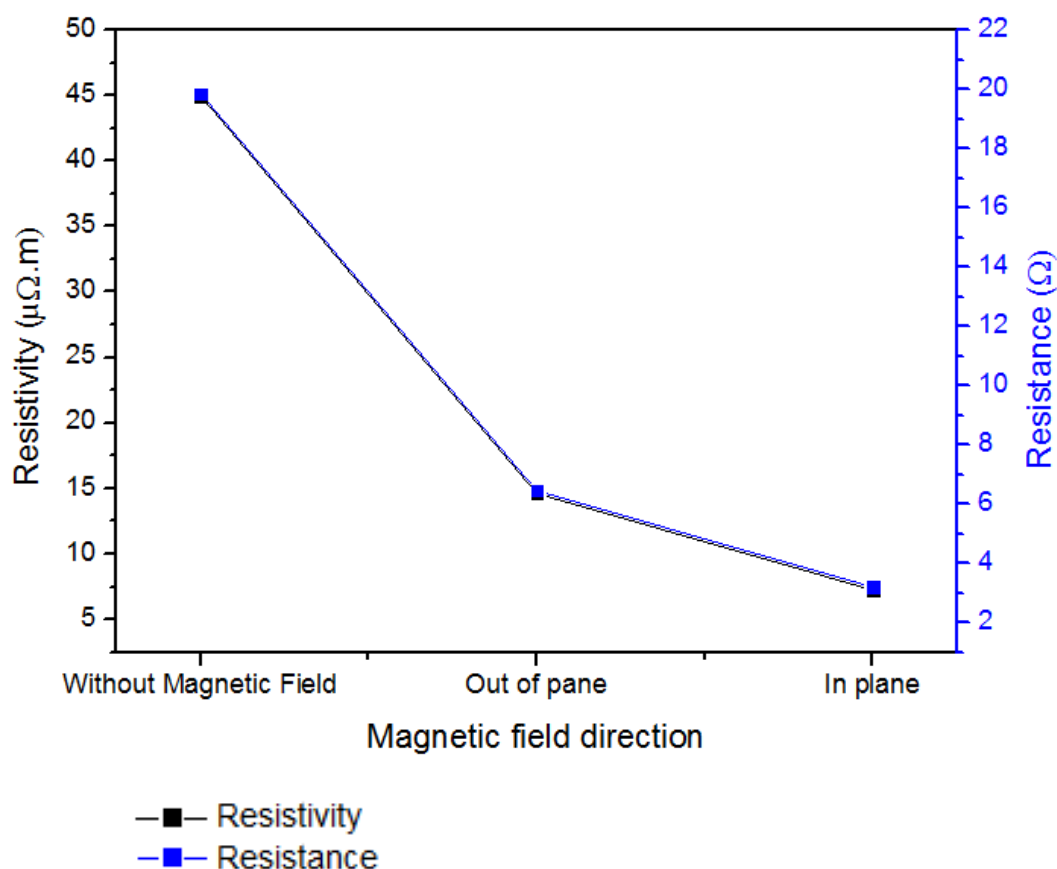
ดังนั้นจึงได้ว่า



รูป 4.23 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรมีซีว ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย Ti

ฟิล์มบางเคลือบ CoFeB บนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่เคลือบด้วย Ti

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่ถูกเคลือบด้วย Ti ภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกันกับการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย Ti นั้นพบว่าลักษณะกราฟความสัมพันธ์นั้นมีลักษณะคล้ายกันกับกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมบนวัสดุรองรับกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย Ti โดยที่ฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยไม่มีสนามแม่เหล็กนั้นจะให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่มากที่สุด และฟิล์มบางที่เตรียมภายใต้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานนั้นจะให้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูป 4.24 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรมัลซ์ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนบนวัสดุรองรับซิลิกอน เวเฟอร์ที่เคลือบด้วย Ti

จากการวิเคราะห์ถึงผลของการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในการเตรียมฟิล์มบางบนวัสดุรองรับทั้งสองนั้น ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า

1. เราสามารถเตรียมฟิล์มบาง CoFeB เพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางให้ดีขึ้นได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ภายใต้การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียม บนวัสดุรองรับทั้งสอง (ซิลิกอน เวเฟอร์ และกระจกสไลด์ (ที่ถูกเคลือบด้วย Ti ได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้การอบร้อน โดยสามารถใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางใด ๆ ก็ได้ แต่สำหรับในการวิจัยครั้งนี้ หากเตรียมฟิล์มบาง (ทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉาก) CoFeB ภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการใส่สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานจะให้ผลของสมบัติไฟฟ้าที่ดีที่สุด
- จากกราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดโพรมัลซ์ของฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบบนบนวัสดุรองรับทั้งสองนั้น แสดงให้เห็นว่าการใส่

สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียมฟิล์มบาง CoFeB บนวัสดุรองรับทั้งสองด้วยเทคนิคการเคลือบแบบ
 ดิซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงที่อุณหภูมิห้องนั้นส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้เมื่อ
 ใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในขณะเตรียมจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่
 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในชั้นของฟิล์มบาง
 CoFeB ที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อศึกษาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB โดยเทคนิคซีซีแมกนีตรอน สเป็คเตอรืง เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบาง CoFeB ที่เตรียมโดยวิธีซีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง และวิเคราะห์สภาวะเงื่อนไขในกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB ที่เหมาะสมต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB เช่น สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวและสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น รวมทั้งศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลของวัสดุรองรับที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB เช่น สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวและสมบัติความเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพฟิล์ม ได้แก่ ชนิดของแผ่นรองรับ สภาวะเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม และการใส่สนามแม่เหล็กในขณะที่เคลือบฟิล์ม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว และสภาพการยึดติดของฟิล์ม สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในขณะที่เคลือบโดยฟิล์มจะเปลี่ยนโครงสร้างจาก ออสเทนไนต์ไปเป็นโครงสร้างแบบผลึกบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมมีพลังงานจลน์สูงขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นผลึก การเตรียมฟิล์มลงแผ่นรองรับ Si-wafer ให้สมบัติเชิงโครงสร้างที่ดีกว่าการเตรียมลงบนกระจก เนื่องจากแผ่นรองรับมีการจัดเรียงอะตอมที่เป็นระเบียบมากกว่ากระจกที่มีโครงสร้างแบบอสเทนไนต์ ผลจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่า ฟิล์มบาง CoFeB ที่เคลือบลงบนกระจกให้ผลต่อลักษณะฟิล์มที่เรียบ ขนาดของเกรนที่เล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับ Si-wafer ผลการทดสอบสภาพการยึดติดของฟิล์มบาง CoFeB พบว่า ฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับกระจก หลุดลอกออกได้ง่ายกว่าฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับ Si wafer นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อสภาพการยึดติดที่ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม

การใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแผ่นรองรับในขณะที่เคลือบฟิล์มเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กให้กับฟิล์ม CoFeB จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ กัน อย่างไรก็ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กกับส่งผลโดยตรงต่อ สมบัติพื้นผิวและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CoFeB โดยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กทำให้ฟิล์มมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น และค่าความต้านทานไฟฟ้าลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับแผ่นรองรับส่งผลดีต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด จากข้อสรุปทำให้สามารถเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง CoFeB สำหรับประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้เหมาะสม

บรรณานุกรมเอกสารอ้างอิง/

- [1] Yuan-Tsung Chen, and W.H. Hsieh, J. Alloys Compd. 552, 283 (2013).
- [2] M.S. Marques et al., Thin Solid Films 520, 2173 (2012).
- [3] Hu Wang et al., Physics Procedia 18, 267 (2001).
- [4] R. Mantovan et al., Thin Solid Films 553, 75 (2013).
- [5] Y. T. Chen and C. C. Chang, J. Alloys Compd. 498, 113 (2010).
- [6] M. Raju, Sujeet Chaudhary and D.K. Pandya, J. Magn. Magn. Mater. 332, 109 (2013).
- [6] H. Wang et al., Phys. Procedia 18, 267 (2011).
- [7] Shin-Ichi Aoqui and M. Munakata, Mater. Sci. Eng. A 413–414, 550 (2005).
- [8] H. Katada et al., IEEE Trans. Magn., 36, 2905 (2000).
- [9] Zhe Liu et al., Journal of Nanomaterials, Vol. 2012, Article ID 174735, 5 pages, 2012.
doi:10.1155/2012/174735
- [10] S. Chikazumi and T. Oomura, Journal of the Physical Society of Japan, 10, 842 (1955).
- [11] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, IEEE Trans. Magn. 25, 3324 (1989).

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายราชศักดิ์ สักดานุภาพ.....

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ.	ฟิสิกส์ (เกียรตินิยมฯ 1)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2545
วทม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2548
วทด.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) วัสดุศาสตร์, ฟิสิกส์ของฟิล์มบาง.....

.....

.....

.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2553	Best paper award in materials for energy session, MSAT 6, 2010	MTEC & WD

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

THAI JOURNAL OF PHYSICS, SERIES 9, (2013).....

C. Ibuki and R. Sakdanuphab “Structural Morphological and Adhesion Properties of CoFeB Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering” Advanced Materials Research 802 (2013) pp. 47-52.....

.....

.....

การเสนอผลงานวิชาการ

The 8th Annual Conference of the Thai Physics Society, March 21-23 2013, Chiang Mai, Thailand.....

The 8th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2013) Korea.....

.....

.....

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

.....

.....

.....

อื่นๆ

.....

.....