



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในฟิล์มบาง TbFe-PZT เพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก

Studies of Magnetoelectric Effect in TbFe-PZT Thin Film for Magnetic Recording Read Head Application

นามผู้วิจัย นางพรรณิ หอมทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา อีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในฟิล์มบาง TbFe-PZT
เพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก

Studies of Magnetoelectric Effect in TbFe-PZT Thin Film
for Magnetic Recording Read Head Application

โดย

นางพรรณิ หอมทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิลิกส์)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรรณณี หอมทอง 2557: การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในฟิล์มบาง
TbFe-PZT เพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, Ph.D. 92 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในฟิล์มบางของ TbFe₂-PZT ตามการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม สนามแม่เหล็กสถิต และความถี่ของสนามแม่เหล็กแบบสลับ โดยแผ่นฟิล์มบางแบบสามชั้นของ TbFe₂/Pb(Zr_{0.46}Ti_{0.54})O₃/TbFe₂ และ TbFe₂/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃/TbFe₂ ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง จากการศึกษาพบว่า ความต่างศักย์ ME ของตัวอย่างที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบ สนามแม่เหล็กสถิต ขนาดและความถี่ของสนามแม่เหล็กสลับอย่างชัดเจน โดยสัมประสิทธิ์ ME จะมีค่าเพิ่มตามความถี่จนมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 851 เฮิร์ตซ์ และมีค่าลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ ME สูงสุด 347 โวลต์ต่อเซนติเมตรเออร์สเตด สามารถตรวจพบได้ในตัวอย่าง 20 nm-TbFe₂/40 nm-Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O₃/20 nm-TbFe₂ โดยสัมประสิทธิ์ ME จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ฟิล์มตัวอย่าง TbFe₂/Pb(Zr_{0.46}Ti_{0.54})O₃/TbFe₂ และ TbFe₂/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃/TbFe₂ นั้น มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสถิตที่ใช้ในการไบแอสที่เหมือนกัน และพบว่าหัวอ่านแม่เหล็กแบบอาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกได้จากฟิล์มบาง TbFe-PZT ที่ถูกทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ นั้นมีศักยภาพที่จะใช้เป็นหัวอ่านแม่เหล็กได้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Panee Homthong 2014: Studies of Magnetoelectric Effect in TbFe-PZT Thin Film for Magnetic Recording Read Head Application. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Pongsakorn Juntarutana, Ph.D. 92 pages.

In this thesis, magnetoelectric (ME) effect in TbFe-lead zirconate titanate thin films will be studied as function of layers thickness, an applied static magnetic field (± 5 kOe), magnitude (0.25–25 Oe) and frequency (501–1251 Hz) of ac magnetic field. The tri-layer laminated $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ and $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ thin films were prepared by rf magnetron sputtering. The ME voltage of the samples strongly depends on thickness of the layers, applied static magnetic field, magnitude and frequency. The ME coefficient increased with increasing frequency of modulated ac magnetic field and reached a maximum at 851 Hz before falling upon a further increase the frequency. The maximum ME coefficient of $347 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$ for 20 nm- $\text{TbFe}_2/40$ nm- $\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/20$ nm- TbFe_2 was observed. The ME coefficient decreased with increasing thickness of the layers. Both $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ and $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ thin films exhibited similar bias static field dependence. A magnetic read head based on magnetoelectric effect was tested in the laboratory prototype. The TbFe-lead zirconate titanate thin films have the potential to be used as a magnetic read head.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. พงศกร จันทรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้
ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไข
วิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วีรพัฒน์ พลอัน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขและ
ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง นายชาญวุฒิ
ศรีผึ้ง เจ้าหน้าที่แห่งสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ได้ให้การแนะนำและคำปรึกษาพร้อมทั้ง
ดูแลในการผลิตฟิล์มบางจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์ใน
ด้านการเรียน และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความ
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ สำหรับคำปรึกษา และความ
ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ
พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

พรรณี หอมทอง
กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	55
ผลการทดลอง	64
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	84
ภาคผนวก	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความละเอียดในการวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสงด้วยโหมดการวัดแบบ PSI และ VSI	38
2	รายละเอียดของวัสดุเป้าสารเคลือบที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบาง	45
3	แสดงเงื่อนไขระบบเคลือบด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง $TbFe_2$	55
4	แสดงเงื่อนไขระบบและอัตราการเคลือบฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$	56
5	แสดงเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มสำหรับเป้าสารเคลือบแต่ละชนิด	58
6	สัญลักษณ์ชิ้นงานตัวอย่างของฟิล์มบาง PZT1	62
7	สัญลักษณ์ชิ้นงานตัวอย่างของฟิล์มบาง PZT2	62
8	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PZT2 ที่อบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ	71
9	แสดงค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่างเมื่อค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาแตกต่างกัน	75
10	ค่า α_v ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ เมื่อความหนาแตกต่างกัน	77
11	ค่า α_v ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ เมื่อความหนาแตกต่างกัน	79
12	ค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่างเมื่ออัตราส่วนระหว่าง $PbZrO_3: PbTiO_3$ แตกต่างกัน	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัสดุคู่ควบระหว่างวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	8
2	แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (ก) แบบตรง (ข) แบบผกผัน	9
3	สภาวะแม่เหล็กพารา (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังได้รับสนามแม่เหล็ก H	22
4	สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) โดเมนแม่เหล็กก่อนได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) โดเมนแม่เหล็กหลังจากได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก	23
5	สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังจากได้รับสนามแม่เหล็ก H	23
6	สภาวะแม่เหล็กเฟอร์รี (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังจากได้รับสนามแม่เหล็ก H	24
7	โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของเทอร์เบียม	25
8	โครงสร้างผลึกแบบทรงลูกบาศก์รวมศูนย์ของเหล็ก	26
9	แสดงค่า magnetostriction ของวัสดุแมกนีโตสทริกทีฟชนิดต่าง ๆ เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก	27
10	โครงสร้างเพอร์ฟสไกต์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	28
11	การเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นเตตระโกนอลของ $BaTiO_3$ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า $120\text{ }^{\circ}\text{C}$	29
12	แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรงและแบบผกผัน	30
13	แผนภาพแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่อัตราส่วน $PbZrO_3: PbTiO_3$ ต่างกัน	31
14	แสดงแผนภาพการต่อเครื่องวัดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก	33
15	แสดงการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง	36
16	แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ก) ภายในพลาสมา และ (ข) บริเวณบนผิวเป้า	37
17	แผนภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM และ (ข) อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและชิ้นงานตัวอย่าง	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	แสดงเงื่อนไขของการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	40
19	แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องดิฟแฟรกโทมิเตอร์	41
20	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของ VSM	43
21	แผนภาพการต่อขดลวดสำหรับตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก	44
22	เป้าสารเคลือบที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ฟิล์มบาง (ก) เป้า Cu (ข) เป้า TbFe ₂ (ค) เป้า Pb(Zr _{0.46} Ti _{0.54})O ₃ และ (ง) เป้า Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃	46
23	เตาเผาความร้อนสูงแบบท่อชนิดตั้งโปรแกรมได้	47
24	เครื่องเคลือบฟิล์มบางอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	47
25	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD)	48
26	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	49
27	เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง รุ่น NT1100	49
28	แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง	50
29	ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์	51
30	ฟิกซ์เจอร์สำหรับตรวจวัด ME	51
31	แผนภาพของอุปกรณ์สำหรับวัดสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME	52
32	แผนภาพการต่ออุปกรณ์กรณีที่ใช้เครื่องขยายประจุ	53
33	รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม รับค่า และประมวลผลสัญญาณ สำหรับระบบตรวจวัดสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME	53
34	โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม รับค่า และประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบตรวจวัด สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME	54
35	แสดงลักษณะวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่เกิดจากคู่ควมกันระหว่าง TbFe ₂ กับ PZT	55
36	แสดงลำดับการเคลือบฟิล์มบาง	58
37	แสดงการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับชิ้นงานตัวอย่างเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	61
38	แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ ME	61
39	ฟิล์มบาง TbFe ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น PZT	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
40	แสดงวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ แบบสามชั้น เมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง	65
41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่มีผลต่อค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ แบบสามชั้น	66
42	กราฟแสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไบแอสขนาด 280 Oe 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 kOe ที่ความถี่เดียวกัน	66
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลากับค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ แบบสามชั้น เมื่อวัดที่ความถี่ (ก) 500 Hz และ (ข) 2.5 kHz	67
44	ลักษณะฟิล์มบาง (ก) เคลือบทองแดง และ (ข) เคลือบ $TbFe_2$	68
45	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3$ ที่ผ่านการอบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน	69
46	ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางจากเครื่อง SEM ของฟิล์มบาง PZT	70
47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ที่ส่งผลต่อการแสดงค่าสัมประสิทธิ์ ME ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ความหนา 400 nm (PZT2_E) แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ระหว่าง 2 kOe ถึง -2 kOe	72
48	แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ความหนา 400 nm (PZT2_E) ในช่วง 501 ถึง 1,251 Hz	73
49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) กับค่า α_v ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ที่ความถี่ 851 Hz สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ในช่วง 2 kOe ถึง -2 kOe	74
50	แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ที่มีต่อค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่าง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ความหนา 400 nm	75
51	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ความหนาต่างกันของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb-[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส 1 ถึง -1 kOe	76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ได้จากฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่มีความหนาแตกต่างกัน	77
53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ความหนาต่างกันของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส 1 ถึง -1 kOe	78
54	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ได้จากฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่มีความหนาแตกต่างกัน	79
55	เซ็นเซอร์ต้นแบบจากวัสดุแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์	80
56	แสดงสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ต้นแบบ	81

การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในฟิล์มบาง TbFe-PZT
เพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก

Studies of Magnetoelectric Effect in TbFe-PZT Thin Film for
Magnetic Recording Read Head Application

คำนำ

อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีการเติบโตอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดวงเงินหมุนเวียนในตลาดโลกปีละหลายพันล้านดอลลาร์ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของสื่อบันทึกข้อมูลแบบบิตแม่เหล็กนั้นสอดคล้องกับอัตราความต้องการใช้งานคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อจัดเก็บข้อมูลที่มีอยู่อย่างมหาศาล และมีแนวโน้มเพิ่มทวีขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการค้นคว้าวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับสื่อบันทึกข้อมูล หรือส่วนของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในหัวอ่านบิตข้อมูลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลจากระดับ Gb/in^2 เป็น Tb/in^2 ทำให้ได้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีขนาดเล็กลง และช่วยให้การเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

ระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กทั้งหมดในปัจจุบันใช้หัวอ่านซึ่งเคลื่อนที่อยู่เหนือผิวของสื่อบันทึกข้อมูลโดยมีระยะห่างเพียงไม่กี่นาโนเมตร โดยหัวอ่านดังกล่าวจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ Giant Magnetoresistance (GMR) หรือ Tunneling Magnetoresistance (TMR) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากบิตข้อมูลแม่เหล็ก โดยความต้านทานของเซ็นเซอร์ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสนามแม่เหล็กในการนำเซ็นเซอร์แบบ GMR หรือ TMR ไปใช้เป็นหัวอ่านนั้นถ้าหากต้องการเสถียรภาพการทำงานที่ดีและน่าเชื่อถือแล้วนั้น หัวอ่านจะต้องประกอบไปด้วยวัสดุฟิล์มบางรวมประมาณ 15 ชั้น โดยในส่วนประกอบดังกล่าวจะต้องมีชั้นของวัสดุที่ทำหน้าที่ป้องกันสนามแม่เหล็กที่เกิดจากบิตข้อมูลอื่น ๆ นอกเหนือจากบิตข้อมูลเป้าหมาย ดังนั้นถ้าหากต้องการให้หัวอ่านสามารถอ่านบิตข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ จำเป็นต้องทำให้ชั้นของวัสดุที่อยู่ระหว่างชั้นของวัสดุป้องกันสนามแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหัวอ่านจะสามารถอ่านบิตข้อมูลได้ถูกต้องถ้าหากความกว้างของชั้นวัสดุป้องกันสนามแม่เหล็กมีขนาดไม่เกินสองเท่าของบิตข้อมูล (อภิรัฐ, 2549) อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ความจุของสื่อบันทึกข้อมูลเพิ่มขึ้นนั้น จำเป็นต้องลดขนาดของบิตข้อมูลที่บันทึกลงบนสื่อ และในการอ่านก็จำเป็นต้องใช้หัวอ่านที่มีขนาดเล็กลงเช่นเดียวกัน แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือ หนึ่งในชั้นของวัสดุที่อยู่ระหว่างชั้นป้องกันสนามแม่เหล็กนั้นเป็นวัสดุเฟอร์ไรต์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งคอยทำหน้าที่ให้สนามแม่เหล็กเพื่อไปไบแอสวัสดุ GMR

ดังนั้น ถ้าหากลดความหนาของวัสดุในชั้นดังกล่าวจะส่งผลต่อขนาดของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการไบแอสและทำให้หัวอ่านทำงานผิดพลาด (Williams, 2001) นี่จึงเป็นข้อจำกัดของหัวอ่านบิตข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์ GMR และ TMR

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้ค้นพบเซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (magnetoelectric: ME) ในวัสดุจำพวกมัลติเฟอร์โรอิก (multiferroic) ซึ่งนักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่าจะสามารถนำเซ็นเซอร์ชนิดนี้ไปใช้เป็นหัวอ่านบิตข้อมูลแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้ในปัจจุบันได้ และหัวอ่านแบบใหม่นี้ยังมีข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก นั่นคือหัวอ่านที่ใช้ปรากฏการณ์ ME นั้น สามารถอ่านบิตข้อมูลได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวอ่านเหมือนเช่นในกรณีของหัวอ่านแบบ GMR หรือ TMR จึงทำให้สามารถลดการใช้พลังงานและความร้อน ช่วยให้อุปกรณ์ที่อาศัยแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสามารถใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามในการนำเซ็นเซอร์แบบ ME ไปประยุกต์เป็นหัวอ่านบิตข้อมูลแม่เหล็กนั้น จะต้องออกแบบเซ็นเซอร์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโน สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงประมาณ 100 Oe (ซึ่งมีค่าประมาณสนามของบิตแม่เหล็ก) ได้ดี และสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต้องมีค่าสูงกว่าสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากผลของปริมาณอื่นๆ เช่นการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกซึ่งประกอบด้วยฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ และ $\text{TbFe}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54})\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ความหนาของฟิล์มต่าง ๆ กัน โดยใช้เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิล็กทริกในฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกในข้อ 1 โดยศึกษาผลของความถี่ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา ขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอสที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิล็กทริก
3. เพื่อศึกษาผลของความหนาของตัวอย่างและองค์ประกอบทางเคมีในฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกในข้อ 1 ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิล็กทริก
4. เพื่อพัฒนาหัวอ่านบิตข้อมูลแบบแม่เหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์แมกนีโตอิล็กทริก

ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3/TbFe_2$ และ $TbFe_2/Pb(Zr_{0.46}Ti_{0.54})O_3/TbFe_2$ โดยฟิล์มบางตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นจะเตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง ฟิล์มบางตัวอย่างที่ได้จะนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางแม่เหล็กจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง ความหนาของฟิล์มจะวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง สำหรับการศึกษากการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกจะวัดด้วยระบบตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME โดยศึกษาผลของความถี่ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา ขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอส ความหนาและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางตัวอย่าง พร้อมทั้งนำฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้ไปผลิตเครื่องต้นแบบเซ็นเซอร์หัวอ่านบิตข้อมูลแบบแม่เหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ ME

การตรวจเอกสาร

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (magnetoelctric effect: ME) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามไฟฟ้า (E) กับพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งเกิดกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก (Srinivasan, 2010a) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแบบตรง

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแบบตรง (direct magnetoelctric effect: DME) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการให้สนามแม่เหล็ก (H) แก่วัสดุแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นของวัสดุแม่เหล็ก พลังงานที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้วัสดุชั้นเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเช่นกัน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของไดอิเล็กทริก (δP) ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังสมการที่ (1)

$$\alpha_H = \frac{\partial P}{\partial H} \cong \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E}{\partial H} \quad (1)$$

โดย α_H คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ ME เมื่อให้สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาแก่วัสดุ มีหน่วย s/m

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของสุญญากาศ มีค่า $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative permittivity)

P คือ ค่าโพลาไรเซชัน มีหน่วย C/m²

E คือ ค่าสนามไฟฟ้า มีหน่วย N/C

H คือ ค่าสนามแม่เหล็ก มีหน่วย Oe

2. ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแบบผกผัน

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกผกผัน (convers magnetoelctric effect: CME) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการให้สนามไฟฟ้า (E) แก่วัสดุส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชั้น พลังงานที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นวัสดุแม่เหล็กทำให้สภาวะแม่เหล็กหรือแมกนีโตเซชัน (δM) ในวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ (2)

$$\alpha_E = \frac{\partial M}{\partial E} \quad (2)$$

โดย α_E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ME เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุ มีหน่วย V/cm.Oe
 M คือ ค่าแมกนีโตเซชัน มีหน่วย A/m

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (1) พบว่าในการวัดค่า α_H นั้นสามารถออกแบบระบบการวัดได้ โดยการนำวัสดุตัวอย่างไปวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) และบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) แล้วจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชัน (δP) หรือการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า (δE) และนำมาคำนวณหาค่า α_H และจากสมการที่ (1) การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กส่งผลให้สนามไฟฟ้าในวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งตรวจวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ผิวของวัสดุ ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะนิยามว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME (α_v) ดังสมการ

$$\alpha_v = \frac{\partial E}{\partial H} \quad (3)$$

หรือ

$$\alpha_v = \frac{V_{out}}{t H_{ac}} \quad (4)$$

โดย α_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME มีหน่วย V/cm.Oe ในระบบหน่วย cgs
 t คือ ค่าความหนารวมของวัสดุ มีหน่วย เซนติเมตร (cm)
 V_{out} คือ ค่าความต่างศักย์เอาท์พุท มีหน่วย โวลต์ (V)

ความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ (1) และสมการที่ (3) พบว่า ค่าสภาพรับไว้ได้ ME และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (5)

$$\alpha_H = \epsilon_0 \epsilon_r \alpha_v \quad (5)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5) พบว่าถ้าต้องการเพิ่มค่าสภาพรับไว้ได้ ME นั้น จะต้องสังเคราะห์วัสดุและกำหนดเงื่อนไขในการวัดเพื่อให้ได้ค่า V_{out} ที่มากและเหมาะสมที่สุด และสำหรับการวัดค่า α_E สามารถวัดได้ในทำนองเดียวกันคือนำวัสดุตัวอย่างไปไว้ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า (E) แล้วจึงวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของแมกนีโตเซชัน (δM)

เนื่องจากปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวัสดุจำพวก มัลติเฟอร์โรอิก เพื่อเป็นการทำความเข้าใจและรู้จักกับวัสดุนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ วัสดุ มัลติเฟอร์โรอิกและลักษณะการคู่ควบไว้ดังนี้

วัสดุ มัลติเฟอร์โรอิก

คำว่า “มัลติเฟอร์โรอิก” (multiferroic) เริ่มใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1994 โดย H. Schmid ซึ่งเขาได้ให้คำนิยามนี้แก่วัสดุเฟสเดียวที่เกิดจากการคู่ควบกันระหว่างวัสดุเฟอร์โรอิก ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป สำหรับวัสดุเฟอร์โรอิกนั้นมีทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่

1. วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) คือวัสดุที่สามารถเกิดสภาวะทางไฟฟ้า หรือสามารถเปลี่ยนทิศทางโพลาไรเซชัน (polarization) เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่มากพอ เช่น แบเรียมไททานเนต (BaTiO_3), เลดไททานเนต (PbTiO_3) เป็นต้น

2. วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) คือวัสดุที่สามารถเกิดสภาวะแม่เหล็ก แบบเฟอร์โร (ferromagnetism) ซึ่งเป็นสภาวะแม่เหล็กที่สามารถทำให้คงอยู่ได้แม้จะไม่ได้อยู่ใน สภาวะที่อยู่ภายใต้อำนาจของสนามแม่เหล็ก เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni)

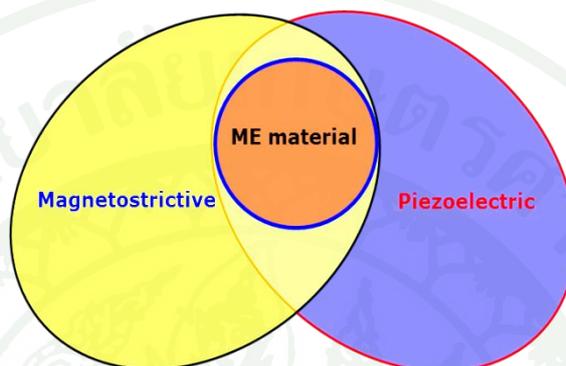
3. วัสดุเฟอร์โรอีลาสติก

วัสดุเฟอร์โรอีลาสติก (ferroelastic materials) คือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างที่ จุดเสถียรและยังรักษาสภาพให้คงอยู่ได้ถึงแม้จะไม่ได้รับความเค้น

4. วัสดุเฟอร์โรทอริติก

วัสดุเฟอร์โรทอริติก (ferrotoridic materials) คือวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก ที่เกิดจากการหมุนของแมกนีโตเซชันหรือโพลาไรเซชัน

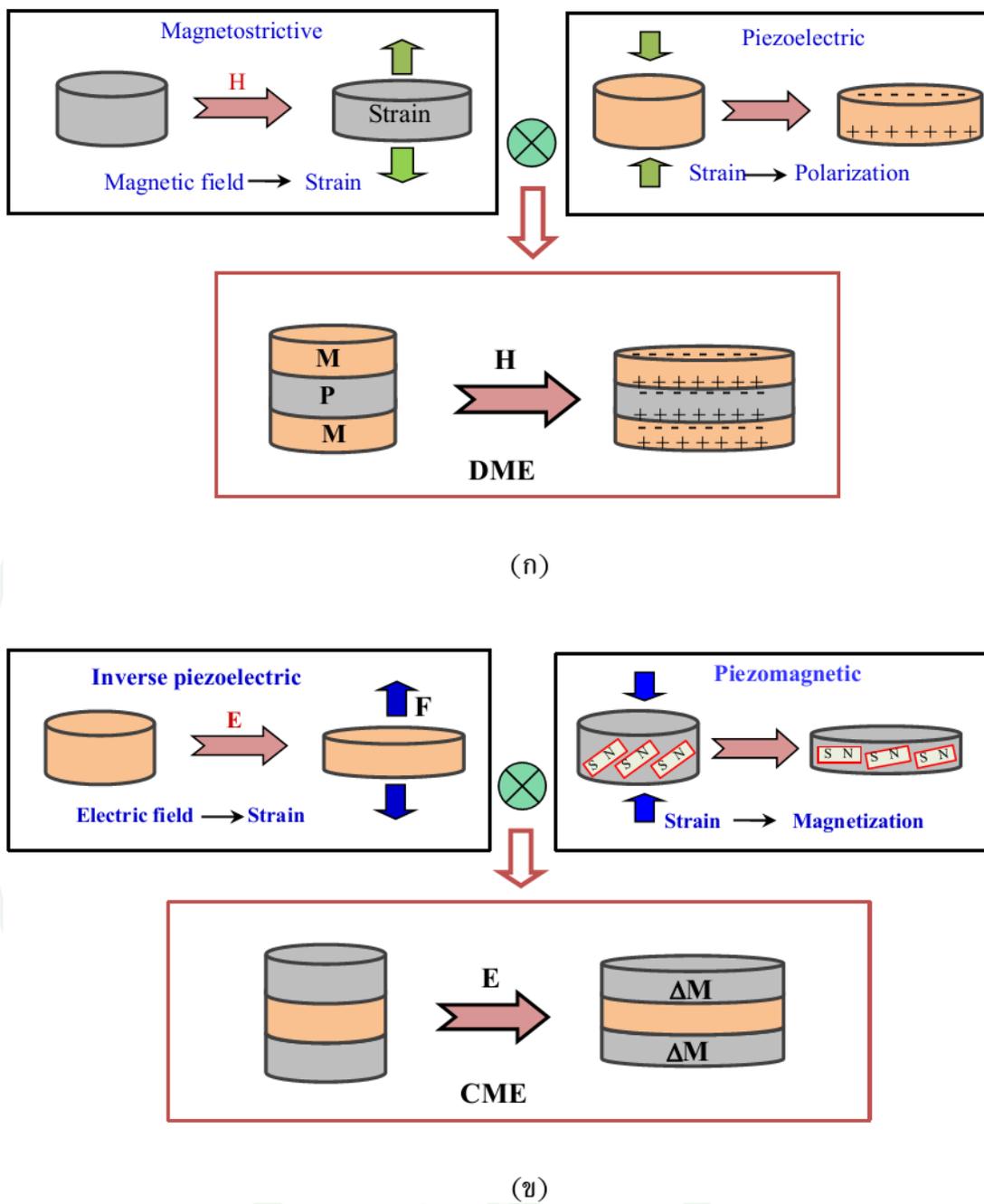
ในส่วนของวัสดุแมกนีโตอิเล็กทริก (magnetoelectric materials) นั้นเกิดจากการคู่ควบกันระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังภาพที่ 1 ลักษณะพิเศษคือเมื่อวัสดุได้รับสนามไฟฟ้าแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแม่เหล็ก (magnetization: M) และเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กแล้วทำให้สภาวะทางไฟฟ้า (polarization: P) เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็คือลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 1 วัสดุคู่ควบระหว่างวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกที่เกิดในวัสดุที่นำมาคู่ควบกันนั้นจะมีความสัมพันธ์กับเฟสของวัสดุ ซึ่งสื่อกลางที่ทำให้ปรากฏการณ์นี้เกิดได้คือการเกิดความเครียดขึ้นในวัสดุ กล่าวคือ การเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกโดยตรงนั้น เมื่อวัสดุแม่เหล็กได้รับสนามแม่เหล็กในแนวเดียวกับระนาบของวัสดุจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นของวัสดุแม่เหล็กขึ้นในขณะเดียวกันก็จะเกิดพลังงานเนื่องจากความเค้นทางกลศาสตร์ขึ้น เรียกว่าการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟ และเรียกวัดนี้ว่าวัสดุแมกนีโตสตริกทีฟ เมื่อความเครียดในชั้นวัสดุแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง พลังงานที่เกิดขึ้นก็จะส่งผลให้วัสดุชั้นเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเช่นกัน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันของไดอิเล็กทริก (ΔP) ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังภาพที่ 2 (ก)

สำหรับการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแบบผันกลับนั้น เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกับระนาบของวัสดุส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขึ้น พลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดในชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ส่งผลต่อความเครียดในชั้นวัสดุแม่เหล็กทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแมกนีโตเซชัน (ΔM) ในวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก ดังภาพที่ 2 (ข)



ภาพที่ 2 แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (ก) แบบตรง และ (ข) แบบผกผัน

ในกรณีวัสดุคู่ควมมีลักษณะเป็นแบบสามชั้น ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก (ME coefficient, α_E) จะขึ้นกับปริมาณและค่าคงตัวต่างๆ ดังสมการที่ (6)

$$\alpha_{E,31} = [-kv(1-v)^m(q_{11}+{}^m q_{21})^p d_{31}] [{}^p \varepsilon_{33}({}^m s_{12}+{}^m s_{11})kv+{}^p \varepsilon_{33}({}^p s_{11}+{}^p s_{12})(1-v)-2k^p d_{31}^2(1-v)]^{-1} \quad (6)$$

- โดย k คือ พารามิเตอร์การคู่ควมของวัสดุ
 v คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
 ${}^m q_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นแม่เหล็ก แสดงค่าแมกนีโตเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง i เมื่อมีสนามแม่เหล็กกระทำในทิศทาง j
 ${}^p d_{31}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก แสดงค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ 3 เมื่อมีแรงกระทำในทิศทางที่ 1
 ${}^p \varepsilon_{33}$ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 ${}^m s_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นของวัสดุแมกนีโตสตริกทีฟ
 ${}^p s_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ตัวแปรที่ส่งผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME คือความหนาของชั้นวัสดุที่เคลือบบนแผ่นรองรับ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแมกนีโตสตริกทีฟกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงให้เห็นได้จากค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction, v_p) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังสมการที่ (7)

$$v_p = \frac{t_p}{t_m+t_p+t_i} \quad (7)$$

- โดย t_m คือ ความหนาของชั้นวัสดุแมกนีสตริกทีฟ
 t_p คือ ความหนาของชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
 t_i คือ ความหนาของชั้นวัสดุประสาน

เมื่อแทนค่าสมการ (7) ลงในสมการ (6) จะได้

$$\alpha_{E,31} = [-k(t_m+t_i)^m(q_{11}+{}^m q_{21})^p d_{31}]^{-1} [(t_m+t_p+t_i) \times \{k^p \varepsilon_{33}({}^m s_{12}+{}^m s_{11}) + \left(\frac{t_m+t_i}{t_p}\right) \times [{}^p \varepsilon_{33}({}^p s_{11}+{}^p s_{12})-2k^p d_{31}^2(1-v)] \}]^{-1} \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (8) พบว่าความหนาของชั้นวัสดุประสานมีผลต่อค่า $\alpha_{E,31}$ โดยถ้า t_i ลดลงค่า $\alpha_{E,31}$ จะเพิ่มขึ้น ($\alpha_{E,31} \propto \frac{1}{t_i}$) และมีค่ามากที่สุดเมื่อ $t_i = 0$

เพื่อให้มีความเข้าใจที่ตรงกันในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจะเรียกวัสดุแมกนีโตอิเล็กทริกหรือวัสดุ ME ปรากฏการณ์ ME ว่า วัสดุแมกนีโตอิเล็กทริก หรือวัสดุ ME

การศึกษาและเทคนิคการสังเคราะห์วัสดุแมกนีโตอิเล็กทริก

1. การศึกษา

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Atrov ในปี ค.ศ. 1960 ซึ่งพบในวัสดุแมกนีโตอิเล็กทริกที่มีเฟสเดียว สำหรับวัสดุเฟสเดียวที่เขาทำการศึกษาในครั้งนั้นคือโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และพบว่าความสมมาตรของผลึกในวัสดุเฟสเดียวเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ ME อีกทั้งยังพบว่าวัสดุเฟสเดียวนั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ ME ไม่สูงนักที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของเฟสและกระแสรั่วไหลที่มีค่าสูง จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการปรับปรุงลักษณะและวิธีการในการผลิตวัสดุ ME ให้มีลักษณะเป็นชั้นๆ หรือมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง การศึกษาปรากฏการณ์ ME ในฟิล์มบาง เช่นฟิล์มบาง TbFe/PZT ได้ดำเนินการไปแล้วบางส่วน ในปี ค.ศ. 1993 โดย Harshe *et al.* ได้ศึกษาปรากฏการณ์ ME ของวัสดุแบบสองชั้นและหลายชั้นทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงการทดลอง พบว่าปรากฏการณ์ ME ในโครงสร้างวัสดุแบบสองชั้นหรือหลายชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และชั้นของวัสดุแมกนีโตสทริกที่พื้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุ ME ที่เป็นก้อน (bulk) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือไม่มีการสูญเสียของการโพลาไรเซชันที่เกิดจากกระแสรั่วไหลด้วย ช่วงเวลาต่อมาในปี ค.ศ. 2005 Dong *et al.* ได้ศึกษาปรากฏการณ์ ME ในตัวอย่าง Terfenal-D/PMN-PT/Terfenal-D แบบสามชั้น ซึ่งพบว่าเมื่อวัดค่า α_v ของวัสดุตัวอย่างที่ความถี่ 1 kHz ได้ค่าสูงสุด 5.5 V/cm.Oe และภายในปีเดียวกันได้มีนักวิจัยซึ่งนำทีมโดย Shi ได้ศึกษาปรากฏการณ์ ME ของวัสดุตัวอย่างซึ่งประกอบด้วย PZT และ Terfenal-D ที่มีลักษณะเป็นแท่งฝังตัวอยู่ในอีพ็อกซี จากการศึกษาพบว่าวัสดุตัวอย่างแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดีที่ความถี่ 90 kHz และค่า α_v มีค่า 6.2 V/cm.Oe เป็นต้น (Srinivasan, 2010b)

2. เทคนิคการสังเคราะห์วัสดุ ME

วัสดุ ME นั้นสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคแตกต่างกันได้หลายเทคนิค ในส่วนของรายละเอียดของแต่ละเทคนิครวมทั้งวัสดุที่สังเคราะห์ได้นั้นก็จะแสดงคุณสมบัติที่ต่างกันด้วย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 เทคนิคการซินเตอร์ (sintering) เป็นกระบวนการยึดเหนี่ยวอนุภาคของของแข็งด้วยแรงระหว่างอะตอม เทคนิคนี้วัสดุตั้งต้นจะต้องบดเป็นผงละเอียดก่อนแล้วนำไปผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะ และนำไปอัดขึ้นรูป (compacting) ชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนที่มีความแข็งแรงพอสมควร ต่อจากนั้นก็จะนำไปผ่านกระบวนการเผาอบหรือการซินเตอร์ เพื่อให้อนุภาคของสารมีการยึดเหนี่ยวกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์ชาวสหรัฐอเมริกา รัสเซีย และอินเดีย ได้ใช้เทคนิคนี้ในการสร้างวัสดุ ME แต่ค่า α_v ที่วัดได้นั้นยังมีค่าน้อยมากโดยประมาณ 1 mV/cm.Oe จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2000 ได้มีการปรับปรุงและควบคุมตัวแปรต่างๆ ในระหว่างที่เกิดกระบวนการซินเตอร์ จึงได้ค่า α_v เพิ่มขึ้นมีค่าโดยประมาณ 10 ถึง 100 mV/cm.Oe (Nan *et al.*, 2008) เช่น ในปี ค.ศ. 2001 Ryu *et al.* ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิซินเตอร์ที่มีต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ซึ่งพบว่าค่า α_v ที่วัดได้จากชิ้นงานสัมพันธ์กับอุณหภูมิซินเตอร์ (Ryu *et al.*, 2001a) แต่อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์วัสดุ ME ด้วยเทคนิคนี้ก็ยังไม่เป็นที่นิยมนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกแล้วทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่มีค่ามาก (ความสมมาตรและสมบูรณ์ของผลึกนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ในวัสดุ)

2.2 เทคนิคการซ้อนทับและเชื่อมต่อ (stacking and bonding) เทคนิคนี้จะนำเอาวัสดุตั้งต้นมาเรียงซ้อนสลับกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะเชื่อมด้วยอีพ็อกซี ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และหนา เทคนิคนี้ Ryu *et al.* (2001b) ได้นำมาใช้ในการสร้างวัสดุ ME เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ ME ในวัสดุ Terfenol-D/PZT แบบสามชั้น แต่ละชั้นเชื่อมด้วยกาวเงิน ชิ้นงานที่ได้มีความหนา 2.5 mm จากการศึกษาพบว่าการที่จะให้วัสดุแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดีนั้นการยึดหดตัวจะต้องมีทิศทางตามแนวรัศมี โดยค่า α_v มีค่าเพิ่มตามสนามแม่เหล็ก H_{dc} ที่เพิ่มขึ้น โดยวัดค่าได้สูงสุด 5.90 V/cm.Oe ที่ความถี่ 1 kHz และต่อมา Nersessian *et al.* (2004) ได้ศึกษาสัดส่วนเชิงปริมาตร (volume fraction, v_p) ของวัสดุ TbFe/PZT/TbFe เพื่อดูการส่งผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ซึ่งพบว่าค่า v_p ของวัสดุมีผลต่อปรากฏการณ์ ME โดยตรง ซึ่งค่า α_v จะเพิ่มตามค่า v_p ที่สูงขึ้น และจะเริ่มเสถียรเมื่อ v_p มีค่ามากกว่า 0.4 โดยค่า α_v ที่วัดได้สูงสุด 2.7 V/cm Oe ที่สนามแม่เหล็กไบแอส 53 kA/m

2.3 เทคนิคการขึ้นรูปแผ่นบางเรียบ (tape casting) เทคนิคนี้จะนำผงวัสดุตั้งต้นที่บดละเอียดแล้วมาเตรียมเป็นสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปแขวนลอยแล้วเทขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโดยตรง โดยทั่วไปฟิล์มที่เตรียมได้จะมีความหนาประมาณ 25 ถึง 100 μm เทคนิคนี้ Srinivasan *et al.* (2001) ได้ใช้ในการเตรียมวัสดุเพื่อทำการศึกษารากฏการณ์ ME ของฟิล์ม NFO/PZT จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ ME ที่อุณหภูมิห้อง และความถี่ของสนามแม่เหล็ก H_{ac} ที่ 1 kHz พบว่าค่า α_v มีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก H_{dc} จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่สนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กที่ให้แก่ตัวอย่างต่อไปอีกพบว่าค่า α_v จะลดลงจนถึงต่ำสุด และเมื่อกลับทิศของสนามแม่เหล็กทำให้เฟสของ α_v เปลี่ยนแปลงไป 180° ค่ายอดของ α_v เกิดขึ้นที่สนามแม่เหล็กใกล้เคียงกัน ค่า α_v ที่วัดได้สูงสุดมีค่า 0.4 V/cm.Oe และในปี ค.ศ. 2004 Fetisov *et al.* ก็ใช้เทคนิคนี้ในการสังเคราะห์วัสดุเฟอร์ไรต์-เพียโซอิเล็กทริก (Ni-PZT) ที่มีลักษณะเป็นแบบมัลติเลเยอร์ (Ni 16 layers, PZT 15 layers) เพื่อศึกษารากฏการณ์ ME ค่า α_v ที่วัดได้สูงสุดมีค่า 18 mV/cm.Oe ที่สนามแม่เหล็กไบแอส 200 Oe และความถี่ 400 Hz ซึ่งอัตราส่วนความหนาของชั้น Ni: PZT เป็น 1: 2 (Fetisov *et al.*, 2004)

2.4 เทคนิคการพิมพ์สกรีน (screen printing) เทคนิคนี้จะนำผงวัสดุตั้งต้นที่ผ่านการบดละเอียดมาผสมเข้ากับสารที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะจนเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนืดที่เหมาะสมแล้วกดผ่านแม่พิมพ์เพื่อให้สารเคลือบติดบนผิวกระเบื้อง ต่อจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเพิ่มการยึดตัวระหว่างอนุภาค ตัวแปรที่มีผลต่อเทคนิคนี้ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเกรน สมบัติของผิว ความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของผลึก และฟิล์มที่ได้จะต้องผ่านกระบวนการเผา ดังนั้นเวลาและอุณหภูมิจึงมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มเป็นอย่างมาก ส่วนความหนาของฟิล์มมักจะมีค่ามากกว่า 200 μm ซึ่ง Bush *et al.* (2010) ได้ใช้เทคนิคนี้ผลิตวัสดุ ME จากผงของ PZT กับ NZF ฟิล์มที่ได้มีความหนาระหว่าง 130 ถึง 250 μm และเมื่อทำการศึกษารากฏการณ์ ME ในวัสดุตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 1 kHz พบว่าค่า α_v ที่วัดได้มีค่า 57 mV/cm.Oe ซึ่งเป็นค่าสูงสุดสำหรับวัสดุตัวอย่างนี้

2.5 เทคนิคโซล-เจล (sol-gel) เทคนิคนี้ใช้กระบวนการโซล-เจล ในการขึ้นรูป ซึ่งทำให้ได้ฟิล์มเซรามิกส์บาง โดยสารตั้งต้นนั้นมีสถานะเป็นของเหลวและหลังเกิดปฏิกิริยาจะมีลักษณะเป็นเจล ในขณะที่กำลังเกิดการเปลี่ยนสถานะก็จะเกิดการขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากการระเหยของตัวทำละลาย โครงสร้างของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป การขึ้นรูปนั้นทำได้โดยการนำแผ่นรองรับไปเคลือบผิวด้วยวิธี spin coating และ dip coating ฟิล์มที่ได้จะแห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นก็จะนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มความหนาแน่นและเพิ่มความเป็นผลึกของฟิล์ม ถ้าอยากได้ความหนาตามที่ต้องการจะต้องไปทำการขึ้นรูปซ้ำ ข้อดีของเทคนิคนี้คือทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นสูงและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อให้ได้ฟิล์มเซรามิกส์จะต่ำกว่าเทคนิคที่ต้องใช้สารตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นผง แต่ข้อเสียก็คือการที่จะให้ฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการนั้นจะต้องผ่านกระบวนการ

ทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งต้องใช้เวลานานและถ้ากระบวนการทำซ้ำเกิดความผิดพลาดจะต้องเริ่มต้นกระบวนการผลิตใหม่ สำหรับเทคนิคนี้ Roy *et al.* (2011) ได้เลือกใช้ในการเตรียมวัสดุผลึกเฟอร์โรอิกซึ่งได้จากสารละลาย PLT_{15-x} กับ CFO โดยศึกษาผลของสัดส่วนโดยปริมาตร (v_p) ของ CFO ที่มีต่อการเกิดปรากฏการณ์ ME ของฟิล์มบางตัวอย่าง ซึ่งพบว่าค่า v_p นั้นจะมีผลต่อปรากฏการณ์ ME และที่ความถี่เรโซแนนซ์ 20 kHz นั้นวัดค่า α_v ได้สูงสุด 250 mV/cm.Oe

2.6 เทคนิคการเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless deposition) สำหรับเทคนิคนี้ต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างแผ่นรองรับกับสารละลายตั้งต้น ระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไอออนของสารตั้งต้นที่หลุดออกมาจะไปยึดเกาะที่ผิวของแผ่นรองรับ และในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนชนิดสารของฟิล์มแต่ละชั้นก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนชนิดของสารละลายตั้งต้น ความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ในระดับไมโครเมตร สำหรับตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการสร้างฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ ได้แก่ อุณหภูมิและ pH ของสารละลาย โดยความหนาของชั้นฟิล์มควบคุมด้วยเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ข้อดีของเทคนิคนี้คือเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ไฟฟ้า ประหยัดพลังงานและไม่จำเป็นต้องมีอ็อกซิเจนมาเชื่อมแต่ละชั้นฟิล์ม แต่มีข้อเสียคือ พื้นผิวของฟิล์มจะไม่สม่ำเสมอ ชั้นงานที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และอาจมีสิ่งปนเปื้อน ลักษณะของชั้นงานจึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง สำหรับเทคนิคนี้ Bi *et al.* (2010) ได้เลือกใช้ในการเตรียมวัสดุ ME เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ ME ในฟิล์ม Ni-PZT-Ni แบบสามชั้น จากการศึกษาพบว่าปรากฏการณ์ ME เกิดได้กับชั้นงานที่เตรียมด้วยเทคนิคนี้ โดยที่ความถี่ 1 kHz นั้น เมื่อค่าสนามแม่เหล็ก H_{dc} เพิ่มขึ้น ค่า α_v ที่วัดได้ก็มีค่าสูงขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งค่า α_v ที่วัดได้สูงสุดมีค่า 5.77 V/cm.Oe ที่สนามแม่เหล็กไบแอส 160 Oe แล้วค่าจะค่อย ๆ ลดลงและเริ่มคงที่เมื่อสนามแม่เหล็ก H_{dc} มีค่า 1 kOe นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความหนา ($t_{Ni}/t_{Ni+tPZT}$) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ด้วย ซึ่งพบว่าค่า α_v มีค่าเพิ่มเมื่ออัตราส่วนความหนาเพิ่มขึ้น

2.7 เทคนิคการเคลือบโดยใช้เลเซอร์ (pulsed laser deposition: PLD) เทคนิคนี้จะเคลือบฟิล์มในระบบสุญญากาศโดยใช้เลเซอร์เป็นตัวยิงไปยังเป้าของสารเคลือบเพื่อที่จะกระตุ้นให้อะตอมหลุดแล้วกระจายไปติดลงบนแผ่นรองรับ ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสร้างพันธะของสารประกอบ ได้แก่ ความยาวคลื่นของเลเซอร์ ความหนาแน่นของพลังงาน ชนิดของแก๊สเฉื่อย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ แก๊สที่ทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิของแผ่นรองรับต้องมีค่าประมาณ 500 ถึง 700 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ฟิล์มเกิดผลึกได้ดี เทคนิคนี้สามารถสร้างฟิล์มได้หลาย ๆ ชั้น และหลายชนิดเพราะสามารถเปลี่ยนเป้าของสารตั้งต้นได้

2.8 เทคนิคการหลอม (arc melting) ทีมนักวิจัยซึ่งนำโดย Bi ได้ศึกษาปรากฏการณ์ ME ในวัสดุ PZT/TbFe₂/PZT โดยใช้เทคนิคนี้ผลิตชั้นงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นการศึกษาเพิ่มเติมต่อจากปี 2010 วัสดุตัวอย่างที่ได้มีโครงสร้างแบบสามชั้นแต่ละชั้นเชื่อมด้วยอ็อกซิเจน จากการวัดค่า α_v ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก H_{ac} ที่ 1 kHz พบว่า

ค่า α_v มีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก H_{dc} จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่อสนามแม่เหล็ก H_{dc} มีค่า 350 Oe และจากการศึกษาผลของความถี่ของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก H_{ac} ในช่วง 1 ถึง 150 kHz ที่อุณหภูมิห้องและ H_{dc} ที่ 350 Oe พบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ 85.5 kHz วัสดุตัวอย่างแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดีที่สวิตค่า α_v ได้สูงสุด 10.5 V/cm.Oe (Bi *et al.*, 2011)

2.9 เทคนิคสปัตเตอร์ริง (sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวของวัสดุที่เป็นเป้าหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงแล้วมีการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กับอะตอมของของแข็งทำให้อะตอมหลุดออกแล้ววิ่งเข้าชนแผ่นรองรับและสะสมเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ยึดเกาะแผ่นรองรับ สำหรับเทคนิคนี้ถูกค้นพบโดย Grove ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1852 ซึ่งขณะนั้นเขาได้ทำการศึกษากระบวนการโกลด์สซาร์จในหลอดรังสีคาโทด และได้สังเกตเห็นว่ามีโลหะตกสะสมบนขั้วแอโนด ในเวลาต่อมา Langmuir (1920) ได้ทำการพัฒนากระบวนการสปัตเตอร์ริงให้เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางอีกทั้งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและได้รับความนิยมถึงปัจจุบันนี้เพราะฟิล์มบางที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ความหนาแน่นสม่ำเสมอ ความบกพร่องต่ำ มีความคงทนสามารถใช้กับแผ่นรองรับได้หลายชนิด อีกทั้งไม่จำเป็นต้องใช้อ็อกซิเจนเพื่อเชื่อมวัสดุในแต่ละชั้น ดังนั้นจึงสามารถผลิตฟิล์มได้ในระดับที่บางมาก ๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ได้ สำหรับปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคนี้ได้แก่ ความดันภายในระบบซึ่งต้องมีระดับที่ต่ำมาก ๆ รวมทั้งชนิดและความดันของแก๊สเฉื่อย กำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นรองรับที่จะทำให้อัตราการเคลือบมีความเหมาะสม ลักษณะทางเคมีของฟิล์ม ความเป็นผลึกและโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์ม (รวมทั้งฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วจะต้องนำไปทำการอบชุบด้วยความร้อน (annealing) ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบด้วยความร้อนต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วย)

จากการศึกษาเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการเตรียมวัสดุ ME พบว่าสามารถทำได้หลายเทคนิคด้วยกัน อย่างไรก็ตามการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะใช้เทคนิคสปัตเตอร์ริงในการเตรียมฟิล์มบางตัวอย่างเพราะชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มีคุณภาพสูง ความบางอยู่ในระดับที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้ และจากการศึกษาข้อมูลทำให้ทราบว่าเทอร์ฟีนอล ($TbFe_2$) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตสทริกทิฟได้ดีที่สุด อนุกรมนี้หอง โดยค่าแมกนีโตสทริกชัน (λ) มีค่าประมาณ 2600×10^{-6} ความเครียดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไบแอส ที่ให้แก่วัสดุชนิดนี้มีค่าสูงกว่าวัสดุแมกนีโตสทริกทิฟทั่วไปถึง 100 เท่า และสูงกว่าวัสดุเพียโซเซรามิกส์ 2 ถึง 5 เท่า ดังนั้น $TbFe_2$ จึงเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูง เมื่อนำไปคู่ควบกับวัสดุที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดี อย่างเช่น เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) เป็นต้น รูปแบบที่เกิดขึ้นใหม่ของวัสดุตัวอย่างจึงเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากประกอบด้วยวัสดุที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิคที่สูงไว้ด้วยกัน ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่าวัสดุนี้ น่าจะแสดงปรากฏการณ์ ME ได้สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้วัสดุ

PZT และ TbFe₂ เป็นวัสดุคู่ควบกันในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง และเนื่องจากการผลิตฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริงให้ได้คุณภาพสูงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเทคนิคสำหรับการผลิตฟิล์มบางจากเอกสารงานวิจัยที่มีนักวิจัยหลากหลายท่าน ได้ทำการศึกษาวิธีการและเงื่อนไขต่าง ๆ ในการผลิตฟิล์มบางทั้งสองชนิดนี้ ทำให้ได้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการผลิต ข้อมูลและรายละเอียดที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

3. เงื่อนไขที่ใช้สังเคราะห์และปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม TbFe₂ ด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง

Choi *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่มีต่อการแสดงสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบาง Tb-Fe(B) ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงภายใต้ระบบที่มีความดันขนาด 7×10^{-7} Torr กำลังไฟฟ้า 300 W ผลการศึกษาพบว่าความดันแก๊สอาร์กอนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางซึ่งความดันแก๊สขนาด 6×10^{-3} mbar นั้นมีความเหมาะสมต่อการแสดงคุณสมบัติที่ดีของฟิล์มบาง ในปีต่อมา Quandt *et al.* (1998) ได้ผลิตฟิล์มบาง TbFe/FeCo ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงโดยเคลือบฟิล์มภายใต้ระบบที่มีความดันขนาดต่ำกว่า 5×10^{-5} Pa ซึ่งใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อยความดันขนาด 0.4 Pa กำลังไฟฟ้า 150 W ผลจากการใช้เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีอัตราการเคลือบ 1.8 nm/s ถัดมาอีกสองปี Pasqualo *et al.* (2000) ได้ศึกษาอัตราส่วนของ Tb-Fe ที่มีผลต่อการแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบาง Tb_xFe_{1-x} ที่เตรียมด้วยเทคนิค RF-magnetron sputtering ภายใต้ระบบที่มีความดันขนาด 7×10^{-7} mTorr ใช้อาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อย ระยะห่างระหว่างเป้าวัสดุกับแผ่นรองรับ 6 cm จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วน Tb_{0.54}Fe_{0.46} มีความเหมาะสมที่ทำให้ฟิล์มตัวอย่างแสดงคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กอ่อนได้ดีที่สุด หลังจากนั้นนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางให้ดีขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง Wei *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและแมกนีโตสทริกทีฟของฟิล์ม TbFe/FeAl ด้วยดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงและปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มด้วยการอบชุบด้วยความร้อน (annealing) ที่อุณหภูมิ 350 °C ซึ่งผลจากการอบชุบด้วยความร้อนทำให้ฟิล์มแสดงค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตสทริกทีฟสูงถึง 574×10^{-6} ต่อมา Jiang *et al.* (2010) ได้ศึกษาผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง TbFe ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งพบว่าความดันที่เหมาะสมที่ทำให้ฟิล์มแสดงคุณสมบัติได้ดีมีขนาด 0.6 Pa

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเคลือบฟิล์ม TbFe₂ ด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริงนี้สามารถทำได้ทั้งระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงและอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เงื่อนไขที่ใช้ในระบบทั้งสองก็มีความแตกต่างกัน อีกทั้งยังพบว่า การปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้นนั้นฟิล์มที่ได้จะต้องผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนก่อน และอัตราส่วน Tb_{0.54}Fe_{0.46} เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้ฟิล์มแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ดี

4. เจ็อนไซที่ใช้สังเคราะห์และปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม PZT ด้วยเทคนิคสปัตเตอร์

Velu *et al.* (1997) ได้สังเคราะห์ฟิล์มบาง PZT ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ โดยมีเจ็อนไซแตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุ ระบบการเคลือบฟิล์มจะทำงานได้ดีภายใต้ความดันที่ต่ำกว่า 5×10^{-7} Pa ความดันแก๊สอาร์กอนมีขนาด 30 mTorr กำลังไฟฟ้า (RF power density) 2.36 W/cm^2 แต่ถ้าใช้ค่าที่สูงกว่านี้จะทำให้เป่าสารเคลือบร้อนและเกิดรอยร้าวขึ้น ระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับต้องมีระยะห่าง 60 mm ซึ่งการเตรียมฟิล์มด้วยเจ็อนไซดังกล่าวทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มอยู่ที่ 50 \AA/min หลังจากเคลือบฟิล์มตัวอย่างเสร็จแล้วจะต้องนำไปผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนในอากาศ เพื่อให้ฟิล์มเกิดโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกท์ (perovskite) ซึ่งเฟสจะเริ่มปรากฏเมื่ออบด้วยอุณหภูมิ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง แต่ถ้าอยากประหยัดเวลาต้องอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ถ้าอุณหภูมิ $620 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ต้องใช้เวลา 30 นาที หรือถ้าอบด้วยอุณหภูมิ $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ก็ใช้เวลาเพียง 5 นาที เท่านั้น (Velu *et al.*, 1997) ในช่วงเวลาต่อมา Jacobsen *et al.* (2010) ได้ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง PZT ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ เพื่อให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่สูงขึ้น ซึ่งพบว่า ความดันของระบบที่เหมาะสมต้องมีขนาด 0.5 mbar กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 600 W แก๊สเฉื่อยที่ใช้ในระบบ ควรเป็นแก๊สอาร์กอนปริมาณ 800 sccm ผสมกับออกซิเจนปริมาณ 20 sccm รวมทั้งการให้ความร้อนกับแผ่นรองรับในขณะที่เคลือบด้วยอุณหภูมิที่สูงระหว่าง $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $620 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลจากการใช้เจ็อนไซดังกล่าวทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงขึ้นโดยเฉลี่ย 200 ถึง 250 nm/min ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาของ P. Murait ในปี ค.ศ. 1995 และของ G. Velu ในปี ค.ศ. 1997 อีกทั้งยังสูงกว่าค่าที่เขาได้รายงานไว้ก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 2006 และปี ค.ศ. 2007 ต่อมา Zhang *et al.* (2011) ทำการโคปฟิล์ม PZT ด้วย $\text{Pb}(\text{Mn},\text{Nb})\text{O}_3$ ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้น โดยใช้กำลังไฟฟ้า 80 W แก๊สเฉื่อยผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจนในอัตราส่วน 20 ต่อ 1 ความดันแก๊ส 1 Pa และแผ่นรองรับมีอุณหภูมิ $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการศึกษาพบว่า การโคปด้วยสารดังกล่าวสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้นได้ ขณะเดียวกัน Choudhary *et al.* (2011) ก็ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า โครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม NiTi/PZT/TiO_x ที่เตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ภายใต้ระบบที่มีความดันขนาด 3.1×10^{-6} Torr แก๊สเฉื่อยผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจนอัตราส่วน 9 ต่อ 1 ใช้กำลังไฟฟ้า 60 W เป้ากับแผ่นรองรับห่างกัน 4.5 cm และแผ่นรองรับมีอุณหภูมิ 823 K ผลจากการใช้เจ็อนไซดังกล่าวทำให้ได้ฟิล์มที่มีอัตราการเคลือบ $133 \text{ } \mu\text{m/min}$ คุณสมบัติทางไฟฟ้ารวมทั้งโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มดีขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง PZT ต้องใช้เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ อีกทั้งยังพบว่าฟิล์มจะเกิดโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกท์ ได้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนอุณหภูมิ $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับแผ่นรองรับแต่ละชนิดที่จะสามารถทนความร้อนได้มากน้อยแตกต่างกัน

สำหรับข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวกับวัสดุคู่ควบทั้งสองชนิดที่ประกอบด้วย $TbFe_2$ ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร กับ PZT ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก พร้อมทั้งเทคนิคการผลิตฟิล์มบาง เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ ME ตลอดทั้งเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม มีดังนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สมบัติแม่เหล็ก

1.1 แหล่งกำเนิดสภาวะแม่เหล็ก

การเกิดสภาวะแม่เหล็กและสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในอะตอมซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กเล็กๆ ในอะตอม ลักษณะการเคลื่อนที่มี 2 ลักษณะ คือการโคจรรอบนิวเคลียสและการสปินรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

การโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส เป็นวงกลมรอบพื้นที่ A ก่อให้เกิดวงกระแสไฟฟ้าล้อมรอบพื้นที่ A ขึ้นซึ่งมีลักษณะเสมือนว่ากระแสไฟฟ้าไหลเป็นวงล้อมรอบพื้นที่ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กในระดับอะตอมขึ้นซึ่งมีขนาดเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ที่วงกระแสล้อมรอบ ดังสมการที่ (9)

$$m_{orb} = IA \quad (9)$$

โดย m_{orb} คือ โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กของการโคจร มีหน่วย $A \cdot m^2$

I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วย แอมแปร์ (A)

A คือ พื้นที่ที่วงกระแสล้อมรอบ มีหน่วย ตารางเมตร (m^2)

สำหรับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี r ด้วยความถี่ ω รอบนิวเคลียสของอะตอม ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าตามสมการที่ (10)

$$m_{orb} = \left(\frac{q}{T}\right)(\pi r^2) \quad (10)$$

โดย T คือ คาบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

หรือ
$$m_{orb} = \frac{q\omega r^2}{2} \quad (11)$$

สนามแม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส มีค่าเป็น

$$B = \frac{\mu_0 2m_{orb}}{4\pi r^3} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) พบว่าไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (B) ขึ้น และหากวงกระแสอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก (H) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงกระแสกับสนามแม่เหล็กภายนอกโดยจะพยายามปรับตัวเองให้มีทิศเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงบิดพยายามหมุนวงกระแสให้ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กมีทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกจึงทำให้ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าดังสมการที่ (13)

$$m_{orb} = \frac{qL}{2m_e} \quad (13)$$

โดย m_{orb} คือ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของการโคจร
 L คือ โมเมนตัมเชิงมุมในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน 1 ตัว
 m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน 1 ตัว

จากสมการที่ (13) ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมแปรผันตรงกับโมเมนตัมเชิงมุมเนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนอกจากมีการโคจรรอบนิวเคลียสแล้วยังมีสปินซึ่งการสปินของอิเล็กตรอนมี 2 สถานะคือ อัป (up) และดาว์น (down) มีโมเมนตัมเชิงมุมในการ สปิน (S) ที่ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก ดังสมการที่ (14)

$$m_{spin} = \frac{qS}{m_e} \quad (14)$$

โดย m_{spin} คือ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของการสปิน
 S คือ โมเมนตัมเชิงมุมในการสปิน

ดังนั้นไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กรวม (m) ของอิเล็กตรอนจึงประกอบด้วย m_{orb} กับ m_{spin} ของอิเล็กตรอนทุกตัวในอะตอม แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมมีโมเมนตัมเชิงมุม

หักล้างกันหมด ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กรวมของอะตอมจึงขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดที่ยังมีอิเล็กตรอนอยู่ไม่เต็มครบทุกออร์บิทัลเท่านั้น ซึ่งลักษณะของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน ในวงโคจรต่างๆ ของอะตอมนั้นๆ จะเป็นตัวบ่งบอกถึงสมบัติของการเกิดไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก และค่าเฉลี่ยของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรถูกนิยามแทนค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชัน (magnetization: M) ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้วัดความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ ดังสมการที่ (15)

$$M = \frac{m}{\Delta V} \quad (15)$$

โดย m คือ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กรวมของอิเล็กตรอน
 ΔV คือ ปริมาตรเล็กๆ ที่ครอบครองไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กจำนวนหนึ่ง
 M คือ สภาพความเป็นแม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชัน มีหน่วย A/m

1.2 อิทธิพลสนามแม่เหล็กภายนอกต่อวัสดุ

วัสดุที่วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (H) วัสดุนั้นจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนั้น โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กและทำให้ค่าแมกนีไทเซชัน (M) เกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า H , M , B แสดงดังสมการที่ (16)

$$B = \mu_0(H+M) \quad (16)$$

โดย μ_0 คือ สภาพให้ซึมผ่านทางแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
 B คือ สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ มีหน่วย เทสลา (T)
 H คือ สนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วย เทสลา (T)

ลักษณะการตอบสนองต่อสนาม H สามารถแสดงได้ด้วยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility: χ) และค่าสภาพให้ซึมผ่านทางแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ)

ซึ่งกำหนดโดย $\chi = \frac{M}{H}$ และ $\mu = \frac{B}{H}$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (16)

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$$

$$\mu_r = 1 + \chi$$

ดังนั้น $\chi = \mu_r - 1$ (17)

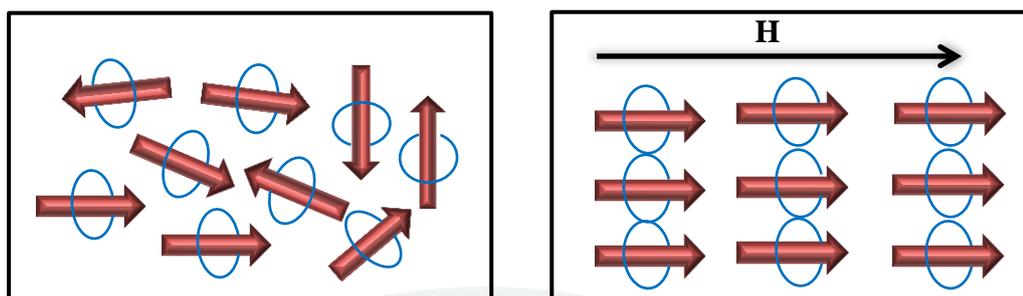
โดย μ_r คือ ค่าสภาพให้ซึมผ่านทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)

วัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (χ) ต่างกันซึ่งค่านี้สามารถใช้ในการจำแนกสภาวะแม่เหล็กของวัสดุได้

1.3 สภาวะแม่เหล็กของวัสดุ

1.3.1 สภาวะแม่เหล็กไดอา (diamagnetism) เกิดกับวัสดุที่มีค่า χ ติดลบเล็กน้อย ($\chi \leq 1$) เมื่อวัสดุนี้อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก (H) จะส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสียดลเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็กๆ ขึ้นในอะตอมโดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก H จึงมีผลทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบซึ่งเรียกว่า สภาวะแม่เหล็กไดอา

1.3.2 สภาวะแม่เหล็กพารา (paramagnetism) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีค่า χ เป็นบวกเล็กน้อย ($\chi \geq 1$) เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก H ซึ่งสภาวะแม่เหล็กนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กนั้นทำให้ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการสปินของอิเล็กตรอนพยายามหมุนในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก H เกิดเป็นแม่เหล็กชั่วคราวขึ้น แต่สภาวะดังกล่าวจะไม่ถาวรและจะหมดไปเมื่อนำวัสดุนี้ออกจากสนามแม่เหล็ก H ดังภาพที่ 3



(ก)

(ข)

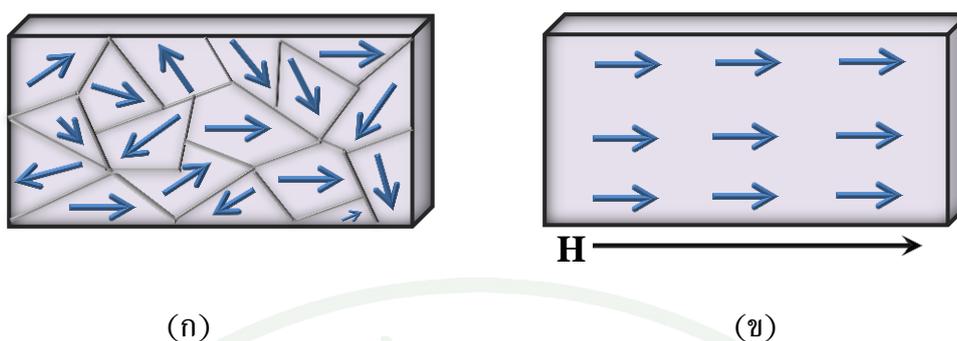
ภาพที่ 3 สภาวะแม่เหล็กพารา (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังได้รับสนามแม่เหล็ก H

สมบัติที่สำคัญของสภาวะแม่เหล็กแบบนี้อีกข้อหนึ่ง ก็คือ ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็กภายนอก (H) ที่วัสดุนั้นวางอยู่และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ (T) ซึ่งเป็นไปตามกฎของคูรี (Curie's law) ดังสมการที่ (18)

$$M = C \frac{H}{T} \quad (18)$$

จากสมการ (18) แสดงว่า เมื่อ H เพิ่มขึ้นจำนวนไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน (m_{spin}) ก็จะจัดเรียงตัวไปตามทิศของ H มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเรียงตัวของ m_{spin} ก็จะถูกรบกวนส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิลดลงทำให้วัสดุมีสภาพความเป็นแม่เหล็กลดลง

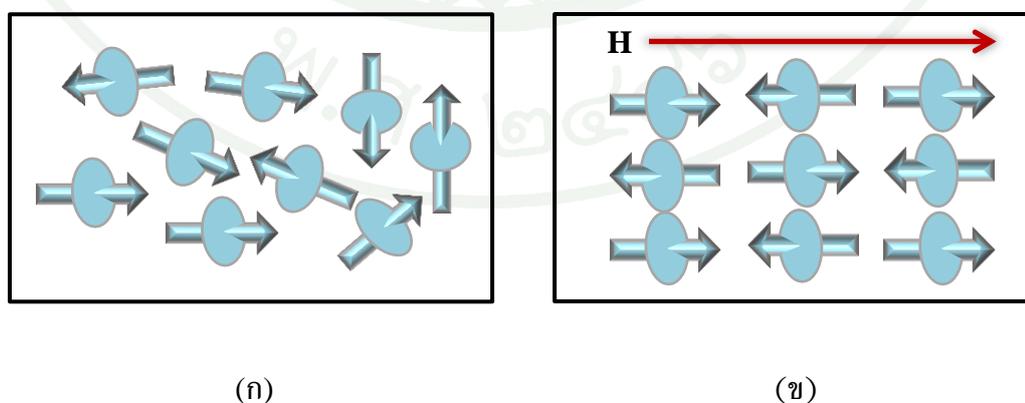
1.3.3 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) เป็นสภาวะแม่เหล็กที่สามารถคงอยู่ได้แม้ว่าวัสดุจะไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก H หรือได้รับเพียงเล็กน้อยก็ตาม อีกทั้งการทำให้หมดสภาพการเป็นแม่เหล็กก็สามารถทำได้ตามต้องการ ซึ่งเกิดในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรวัสดุกลุ่มนี้จะมีค่า χ เป็นบวกมาก ๆ ($\chi \gg 1$) สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของสปินอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนสองตัวที่อยู่ใกล้กันจะมีสปินชี้ไปในทิศทางขนานกันก่อให้เกิดปริมาตรเล็ก ๆ ขนาด 10^{-8} ถึง 10^{-12} m³ ซึ่งมีการเรียงของแนวการหมุนของอิเล็กตรอนไปในทิศทางขนานกันเรียกว่า โดเมน (domain) การเรียงตัวในแต่ละโดเมนนั้นไม่จำเป็นต้องมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาบังคับ แต่เนื่องจากตอนต้นนั้นโดเมนจะเรียงตัวกันแบบสุ่มทำให้ไม่มีสภาวะทางแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยโดเมนที่มีทิศใกล้เคียงกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีขนาดโตขึ้นจนกระทั่งไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของโดเมนจะวางตัวตามแนวทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก เกิดขนาดความเป็นแม่เหล็กสูงสุด เรียกว่า สภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (saturate magnetization) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) โดเมนแม่เหล็กก่อนได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) โดเมนแม่เหล็กหลังจากได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

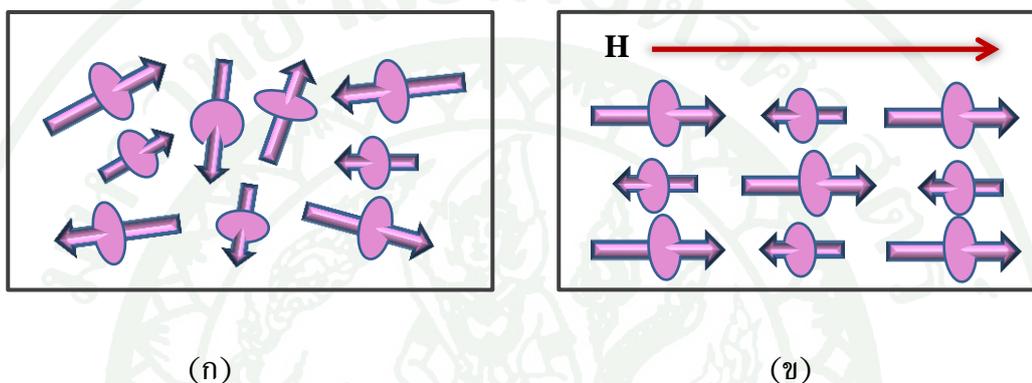
สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรนี้มีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างยิ่ง วัสดุที่สามารถแสดงสภาวะทางแม่เหล็กชนิดนี้จะมีค่า χ เป็นบวกมากๆ ได้แก่ เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) และโลหะผสมของวัสดุเหล่านี้กับธาตุแรร์เอิร์ท (rare earth element) เช่น เทอร์ฟีนอล ($TbFe_2$) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะคงสภาพสภาวะนี้ตราบที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิคูรี แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีสภาวะแม่เหล็กพาราทันที

1.3.4 สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetism) เป็นสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งที่เกิดกับวัสดุที่เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก H แล้วอะตอมในผลึกมีไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กขนาดเท่า ๆ กัน เรียงตัวสลับทิศสวนทางกันหักล้างกันพอดี จึงไม่มีสภาพแม่เหล็กเกิดขึ้น ดังภาพที่ 5 วัสดุประเภทนี้ ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และแมงกานีส



ภาพที่ 5 สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังจากได้รับสนามแม่เหล็ก H

1.3.5 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์ริ (ferrimagnetism) เป็นสภาวะแม่เหล็กที่เกิดในวัสดุที่มีค่า χ เป็นบวกมากๆ และอะตอมในผลึกมีไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กสลับทิศสวนทางกัน แต่มีขนาดต่างกัน เมื่อหักล้างกันแล้วไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กรวมไม่เป็นศูนย์ ดังภาพที่ 6 จึงทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กได้ ซึ่งเราเรียกวัดเหล่านี้ว่า เฟอร์ไรต์ ($XOFe_2O_3$) โดยที่ X คือ Fe, Mn, Co, Ni, Mg, Zn, Cd ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้และถ้า X เป็น Fe สารนี้ก็คือ Fe_3O_4 หรือแมกนีไทต์ นั่นเอง วัสดุเฟอร์ไรต์จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ จึงมักถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กันอย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 6 สภาวะแม่เหล็กเฟอร์ริ (ก) ก่อนได้รับสนามแม่เหล็ก H และ (ข) หลังจากได้รับสนามแม่เหล็ก H

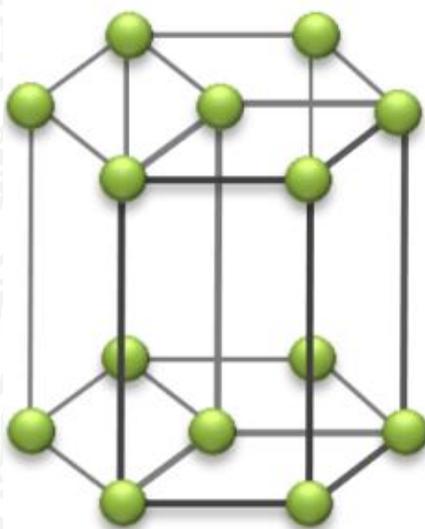
1.4 ความเครียดแม่เหล็ก

เมื่อวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่วัสดุส่งผลให้ทิศทางการสปีนของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป ลักษณะการกระจายตัวรอบๆ นิวเคลียสก็เปลี่ยนตามไปด้วย ผลจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างอะตอมทำให้เกิดสภาพขั้วแม่เหล็กขึ้นและในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์นั้นขนาดของวัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการยืดหรือหดตัวของวัสดุในทิศทางการเกิดสภาวะแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า การเกิดความเครียดแม่เหล็ก (magnetostriction) ในขณะเดียวกันก็เกิดพลังงานเนื่องจากความเค้นทางกลศาสตร์ขึ้น ซึ่งเรียกว่าพลังงานแมกนีโตสตริกทีฟ (magnetostictive energy) และเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟ และเรียกวัดวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่เกิดปรากฏการณ์ในลักษณะนี้ว่าวัสดุแมกนีโตสตริกทีฟ (magnetostictive material) ซึ่งเป็นวัสดุและปรากฏการณ์ที่ผู้วิจัยนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

2. สมบัติของเทอร์เบียม (II) ไอรอน

เทอร์เบียม (II) ไอรอน ($TbFe_2$) เป็นอัลลอยด์ของเทอร์เบียม (Tb) และเหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นการดึงเอาจุดเด่นของธาตุแต่ละชนิดมารวมกันจนทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นรายละเอียดมีดังนี้

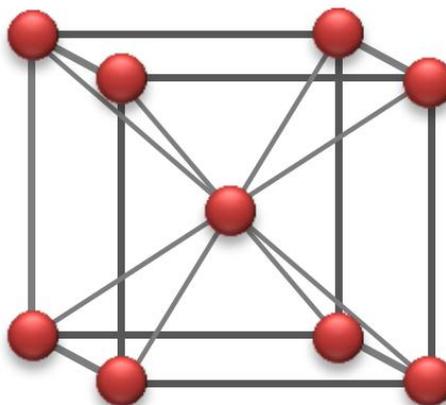
2.1 เทอร์เบียม (Terbium: Tb) เป็นธาตุหายาก (rare earths) หมายเลขอะตอม 65 สัญลักษณ์ Tb มีลักษณะสีเทาเงินวาว อ่อนนุ่ม เหนียว ยืดเป็นเส้นหรือตีเป็นแผ่นได้ สามารถตัดได้ด้วยมีด มีความเสถียรในอากาศ มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรและโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของเทอร์เบียม

ที่มา: www.periodni.com/tb.html

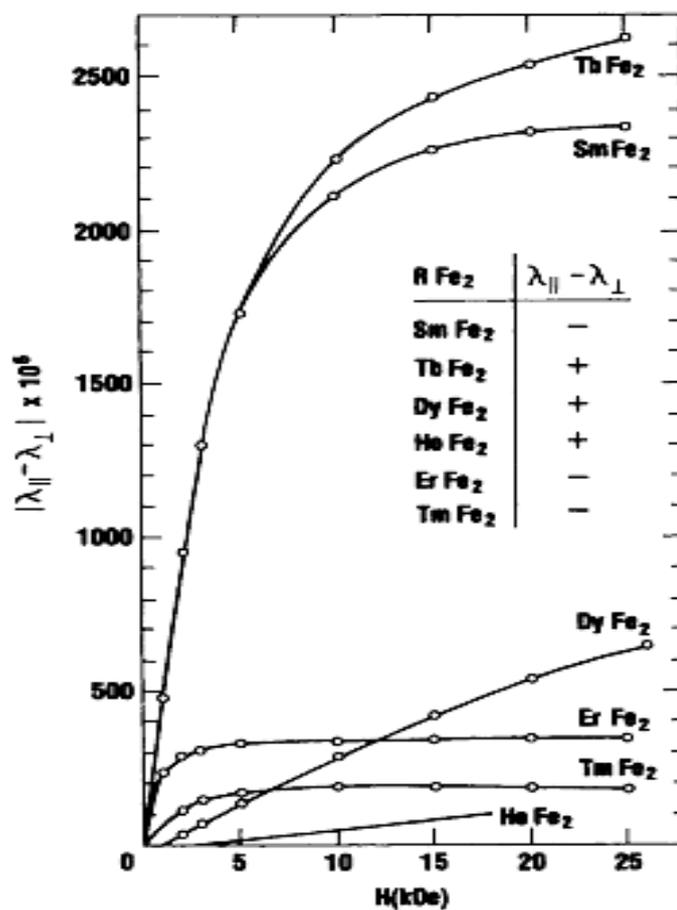
2.2 เหล็ก (Iron: Fe) มีหมายเลขอะตอม 26 สัญลักษณ์คือ Fe มีลักษณะสีเทาแวววาว มีคุณสมบัติเป็นโลหะและมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรเช่นเดียวกับเทอร์เบียม เหล็กบริสุทธิ์นั้นมีคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่เหมาะกับการใช้งานจึงต้องเติมธาตุอื่นลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น โครงสร้างผลึกของเหล็กเป็นแบบ ทรงลูกบาศก์รวมศูนย์ (body-center cubic) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างผลึกแบบทรงลูกบาศก์รวมศูนย์ของเหล็ก

ที่มา: www.periodni.com/fe.html

การรวมกันระหว่างธาตุเหล็กกับธาตุเทอร์เบียมนั้นเป็นการดึงเอาคุณสมบัติที่โดดเด่นของธาตุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ทำให้ได้ธาตุใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดี เหนียว ไม่เปราะ และแสดงคุณสมบัติของการเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่แสดงปรากฏการณ์แมกเนโตสทริกทีฟได้ดีที่สุด ณ อุณหภูมิห้อง โดย $\lambda \approx 2600 \times 10^{-6}$ ความเครียดซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุชนิดนี้มีค่าสูงกว่าวัสดุแมกเนโตสทริกทีฟทั่วไปถึง 100 เท่า และมีค่าสูงกว่าวัสดุเพียโซเซรามิกส์ 2 ถึง 5 เท่า ดังภาพที่ 9 ดังนั้น TbFe₂ จึงเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังที่มีประสิทธิภาพเป็นอย่างยิ่ง



ภาพที่ 9 แสดงค่า magnetostriction ของวัสดุแมกนีโตสทริกทีฟชนิดต่างๆ เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

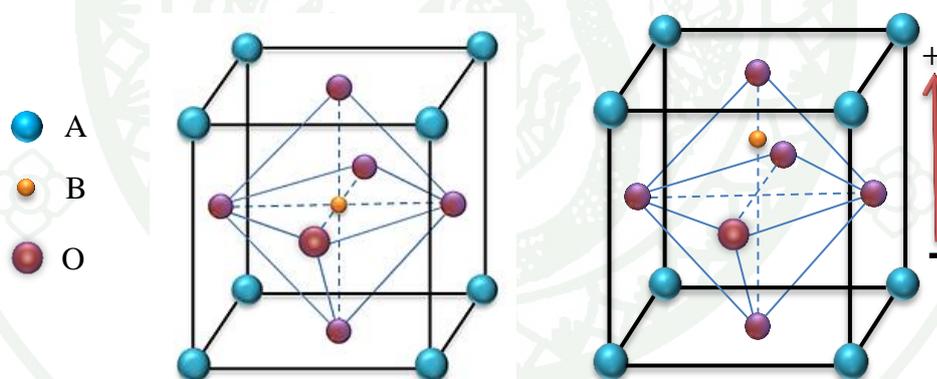
ที่มา: Handbook of giant magnetostrictive materials.

3. วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นสารเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติสำคัญสองประการ ประการแรกสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัสดุนั้น ประการที่สองคือสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัสดุแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นคุณสมบัติในการทำงานของวัสดุจึงประกอบด้วยสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้า

3.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

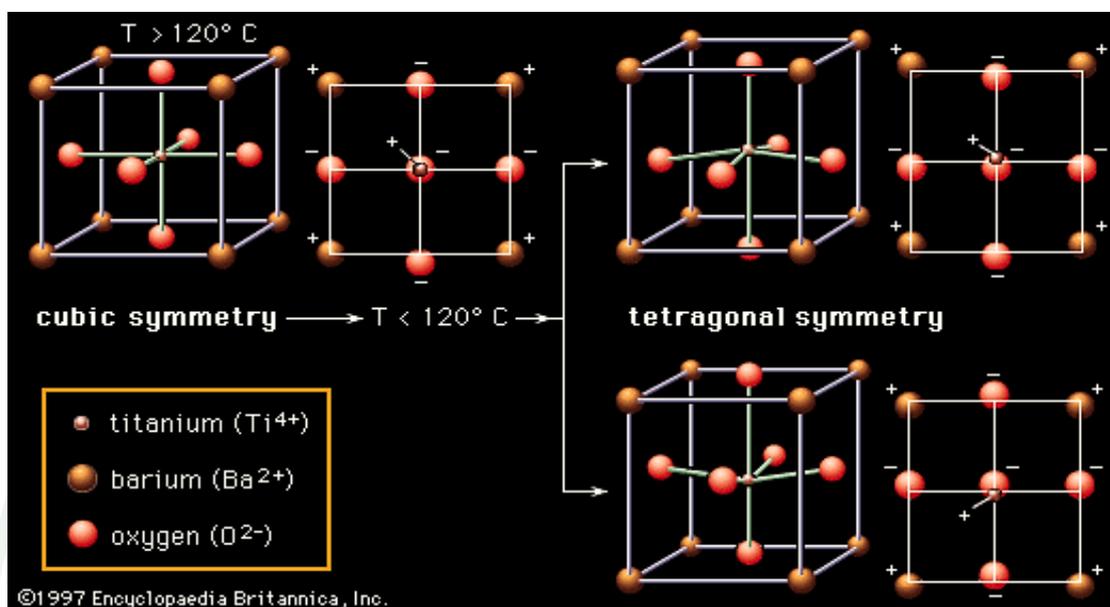
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดกับวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) หรือ ABO_3 ซึ่งในสภาวะปกติไอออนที่ตำแหน่ง B จะไม่อยู่ในลักษณะสมมาตร ดังนั้นเมื่อมีการให้แรงหรือให้สนามไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้เกิดการเลื่อนของไอออนในตำแหน่ง B ทำให้เป็นลักษณะของไดโพลขึ้นมา ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ตัวอย่างของวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไททานेट ($BaTiO_3$) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยเมื่ออุณหภูมิมากกว่า $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ โครงสร้างผลึกของ $BaTiO_3$ นั้นจะมีความสมมาตร แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไอออนของ Ti^{4+} ที่อยู่ตรงกลางและไอออนของ O^{2-} ที่อยู่ล้อมรอบในหน่วยเซลล์ของ $BaTiO_3$ จะเกิดการเลื่อนกันทำให้เกิดอิเล็กทริกไดโพลโมเมนต์ขึ้น สำหรับอุณหภูมิ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ นี้ เรียกว่า อุณหภูมิคูรี ซึ่งเป็นอุณหภูมิกวอดที่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนโครงสร้างของ $BaTiO_3$ จากที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์จะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ทำให้โครงสร้างของ $BaTiO_3$

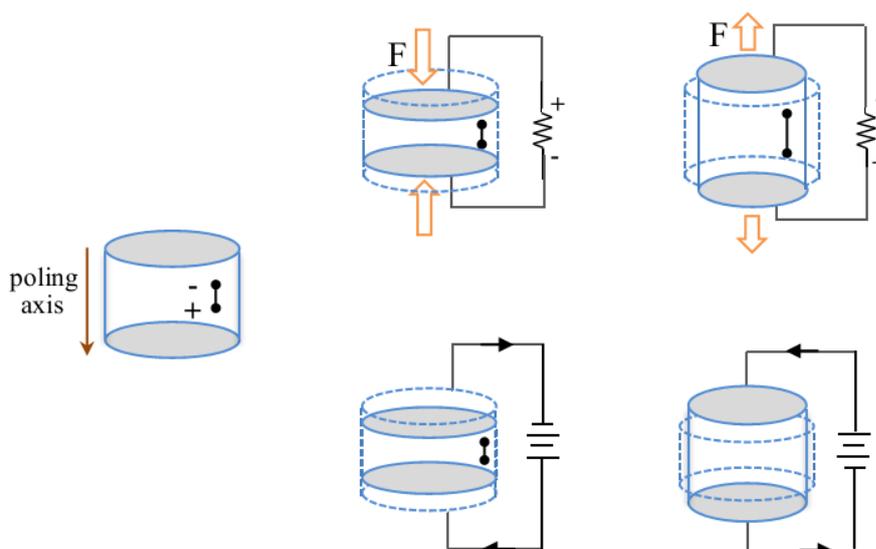
เกิดความไม่สมมาตรกัน จุดศูนย์กลางประจุบวกทั้งหมดภายในหน่วยเซลล์แยกออกจากจุดศูนย์กลางของประจุลบ จึงทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ลักษณะดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นเตตระโกนอลของ BaTiO_3 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 120°C

ที่มา: www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic_sensor/piezoelectric1.htm

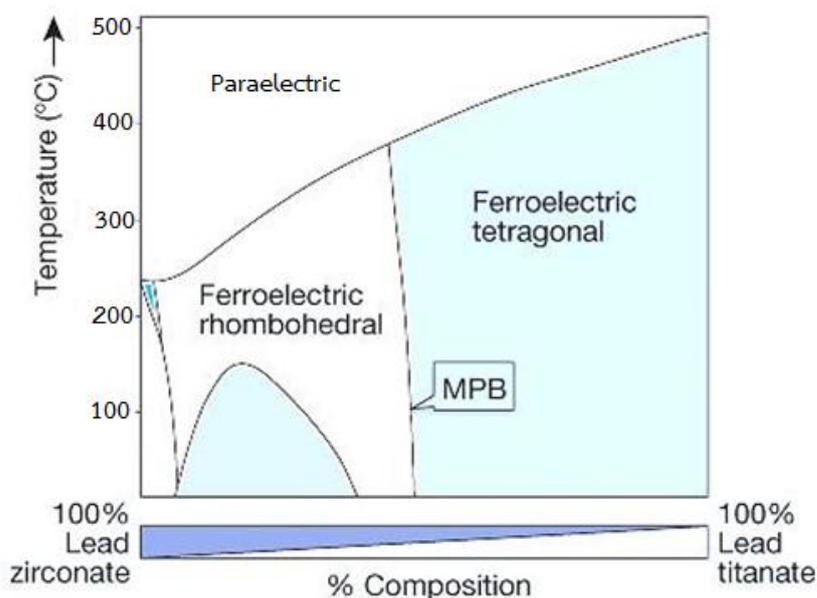
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำต่อวัสดุแล้วทำให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า โดยเมื่อใส่แรงกดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบขึ้นในโครงสร้างของวัสดุและเมื่อมีแรงดึงจะเกิดประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามกัน สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามแรงที่วัสดุได้รับในทางกลับกันถ้าให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุจะส่งผลทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวและเมื่อกลับทิศทางของสนามไฟฟ้าวัสดุเกิดการหดตัว ซึ่งเรียกว่าการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (converse piezoelectric effect) โดยขนาดและรูปร่างจะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรงและแบบผกผัน

3.2 สมบัติของเลดเซอร์โคเนตไททานเนต

เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (lead zirconate titanate: PZT) เป็นสารเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ มีสูตรทั่วไปคือ $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ หรือ PZT เกิดจากสารละลายของแข็งระหว่างเลดไททานเนต (PbTiO_3) ร่วมกับสารเลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) ซึ่ง PbTiO_3 มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 495°C มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลและแสดงคุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก สำหรับ PbZrO_3 อุณหภูมิคูรีมีค่า 234°C โครงสร้างผลึกเป็นแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) มีสมบัติเป็นสารแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก สารทั้งสองชนิดจะผสมกันในอัตราส่วนบริเวณมอร์โฟโทรปิกเฟสบาวเดอรี (morphotropic phase boundary: MPB) ณ บริเวณ MPB นี้โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลและโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล จะอยู่ร่วมกันอย่างสมดุล วัสดุแสดงคุณสมบัติการเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่สูง ดังนั้นในการนำ PZT มาประยุกต์ใช้งานจึงนิยมเตรียมอัตราส่วนใกล้เคียงบริเวณ MPB นี้ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แผนภาพแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่อัตราส่วน PbZrO_3 : PbTiO_3 ต่างกัน

ที่มา: www.nature.com

สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 มีค่าประมาณ 0.52: 0.48 ซึ่งอัตราส่วนนี้ทำให้การแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าของวัสดุ PZT มีค่าสูง เนื่องจากโครงสร้างแบบเตตระโกนอลนี้มีทิศทางในการเกิดข้อไฟฟ้าที่เรียงตัวไปในแนวเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้ 6 ทิศทาง ส่วนโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลนั้นมี 8 ทิศทาง ดังนั้นบริเวณ MPB จึงมีทิศทางในการจัดเรียงตัวการเกิดข้อไฟฟ้าได้ถึง 14 ทิศทาง ทำให้มีโอกาสเกิดข้อได้ง่าย

4. ความต้านทาน สภาพความต้านทาน และผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (resistance: R) เป็นสมบัติที่บอกระดับการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุนั้นๆ โดยกระแสไฟฟ้า (I) ที่ผ่านวัสดุตัวนำจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ (V) ระหว่างปลายของตัวนำนั้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) ดังสมการที่ (19)

$$R = \frac{V}{I} \quad (19)$$

สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) เป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด สารต่างชนิดกันจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่างกัน และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) เพื่อหาความต้านทาน (R) ของวัสดุที่อุณหภูมิคงตัวค่าหนึ่ง โดยวัสดุมีความยาว (l) และพื้นที่หน้าตัด (A) ที่แตกต่างกัน ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าดังสมการที่ (20)

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (20)$$

หรือ

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (21)$$

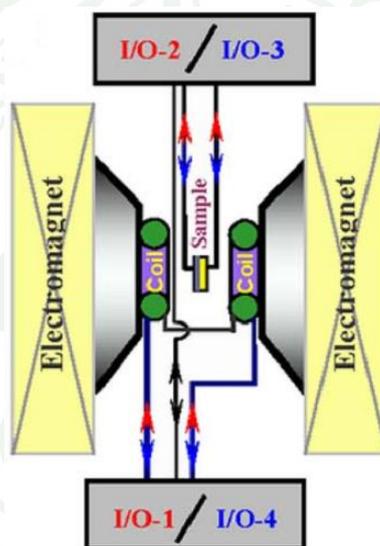
จากสมการที่ (20) พบว่า ณ อุณหภูมิคงตัวค่าหนึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า แต่จะแปรผกผันกับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

ความต้านทานไฟฟ้าในวัสดุ เป็นคุณสมบัติของสารในการยอมให้อิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและสถานะของสารด้วย ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ทำให้สถานะหรือสภาพภายในวัสดุเปลี่ยนไปก็คืออุณหภูมิ โดยถ้าอุณหภูมิของสารเปลี่ยนไปก็ย่อมทำให้ความต้านทานและค่าสภาพต้านทานของสารเปลี่ยนไปด้วย โดยแยกพิจารณาตามประเภทของสาร ดังนี้

- 1) ฉนวน (insulator) มีสภาพต้านทานสูง แต่จะมีค่าลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูง ๆ
- 2) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) มีสภาพต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- 3) ตัวนำ (conductor) มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ถ้าเป็นโลหะบริสุทธิ์ความต้านทานจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำที่เป็นโลหะผสมบางชนิดนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ค่อยมีผลต่อการเปลี่ยนสภาพความต้านทาน จึงนิยมนำวัสดุชนิดนี้มาทำเป็นตัวต้านทานมาตรฐาน
- 4) ตัวนำยวดยิ่ง (superconductor) จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิลดลง

5. การวัดค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก

ในการศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำไปวางระหว่างขั้วของแม่เหล็กที่ใช้ในการไบแอส (H_{dc}) ซึ่งระหว่างขั้วแม่เหล็กดังกล่าวจะมีขดลวดอีกชุดหนึ่งทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ให้ผ่านชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ที่ผิวของตัวอย่างจะถูกวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบ ล็อก-อิน หรืออาจจะขยายประจุก่อนแล้วจึงวัดความต่างศักย์ที่ได้จากเครื่องขยายประจุกโดยใช้ ล็อก-อิน อีกทีหนึ่ง ซึ่งโดยวิธีนี้จะได้อ่านค่าที่ถูกต้องมากกว่าเนื่องจากความต้านทานอินพุทของตัวขยายประจุกมีค่าสูงมาก ๆ (Chen *et al.*, 2010) ลักษณะแผนภาพการวัดค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงแผนภาพการต่อเครื่องวัดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก

ที่มา: Chen *et al.* (2010)

ความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ที่ผิวของตัวอย่างจะถูกวัดเทียบกับตัวแปรต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ ได้แก่ ขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอส ขนาดและความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา หรือทิศทางในการให้สนามแม่เหล็กทั้งสอง จากนั้นจึงนำความต่างศักย์ที่วัดได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME ตามสมการที่ (4)

6. การสังเคราะห์ฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง (thin film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ การระบุว่าฟิล์มใดเป็นฟิล์มบางนั้นอาจพิจารณาได้จากการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่าฟิล์มบาง แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) เรียกฟิล์มนั้นว่า ฟิล์มหนา จากความหมาย จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันอาจเป็นฟิล์มหนาหรือฟิล์มบางก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้น เช่น ให้ความคมทนถาวร หรือสวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานด้านอื่น ๆ

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางมีหลายแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี ปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางนั้นแบ่งได้ 2 เทคนิค ได้แก่

6.1 เทคนิคทางเคมี (chemical deposition techniques) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นรองรับ ซึ่งรวมถึงการเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า (electrodeposition) และไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless deposition)

6.2 เทคนิคทางกายภาพ (physical deposition techniques) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วกระจายเข้าไปยึดติดกับแผ่นรองรับโดยการใช้ความร้อน (thermal) การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การใช้แสงเลเซอร์ (laser ablation) และเทคนิคสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอริงเท่านั้น

7. การสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอริง

อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนอะตอมนั้นอาจจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ แต่ในการทำให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้ความหนาของฟิล์มตามต้องการ สำหรับเทคนิคสปัตเตอริงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

7.1 ดีซีสปัตเตอริง

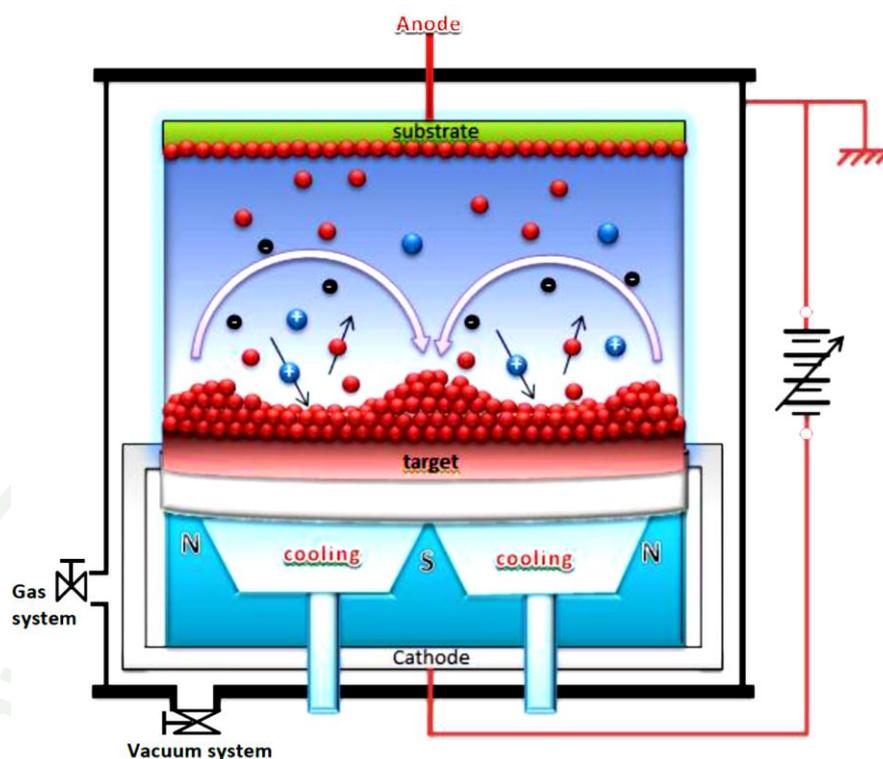
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง (DC-sputtering) เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ได้กับเป้าสารเคลือบที่เป็นโลหะและนำไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้

7.2 อาร์เอฟสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง (RF-sputtering) จะใช้กระแสไฟฟ้าสลับความถี่คลื่นวิทยุ (radio frequency: RF) อยู่ในช่วง 5 ถึง 30 MHz (เป็นค่าความถี่ที่คณะกรรมการ FCC (federal communications commission) กำหนดไว้สำหรับใช้งานที่เกี่ยวข้องกับพลาสมา ทั้งนี้เพื่อไม่ให้รบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ในการเคลือบฟิล์ม) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสองสลับกัน ช่วยให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เมื่ออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายในพลาสมาทำให้มีพลังงานสูงพอที่จะชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยแล้วเกิดเป็นไอออนได้ จึงเป็นการเพิ่มไอออนในระบบ และช่วยให้พลาสมาสามารถคงตัวอยู่ได้ด้วยความดันของก๊าซต่ำลง ซึ่งเป็นการลดปริมาณของก๊าซที่อาจปนเปื้อนลงในฟิล์มได้ อาร์เอฟสปัตเตอริงสามารถใช้กับเป้าสารเคลือบที่เป็นทั้งโลหะและฉนวนไฟฟ้าได้

7.3 อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF-magnetron sputtering)

ระบบดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริงสามารถผลิตไอออนได้ค่อนข้างต่ำถึงแม้ว่าการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าในกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริงจะสามารถช่วยเพิ่มโอกาสให้อิเล็กตรอนชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยแต่ปริมาณไอออนที่ได้ยังไม่มากพอ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซมากขึ้น จึงได้มีการนำแม่เหล็กใส่เข้าไปในระบบด้วย และระบบนี้เรียกว่าอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF-magnetron sputtering) ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 15

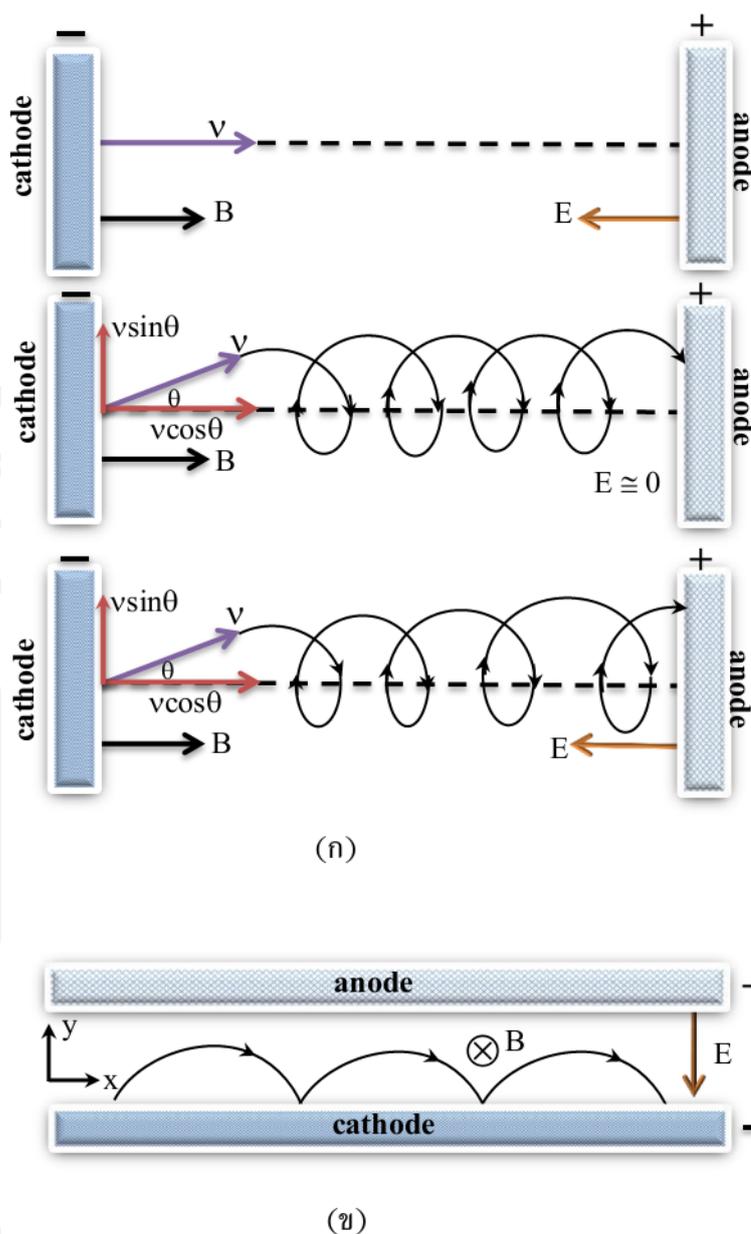


ภาพที่ 15 แสดงการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ภายในพลาสมานั้นจะได้รับแรง (F) กระทำจากสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งอธิบายได้ด้วยแรงลอเรนซ์ ดังสมการที่ (22)

$$F = qE + q(v \times B) \quad (22)$$

แรงลอเรนซ์จะทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุ q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v วนเป็นเกลียว (helix) รอบแกนที่ขนานกับสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 16 (ก) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในพลาสมานานขึ้น จึงเพิ่มโอกาสที่จะชนกับอะตอมของก๊าซมากขึ้น อิเล็กตรอนที่บริเวณใกล้ผิวเป้าจะเคลื่อนที่แบบกระโดด (hopping) ไปบนผิวเป่าดังภาพที่ 16 (ข) ทำให้บริเวณดังกล่าวมีไอออนเกิดขึ้นจำนวนมาก ผิวเป้าส่วนนี้จึงถูกกัดกร่อนออกไปมากกว่าบริเวณอื่น



ภาพที่ 16 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ก) ภายในพลาสมา และ (ข) บริเวณบนผิวเป้า

เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงช่วยเพิ่มอัตราการเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 10 ถึง 100 เท่า และช่วยลดความดันก๊าซขณะเคลือบได้มาก ฟิล์มที่ได้มีความสะอาดสูง ดังนั้นระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงนี้จึงเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยมีการนำไปใช้กับระบบดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริง เรียกว่าระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงตามลำดับ

8. การวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง

เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง เป็นเครื่องวัดความเรียบและหยาบของผิววัตถุ รวมทั้งการวัดแบบชั้นบันได ด้วยการใช้แสงส่องลงไปกระทบพื้นผิวของฟิล์มและมีกล้องจุลทรรศน์เป็นตัวส่องให้เห็นพื้นผิวแล้วแสดงภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยแสงที่กระทบกับพื้นผิวจะเกิดการสะท้อนกลับ แสงที่สะท้อนกลับจะมีความถี่แตกต่างกันทำให้เห็นภาพที่มีเฉดสีที่ต่างกัน แล้วนำเฉดสีต่างๆ มาวิเคราะห์และหาค่าความหนาของฟิล์มได้ โดยการใช้แสง สามารถแบ่งโหมดการวัดออกเป็นสองแบบ ดังนี้

8.1 phase-shifting interferometry (PSI) ใช้สำหรับวัดความเรียบ และความสูงที่น้อยมาก ๆ ของพื้นผิว โดยมีระดับความละเอียดในแนวตั้งที่ 3 \AA ใช้แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 632 นาโนเมตร

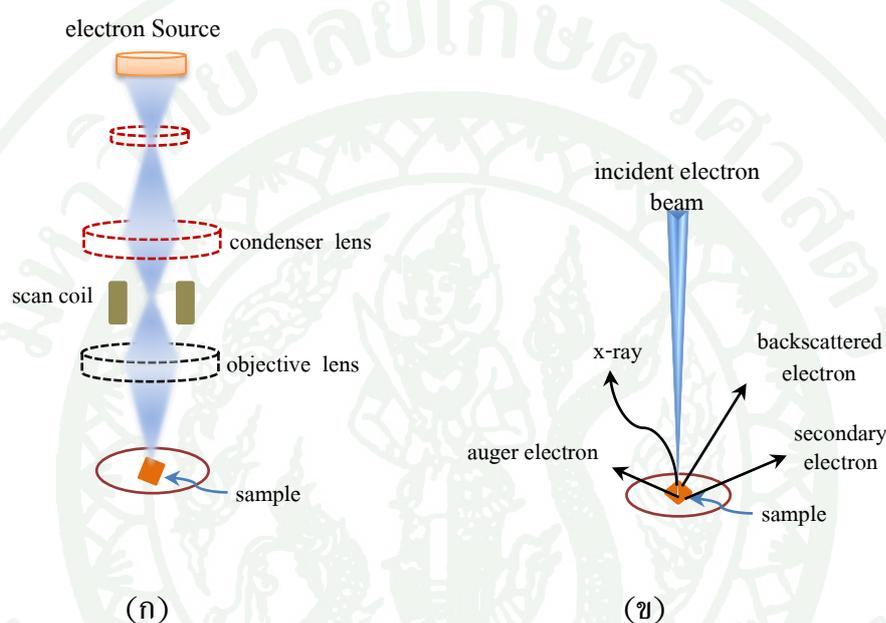
8.2 vertical scanning interferometry (VSI) ใช้สำหรับวัดความหยาบ และความสูงของพื้นผิวถึงระดับมิลลิเมตร โดยมีระดับความละเอียดในแนวตั้งที่ 30 \AA ใช้แสงสีขาวที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น

ตารางที่ 1 ความละเอียดการวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสงด้วยโหมดการวัดแบบ PSI และ VSI

mode	vertical resolution	
	single measurement	multiple measurement (averaged)
PSI	3 \AA	1 \AA
VSI	3 nm	$<1 \text{ nm}$

9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือสแกนไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา มีกำลังขยายสูงประมาณ 200,000 เท่า โดยส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แผนภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM และ (ข) อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและชิ้นงานตัวอย่าง

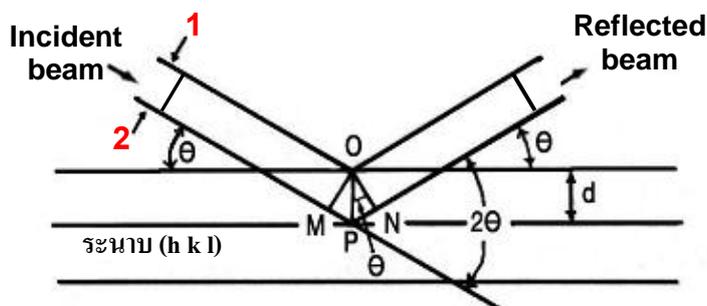
SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ ต่อจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดการสะท้อนจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งเรียกอิเล็กตรอนที่เกิดจากการสะท้อนว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) และตรวจวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ (detector) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์นำไปสร้างเป็นภาพบนจอคอมพิวเตอร์แสดงผลต่อไป และสามารถบันทึกภาพบนจอได้เลย

10. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer: XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร

10.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีเอกซ์ (ความยาวคลื่น 0.5 ถึง 2.5 Å) ไปกระทบวัสดุที่เป็นผลึกและมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงเงื่อนไขของการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารังสีที่ 1 และ 2 ซึ่งตกกระทบระนาบ (h k l) ของอะตอมเป็นมุม θ แล้วรังสีทั้งสองเกิดการแทรกสอดกันแบบเสริม รังสีที่ 2 ต้องเดินทางด้วยระยะทางที่มากกว่ารังสีที่ 1 เท่ากับ $MP+PN$ ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวคลื่น (λ) ดังสมการที่ (23)

$$n\lambda = MP + PN \quad (23)$$

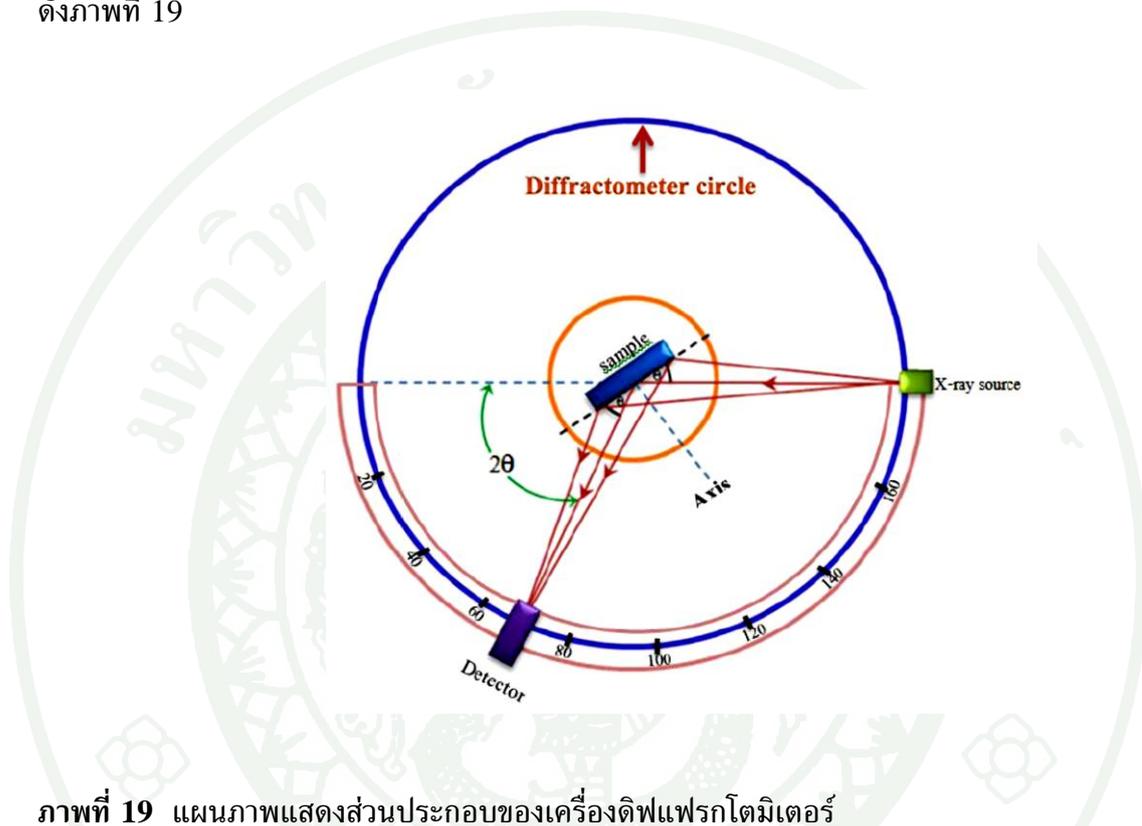
โดย n คือ ลำดับของการเกิดการเลี้ยวเบนเท่ากับ 1, 2, 3,....

จากภาพที่ 17 จะได้ $MP = PN = d\sin\theta$ โดย d เป็นระยะห่างระหว่างระนาบเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (23) จะได้ กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (24)

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (24)$$

10.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อบันทึกรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบของผลึก โดยจะยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปยังผลึก แล้ววัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากผลึกที่มุมต่างๆ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เนื่องจากมุมในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นี้มีข้อดีคือใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยไม่ทำลายชิ้นงาน สามารถบอกสูตรเคมีและความแตกต่างของสารประกอบที่มีในชิ้นงานตัวอย่างได้ ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์แบบอื่นส่วนมากจะบอกความแตกต่างระดับนี้ไม่ได้ ส่วนข้อจำกัดคือไม่สามารถบอกความแตกต่างของสารประกอบที่เป็นอสัณฐาน ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบที่มีปริมาณน้อยๆ ที่รวมอยู่ในสารที่นำมาวิเคราะห์ได้ อีกทั้งไม่สามารถวิเคราะห์ชนิดของสารที่ไม่มีข้อมูล

อยู่ในฐานข้อมูล JCPDS ได้ สารเจือปนบางตัวทำให้แลตทิซพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ของผลึกหลักเปลี่ยนแปลงทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของผลึกหลักเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นเมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนมาเทียบในบัตรข้อมูล (JCPDS card) จึงเปรียบเทียบแบบตรงไปตรงมาไม่ได้

11. การตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุตัวอย่างด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง

การตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุตัวอย่างด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง (vibrating sample magnetometer: VSM) เทคนิคนี้อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก โดยให้ตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดสั้นใกล้ๆ บริเวณขดลวดตรวจวัด ในกรณีที่สารตัวอย่างที่กำลังสั้นอยู่นั้นมีความเป็นแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตรวจวัดและขณะเดียวกันก็เหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขดลวดดังกล่าว โดยค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของขดลวดเป็นสัดส่วนกับไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก m ในวัสดุ ดังสมการที่ (25)

$$V = mAfS \quad (25)$$

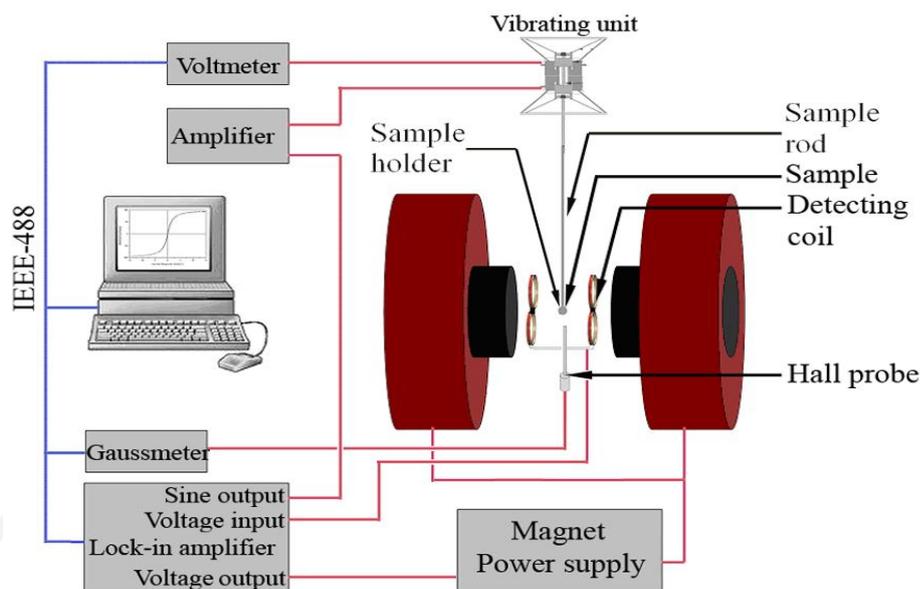
โดย V คือ ค่าความต่างศักย์เหนี่ยวนำ มีหน่วย โวลต์

f คือ ความถี่ในการสั่นของวัสดุตัวอย่าง มีหน่วย Hz

A คือ แอมพลิจูดในการสั่น

S คือ ความไวในการตรวจวัดของขดลวด

VSM จะประกอบไปด้วยส่วนซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการสั่นของวัสดุตัวอย่าง แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก H_{dc} เพื่อใช้ในการแมกนีไทซ์ตัวอย่าง และขดลวดตรวจวัด (detecting coils) สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กแสดงดังภาพที่ 20

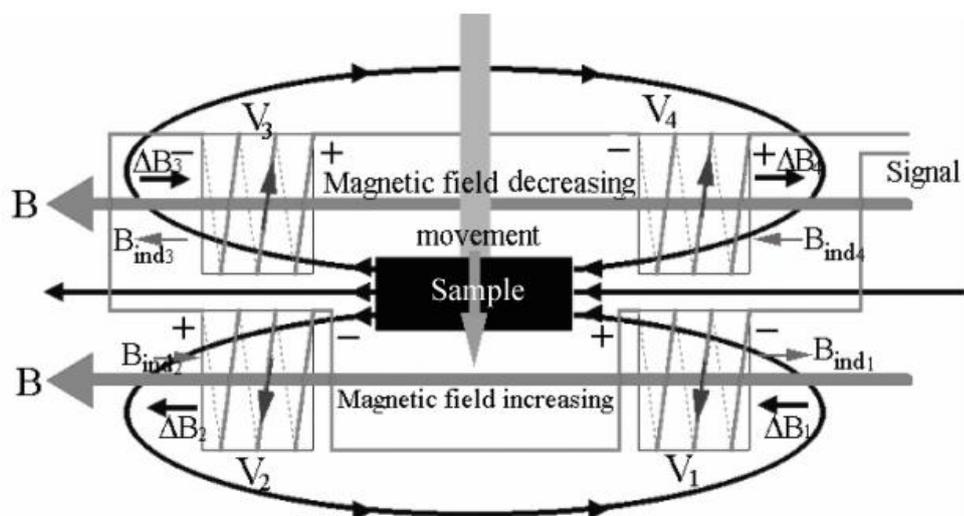


ภาพที่ 20 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของ VSM

ขดลวดที่ใช้ในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดที่มีสมบัติเหมือนกันจำนวนสี่ขดต่อกันดังภาพที่ 19 การต่อในรูปแบบดังกล่าวสามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระเพื่อมของแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่ความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่เกิดจากการสั้นของตัวอย่างมีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์เหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากขดลวดแต่ละตัว ดังสมการ (26)

$$V_{signal} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (26)$$

เนื่องจากสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กของตัวอย่างนั้น มีความถี่เดียวกับความถี่ในการสั้นของตัวอย่าง ดังนั้นสัญญาณรบกวนอื่นๆ ซึ่งมีความถี่ต่างออกไปนั้นสามารถขจัดออกไปได้โดยใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน ในการวัดความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดตรวจวัด โดยสัญญาณที่มีความถี่เดียวกับการสั้นของตัวอย่างจะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับเครื่องวัด



ภาพที่ 21 แผนภาพการต่อขดลวดสำหรับตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตฟิล์มบาง

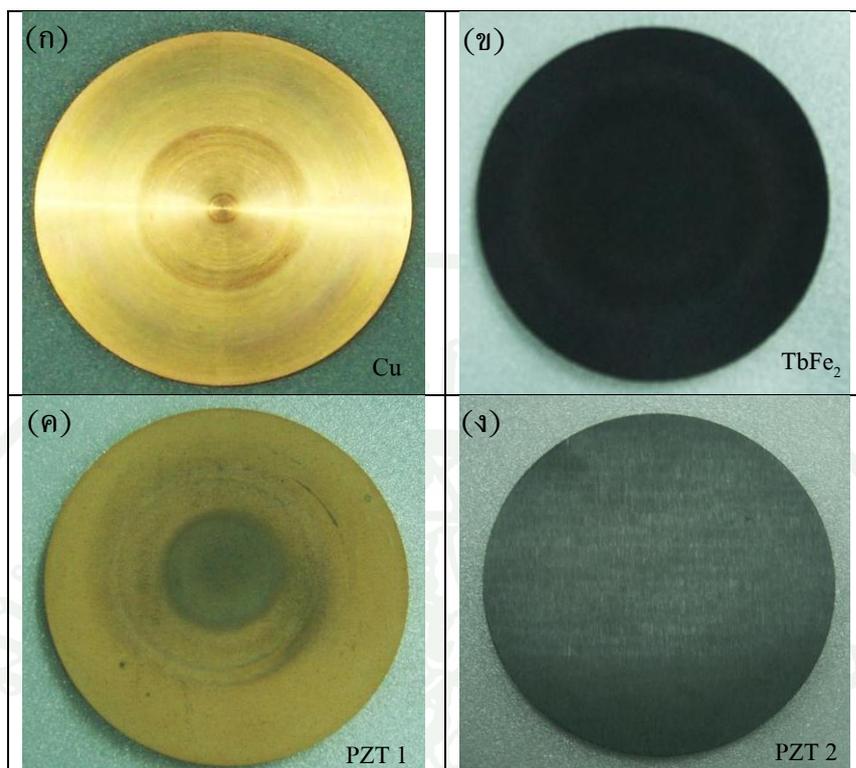
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบางเพื่อประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก มีรายละเอียดดังนี้

1.1 วัสดุเป้าสารเคลือบ

เป้าสารเคลือบที่ใช้มี 4 ชนิด สั่งซื้อจาก TRY sputtering target limited แสดงดังภาพที่ 22 โดยรายละเอียดของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของวัสดุเป้าสารเคลือบที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบาง

วัสดุ	ขนาด	สูตรทางเคมี	ความบริสุทธิ์
เป้าเทอร์เบียมไอรอน	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว	TbFe ₂	99.9%
เป้าเพียโซอิเล็กทริก (1)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว	(Pb(Zr _{0.46} Ti _{0.54})O ₃)	99.9%
เป้าเพียโซอิเล็กทริก (2)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว	(Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃)	99.9%
เป้าทองแดง	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว	Cu	99.9%



ภาพที่ 22 เป้าสารเคลือบที่ใช้สำหรับสังเคราะห์ฟิล์มบาง (ก) เป้า Cu (ข) เป้า $TbFe_2$ (ค) เป้า $Pb(Zr_{0.46}Ti_{0.54})O_3$ และ (ง) เป้า $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$

1.2 วัสดุรองรับ ประกอบด้วย

1.2.1 แผ่น PZT เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 mm หนา 0.191 mm (PSI 5A-4E)

1.2.2 กระจกสไลด์ขนาด $25.4 \times 76.2 \times 1 \text{ mm}^3$

1.3 เครื่องอัลตราโซนิก

1.4 เครื่องเป่าลมร้อน

1.5 น้ำ 3D

1.6 อะซิโตน

1.7 เอทานอล

1.8 กาวเงิน

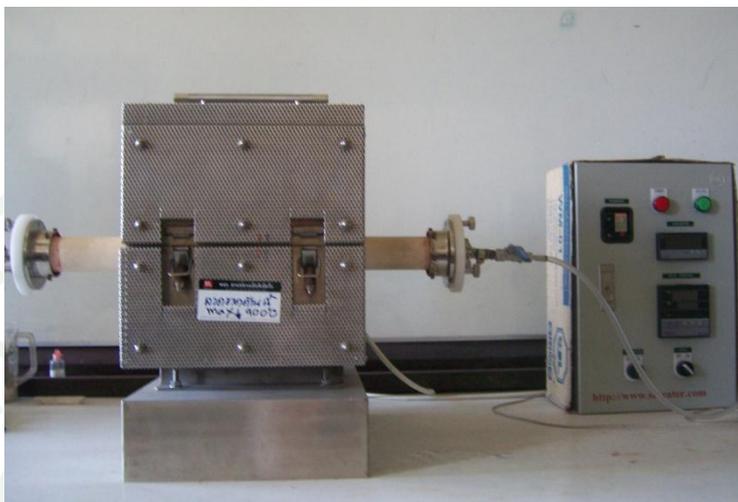
1.9 คีมปากคีบ

1.10 ที่ตัดกระจกสไลด์

1.11 บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

1.12 ถูมมือยางแบบไม่มีแป้ง

1.13 เตาเผาความร้อนสูงแบบท่อชนิดตั้งโปรแกรมได้ ผลิตโดยบริษัทสวนหลวงเอ็นจิ-เนียริง สามารถตั้งขั้นตอนการเผาได้ทั้งหมด 16 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนสามารถตั้งเวลาในการเผาได้ถึง 99 ชั่วโมง และสามารถทำความร้อนได้ถึง 1200 °C ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 เตาเผาความร้อนสูงแบบท่อชนิดตั้งโปรแกรมได้

1.14 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ผลิตโดยศูนย์ชินโครตรอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังภาพที่ 24

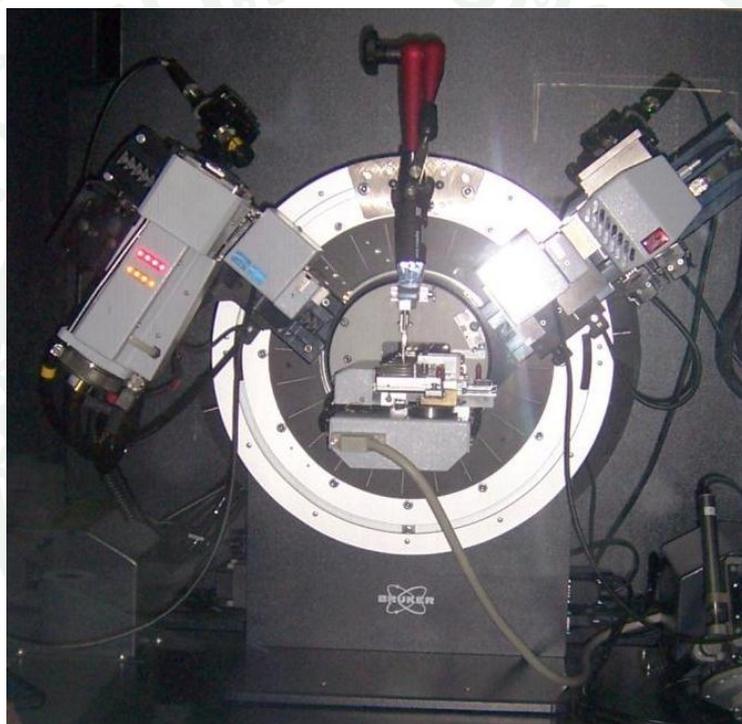


ภาพที่ 24 เครื่องเคลือบฟิล์มบางอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง

2.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD)

ในการวิจัยได้ใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD) รุ่น D8 Advance ผลิตจากบริษัท BRUKER ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แสดงดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD)

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

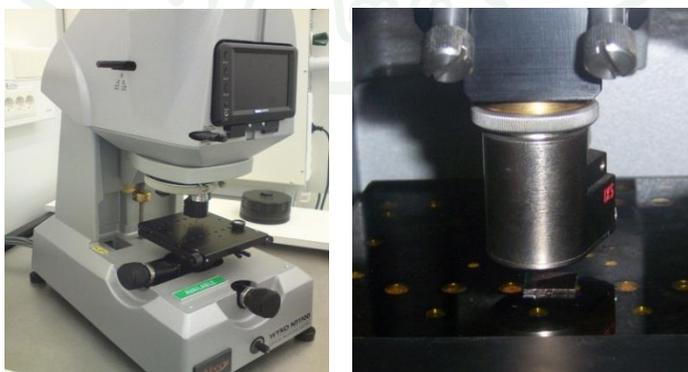
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน รุ่น S-3400N ผลิตจากบริษัท HITACHI ใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงพื้นผิวและความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการ อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3 เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง (Optical profiler WYKO)

ความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบได้ในแต่ละชั้นจะนำมาวัดความหนาของฟิล์มก่อน เพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ โดยใช้เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง รุ่น NT1100 ผลิตโดยบริษัท Veeco/WYKO ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยแสง รุ่น NT1100

2.4 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง (vibrating sample magnetometer: VSM)

แมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง ใช้สำหรับศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่าง ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง

2.5 เครื่องมือวัดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย

2.5.1 อุปกรณ์สำหรับระบบตรวจวัด ME

ก. ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์

ออกแบบและสร้างขดลวดเฮล์มโฮลทซ์สำหรับการใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ในช่วง 0 - 60 Oe ให้แก่ตัวอย่างในการวัดค่าสภาพรีไวต์ ME และสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME โดยใช้ขดลวด 24 AWG และใช้ Polyoxy- methylene (POM) เป็นแกนสำหรับพันขดลวด โดยขดลวดแต่ละขดมีจำนวน 280 รอบ รัศมีเฉลี่ย 5 cm ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์

ข. ฟิกซ์เจอร์สำหรับวัด ME

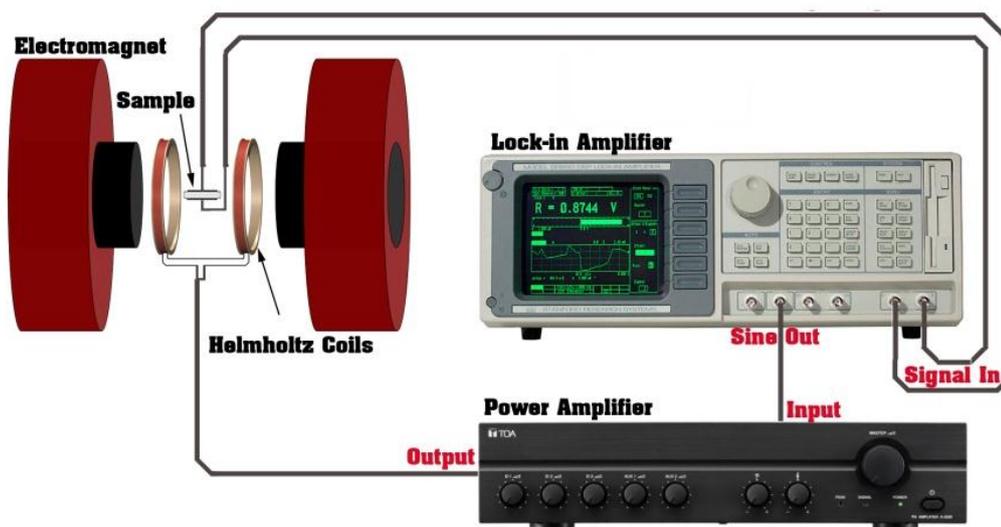
ออกแบบฟิกซ์เจอร์สำหรับวัด ME เพื่อกันสัญญาณรบกวน สำหรับการออกแบบและสร้างครั้งนี้ได้ใช้ท่อทองเหลืองซึ่งเป็นตัวนำที่ดี และไม่เป็นแม่เหล็ก ทำให้สามารถเปลี่ยนตัวอย่างสำหรับตรวจวัด ME ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ฟิกซ์เจอร์สำหรับตรวจวัด ME

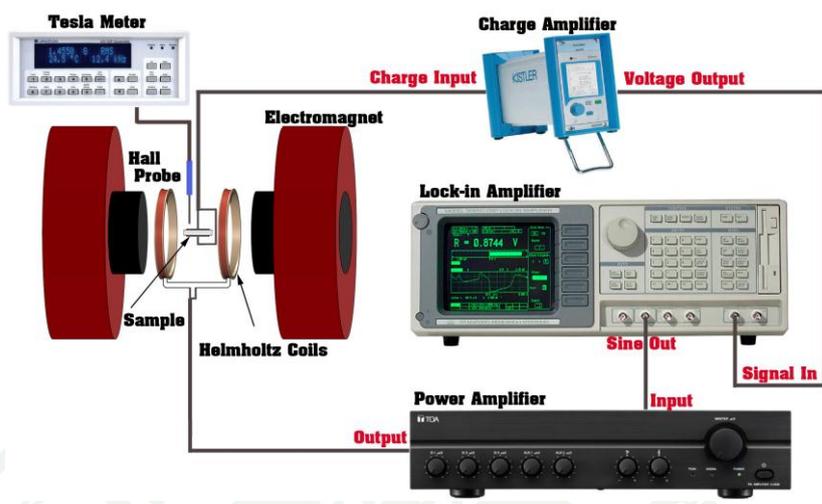
2.4.2 ระบบตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME

ระบบที่ใช้ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME ประกอบด้วย แม่เหล็กไฟฟ้า ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ (helmholtz coils) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (lock-in amplifier) เครื่องขยายกำลัง (power amplifier) ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 แผนภาพของอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME

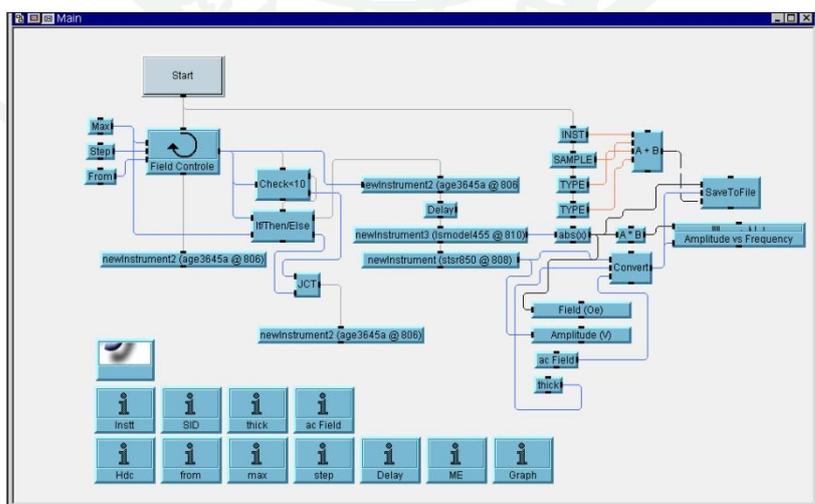
โดยสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) จากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน ถูกจ่ายให้แก่เครื่องขยายกำลัง ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าสลับให้แก่ขดลวดเฮล์มโฮลทซ์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก H_{ac} ให้แก่ตัวอย่าง จากนั้นเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน จะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างในโหมดผลต่าง แล้วจึงนำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME หรืออีกวิธีหนึ่งคืออาจจะขยายประจุก่อน แล้วจึงวัดความต่างศักย์ที่ได้จากเครื่องขยายประจุโดยใช้ ล็อก-อิน อีกที่หนึ่ง ซึ่งการใช้วิธีนี้จะได้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า เนื่องจากความต้านทานอินพุทของตัวขยายประจุจะมีค่าสูงมาก ๆ ลักษณะแผนภาพกรณีที่ใช้เครื่องขยายประจุ แสดงดังภาพที่ 32



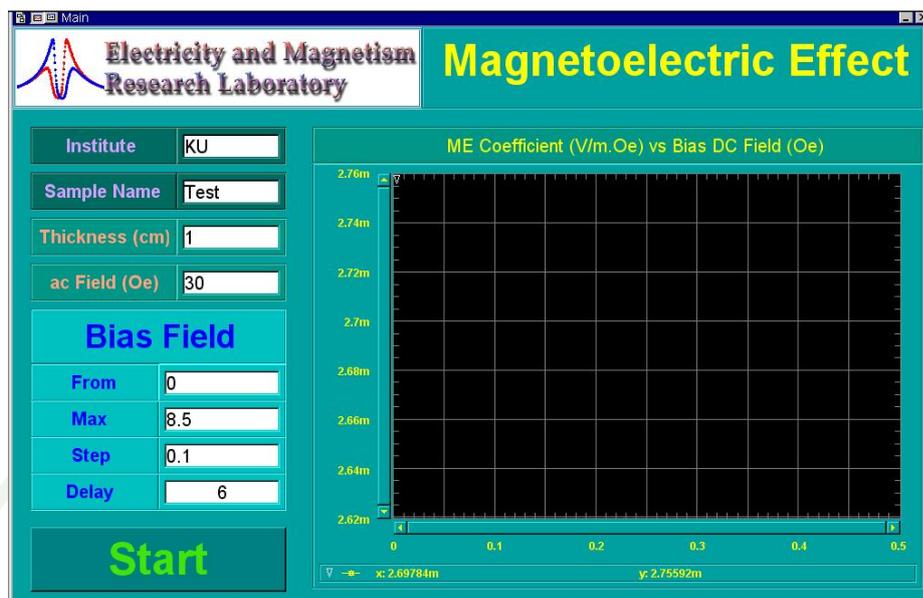
ภาพที่ 32 แผนภาพการต่ออุปกรณ์กรณีที่ใช้เครื่องขยายประจุ

2.4.3 โปรแกรมควบคุมและรับค่าสัญญาณ

ในการตรวจวัดสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME จำเป็นต้องมีการวัดค่าความต่างศักย์ที่สนามแม่เหล็กต่างๆ กัน เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการควบคุมและตรวจวัด ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม VEE Onelab ของ Agilent แสดงดังภาพที่ 33 และภาพที่ 34 ซึ่งใช้เป็นตัวควบคุมและรับค่าสัญญาณจากเครื่องมือวัด และประมวลผลค่าที่วัดได้ในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ รวมทั้งมีการบันทึกค่าที่วัดได้เพื่อนำไปประมวลผลในลำดับต่อไป



ภาพที่ 33 รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม รับค่า และประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบตรวจวัดสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME



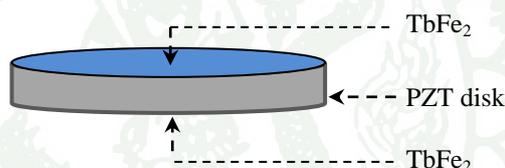
ภาพที่ 34 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม รับค่า และประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบตรวจวัดสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ME

วิธีการ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาปรากฏการณ์ ME ในตัวอย่าง 2 แบบ ได้แก่ การเคลือบ TbFe₂ บนแผ่น PZT และการสังเคราะห์ฟิล์มบาง TbFe₂/PZT/TbFe₂ บนแผ่นกระจกสไลด์ แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1. การเคลือบ TbFe₂ บนแผ่น PZT

ในขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์ TbFe₂/PZT/TbFe₂ โดยทำการเคลือบฟิล์มบาง TbFe₂ ลงบนผิวหน้าของแผ่น PZT ทั้งสองด้านด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ภายใต้ระบบของแก๊สอาร์กอน ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 35 และสำหรับเงื่อนไขที่ใช้กับระบบสังเคราะห์วัสดุตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 35 แสดงลักษณะวัสดุผลติเฟอร์โรอิเล็กที่เกิดจากคู่ควมกันระหว่าง TbFe₂ กับ PZT

ตารางที่ 3 แสดงเงื่อนไขระบบเคลือบด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง TbFe₂

condition	quantities
base pressure	10 ⁻⁵ mbar
gas pressure	10 ⁻³ mbar
sputtering power	300 W
diameter of target	75 mm

2. การสังเคราะห์ฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ บนแผ่นกระจกสไลด์

2.1 ขั้นตอนการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและอัตราการเคลือบฟิล์มบาง

ก่อนที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางของวัสดุ ME นั้น ผู้วิจัยได้ทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับเป้าสารเคลือบแต่ละชนิด ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวประกอบด้วย กำลังไฟฟ้า ความดันของระบบ และความดันแก๊สอาร์กอน โดยเงื่อนไขที่ใช้จะมีความเหมาะสมหรือไม่นั้นจะสังเกตจากความคงตัวของพลาสมาภายในแชมเบอร์ สำหรับการหาอัตราการเคลือบฟิล์มนั้น ผู้วิจัยได้ทำการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดลงบนกระจกสไลด์ที่ละแผ่นก่อน แล้วจับเวลาที่ใช้ในการเคลือบต่อจากนั้นจะนำไปวัดค่าความหนาด้วยเครื่องวัดความฟิล์มด้วยแสง ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ฟิล์มบางของวัสดุ ME ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยได้ใช้เงื่อนไขและอัตราการเคลือบฟิล์ม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงเงื่อนไขระบบและอัตราการเคลือบฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$

film	RF-power (W)	base pressure (Torr)	gas pressure (Torr)	deposition rate (nm/min)
Cu	200	3.0×10^{-3}	1.20×10^{-2}	57
$TbFe_2$	200	3.0×10^{-3}	1.85×10^{-2}	0.285
PZT	200	3.0×10^{-3}	1.30×10^{-2}	2.0

2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$

2.2.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกสไลด์

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์ฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ โดยใช้กระจกสไลด์เป็นวัสดุรองรับ ซึ่งการเตรียมกระจกสไลด์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ก. ล้างทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำ 3D
- ข. ล้างด้วยอะซิโตน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- ค. ล้างด้วยเอทานอล โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- ง. นำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 60 นาที

2.2.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง

ก. การทำความสะอาดซิลส์

- 1) ล้างด้วยน้ำ DI
- 2) ใช้น้ำยาล้างจานล้างทำความสะอาดและใช้ฟอยขัดให้สะอาด
- 3) เป่าให้หมดด้วยลม
- 4) นำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที

ข. ประกอบเป้าสารเคลือบเข้ากับหัวแมกนีตรอนของเครื่องสปัตเตอร์ริง ต่อจากนั้นนำกระจกสไลด์วางบนแท่นวางแล้วปิดฝาแชมเบอร์ให้สนิท

ค. การสร้างสภาวะสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบอากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบอากาศแบบโรตารี และเครื่องสูบอากาศแบบเทอร์โบ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) เปิดสวิตช์ควบคุมปั๊มทั้งสองตัว
- 2) เปิดสวิตช์เครื่องสูบอากาศแบบโรตารี เมื่อความดันมีค่า 10 Torr ให้คลายเกลียวน็อตที่ฝาแชมเบอร์ออกจนกระทั่งความดันมีค่า 3 Torr ให้เปิดเครื่องสูบอากาศแบบเทอร์โบ
- 3) เครื่องสูบอากาศแบบเทอร์โบ ทำหน้าที่สูบอากาศออกจากแชมเบอร์ เพื่อให้ได้ base pressure ตามต้องการ

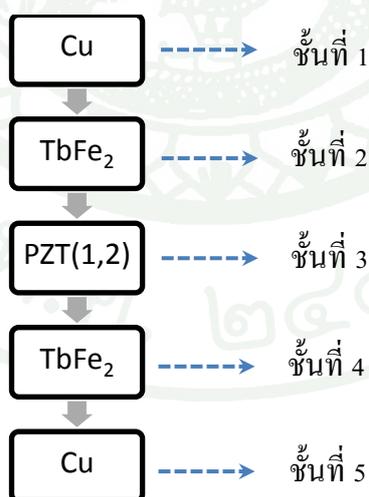
ง. การเคลือบฟิล์มบาง

- 1) เปิดระบบแก๊สอาร์กอน หมุนเปิดวาล์วที่ถังแก๊ส ปรับวาล์วรูเข็ม ควบคุมความดันแก๊สในแชมเบอร์จนกว่าระดับความดันจะคงที่ ความดันแก๊สที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของเป้าสารเคลือบ
- 2) เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟอาร์เอฟ โดยเปิดปุ่ม POWER-ON ปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ 200 W จับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มซึ่งเวลาที่ใช้แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มสำหรับเป้าสารเคลือบแต่ละชนิด

target	sample	thickness (nm)	time (min)
Cu		114	2
	sample 1	20	70
	sample 2	40	140
TbFe ₂	sample 3	60	210
	sample 4	80	280
	sample 5	100	350
PZT(1,2)	sample 1	40	20
	sample 2	80	40
	sample 3	120	60
	sample 4	160	80
	sample 5	200	100

3) ทำการเคลือบฟิล์มโดยเรียงลำดับดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 แสดงลำดับการเคลือบฟิล์มบาง

ชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบทองแดงชั้นที่หนึ่งเรียบร้อยแล้วจะต้องติดทับด้วยกระดาษกาวที่ขอบของกระจกสไลด์ เพื่อเว้นพื้นที่บางส่วนเอาไว้สำหรับติดขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ ME และฟิล์มบางแต่ละชั้นจะถูกนำไปวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาด้วยแสงก่อน เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มบางตามที่ต้องการ

จ. ขั้นตอนการปิดเครื่อง

เมื่อเคลือบฟิล์มได้ความหนาของแต่ละชั้นตามที่ต้องการแล้ว ต่อจากนั้นทำการปิดระบบการเคลือบแบบย้อนกลับซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ปิดสวิทช์แหล่งจ่ายไฟอาร์เอฟ กดที่ปุ่ม POWER-OFF
- 2) ปิดระบบแก๊สอาร์กอน
- 3) ปิดเครื่องสูบลuftแบบเทอร์โบ รอ 30 นาที ปิดเครื่องสูบลuftแบบโรตารี ปล่อยให้อุณหภูมิภายในแชมเบอร์ลดลงซึ่งต้องใช้เวลา 30 นาที
- 4) เปิดฝาแชมเบอร์ โดยค่อยๆ ปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในแชมเบอร์
- 5) ปิดระบบทำความเย็น
- 6) เปิดฝาแชมเบอร์นำชิ้นงานตัวอย่างออกมาจัดเก็บให้เป็นระเบียบ

3. การอบชุบด้วยความร้อน

ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน แล้วนำไปอบชุบด้วยความร้อนโดยใช้เตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 200, 300, 400, 500 และ 600 °C ตามลำดับ เป็นเวลานาน 25 นาที โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของฟิล์ม และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ ME ในฟิล์มบาง

4. การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม

4.1 โครงสร้างของฟิล์ม

ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีดังนี้

4.1.1 นำฟิล์มบางตัวอย่างวางบนที่ยึดตัวอย่าง

4.1.2 กำหนดค่าในโปรแกรมให้วัดค่ามุม 2θ ตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศา อัตราการเพิ่มของมุม 2θ เป็น 0.02 องศาต่อวินาที

4.1.3 กำหนดค่าความต่างศักย์ 40 kV กระแส 40 mA ให้กับหลอดรังสีเอกซ์

4.1.4 เริ่มวัดและบันทึกเป็นความเข้มรังสีกับมุม 2θ

4.1.5 นำผลที่ได้มาศึกษาพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก

4.2 พื้นผิวของฟิล์มบาง

การศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

4.2.1 ตัดชิ้นงานตัวอย่างให้สามารถนำเข้าเครื่อง SEM ได้ แล้วติดชิ้นงานลงบนแท่นวาง (Stub) ด้วยเทปคาร์บอนสองหน้าโดยให้ด้านที่ต้องการวัดอยู่ด้านบน

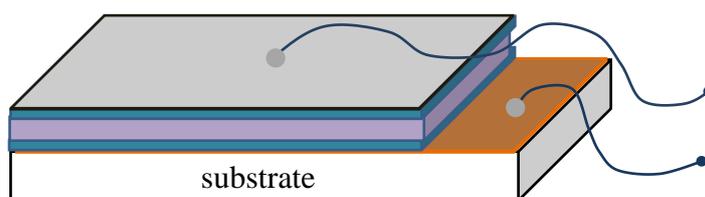
4.2.2 ฉาบผิวชิ้นงานด้วยทองเพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้

4.2.3 กำหนดค่าในโปรแกรมให้ใช้ความต่างศักย์ 20 kV กระแส 87 mA กำลังขยาย $7500X$ และวัดด้วยโหมด SE detector

4.2.4 นำผลที่ได้มาศึกษาและวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง

4.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง

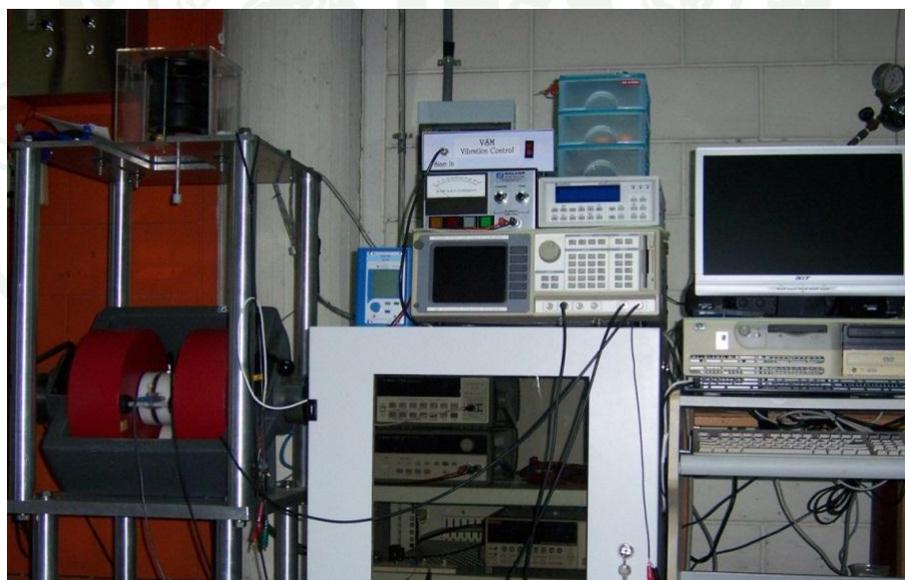
การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางนั้น จะแบ่งชิ้นงานออกเป็น 6 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีพื้นที่ประมาณ 35 ตารางมิลลิเมตร ความหนาฟิล์มรวม 400 นาโนเมตร ชั้นแรกจะไม่นำไปผ่านกระบวนการอบชุบด้วยความร้อนแต่อีก 5 ชั้นงานที่เหลือจะนำไปอบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิ $200, 300, 400, 500$ และ 600 °C ตามลำดับ จากนั้นทาบผิวหน้าชิ้นงานด้วยกาวเงินแล้วต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับชิ้นงาน ดังภาพที่ 37 และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (current source) หลังจากนั้นวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดบนผิวชิ้นงาน คำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าตามสมการที่ (19) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าตามสมการที่ (21)



ภาพที่ 37 แสดงการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับชิ้นงานตัวอย่างเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

5. การศึกษาความสัมพันธ์แมกนีโตอิเล็กทริกของฟิล์ม

ศึกษาปรากฏการณ์ ME ในฟิล์มบางด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก (α_v) ที่ได้จากตัวอย่าง เมื่อขนาดความถี่สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาและขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอสต่างๆ กัน โดยฟิล์มบางตัวอย่างจะติดขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงินก่อนแล้วนำไปติดกับโพรบหัววัด และนำไปวางระหว่างขั้วของแม่เหล็กที่ใช้ในการไบแอสซึ่งระหว่างขั้วแม่เหล็กดังกล่าวจะมีขดลวดอีกชุดหนึ่งทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นกับเวลาให้ผ่านตัวอย่าง จากนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน โดยทำการต่อเครื่องมือต่างๆ ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ ME

5.1 สัญลักษณ์ของฟิล์มบางตัวอย่าง

เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างมีจำนวนหลายชิ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดสัญลักษณ์ เพื่อให้
ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ดังนี้

5.1.1 ฟิล์มบาง Cu/TbFe₂/PZT1/TbFe₂/Cu เมื่อ PZT1 คือ Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O₃

ตารางที่ 6 สัญลักษณ์ชิ้นงานตัวอย่างของฟิล์มบาง PZT1

sample ID	TbFe ₂ (nm)	PZT1 (nm)	TbFe ₂ (nm)	anneal temp (°C)
PZT1_A	20	40	20	500
PZT1_B	40	80	40	500
PZT1_C	60	120	60	500
PZT1_D	80	160	80	400-650
PZT1_E	100	200	100	500

5.1.2 ฟิล์มบาง Cu/TbFe₂/PZT₂/TbFe₂/Cu เมื่อ PZT2 คือ Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O₃

ตารางที่ 7 สัญลักษณ์ชิ้นงานตัวอย่างของฟิล์มบาง PZT2

sample ID	TbFe ₂ (nm)	PZT2 (nm)	TbFe ₂ (nm)	anneal temp (°C)
PZT2_A	20	40	20	500
PZT2_B	40	80	40	500
PZT2_C	60	120	60	500
PZT2_D	80	160	80	500
PZT2_E	100	200	100	200-650

5.2 การใช้งานเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์ ME มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็น
- 2) เปิดปั้มน้ำ
- 3) เปิดสวิตช์เครื่องวัดต่าง ๆ
- 4) ติดชิ้นงานตัวอย่างบนแท่นสำหรับวางตัวอย่าง
- 5) กดสวิตช์เปิดเครื่อง
- 6) กดปุ่ม POWER ที่เครื่องควบคุมแม่เหล็ก
- 7) กดปุ่ม DC ON ที่เครื่องควบคุมแม่เหล็ก
- 8) เปิดโปรแกรม ME-effect และป้อนค่าต่าง ๆ ลงในโปรแกรม
- 9) กดปุ่ม START เพื่อเริ่มการทำงาน
- 10) กดปุ่ม REVERSAL ที่เครื่องควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อกลับทิศของสนามแม่เหล็กเมื่อมีสัญญาณเตือนจากโปรแกรม

5.3 การกำหนดค่าสนามแม่เหล็กและค่าความถี่ที่ใช้ในการวัด กำหนดดังนี้

- 1) กำหนดค่า สนามแม่เหล็ก H_{dc} ให้มีค่าระหว่าง 5.0 ถึง -5.0 kOe
- 2) กำหนดค่าสนามแม่เหล็ก H_{ac} ที่ 1 Oe แล้ว ปรับความถี่ให้มีค่าต่างกันดังนี้ 501, 751, 801, 851, 901, 1001 และ 1,251 Hz ตามลำดับ
- 3) กำหนดค่าความถี่ไว้ที่ 851 Hz แล้ว ปรับค่า H_{ac} ต่างกันดังนี้ 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 และ 25.0 Oe ตามลำดับ และนำค่าที่วัดได้ไปประมวลผล

6. การผลิตเครื่องต้นแบบ

ฟิล์มบางที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ ME สูงที่สุดจะถูกนำมาใช้ในการผลิตเซ็นเซอร์ที่ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยจะนำมาสร้างเครื่องต้นแบบก่อน

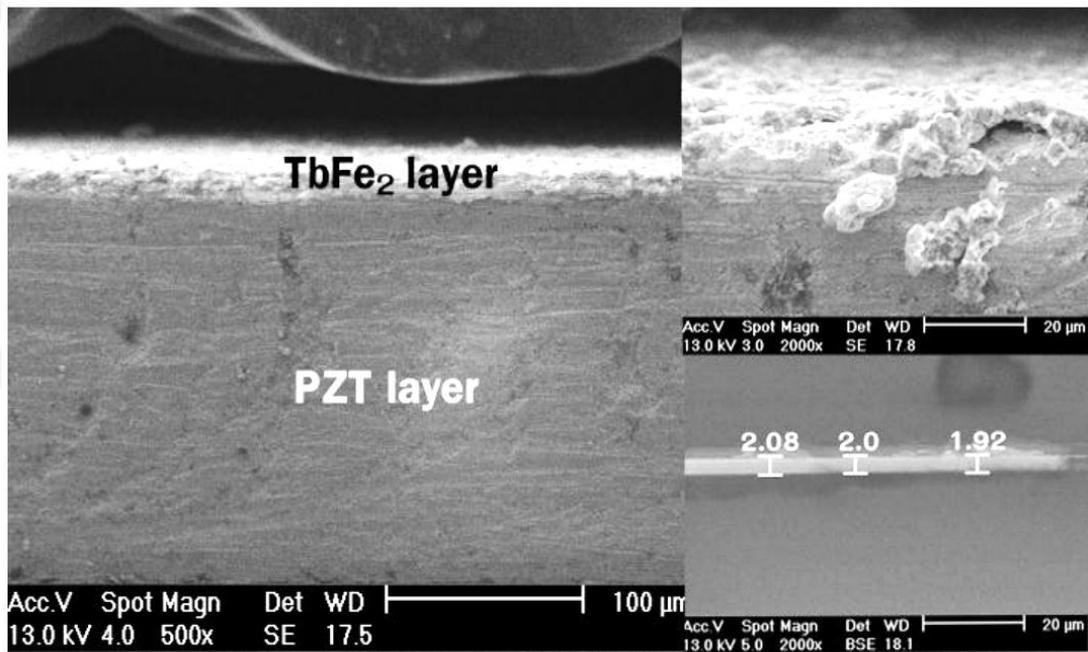
7. รายงานผลการดำเนินการทดลอง

ผลการทดลอง

ผลการเคลือบ $TbFe_2$ บนแผ่น PZT

1. วัสดุตัวอย่าง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ เมื่อใช้แผ่น PZT เป็นวัสดุรองรับ

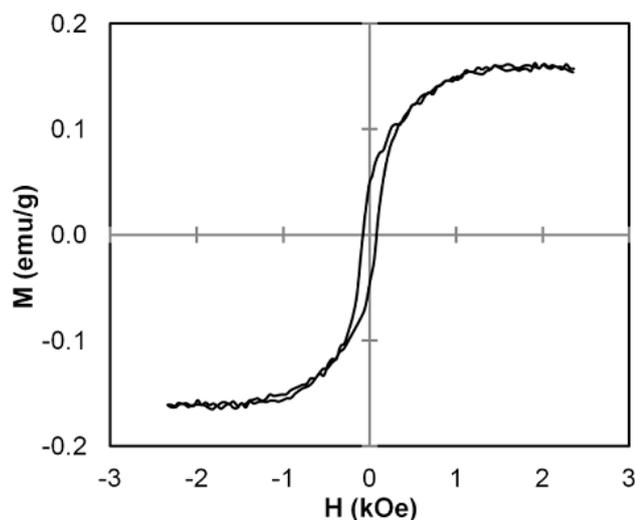
วัสดุตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอริงแล้ว เมื่อนำไปทดสอบดูผลการเคลือบติดของฟิล์มบาง $TbFe_2$ บนแผ่น PZT ด้วยเครื่อง SEM ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังภาพที่ 39 ซึ่งพบว่าชั้นฟิล์มบางเคลือบติดบนพื้นผิวของแผ่น PZT ทำให้มองเห็นเป็นบริเวณสีขาว และเมื่อใช้โหมดการวัดแบบ BSE จะทำให้มองเห็นการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน ความหนาฟิล์มที่ได้มีค่าประมาณ $2\ \mu m$



ภาพที่ 39 ฟิล์มบาง $TbFe_2$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น PZT

2. ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก

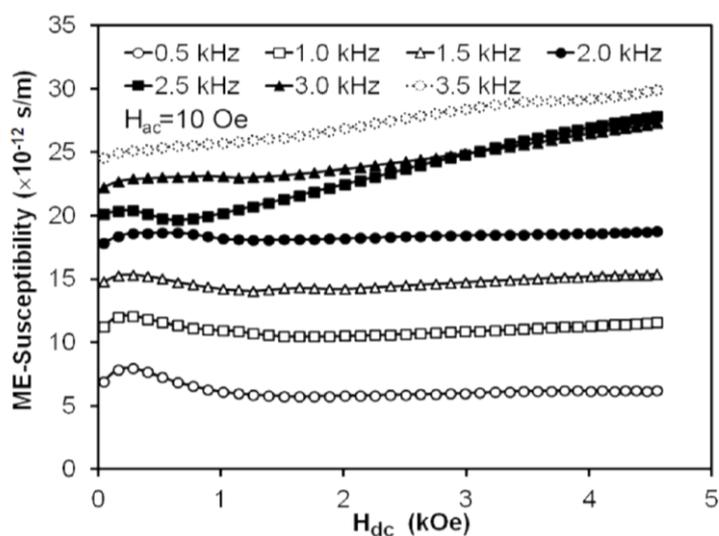
วัสดุตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM โดยการวัดวงฮีสเทอรีซิส พบว่าวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่แคบๆ บ่งบอกว่าวัสดุนี้มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กอ่อน ดังภาพที่ 40



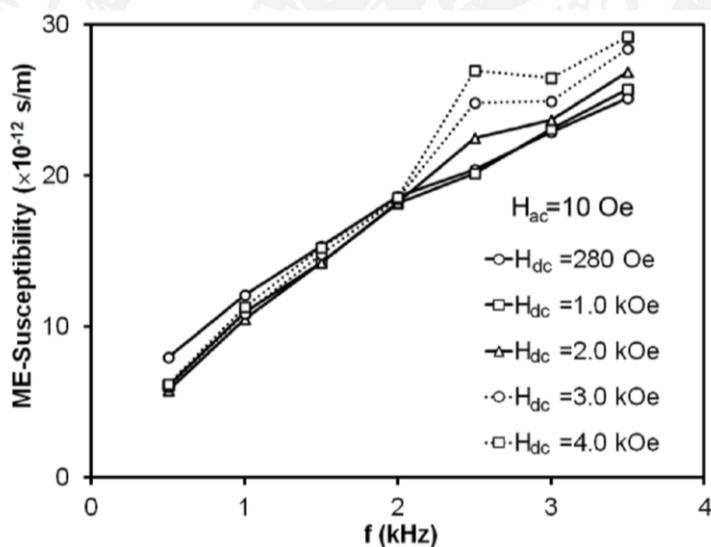
ภาพที่ 40 แสดงวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุ $\text{TbFe}_2/\text{PZT}/\text{TbFe}_2$ แบบสามชั้น เมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง

3. ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก

การเกิดปรากฏการณ์ ME ในวัสดุสามารถตรวจวัดได้จากการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุ เมื่อให้ขนาดและความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาและขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอสแตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 41 ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง สนามแม่เหล็กไบแอสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 5 kOe และสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีขนาด 10 Oe วัสดุตัวอย่างมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยค่าสภาพรับไว้ได้ ME มีค่าสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ขนาด 280 Oe, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 kOe ที่ความถี่เดียวกัน พบว่าค่าสภาพรับไว้ได้ ME มีค่าเพิ่มตามความถี่ที่สูงขึ้นและสูงสุดเมื่อความถี่มีค่า 2.5 kHz ดังภาพที่ 42

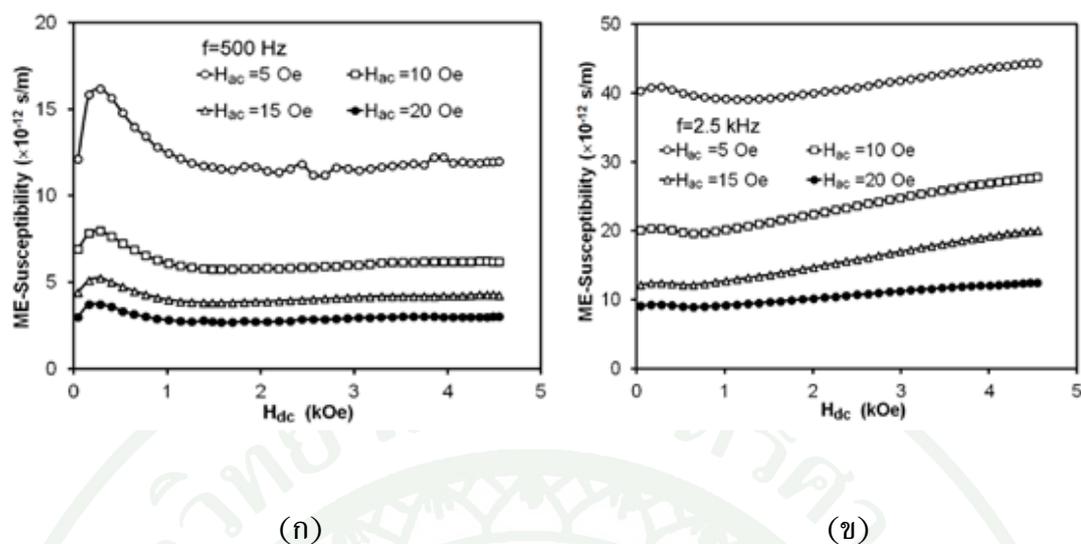


ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่มีผลต่อค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ แบบสามชั้น



ภาพที่ 42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไบแอสขนาด 280 Oe 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 kOe ที่ความถี่เดียวกัน

จากการทดลองพบว่า ขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาพร้อมทั้งขนาดของสนามแม่เหล็กไบแอส มีผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ของวัสดุ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาลักษณะการตอบสนองของวัสดุที่มีต่อขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 5.0, 10.0, 15.0 และ 20 Oe โดยศึกษาที่ความถี่ 500 Hz และ 2.5 kHz สนามแม่เหล็กไบแอสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 5 kOe ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 43



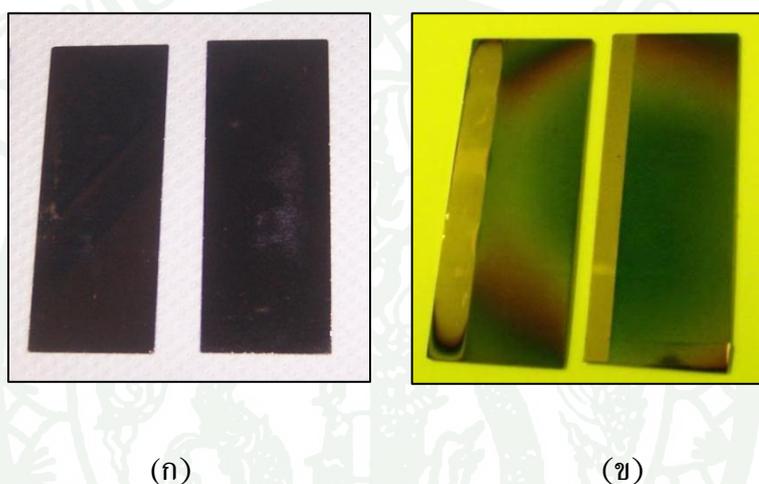
ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลากับค่าสภาพรับไว้ได้ ME ของวัสดุ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ แบบสามชั้น เมื่อวัดที่ความถี่ (ก) 500 Hz และ (ข) 2.5 kHz

จากภาพพบว่า การตอบสนองของวัสดุตัวอย่างที่มีต่อขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่การแสดงค่าสภาพรับไว้ได้ ME จะแปรผกผันกับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา และเมื่อแยกพิจารณาพบว่ากรณีความถี่ 500 Hz กราฟที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจน เมื่อสนามแม่เหล็กไบแอสมีค่าน้อย (0-1 kOe) และเริ่มคงที่เมื่อสนามแม่เหล็กไบแอสเพิ่มขึ้น (> 1 kOe) ส่วนที่ความถี่ 2.5 kHz นั้น ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าสนามแม่เหล็กไบแอสที่สูงขึ้น ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวอย่างสามารถแสดงการเกิดปรากฏการณ์ ME ได้ดีเมื่อวัสดุได้รับสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่มีค่าน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการได้รับสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดโพลาไรเซชันในวัสดุถึงจุดอิ่มตัว จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ ME ได้น้อยลง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1)

การเคลือบฟิล์มบาง $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ บนแผ่นกระจกสไลด์

1. ผลการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

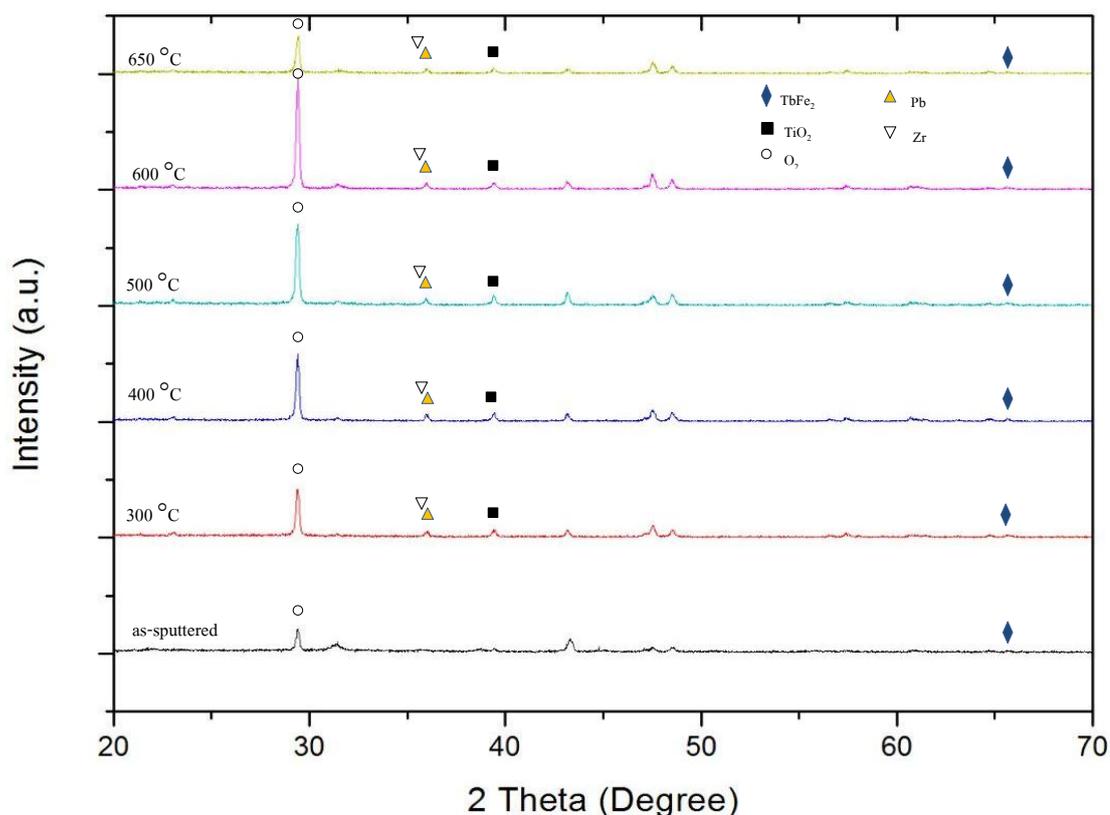
จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ผลิตฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกได้ ซึ่งฟิล์มบางที่ผลิตได้มีลักษณะดังภาพที่ 44 ฟิล์มบางดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในลำดับต่อไป



ภาพที่ 44 ลักษณะฟิล์มบาง (ก) เคลือบทองแดง และ (ข) เคลือบ $TbFe_2$

2. การศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของ $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

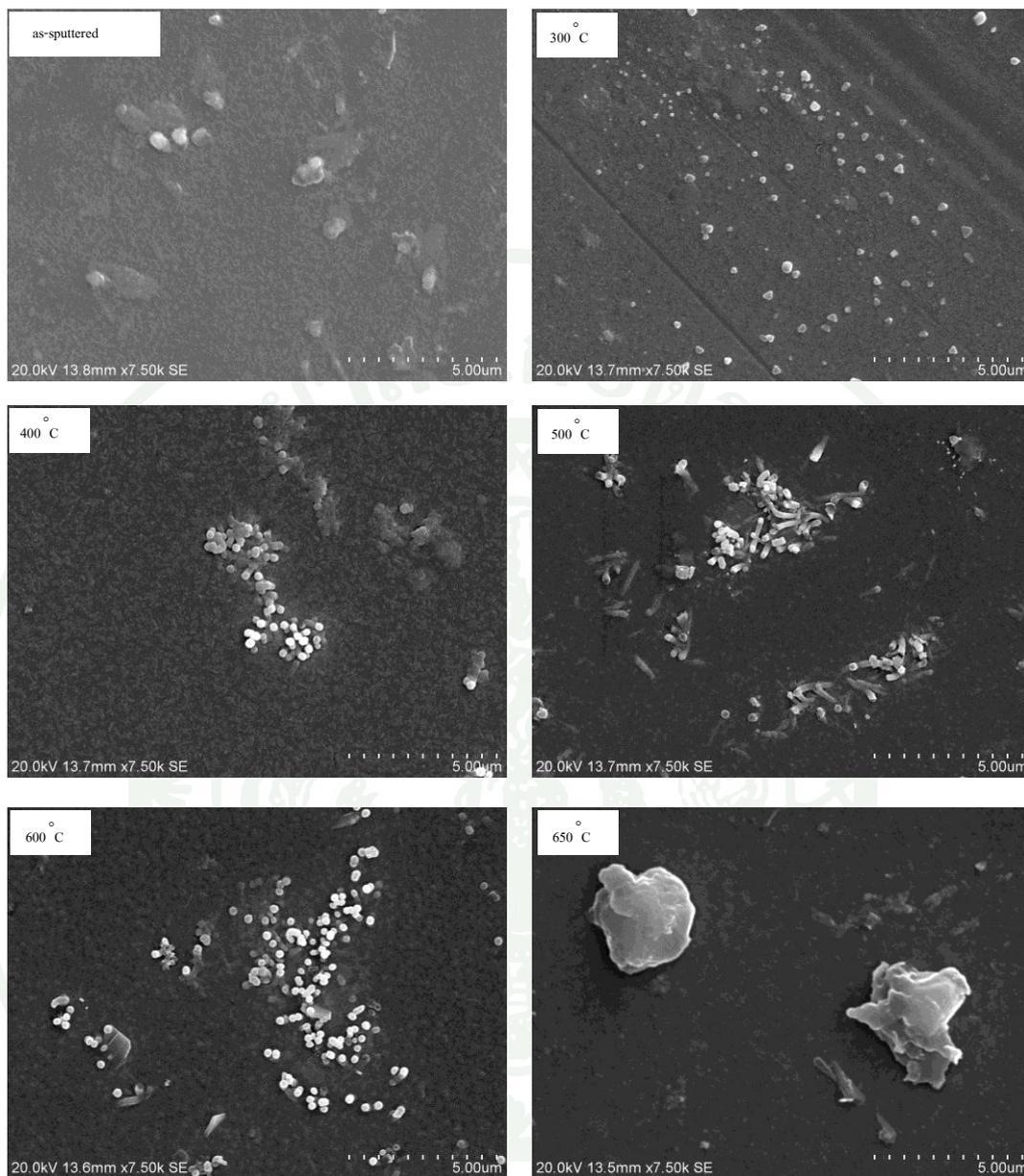
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางตัวอย่าง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3$ ที่ผ่านการอบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิ 300, 400, 500, 600 และ 650 °C แสดงดังภาพที่ 45 เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล พบว่าธาตุ Pb สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-0972, Zr สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-071-0972, Ti สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 00-044-1288 สำหรับ O_2 สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 00-001-1025 และ $TbFe_2$ สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-071-0457 ตามลำดับ และพบว่าความเข้มของการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ของ O_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ



ภาพที่ 45 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3$ ที่ผ่านการอบชุบ ความร้อนด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน

3. การศึกษาโครงสร้างของ $\text{TbFe}_2/\text{PZT}/\text{TbFe}_2$ ด้วยกล้อง SEM

กระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบาง PZT เรียบร้อยแล้วจะนำมาแบ่งออกเป็น 6 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง ส่วนอีก 5 ชั้นที่เหลือถูกนำไปอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน 300, 400, 500, 600 และ 650 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 25 นาที เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างมาศึกษา ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง SEM จากภาพ พบว่าพื้นผิวของฟิล์มจะมีสีที่แตกต่างกัน โดยจะมองเห็น เฟสที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างสีขาวปรากฏขึ้นบนพื้นผิวสีดำ ดังภาพที่ 46 ซึ่งจากภาพพบว่า ปริมาณและขนาดของโครงสร้างสีขาวนั้นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ออบชุบความร้อน ทั้งนี้ เพราะการอบชุบด้วยความร้อนนั้นจะช่วยทำให้ฟิล์มเกิดโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็น สีขาวบนพื้นผิวของฟิล์ม โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ อีกทั้งยังพบว่าพื้นผิวของชิ้นงาน ตัวอย่างจะเกิดรอยร้าวขึ้นเมื่ออบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 °C



ภาพที่ 46 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางจากเครื่อง SEM ของฟิล์มบาง PZT

4. ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนเมื่อนำมาศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 8 ซึ่งพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ตารางที่ 8 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง PZT2 ที่อบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิต่างๆ

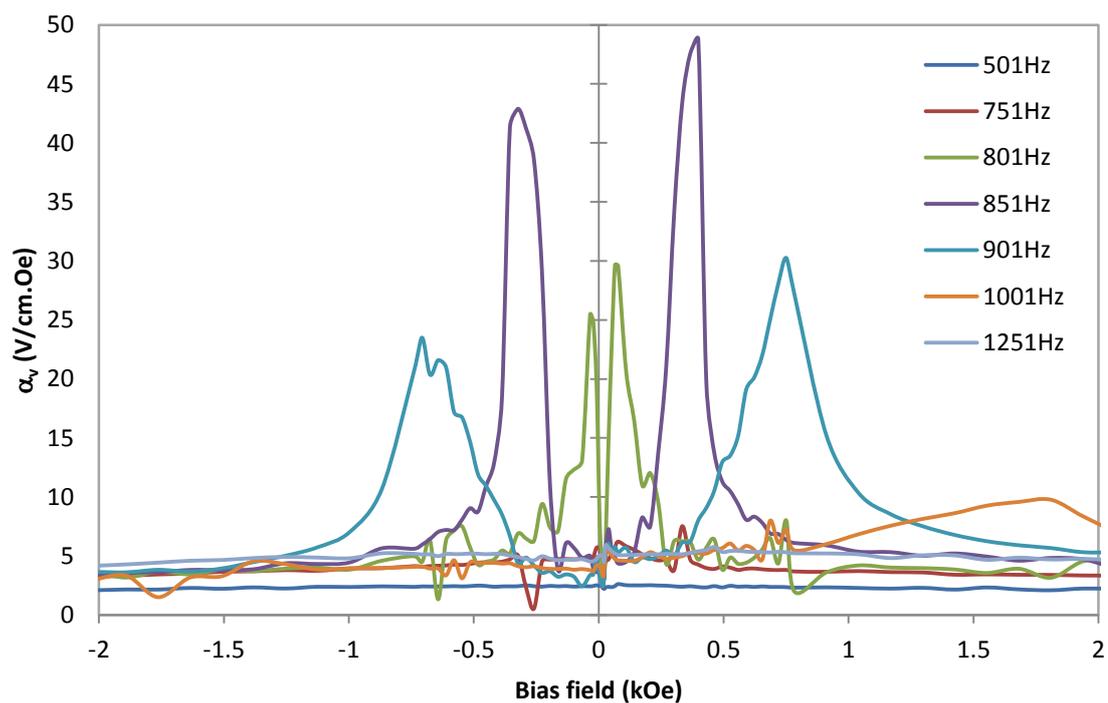
annealing temperature (°C)	resistivity ($\Omega.m$)
as-sputtered	203.66
200	4.96×10^3
300	1.36×10^9
400	8.02×10^9
500	9.97×10^9
600	1.11×10^{10}

5. ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก (α_v)

5.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง

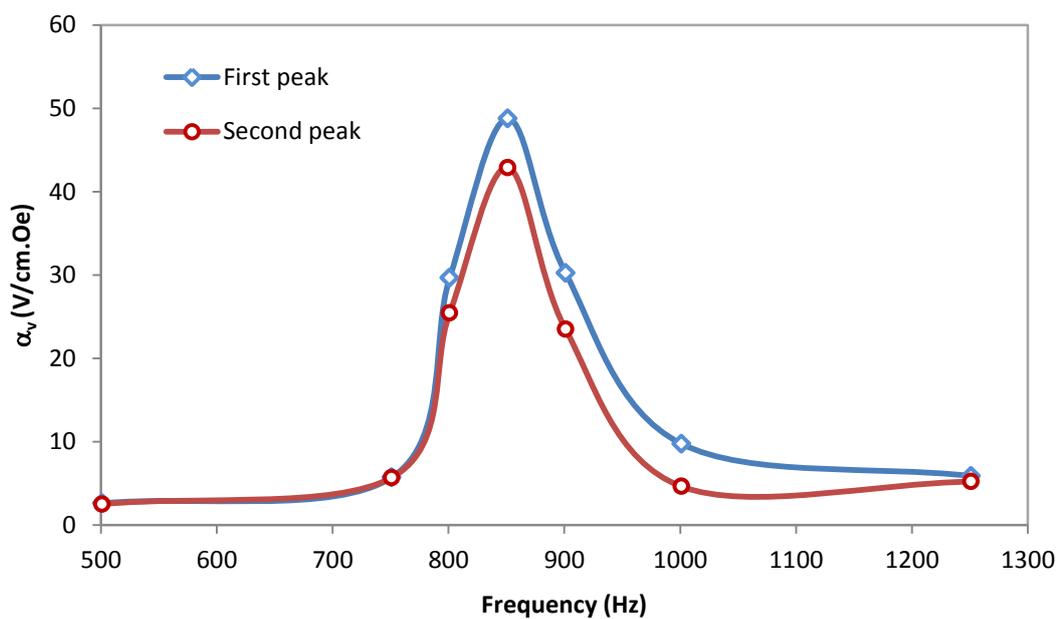
5.1.1 ผลของความถี่ (f) ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา เมื่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีขนาด 1 Oe และ สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) มีค่าระหว่าง 5 kOe ถึง -5 kOe ที่มีต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME

หลังจากที่ศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง PZT ด้วยเทคนิค SEM แล้วพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบชุบชิ้นงานตัวอย่างสูงกว่า 500 °C พื้นผิวของฟิล์มเกิดรอยร้าวและกระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับเริ่มหลอมละลาย ดังนั้นในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาที่ส่งผลต่อการเกิดค่าสัมประสิทธิ์ ME ของชิ้นงานนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาฟิล์มบาง TbFe₂/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O₃/TbFe₂ ความหนา 400 nm (PZT₂_E) ที่ผ่านการอบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิ 500 °C เป็นชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งผลจากการศึกษาแสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ที่ส่งผลต่อการแสดงค่าสัมประสิทธิ์ ME ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ความหนา 400 nm (PZT2_E) แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ระหว่าง 2 kOe ถึง -2 kOe

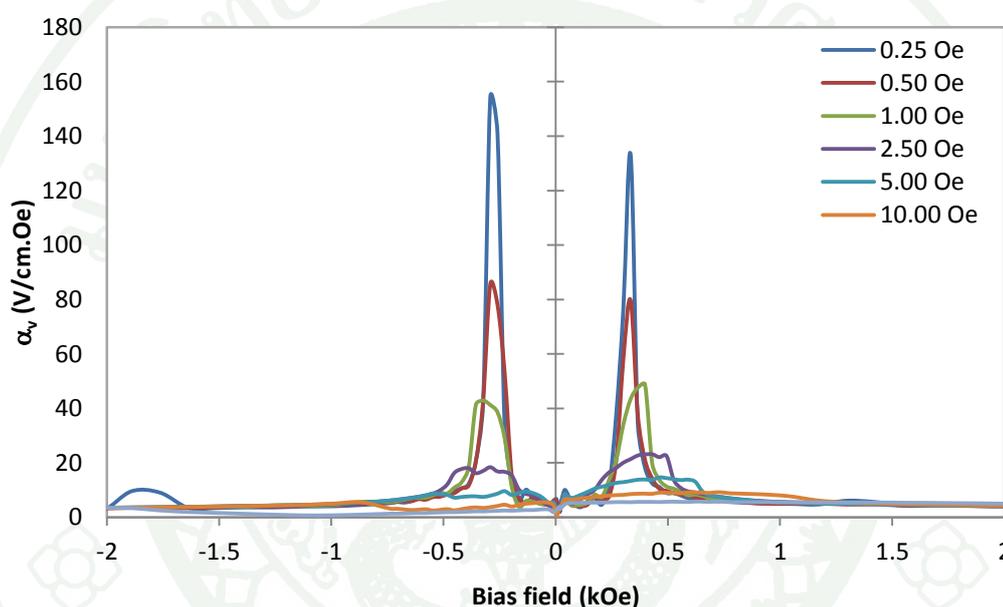
จากกราฟพบว่า ชิ้นงานตัวอย่างแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดี เมื่อได้รับความถี่ที่มีขนาด 801, 851 และ 901 Hz ซึ่งตำแหน่งจุดยอดของกราฟจะเลื่อนตามค่าสนามแม่เหล็กไบแอสที่เพิ่มขึ้น (300-1000 Oe) โดยค่า α_v ที่วัดได้มีค่า 29.56, 48.77 และ 30.26 V/cm.Oe เมื่อสนามแม่เหล็กไบแอสมีค่า 77.80, 398.46 และ 750.59 Oe ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ความถี่ 851 Hz ฟิล์มบางตัวอย่างจะแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดีที่สุด ดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ความหนา 400 nm (PZT2_E) ในช่วง 501 ถึง 1,251 Hz

5.1.2 ผลของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) เมื่อความถี่ 851 Hz และสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ระหว่าง 5 kOe ถึง -5 kOe ที่มีต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME

การทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา มีผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ของฟิล์มบางตัวอย่าง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ (PZT2_E) ลำดับต่อไปจะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ที่มีต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME โดยศึกษาที่ความถี่คงตัว 851 Hz สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) มีค่าระหว่าง 5 kOe ถึง -5 kOe แล้ววัดค่า α_v ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 49

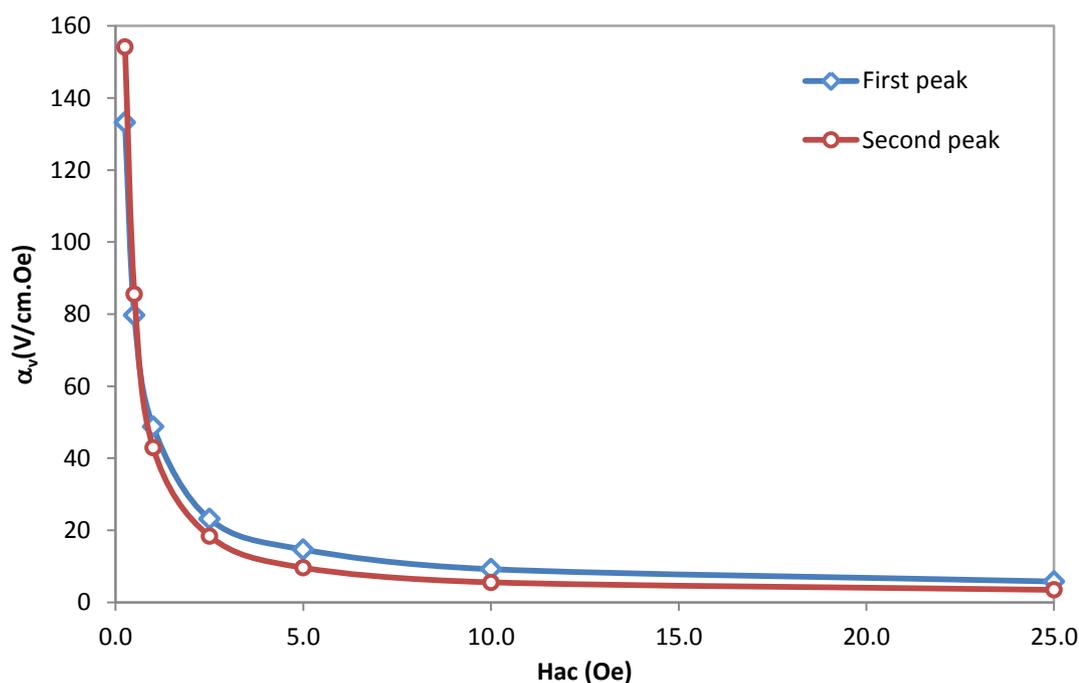


ภาพที่ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) กับค่า α_v ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ที่ความถี่ 851 Hz สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) ในช่วง 2 kOe ถึง -2 kOe

จากกราฟ พบว่าค่า α_v ของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ เกิดได้ดี และสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีค่า 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.5 Oe ซึ่งตำแหน่งจุดยอดของกราฟจะเลื่อนตามค่าสนามแม่เหล็กไบแอสที่เพิ่มขึ้น (300-500 Oe) โดยค่า α_v ที่วัดได้มีค่า 133.24, 79.70, 48.77 และ 22.51 V/cm.Oe เมื่อสนามแม่เหล็กไบแอสมีค่า 334.20, 334.20, 398.42 และ 494.58 Oe ตามลำดับ สำหรับค่า α_v ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) กับค่า α_v แสดงดังภาพที่ 50 ซึ่งพบว่าฟิล์มตัวอย่างจะแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ดีเมื่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีค่าน้อย และสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาค่า α_v เมื่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีค่า 1 Oe

ตารางที่ 9 แสดงค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่างเมื่อค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาแตกต่างกัน

H_{ac} (Oe)	$\alpha_{v,max}$ (V/cm.Oe)	
	first peak	second peak
0.25	133.241	154.115
0.50	79.6975	85.545
1.00	48.7717	42.8977
2.50	23.153	18.4084
5.00	14.658	9.6059
10.00	9.21015	5.55935
25.00	5.78693	3.46424



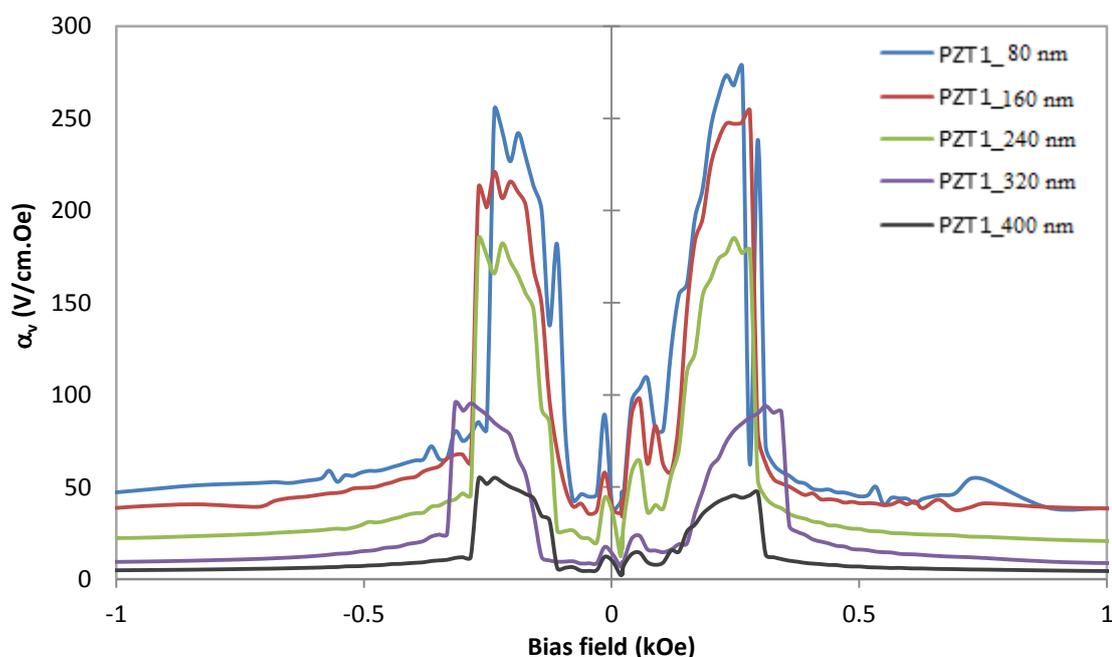
ภาพที่ 50 แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) ที่มีต่อค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่าง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3/TbFe_2$ ความหนา 400 nm

5.2 ความหนาของฟิล์มบางที่ส่งผลต่อค่า α_v

การศึกษาความหนาของฟิล์มบางที่ส่งผลต่อค่า α_v นั้นจะใช้ฟิล์มบางตัวอย่างที่มีความหนา 80, 160, 240, 320 และ 400 nm ที่ผ่านการอบชุบความร้อนด้วยอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 25 นาที แล้วนำมาวัดค่า α_v โดยให้ความถี่มีค่าคงตัว 851 Hz และสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีค่าคงตัว 1 Oe ตามลำดับ ผลการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังนี้

5.2.1 ความหนาของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ ที่ส่งผลต่อค่า α_v

ผลของความหนาของฟิล์มบาง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ ที่ส่งผลต่อค่าแสดงปรากฏการณ์ ME เมื่อศึกษาที่สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) มีค่าระหว่าง 5 kOe ถึง -5 kOe แสดงดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ความหนาต่างกันของฟิล์มบาง

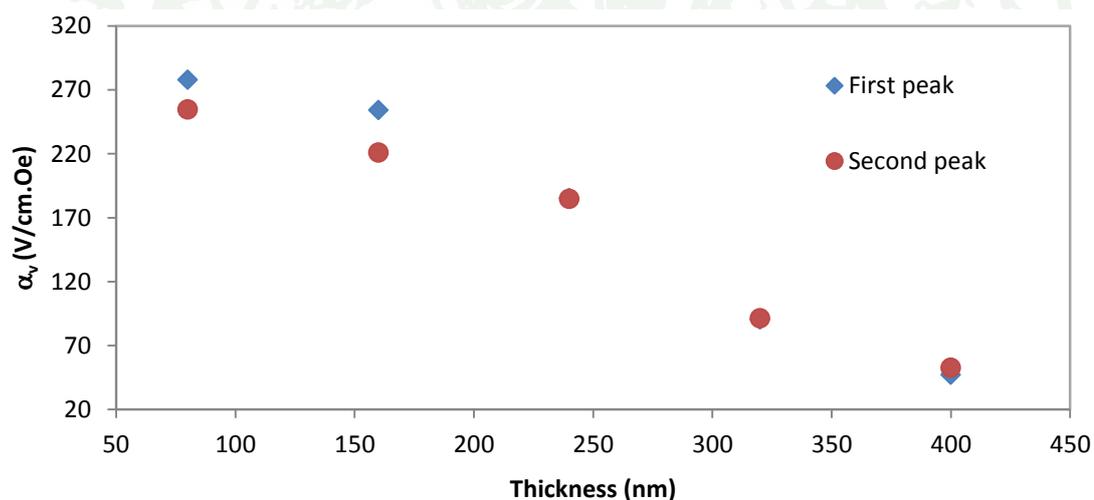
$TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส 1 ถึง -1 kOe

จากกราฟพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า α_v ที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) สำหรับตัวอย่าง $TbFe_2/Pb[Zr_{0.46}Ti_{0.54}]O_3/TbFe_2$ ตำแหน่งจุดยอดของกราฟจะเลื่อนตามค่าสนามแม่เหล็กไบแอสที่เพิ่มขึ้น (130-350 Oe) โดยค่า α_v มีค่า 277.94, 254.09, 178.88, 90.27 และ 47.09 V/cm.Oe เมื่อฟิล์มมีความหนา 80, 160, 240, 320 และ 400 nm ตามลำดับ และค่า α_v ทั้งหมดของฟิล์มบางแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่า α_v ของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ เมื่อความหนาแตกต่างกัน

thickness (nm)	$\alpha_{v,max}$ (V/cm.Oe)	
	first peak	second peak
80	277.938	254.632
160	254.096	220.985
240	185.163	184.686
320	90.272	91.419
400	47.088	52.703

จากตารางที่ 10 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v กับความหนาของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ได้ความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 52

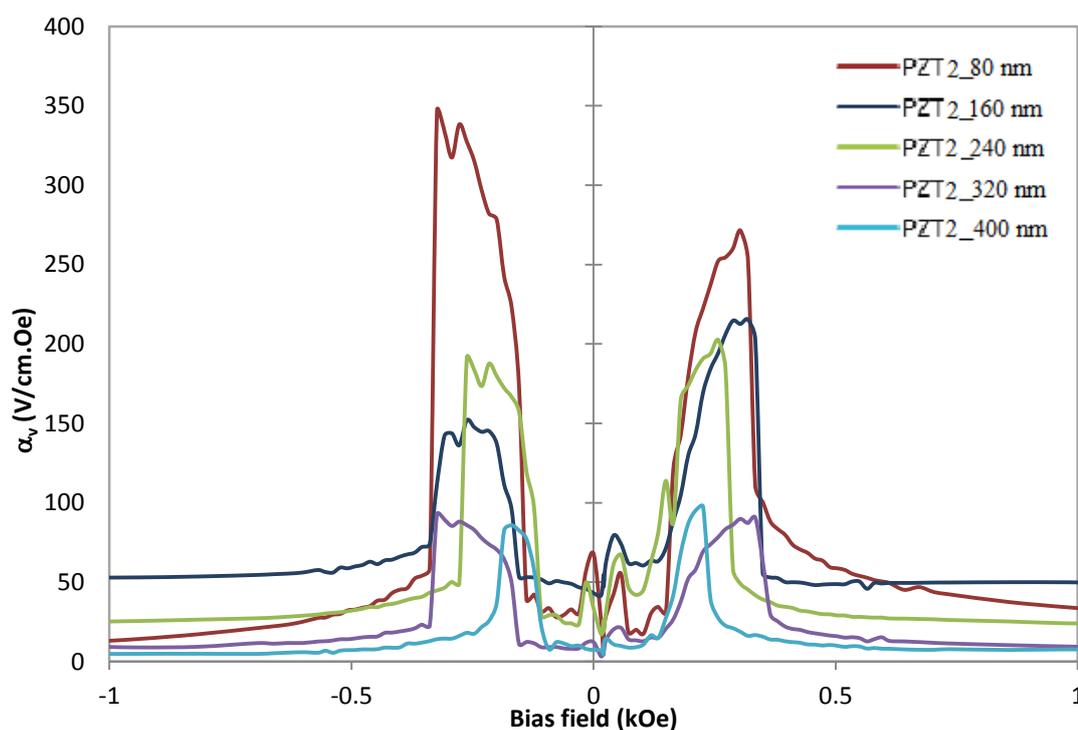


ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ได้จากฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่มีความหนาแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าค่า α_v ของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ นั้น มีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม โดยค่า α_v มีแนวโน้มลดลงเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น

5.2.2 ความหนาของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่ส่งผลต่อค่า α_v

ผลของความหนาของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่ส่งผลต่อ การแสดงปรากฏการณ์ ME เมื่อศึกษาที่สนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) มีค่าระหว่าง 5 ถึง -5 kOe แสดงดังภาพที่ 53



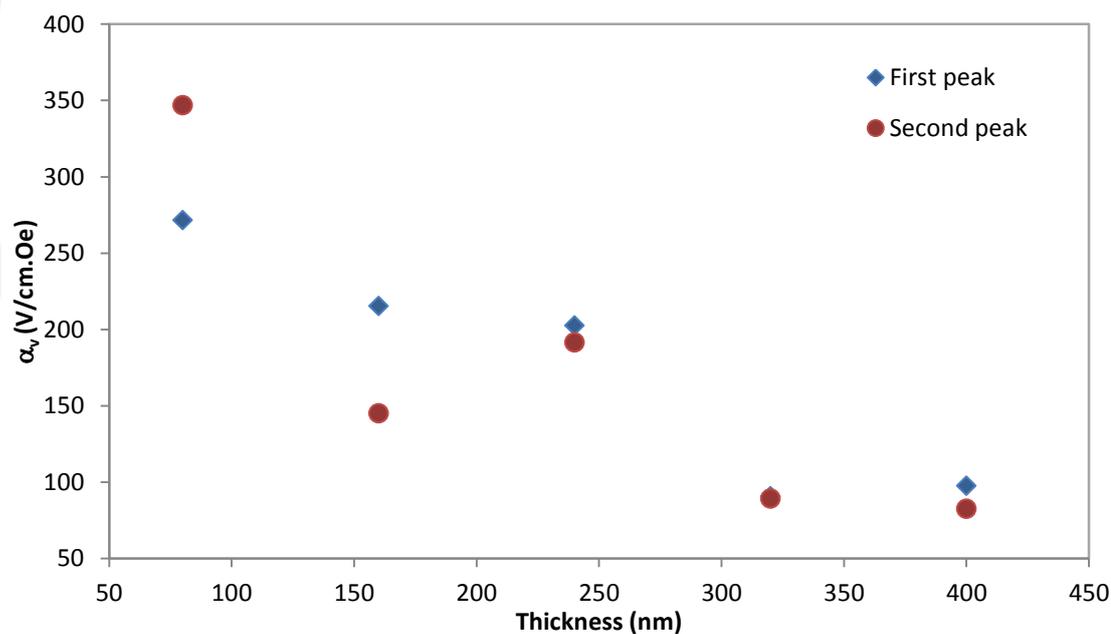
ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ความหนาต่างกันของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ แสดงในช่วงสนามแม่เหล็กไบแอส 1 ถึง -1 kOe

จากกราฟพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า α_v ที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) สำหรับ ตัวอย่าง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ตำแหน่งจุดยอดของกราฟจะเลื่อนตามค่าสนามแม่เหล็กไบแอสที่เพิ่มขึ้น (100-350 Oe) โดยค่า α_v มีค่า 271.56, 215.43, 202.59, 90.644 และ 97.54 V/cm.Oe เมื่อฟิล์มมีความหนา 80, 160, 240, 320 และ 400 nm ตามลำดับ สำหรับค่า α_v ทั้งหมดของฟิล์มบางแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่า α_v ของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ เมื่อความหนาแตกต่างกัน

thickness (nm)	$\alpha_{v,max}$ (V/cm.Oe)	
	first peak	second peak
80	271.56	346.78
160	215.43	145.09
240	202.58	191.53
320	90.64	89.29
400	97.54	82.50

จากตารางที่ 11 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v กับความหนาของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ได้ความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α_v ที่ได้จากฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ ที่มี ความหนาแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าค่า α_v ของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ นั้น มีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม โดยค่า α_v มีแนวโน้มลดลงเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น

5.3 อัตราส่วนระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 ที่ส่งผลต่อค่า α_v

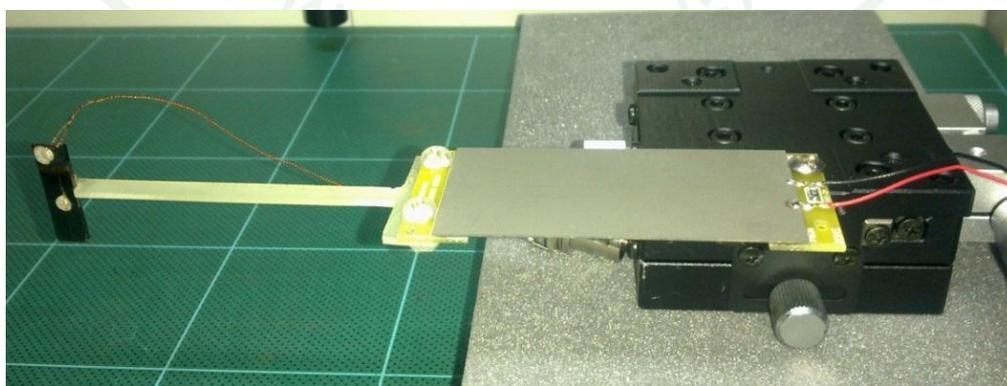
จากการศึกษาและเปรียบเทียบอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ กับฟิล์มบาง $\text{TbFe}_2/\text{Pb}[\text{Zr}_{0.46}\text{Ti}_{0.54}]\text{O}_3/\text{TbFe}_2$ เมื่อความถี่ 851 Hz และสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลามีขนาด 1 Oe แสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งพบว่าโดยส่วนใหญ่ PZT1 ให้ค่า α_v ที่สูงกว่า PZT2 แสดงว่าอัตราส่วนระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 มีผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ ME ของฟิล์มบาง

ตารางที่ 12 ค่า α_v ของฟิล์มบางตัวอย่างเมื่ออัตราส่วนระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 แตกต่างกัน

thickness (nm)	$\alpha_{v,max}$ (V/cm.Oe)			
	first peak		second peak	
	PZT1	PZT2	PZT1	PZT2
80	277.938	271.56	254.632	346.783
160	254.096	215.428	220.985	145.094
240	185.163	202.583	184.686	191.525
320	90.272	90.644	91.419	89.2881
400	47.088	97.543	52.703	82.499

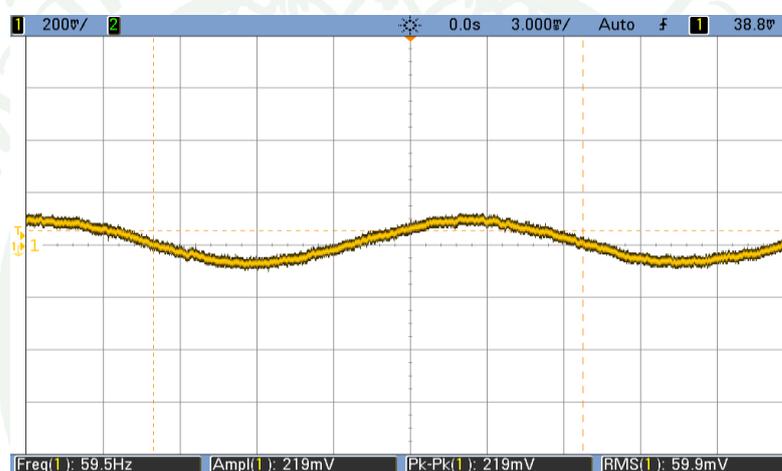
6. การผลิตเซ็นเซอร์ต้นแบบ

ฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้นำมาผลิตเป็นเซ็นเซอร์ต้นแบบในหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก มีลักษณะดังภาพที่ 55

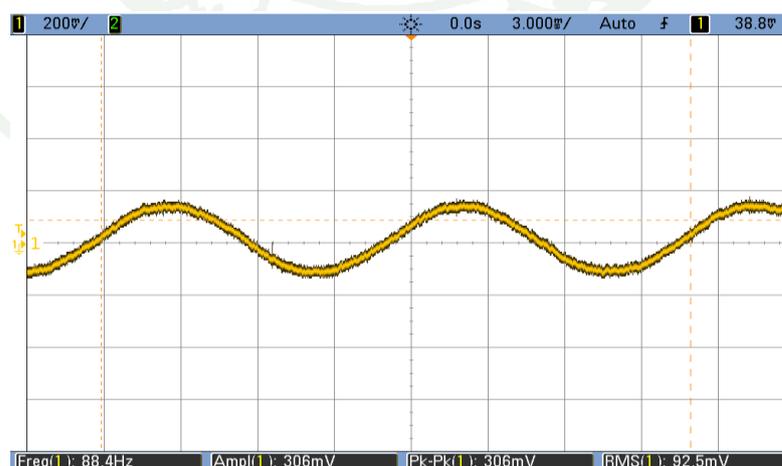


ภาพที่ 55 เซ็นเซอร์ต้นแบบจากวัสดุแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อผลิตเซ็นเซอร์ต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงออกแบบระบบการตรวจวัดสัญญาณที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ต้นแบบ โดยอาศัยกฎของเลนส์ ที่ว่า “ถ้าเส้นลวดอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น” ดังนั้นจึงนำเซ็นเซอร์ต้นแบบที่ได้ไปวางใกล้ๆ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กแล้วต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้าและดูความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ ค่าที่ได้แสดงดังภาพที่ 56 (ก) ถึง (ง) ซึ่งพบว่าเมื่อความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้นเพราะถ้ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นนั้นจะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ แสดงว่าเซ็นเซอร์ต้นแบบที่ผลิตขึ้นมาสามารถตรวจวัดสัญญาณได้จริง

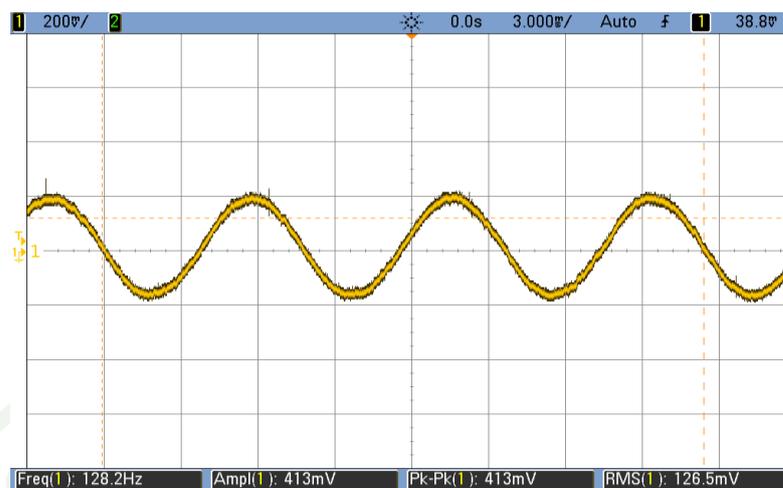


(ก)

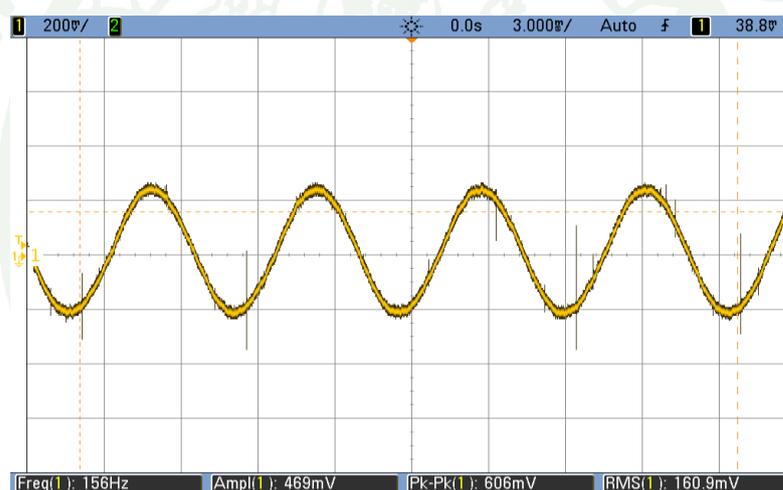


(ข)

ภาพที่ 56 แสดงสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ต้นแบบ



(ค)



(ง)

ภาพที่ 56 (ต่อ)

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกในลักษณะฟิล์มบางของวัสดุ $TbFe_2/Pb(Zr_{0.46}Ti_{0.54})O_3/TbFe_2$ และวัสดุ $TbFe_2/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3/TbFe_2$ แบบสามชั้นให้มีความหนา 80, 160, 240, 320 และ 400 นาโนเมตร ตามลำดับ ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกสำหรับไปประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ ME (α_v) ได้แก่ ความถี่และขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา ขนาดสนามแม่เหล็กไบแอส อุณหภูมิในการอบชุบความร้อน ความหนาของฟิล์มบาง และอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมี จากการทดลองพบว่าสามารถสังเคราะห์วัสดุ ME ในลักษณะฟิล์มบางได้เป็นผลสำเร็จ ฟิล์มบางตัวอย่างสามารถแสดงปรากฏการณ์ ME ได้ เมื่อทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแสดงปรากฏการณ์ดังกล่าว พบว่าฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้มีการตอบสนองได้ดีที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาในช่วง 801 ถึง 901 Hz ขนาดสนามแม่เหล็กไบแอสมีค่าระหว่าง 300 ถึง 1000 Oe และมีการตอบสนองได้ดีเมื่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลามีค่าต่ำๆ และค่า α_v เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มลดลง แต่องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุส่งผลต่อค่า α_v ไม่ชัดเจนทั้งนี้อาจเกิดจากการควบคุมกันที่ไม่สมบูรณ์ของวัสดุ และจากการทดลองในครั้งนี้ ค่า α_v ที่วัดได้มีค่าสูงสุด 346.783 V/cm.Oe ที่ความถี่ 851 Hz ขนาดของสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (H_{ac}) มีค่า 1 Oe และสนามแม่เหล็กไบแอส (H_{dc}) มีขนาด 303.17 Oe เมื่อนำฟิล์มบางที่สังเคราะห์ไปผลิตเป็นเซ็นเซอร์ต้นแบบในหัวอ่านของระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก ปรากฏว่าสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้เป็นผลสำเร็จ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- พนม กาสรุน. 2550. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนดีซีสปีดเตอริงและอาร์เอฟสปีดเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พัฒนา เทพชโลธร. 2548. การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 15 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. 2554. เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร. 2549. ผลการคายประจุไฟฟ้าสถิตในหัวบันทึก. พิมพ์ครั้งที่ 1 ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี.
- Astrov, D.N., (1961). Magnetoelectric effects in chromium oxide, Soviet Phys., JETP13, 729-733.
- Bi, K., Y.G. Wang, W. Wu and D.A. Pan. 2010. The large magnetoelectric effect in Ni-lead zirconium titanate - Ni trilayers derived by electroless deposition. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 43: 132002.
- Bi, K., Y.G. Wang, W. Wu and D.A. Pan. 2011. Large magnetoelectric effect in mechanically mediated structure of TbFe₂, Pb(Zr, Ti)O₃, and nonmagnetic flakes. **Appl. Phys.** 98: 133504-133507.
- Bueno-Baques, D., R. Grossinger, M. Schonhart, G. V. Doung, R. Sato, V. Corral-Fiores and J. Matutes-Aquino. 2006. The magnetoelectric effect in pulsed magnetic fields. **J. Appl. Phys.** 99: 908-910.
- Bush, A. A., V. Y. Shkuratov, I. A. Chernykh and Y. K. Fetisov. 2010. Lead Zirconate Titanate-Nickel Zink Ferrite Thick-Film Composite: Obtaining by the Screen Printing Technique and Magnetoelectric properties. **Tech. Phys.** 55: 387-394.

- Chen, S. Y., Q. Y. Ye, W. Miao, D. H. Wang, J. G. Wan, J. -M. Liu, Y. W. Du, Z. G. Huang and S. Q. Zhou. 2010. Direct and converse magneto-electric effect in $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{41}\text{Co}_5\text{Sn}_{11}/\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ laminate. **J. Appl. Phys.** 107: 901-903.
- Choi, Y. S., S. R. Lee, S. H. Han, H. J. Kim and S. H. Lim. 1997. The magnetic properties of Tb-Fe(B) thin films fabricated by rf magnetron sputtering. **J. Alloys Compd.** 258: 155-162.
- Choudhary, N., D. K. Kharat and D. Kaur. 2011. Structural, electrical and mechanical properties of magnetron sputtered NiTi/PZT/TiO_x thin film heterostructure. **Surface & Coating Technology.** 205: 3387-3396.
- Engdahl, G., 2000. **Handbook of Giant Magnetostrictive Materials.** Academic Press, USA.
- Fetisov, Y. K., K. E. Kamentsev and A. Y. Ostashchenko. 2004. Magnetolectric effect in multilayer ferrite-piezoelectric structure. **J. Magn. Magn. Mater.** 2064-2066.
- Jacobsen, H., K. Prume, B. Wagner, K. Ortner and T. Jung. 2010. High-rate sputtering of thick PZT thin films for MEMS. **J. Electroceram.** 25: 198-202.
- Jiang, H. C., W. L. Zhang, W. X. Zhang and B. Peng. 2010. Effect of argon pressure on magnetic properties and low-field magnetostriction of amorphous TbFe films. **Physca B.** 405: 834-838.
- Kronmuller, H. and S. Parkin. 2007. **Hand book of magnetism and advanced magnetic materials.** NJ-John Wiley and Son.
- Nan, C. -W., M. I. Bichrin, S. Dong, D. Viehland and G. Srinivasan. 2008. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status, and future direction. **J. Appl. Phys.** 103: 031101-031135.
- Nersessian, N., S. W. Or and C. P. Carmanm. 2004. Magnetolectric behavior of terfenal-D composite and lead zirconate titanate ceramic laminates. **IEEE Trans. Magn.** 40: 2646-2648.
- Pasqual, M., A. Infortuna, L. Martino, C. Sasso, C. Beatrice and S. H. Lim. 2000. Magnetic propoties of TbFe thin films under applied stress. **J. Magn. Magn. Mater.** 796-771.

- Quandt, E., A. Ludwig, D. G. Lord and C. A. Faunce. 1998. Magnetic properties and microstructure of giant magnetostrictive TbFe/FeCo multilayer. **J. Appl. Phys.** 83: 7267-7269.
- Roy, S., R. Chatterjee and S.B. Majumder. 2011. Magnetolectric coupling in sol – gel synthesized dilute magnetostrictive - piezoelectric composite thin films. **J. Appl. Phys.** 110: 101-103.
- Ryu, J. S. Priya, K. A. V. Carazo and K. Uchino. 2001. Effect of the Magnetostrictive Layer on Magnetolectric Properties in Lead Zirconate Titanate/Terfenol-D Laminate Composites. **J. Am. Ceram. Soc.** 84: 2905-2908.
- Srinivasan, G. 2010. Magnetolectric compolites. **Annu. Rev. Mater. Res.** 40: 153-178.
- Velu, G., D. Remiens and B. Thierry. 1997. Ferroelectric properties of PZT thin films prepared by sputtering with Stoichiometric single oxide target: comparison between conventional and rapid thermal annealing. **J. Eur. Ceram. Soc.** 17: 1749-1755.
- Wei, W. M. Yiming, Q. Shiqiang and Z. Xiying. 2008. Magnetic and magnetostrictive properties of amorphous TbFe/FeAl multilayer thin film. **J. Rare Earths.** 26: 571-574.
- Zhang, T., S. -Y. Zhang, K. Wasa, H. Zhang, Z. -J. Chen, X. -J. Shui and Y. -T. Yang. 2011. Effects of Pb(Mn, Nb)O₃ doping on the properties of PZT-base films deposited on silicon substrates. **Phys. Status Solidi A**, 1-7.



Effects of alternating magnetic field on magnetoelectricity of sputtered TbFe₂/PZT/TbFe₂ laminate composite

P. HOMTHONG, P. JANTARATANA, C. SIRISATHITKUL^{a,*}

Magnetic Materials Speciality Research Unit, Department of Physics, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^aMolecular Technology Research Unit, School of Science, Walailak University,

Nakon Si Thammarat, 80161, Thailand

Both magnitude and frequency of alternating magnetic field (H_{ac}) affect the magnetoelectric (ME) effect in a sputtered TbFe₂/PZT/TbFe₂ laminate composite. With the increase in H_{ac} from 5 to 20 Oe, the magnitude of ME susceptibility (the ratio of induced electric polarization to H_{ac}) is decreased indicating an insensitive polarization to the variation of H_{ac} in this regime. When the frequency of H_{ac} is lower than 2.5 kHz, the ME susceptibility is increased with increasing bias magnetic field (H_{dc}) up to 280 Oe. With further increases in H_{dc} , the ME susceptibility drops to a saturation value. By contrast, the ME susceptibility in the case of H_{ac} beyond 2.5 kHz is monotonically increased by the increase in H_{dc} up to 4500 Oe. At 2.5 kHz, the ME effect has a linear variation with the H_{dc} ranging from 800 Oe to 4500 Oe.

(Received August 5, 2012; accepted February 20, 2013)

Keywords: Magnetoelectric effect, Laminate composite, Magnetron sputtering, TbFe₂, PZT

1. Introduction

Magnetoelectric (ME) composites comprise the piezoelectric materials (e.g. PbZr_{1-x}Ti_xO₃ or PZT, BaTiO₃, polyvinylidene fluoride or PVDF) and magnetostrictive materials (e.g. soft ferrites, Fe, Co, Ni, Tb_{1-x}Dy_xFe₂ or Terfenol-D) [1,2]. In an applied magnetic field, the mechanical stress originated in the magnetoactive phase is transferred to the electroactive phase and the electric field is induced as a result of the piezoelectric effect. Likewise, the mechanical stress in the electroactive phase upon the application of electric field induces the magnetic field [1]. The conversion between the electric and magnetic fields in ME composites is of interest for both theoretical and technological aspects. Compared with the particulate composites [3-5], the laminate composites generally exhibit higher ME effect due partly to less mechanical defects and undesirable phases [1]. In ME sandwich structures, magnetoactive layers on both sides of an electroactive disk can be achieved by several methods including sputtering, aerosol deposition as well as epoxy bonding [2]. In order to utilize positive magnetostriction, bonded terfenol-D is commonly used [6,7]. Rare earth-transition metal Tb-Fe also exhibits the giant magnetostriction effect but its implementation in micro-electromechanical systems (MEMS) is impeded by its large magneto-crystalline anisotropy [8,9]. To reduce the magnetic fields needed to switch Tb-Fe components and enhance their applications, the sputtered TbFe layers are coupled with soft ferromagnetic films [10,11]. So far, there have been a few publications on incorporating TbFe₂ into ME structures with only a single report on using sputtering [12-14]. In this work, a laminate ME composite

is prepared by sputtering of both sides of a PZT disk. The ME effect is studied as a function of magnitude and frequency of the magnetic field to explore the working characteristics in sensing applications.

2. Experimental

The TbFe₂/PZT/TbFe₂ laminate composite was prepared by rf magnetron sputtering technique. A PZT disk of 6.4 mm in diameter and 0.191 mm in thickness (Piezo Systems Inc. model PSI-5A4E) was used as a substrate with 7.6 cm-diameter TbFe₂ disk (99.9% purity) installed as a sputtering target. Before deposition, the chamber was pumped down to a base pressure below 10⁻⁵ mbar and then Ar gas up to 51 sccm was continuously supplied to the chamber. The rf power was fixed at 300 W during the entire deposition. After the deposition, the sample was examined by scanning electron microscopy (SEM) and its magnetic properties were measured by vibrating sample magnetometry (VSM).

In the ME measurement as illustrated in Fig. 1, the sample was subjected to the alternating magnetic field (H_{ac}) and bias magnetic field (H_{dc}) in the direction parallel to the sample plane. An electromagnet (Walker Scientific Inc. model HV-4H with a power supply) was used to generate the H_{dc} up to 4.5 kOe. A power amplifier (TOA Corporation model A-2120H) was used to amplify the sinusoidal signal from the lock-in amplifier (Standford Research Systems model SR850) and then supplied to a pair of Helmholtz coils to generate H_{ac} . Both H_{dc} and H_{ac} were measured by a gaussmeter (LakeShore model 455) equipped with a Hall probe (LakeShore model HMMT-

6J04-VR). The electric charge induced by the sample was measured by a charge amplifier (Kistler model 5015A) and the output voltage from the charge amplifier was measured by the lock-in amplifier. The ME susceptibility (α) is defined as

$$\alpha = \frac{P}{H_{ac}} \quad (1)$$

where P represents the electric polarization (charge per unit area).

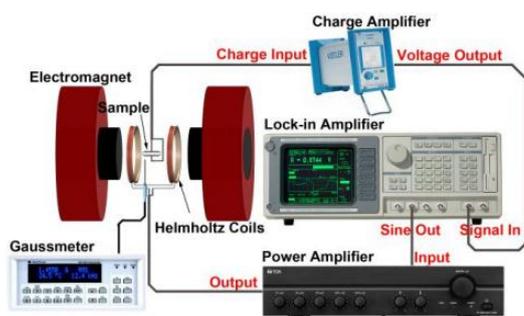


Fig. 1. Schematic diagram of the ME measurement system.

3. Results and discussion

Fig. 2 shows a cross-sectional SEM image of the sputtered TbFe₂ film on the PZT disk. The TbFe₂ appeared as a lighter layer is $2.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$ thick. The room temperature magnetic hysteresis loop obtained from the VSM measurement of the TbFe₂/PZT/TbFe₂ composite is shown in Fig. 3. With the magnetic field parallel to the plane of the sample, the magnetoactive TbFe₂ layers contribute to the saturation magnetization of 0.15 emu/g and the remanent magnetization of 0.05 emu/g. The coercive field around 100 Oe is generally higher than those of Tb-Fe alloys in other ratios. In addition to the dependence on the composition, Jiang and co-workers demonstrated that the magnetic behavior of Tb-Fe films were sensitive to the pressure and plane of sputtering [8,9].

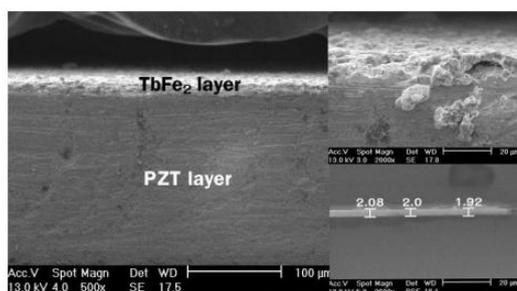


Fig. 2. SEM images of a TbFe₂ layer deposited on PZT surface.

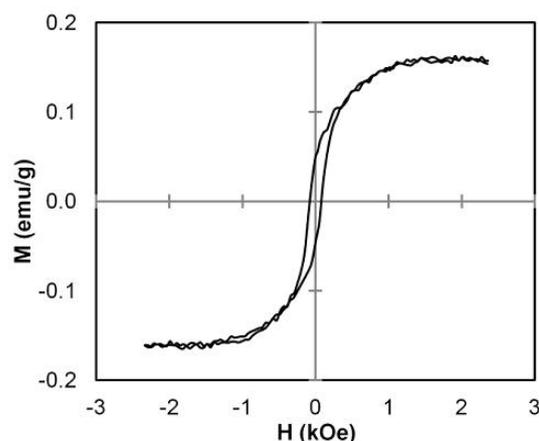


Fig. 3. Room temperature magnetization curve of the trilayered TbFe₂/PZT/TbFe₂ composite.

The strength of electroactive and magnetoactive responses as well as the coupling between these phases, which contribute to the ME effect, can be expressed in terms of the ME susceptibility. In Fig. 4, the ME susceptibility is plotted as a function of H_{dc} . In this particular measurement, H_{ac} of 7 different frequencies far below the resonance were studied at a fixed magnitude of 10 Oe. The ME variation with H_{dc} has a few distinct characteristics depending on the frequency. When the frequency of H_{ac} is lower than 2.5 kHz, the ME susceptibility is increased with the increase of H_{dc} in a low regime and reaches maximum at the value called the characteristic field. The characteristic field around 280 Oe in Fig. 4 is comparable to the external field which causes the rotation of magnetization indicated by the hysteresis loop in Fig. 2. Beyond the characteristic field, the ME susceptibility is gradually reduced with the further increase in H_{dc} before approaching the saturation at high fields. A similar ME response at 1 kHz was previously observed in epoxy bonded TbFe₂/PZT/TbFe₂ composites [13]. In contrast to low frequencies, the ME susceptibility in the case of 3.0 and 3.5 kHz is monotonically increased with increasing H_{dc} . When the frequency of H_{ac} is 2.5 kHz, the characteristic can be considered as an immediate transition between the low and high frequency regimes. Interestingly, the ME susceptibility at this frequency exhibits a linear response to H_{dc} in an extended range from 800 Oe to 4.5 KOe. The characteristics of ME in Fig. 4 can be explained by the magnetostrictive behavior of TbFe₂. The maximum ME effect occurs when the variation in magnetostriction reach the maximum. Further increases in magnetic field are no longer enhance the response in the piezoelectric phase but only reduce the ME coefficient and susceptibility. From the previous works, the interesting features in TbFe₂ films are its approximately linear magnetostriction in response to H_{dc} and high saturation field [8,13]. As evident from this work, the magnetostrictive behavior of TbFe₂ is also influenced by

the frequency of H_{ac} . In Fig. 5, the ME susceptibility is plotted against the frequency of H_{ac} . The increase in ME effect with increasing frequency far below the resonance was similar to the nickel ferrite/PZT multilayers and it can be explained by the variation of electrical conductivity of magnetoactive layers in this frequency regime [15].

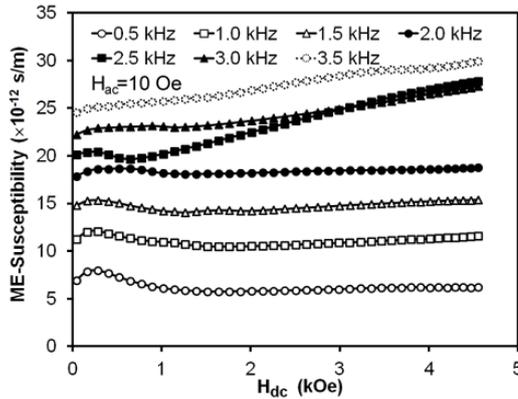


Fig. 4. ME responses of the trilayered $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ composite to the variation in H_{dc} at 7 different frequencies of H_{ac}

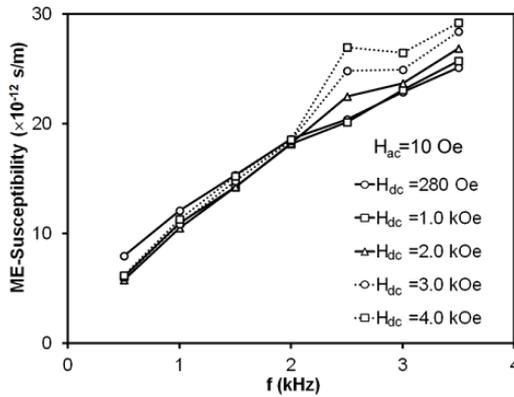


Fig. 5. ME susceptibility of the trilayered $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ composite as a function of frequency measured at 5 different H_{dc}

Due to its unique characteristic, the frequency of 2.5 kHz is chosen along with 500 Hz for the further investigation on the effect of the H_{ac} magnitude. In Fig. 6, the ME response at 3 other H_{ac} values (5, 15 and 20 Oe) resemble that measured using $H_{ac} = 10$ Oe at each frequency and the ME susceptibility at both frequencies is clearly decreased with increasing H_{ac} . Such reduction is originated from the saturation of magnetization rotation. The induced polarization consequently saturates and the ratio in Eq. (1) is diminished by the increase in H_{ac} . In the case of 500 Hz in Fig. 6(a), the peak is lowered with a

slight shift to smaller H_{dc} by the increase in H_{ac} . In Fig. 6(b), the ME susceptibility is rather insensitive to the change of H_{dc} up to 1 kOe. Above 1 kOe, the characteristic linear variation at 2.5 kHz is found at every H_{ac} with the smallest slope in the case of 20 Oe.

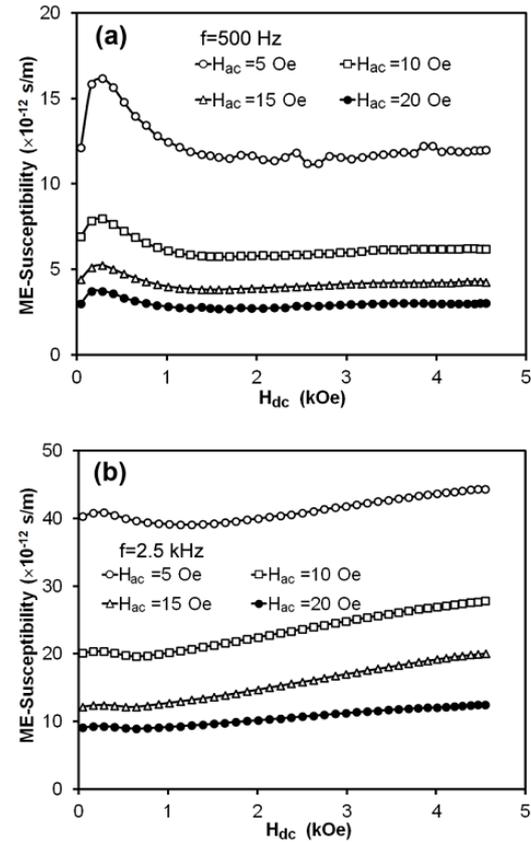


Fig. 6. ME responses of the trilayered $TbFe_2/PZT/TbFe_2$ composite to the variation in H_{dc} at 4 different magnitudes of H_{ac} , measured at (a) 500 Hz and (b) 2.5 kHz.

4. Conclusions

In summary, it is demonstrated that $TbFe_2$ films can be sputtered on both sides of a PZT disk to create a laminate ME composite. The H_{ac} affects both magnitude and characteristic of the ME effect. Due to the saturation in induced polarization, the magnitude of ME susceptibility is dropped by the increase in H_{ac} from 5 to 20 Oe. In a low frequency regime of H_{ac} (< 2.5 kHz), the ME susceptibility is increased with increasing H_{dc} and reaches a maximum at a characteristic bias field of 280 Oe before falling beyond the characteristic bias field. With further increases in H_{dc} , the ME susceptibility is rather constant. In a high frequency regime of H_{ac} (> 2.5 kHz),

the ME susceptibility is steadily increased by the increase in H_{dc} . At 2.5 kHz, the linear ME variation is observed in the H_{dc} range from 800 Oe to 4500 Oe.

Acknowledgments

This work was financially supported by National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency and Industry/University Cooperative Research Center (I/UCRC) in HDD Component, the Faculty of Engineering, Khon Kaen University. A partial support by Faculty of Science, Kasetsart University is also acknowledged.

References

- [1] M. Fiebig, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, R123 (2005).
- [2] R. C. Kamble, D. Y. Jeong, J. Ryu, *Adv. Cond. Matter Phys.* **2012**, 824643 (2012).
- [3] C. Miclea, C. Tanasoiu, L. Amarande, C. F. Miclea, C. Plavitu, M. Cioangher, L. Trupina, C. T. Miclea, T. Tanasoiu, M. Susu, I. Voicu, V. Malczanek, A. Ivanov, C. David, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **12**, 272 (2010).
- [4] A. Khamkongkao, P. Jantaratana, C. Sirisathitkul, T. Yamwong, S. Maensiri, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **21**, 2438 (2011).
- [5] Y. Zhou, S. H. Zhou, Y. X. Ye, L. Zhang, *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.* **6**, 401 (2012).
- [6] C. P. Zhao, F. Fang, W. Yang, *Smart Mater. Struct.* **19**, 125004 (2010).
- [7] Y. M. Pei, K. X. Xu, A. M. Zeng, S. G. Ai, *Chin. Phys. Lett.* **29**, 057801 (2012).
- [8] H. C. Jiang, W. L. Zhang, W. X. Zhang, B. Peng, *Chin. Phys. Lett.* **25**, 1435 (2008).
- [9] H. C. Jiang, W. L. Zhang, W. X. Zhang, B. Peng, *Phys. B* **405**, 834 (2010).
- [10] T. Feng, Y. Li, Z. Chen, *Rare Met.* **30**, 322 (2011).
- [11] J. Li, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, 1512 (2012).
- [12] S. Stein, M. Wuttig, D. Viehland, E. Quandt, *J. Appl. Phys.* **97**, 10Q301 (2005).
- [13] K. Bi, Y. G. Wang, D. A. Pan, W. Wu, *Script. Mater.* **63**, 589 (2010).
- [14] K. Bi, Q. W. Ai, L. Yang, W. Wu, Y. G. Wang, *Acta Phys. Sin.* **60**, 057503 (2011).
- [15] Y. K. Fetisov, K. E. Kamentsev, A. Y. Ostashchenko, *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276**, 2064 (2004).

*Corresponding author: schitnar@wu.ac.th



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางพรรณิ หอมทอง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 พฤศจิกายน 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเฝ้าไร่ จังหวัดหนองคาย
ประวัติการศึกษา	1. วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม 2. ศษ.ม. (การบริหารการศึกษา) มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	รับราชการครู วิทยฐานะชำนาญการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สพม. 21 โรงเรียนวังหลวงพิทยาสรรพ์
ทุนวิจัยที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ และศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้าน ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น