



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์
สาขา

ฟิสิกส์
ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอน

Characterization of Micropatterned Magnetic Structures

นามผู้วิจัย นางสาวพัชรา สุกุลรัตน์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยวัชรี รัตนสกุลทอง, ประ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ยวีวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอน

Characterization of Micropatterned Magnetic Structures

โดย

นางสาวพัชรา สุกรัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พัชรา ศกุลรัตน์ 2555: การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอน ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วัชร รัตนสกุลทอง, ปร.ด. 82 หน้า

โครงสร้างแบบเสา (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $9.6 \mu\text{m}$) และแบบหลุม (เส้นผ่านศูนย์กลาง $11.2\text{-}16.6 \mu\text{m}$) ของสารไวแสง SU-8 ที่เตรียมโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีจากแสงซินโครตรอน ได้รับการเคลือบด้วยฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ด้วยวิธีสปัตเตอริง การศึกษาลักษณะพื้นผิวของโครงสร้างทั้งสองแบบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นพื้นผิวฟิล์มโคบอลต์ที่ราบเรียบบนโครงสร้างทั้งสองแบบ และผลการวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยเทคนิคการสั่นตัวอย่าง (VSM) พบว่าฟิล์มโคบอลต์ที่มีความหนา $50\text{-}80 \text{ nm}$ บนโครงสร้างแบบเสา จะมีค่าแมกนีไทเซชันทั้งในแนวนอนและตั้งฉากกับผิวฟิล์มต่ำกว่าฟิล์มโคบอลต์แบบต่อเนื่องที่มีความหนาเท่ากัน เนื่องจากขนาดโดเมนที่เล็กกว่า นอกจากนี้แมกนีไทเซชันของโครงสร้างขนาดไมโครแบบเสาในสนามแนวตั้งฉากจะสูงกว่าในแนวนอนกับระยะบนพื้นผิวแสดงถึงพฤติกรรมของแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กของฟิล์มโคบอลต์บนโครงสร้างขนาดไมโครแบบเสา จากกราฟฮิสเทอรีซิสในแนวนอนและตั้งฉากของฟิล์มโคบอลต์หนา $0.9\text{-}1.4 \mu\text{m}$ บนโครงสร้างแบบหลุมพบว่า ตัวอย่างที่มีหลุมขนาดใหญ่แสดงแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กต่ำกว่าที่มีหลุมขนาดเล็ก เนื่องจากความแตกต่างของค่าแมกนีไทเซชันในสนามแนวตั้งฉากและแนวนอนของหลุมขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่าของหลุมขนาดเล็ก ในสนามแม่เหล็กที่ให้ทั้งสองทิศทาง พบว่าค่าสแควร์เนสและสนามลบล่างแม่เหล็กมีค่าต่ำสุดในตัวอย่างที่มีหลุมขนาดเล็กสุดที่ขนาดโดเมนแม่เหล็กของฟิล์มในหลุมและบนขอบใกล้เคียงกัน หลังจากขัดผิวเคลือบโคบอลต์ออกจากผิวหน้าจะทำให้แมกนีไทเซชันในสนามทั้งสองแนวมีความใกล้เคียงกันมากขึ้นแสดงถึงความเป็นแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กที่ลดลง จากการเปรียบเทียบผลของขนาดหลุม พบว่าในตัวอย่างที่มีหลุมขนาดเล็กสุด ค่าสแควร์เนสน้อยกว่ามีค่าต่ำสุดแต่สนามลบล่างแม่เหล็กกลับมีค่าสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นผลจากฟิล์มแม่เหล็กที่หลุดจากการขัดยังคงเหลือตกค้างอยู่และส่งผลแม่เหล็กออกมาในทิศลุ่ม

Patchara Sukonrat 2012: Characterization of Micropatterned Magnetic Structures.
Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis
Advisor: Ms. Watcharee Rattanasakulthong, Ph.D. 82 pages.

SU-8 photoresist pillars (around 9.6 μm in diameter) and holes (11.2-16.6 μm in diameter) were patterned by synchrotron X-ray lithography. Ferromagnetic cobalt (Co) films were then sputtered on these patterned substrates. Scanning electron microscopy (SEM) revealed smooth surface morphology of cobalt films in all samples. From vibrating sample magnetometry (VSM) with in-plane and out-of-plane magnetic field, Co films of 50-80 nm in thickness on the micropillar substrate had lower magnetizations than those of continuous films because of their smaller domains. Furthermore, magnetic anisotropy was observed with a higher magnetization in the out-of-plane direction. For 0.9-1.4 μm thick Co films on the microhole substrates, samples with larger holes exhibited lower magnetic anisotropy and the difference between in-plane and out-of-plane magnetizations was less than that in the case of smaller holes. In both directions of applied magnetic field, the squareness and the coercivity were minimal in the sample with smallest holes because the sizes of magnetic domains in the holes and on the surfaces were comparable. After removal of Co films on the surface, the difference between in-plane and out-of-plane magnetizations was decreased indicating the reduction in magnetic anisotropy. By comparing the effect of the hole size, the squareness was still the lowest but the coercivity became the highest in the sample with smallest holes which is possibly due to the random magnetic field generated by residual Co after the polishing.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วชิร รัตนสกุลทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้อบรมสั่งสอนวิชา ความรู้ ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ. ดร. ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำทั้งในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ การแก้ไขและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พงสกร จันทรัตน์ ซึ่งให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัย และคุณชาญวุฒิ ศรีผึ้ง สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนในภาควิชาฟิสิกส์ สำหรับคำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดาที่ล่วงลับ และมารดา ที่เป็นกำลังใจสำคัญ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

พัชรา สุภรัตน์

กันยายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก กระบวนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี	74
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน Advanced Materials Research Vols. 335-336 (2011) pp 1000-1003	77
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยขนาดหลุม ระยะขอบถึงขอบ และระยะแนวทแยงจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม	51
2	ค่าเฉลี่ยขนาดหลุมและระยะจากขอบถึงขอบของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมหลังการเคลือบฟิล์ม	52
3	ค่าเฉลี่ยขนาดหลุมและระยะจากขอบถึงขอบของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมหลังการขัดผิวเคลือบฟิล์มออก	54
4	ค่าสนามลบล้างแม่เหล็ก (H_C) และค่าสแควร์เนส (S) ในสนามทั้งสองแนวเปรียบเทียบตัวอย่างเคลือบและหลังขัด	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของวงแหวนที่ส่วนบนยื่นออกไปเล็กน้อย จากการกัดด้วยสารเคมีหลังจากทำลิโทกราฟี	5
2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope: AFM) แสดงลักษณะของเกรตติงโคบอลต์บนฟิล์มเหล็ก ซึ่งมีช่องเกรตติง $d = 5 \mu\text{m}$ และความกว้างของแถบ $2.8 \mu\text{m}$ และความสูงประมาณ 41 nm	5
3 ภาพจาก SEM แสดงแถวของแท่ง Fe ยาว $30 \mu\text{m}$ และกว้าง $0.9 \mu\text{m}$ และ $1.9 \mu\text{m}$ สลับกันไป	6
4 ภาพ MFM แบบไม่สัมผัสของแถวขนาด $40 \times 15 \text{ nm}^2$ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกเป็น (a) -0.09 (b) 0.04 และ (c) 0.12 T ที่พื้นที่การสแกนกว้าง $8 \mu\text{m}$	7
5 ลักษณะของสื่อแบบต่อเนื่อง (ซ้าย) และสื่อที่มีรูปแบบแน่นอน (ขวา)	9
6 กระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอน (จากซ้ายไปขวา) (a) การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) (b) การเคลือบไอระเหย (evaporative deposition) (c) การกัดลาย (etching)	12
7 หลักการของลิโทกราฟีแบบแทรกสอด	14
8 ระบบลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนมาตรฐาน	15
9 กระบวนการเอ็ชเรย์ลิโทกราฟี	16
10 ขั้นตอนพื้นฐานในการทำลิโทกราฟีพิมพ์ลาย	17
11 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบสปีดเตอริงแบบต่างๆ S คือ ชัตเตอร์ (shutter), A คือ แอโนด (anode), T คือ เป้า (target), P คือ ไอออนพลาสมา (plasma ion), SM คือ ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid magnet), M คือ แม่เหล็ก (magnet), E คือ สนามไฟฟ้า (electric field) และ B คือ สนามแม่เหล็ก (magnetic field)	18
12 สนามแม่เหล็กภายนอกแท่งแม่เหล็ก ที่ออกจากขั้วเหนือและไปจบที่ขั้วใต้ และสนามแม่เหล็กภายในจากขั้วเหนือไปได้ ที่พยายามจะลดการแมกนีไทซ์ หรือดีแมกนีไทซ์	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	ทรงรีทั่วไปซึ่งมีสามแกน 2a, 2b และ 2c แฟกเตอร์ดีแมกนีไตเซชันตามแกนทั้งสามนี้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง	23
14	แผนภาพรูปแบบการแมกนีไตเซชัน เมื่อขนาดของโดเมนเพิ่มขึ้น แมกนีไตเซชันเปลี่ยนจากสถานะ(ก)โดเมนเดี่ยวที่แมกนีไตเซชันทิศเดียว เป็นแมกนีไตเซชันสม่ำเสมอเล็กน้อย มีรูปแบบเหมือน (ข) สถานะวอร์เทก และสุดท้ายเป็น (ค) สถานะหลายโดเมน (multi domain)	24
15	แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อสถานะทางแม่เหล็กของวัสดุ โดย SP คือสถานะซูเปอร์พาราแมกเนติก, SD คือ โดเมนเดี่ยว และ MD คือ หลายโดเมน	24
16	ตัวอย่างกราฟฮิสเทอรีซิส	26
17	ส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
18	การทำงานและส่วนประกอบของ VSM คือ (1) เครื่องสั่นเชิงกล (2) แท่งสำหรับสั่นตัวอย่าง (3) แม่เหล็กไฟฟ้า (4) ขั้วแม่เหล็ก (5) ขดลวดรับสัญญาณ (6) ที่ยึดสารตัวอย่าง	30
19	(a) สารไวแสง SU-8 บนแผ่น PCB ที่ผ่านการพัฒนาแล้ว (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (b) ชิ้นตัวอย่างที่มีเสาสารไวแสง	31
20	(a) สารไวแสง SU-8 ที่ผ่านการพัฒนาแล้วบนเกรฟไฟต์ ที่เป็นวัสดุรองรับ (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (b) ชิ้นตัวอย่างที่มีหลุมสารไวแสง	32
21	ส่วนประกอบของเครื่องสเป็คโตริง (a) ภาชนะสุญญากาศ เภจวัดความดัน และตัวควบคุมการไหลของแก๊ส, (b) ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน, (c) โรตารีปั๊ม, (d) เทอร์โบปั๊ม, (e) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า, (f) เครื่องระบายความร้อน	33
22	เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิคการสั่นตัวอย่าง	34
23	กล้องจุลทรรศน์แสง	35
24	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
25	ชิ้นตัวอย่างที่ติดบนแท่นวางตัวอย่างด้วยเทปคาร์บอนสำหรับทดสอบด้วย SEM	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาก่อนทำการเคลือบฟิล์ม (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) ภาพที่กำลัขยายต่ำ (b) ภาพที่กำลัขยายสูง	40
27 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะโดยรวมของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาหลังทำการเคลือบฟิล์ม (a) ภาพที่กำลัขยายประมาณ 22 เท่า (สเกลแสดงระยะ 3 mm) (b) ภาพที่กำลัขยายประมาณ 200 เท่า (สเกลแสดงระยะ 300 μm) รูปเล็กแสดงรายละเอียดของเสาที่กำลัขยายสูง	41
28 ภาพจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ ที่เคลือบบนแผ่น PCB ของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา (สเกลแสดงระยะ 30 μm (a) และ 20 μm (b)) (a) ภาพมุมเอียงของโครงสร้างเสา (b) ภาพโครงสร้างเสาที่ลึ้มสามารถใช้วัดความยาวได้	42
29 ภาพจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ที่เคลือบบนแผ่น PCB ของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) แสดงระยะระหว่างเสา (b) แสดงความกว้างของเสา	43
30 ภาพตัดขวางจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ที่เคลือบด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอริงที่อุณหภูมิห้องเวลาการเคลือบ 3 นาที กำลัในการสปีดเตอริงที่ 200 วัตต์ ความดัน 10^{-5} ทอร์ และความดันอาร์กอนสปีดเตอริง 10^{-3} ทอร์ สเกลแสดงระยะ (a) 1 μm , (b) และ (c) 500 nm	44
31 กราฟฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างฟิล์มโคบอลต์ต่อเนื่อง เปรียบเทียบสนามแนวตั้งฉากกับขนาน	45
32 กราฟฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างรูปแบบเสา เปรียบเทียบสนามแนวตั้งฉากกับขนาน	46
33 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E บนพื้นที่ประมาณ 27×18 หลุม	48
34 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมก่อนสปีดเตอริง (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	50
35 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมหลังสปีดเตอริง (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
36 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบ หลุมหลังขัดผิวเคลือบด้านบนออก (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	53
37 ภาพ SEM แสดงความหนาของฟิล์มโคบอลต์ในหลุมของตัวอย่างที่มีรูปแบบ แน่นอนแบบหลุมสองบริเวณ (a) และ (b)	55
38 นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันของตัวอย่างเคลือบฟิล์มแม่เหล็กในสนามแนวนอน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	56
39 นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันของตัวอย่างหลังขัดฟิล์มแม่เหล็กที่ผิวหน้าออกใน สนามแนวนอน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	59
40 ภาพเปรียบเทียบตัวอย่างก่อน และหลังขัดในสนามแนวนอน และตั้งฉากโดยนอร์ มอลไลซ์ ค่าแมกนีไทเซชันเทียบกับ แมกนีไทเซชันอิ่มตัวของตัวอย่างเคลือบใน สนามแนวนอน ของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E	61
41 กราฟเปรียบเทียบค่าสนามลบล่างแม่เหล็กในสนามแนวนอน และตั้งฉากของ ตัวอย่าง (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด	65
42 กราฟเปรียบเทียบค่าสแควร์เนสในสนามแนวนอน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด	66
 ภาพผนวกที่	
ก1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโครงสร้างระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี	75

การศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอน

Characterization of Micropatterned Magnetic Structures

คำนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive: HDD) เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูล ที่มีการใช้เป็นเวลามากกว่า 50 ปีมาแล้ว การพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (bit per areal density) ของ HDD เป็นไปอย่างก้าวกระโดดตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษที่ ค.ศ. 1990 ต่อมาจนถึง 2011 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ HDD เพิ่มขึ้นจาก 1 Gb/in^2 เป็น 1 Tb/in^2 ในขณะที่ราคาต่อบิต (bit) ก็ลดลงสวนทางกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Varvaro, 2012) และเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของ HDD มีขนาดที่เล็กลง ส่งผลให้ขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มี HDD เป็นส่วนประกอบ เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องถ่ายรูป ก็มีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ทำให้การแข่งขันกันพัฒนาให้ HDD มีขนาดเล็กลง หรือมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากขึ้นเป็นความท้าทายอันดับต้นๆ ของอุตสาหกรรมการผลิต HDD ของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน

ในช่วงแรก HDD ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นสื่อบันทึกแม่เหล็กตามยาว (longitudinal magnetic recording media: LMR) ซึ่งมีแมกนีโตเซชันในแนวนอนขนานกับระนาบพื้นผิวของ HDD โดยมีความสามารถในการบันทึกในระดับ 160 Gb/in^2 ในปี 2005 (Piramanayagam and Chong, 2012) ต่อมาเมื่อ LMR เข้าสู่ขีดจำกัดที่ไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้อีก สื่อบันทึกแม่เหล็กตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording media: PMR) ที่มีแมกนีโตเซชันตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวของ HDD ก็ได้เข้ามาแทนที่ PMR โดยได้แก้ปัญหาของสนามดีแมกนีโตเซชัน (demagnetizing field) ของ HDD แบบ LMR และในปัจจุบันให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นกว่าเดิมมาก จนมีความสามารถในการบันทึกถึงระดับ Tb/in^2 โดย HDD แบบ PMR ที่ใช้อยู่ในขณะนี้ เป็นสื่อแม่เหล็กแบบต่อเนื่องที่มีบิตในการบันทึกแบบกรานูลาร์ (granular) แม้ว่าจะมีขนาดบิตเล็กลง และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นมาก แต่ก็ยังสามารถทำให้เล็กลงได้อีก โดยพัฒนาสื่อบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบของบิตแน่นอน (bit patterned media: BPM) ขึ้นมาแทนสื่อบันทึกเดิม ซึ่งคาดว่าจะสามารถบันทึกได้ถึงระดับที่มากกว่า 10 Tb/in^2 ในอนาคตอันใกล้ (Schabes, 2008)

ดังนั้นการพัฒนาโครงสร้างแม่เหล็กระดับนาโนและไมโครที่มีรูปแบบแน่นอนเป็นสิ่งจำเป็นและท้าทายในการพัฒนาเทคโนโลยี HDD เทคนิคที่นิยมในการสังเคราะห์สื่อบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบแน่นอน คือ ใช้เทคนิคลิโทกราฟี (lithography) ถ่ายทอดรูปแบบบนวัสดุรองรับ (substrate) แล้วเคลือบสารแม่เหล็กลงไปบนวัสดุรองรับ โครงสร้างเช่นนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าระดับไมโคร (micro-electromechanical system: MEMS) และการบันทึกข้อมูล ทั้งแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบของบิตที่แน่นอน หรือ สื่อที่มีร่องในการบันทึกแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete track media: DTM) การนำไปใช้งานขึ้นอยู่กับสมบัติทางแม่เหล็ก

แม้ว่าการศึกษาแม่เหล็กระดับนาโนและไมโครได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว แต่เทคโนโลยีลิโทกราฟีในประเทศไทยยังไม่สามารถสังเคราะห์สื่อบันทึกแม่เหล็กที่มีรูปแบบของบิตที่แน่นอนในระดับนาโนเมตรได้ งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อเริ่มต้นศึกษาโครงสร้างแม่เหล็กจากระดับไมโครเมตร โดยได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในการผลิตวัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอน ด้วยเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี (x-ray lithography) สองรูปแบบ คือ แบบเสา (pillar) และแบบหลุม (hole) ขนาดไมโคร ซึ่งเมื่อเคลือบหรือเติมสารแม่เหล็กแล้วยังมีสมบัติทางแม่เหล็กและคุณลักษณะอื่นๆ อีกที่ยังไม่ได้รับการศึกษา ผลงานวิจัยที่ได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนางานทางด้านแม่เหล็กระดับไมโครในประเทศไทยให้มีความก้าวหน้ามากขึ้น เพื่อเข้าสู่งานแม่เหล็กระดับนาโนในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโคร บนวัสดุรองรับแบบเสา และแบบหลุม
2. เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของโครงสร้างแม่เหล็กบนวัสดุรองรับทั้งสองแบบ
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กของโครงสร้างแม่เหล็กบนวัสดุรองรับทั้งสองแบบ

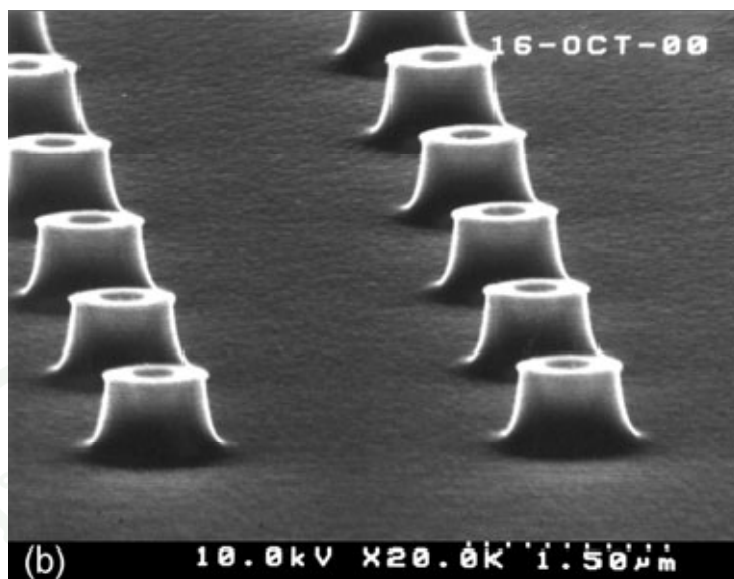
ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครเมตรที่มีรูปแบบแน่นอน ซึ่งเตรียมโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี โครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครที่เตรียมได้มีสองรูปแบบคือ แบบเสาและแบบหลุม และทำการเคลือบสารแม่เหล็กโคบอลต์ไปบนผิวของโครงสร้างระดับไมโคร ให้เป็นโครงสร้างแม่เหล็กที่มีรูปแบบแน่นอน และนำไปศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง สัณฐานวิทยาของโครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจเอกสาร

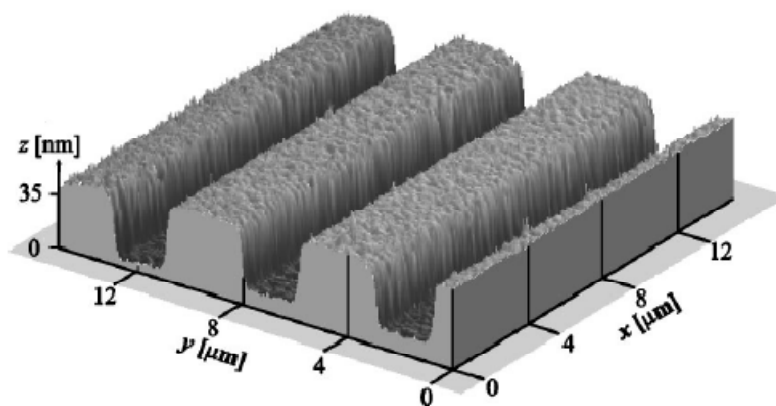
โครงสร้างแม่เหล็กระดับไมโครและนาโนมีรูปแบบที่แน่นอน ได้รับการวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ในสื่อบันทึกข้อมูล และเครื่องจักรกลไฟฟ้าระดับไมโคร โดยสามารถผลิตโครงสร้างที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เช่น ในปี 2002 Dumpich *et al.* (2002) ได้ใช้เทคนิคลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอน (electron beam lithography) ในการเตรียมแม่เหล็กระดับไมโครในรูปแบบของเส้นลวดโคบอลต์ขนาด 150 nm ถึง 4000 nm บนวัสดุรองรับ GaAs ซึ่งโดเมนแม่เหล็กที่มีทิศแมกนีโตเซชันตั้งฉากกับกระแสจะทำให้เกิดแอนไอโซโทรปีแมกนีโตรีซิสแตนซ์ โดยแมกนีโตรีซิสแตนซ์ตามยาวจะมีความต้านทานต่ำกว่าตามขวาง Morecroft (2003) ได้ผลิตแถวของเส้นลวด $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_5$ กว้าง 3 μm และยาว 5 mm โดยพบว่าแอนไอโซโทรปี (anisotropy) เพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของเส้นลวดลดลง และการเพิ่มขึ้นของสนามลบล้างแม่เหล็ก (coercivity) จะขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความลึกของโครงสร้าง นอกจากนี้มีการเตรียมโครงสร้างรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 μm ถึง 2 μm ด้วยเทคนิคลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนโดย Kläui *et al.* (2003) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยทำการปลูกฟิล์มแม่เหล็ก Cu/Co/Cu ด้วยเทคนิค MBE (molecular beam epitaxy) ลงบนซิลิกอน โดยวงแหวนถูกทำให้สูงเพียงพอและขอบของส่วนบนที่ยื่นออก เพื่อให้ฟิล์มแม่เหล็กที่ส่วนบนจะไม่ต่อเนื่องกับส่วนที่อยู่ในแนวร่องด้านล่าง เพื่อให้ส่วนบนเป็นแม่เหล็กที่อิสระได้

ในปี 2002 ได้มีการผลิตโครงสร้างแม่เหล็กไมโคร โดยสร้างเป็นแถบแม่เหล็กสลับกับร่องเป็นแนวยาว ลักษณะเดียวกับเกรตติง ความกว้างตั้งแต่ 1 μm ถึง 7.5 μm โดยนักวิจัยหลายกลุ่มด้วยกัน เช่น Schmitte *et al.* (2002) Theis-Brohl *et al.* (2003) Westphalen *et al.* (2005) และ Potzger *et al.* (2005) โดยใช้เทคนิคปรากฏการณ์แมกนีโตออปติกของเคอร์ (magneto-optical Kerr effect: MOKE) ในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของแม่เหล็กขนาดไมโคร ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงกับความกว้างที่มากขึ้นของแถบแม่เหล็ก มีผลต่อการกลับทิศแมกนีโตเซชันอย่างเด่นชัด (Theis-Brohl *et al.*, 2003) และระยะห่างระหว่างแถบแต่ละแถบที่แตกต่างกันก็มีผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแถบเช่นกัน (Westphalen *et al.*, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของวงแหวนที่ส่วนบนยื่นออกไปเล็กน้อย จากการกัดด้วยสารเคมีหลังจากทำลิโทกราฟี

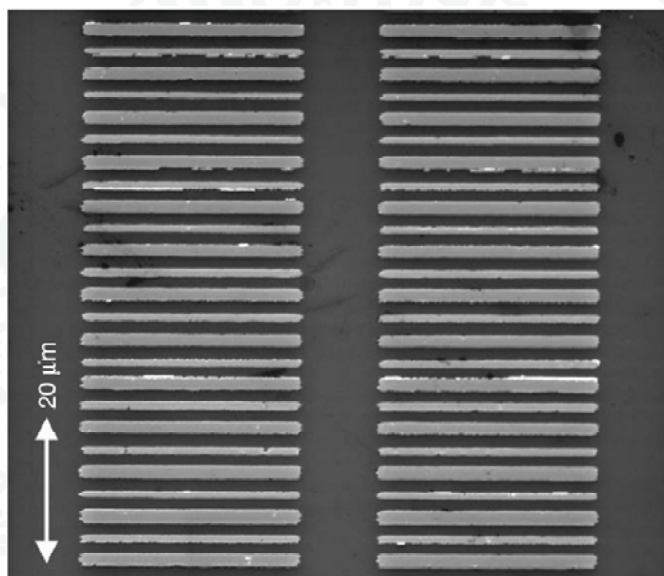
ที่มา: Kläui *et al.* (2006)



ภาพที่ 2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope: AFM) แสดงลักษณะของเกรตติงโคบอลต์บนฟิล์มเหล็ก ซึ่งมีช่องเกรตติง $d = 5 \mu\text{m}$ และความกว้างของแถบ $2.8 \mu\text{m}$ และความสูงประมาณ 41 nm

ที่มา: Westphalen *et al.* (2005)

ในปี 2006 Westphalen *et al.* (2006) ใช้เทคนิคลิโทกราฟีเชิงแสง (optical lithography: OL) ผลิตโครงสร้างระดับไมโครและเคลือบชั้นแม่เหล็กด้วยเทคนิคสปัตเตอร์แบบแมกนีตรอน (magnetron sputtering) โดยสร้างเป็นแถวของแถบ Fe สองมิติ โดยมีความยาว 30 μm และกว้างสองขนาดคือ 0.9 μm และ 1.9 μm สลับกันไป ดังภาพที่ 3 จากการวัดสมบัติทางแม่เหล็กด้วย MOKE ได้ค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวมากกว่า 1.99×10^5 A/m และพบว่าความกว้างที่แตกต่างกันของแถบเหล็กทำให้เกิดสนามกลับทิศ (switching field) ที่แคบมาก และได้ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ที่สูงชัน

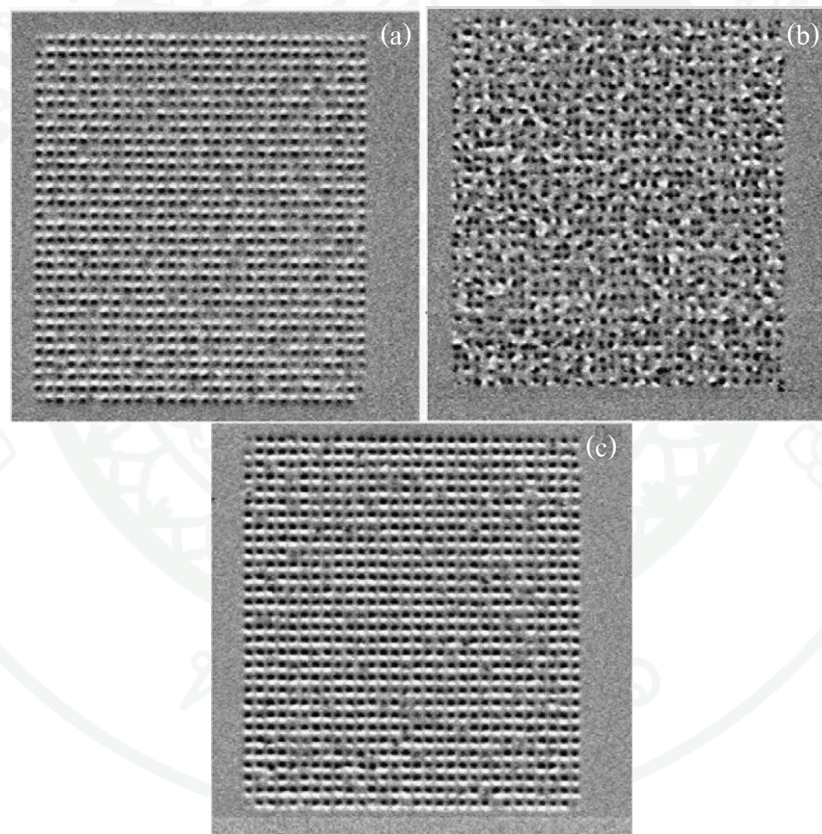


ภาพที่ 3 ภาพจาก SEM แสดงแถวของแท่ง Fe ยาว 30 μm และกว้าง 0.9 μm และ 1.9 μm สลับกันไป

ที่มา: Westphalen *et al.* (2006)

โครงสร้างแบบจุด (dot) ระดับไมโคร และนาโน ก็เป็นที่สนใจจากนักวิจัยหลายกลุ่ม โดย Thomson *et al.* (2006) Becherer *et al.* (2008) และ Okamoto *et al.* (2008) ผลิตโครงสร้างขนาด 50 nm ถึง 5 μm ของ Co/Pd, 40 nm ถึง 80 nm ของ Co/Pt และ ขนาดประมาณ 10 nm ถึง 100 nm ของ Ll_0 -FePt, Co/Pt และ CoPt/Ru ตามลำดับ พบว่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กมีผลต่อสนามกลับทิศ (Thomson *et al.*, 2006) และจุดแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic dot) โดเมนเดี่ยวจะมีการจับคู่แบบไดโพลาร์ (dipolar coupling) กันเอง และโครงสร้างโดยรวมมีสมบัติแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ (Becherer *et al.*, 2008) รวมถึงการเคลื่อนของผนังโดเมนจะมีผลต่อการกลับทิศของแมกนีไตเซชัน (Okamoto *et al.*, 2008)

นอกเหนือจากเทคนิคลิโทกราฟีแล้ว ยังมีการใช้เทคนิคอื่นๆ อีก ในการสร้างรูปแบบที่แน่นอนเช่น Gurovich *et al.* (2010) ได้เตรียมสื่อแม่เหล็กที่มีรูปแบบแน่นอนความหนาแน่น 100 ถึง 155 Gb/in² โดยการฉายโปรตอนจากเครื่องเร่งไอออนไปกำจัดอะตอมของออกซิเจน จากโคบอลต์ออกไซด์ (Co₃O₄) ให้เกิดเป็นบิตของโคบอลต์ ที่มีขนาดแฉกบิตแม่เหล็กเป็น 15 × 15, 30 × 15 และ 40 × 15 nm² การศึกษาสมบัติแม่เหล็กทำโดยใช้เครื่อง SQUID วัดค่าสนามลบล้างแม่เหล็ก และแมกนีโตเซชันตกค้าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กกำลังแยกสูง (high resolution magnetic force microscope: HR-MFM) ในการศึกษาแรงแม่เหล็กดังภาพที่ 4 พบว่าขนาดและรูปร่างของบิตมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสนามลบล้างแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับปัจจัยของแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กของบิต



ภาพที่ 4 ภาพ MFM แบบไม่สัมผัสของแฉกบิตขนาด 40 × 15 nm² ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกเป็น (a) -0.09 (b) 0.04 และ (c) 0.12 T ที่พื้นที่การสแกนกว้าง 8 μm

ที่มา: Gurovich *et al.* (2010)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สื่อที่มีรูปแบบแน่นอน (Patterned Media)

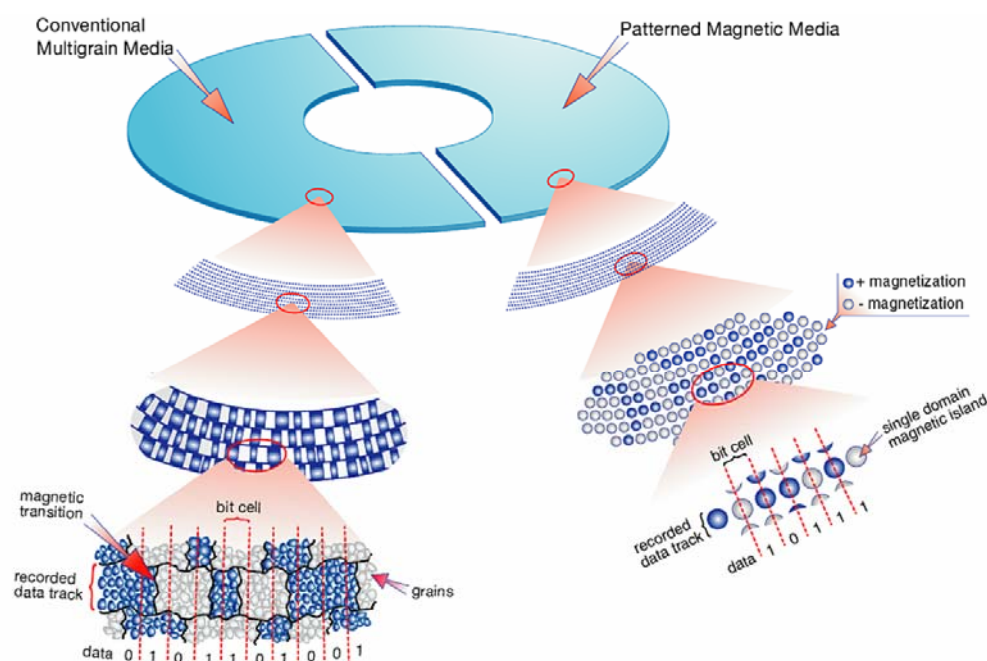
สื่อที่มีรูปแบบแน่นอน คือ สื่อบันทึกข้อมูลที่แบ่งส่วนย่อยให้มีขนาดและตำแหน่งที่แน่นอนตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งวิธีที่ใช้ในการสร้างรูปแบบที่แน่นอนเหล่านี้ ล้วนมีวิธีการที่จะลดขนาดของโครงสร้างให้เป็นเกรนเดี่ยว โดยเทคโนโลยีในการสร้างรูปแบบที่แน่นอนมีการพัฒนาให้ง่ายขึ้น และสามารถทำสำเนาได้ในเชิงพาณิชย์ และมีศักยภาพในการที่จะพัฒนาปรับปรุงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้เพิ่มขึ้น

เป็นเวลามากกว่า 40 ปีแล้ว ที่มีการพัฒนาสื่อบันทึกข้อมูล โดยวิวัฒนาการของการเตรียมสื่อฟิล์มบางสามารถแบ่งออกได้เป็น a) การใช้วัสดุที่มีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กสูง b) การลดความหนาและโมเมนต์ของฟิล์มบาง c) การลดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน d) การเพิ่มความต้านทานทางความร้อน ในปี 2009 วัสดุที่ใช้ใน HDD มีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กประมาณ 5000 Oe และความหนาแน่นในการบันทึกประมาณ 350 ถึง 400 Gb/in² (Mellor, 2009) เนื่องจากข้อจำกัดของสภาวะซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic limit) เมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กเล็กลงมาก นักวิจัยจึงได้มองหาทางเลือกอื่นโดยการสร้างสื่อบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบแน่นอนที่ใช้จัดเก็บข้อมูล โดยสื่อบันทึกข้อมูลชนิดนี้จะมีเกรนแม่เหล็ก หรือ บิตที่มีรูปแบบแน่นอน

บิตที่มีรูปแบบแน่นอน (patterned bit: PB)

PB เป็นสื่อสำหรับบันทึกที่มีรูปแบบแน่นอน ที่เป็นทางเลือกสำหรับการเก็บข้อมูลในอนาคต โดยมีเทคนิคมากมายที่สามารถพัฒนาเพื่อประดิษฐ์สื่อที่มีรูปแบบแน่นอน

ภาพสื่อบันทึกข้อมูลต่อเนื่องในปัจจุบันแสดงในภาพที่ 5 (ซ้าย) ภายในแต่ละบิตเซลล์ จะมีเกรนแม่เหล็กเล็กๆ มากมาย เกรนเหล่านี้จะถูกสร้างแบบสุ่มระหว่างการผลิตฟิล์มแม่เหล็ก แต่ละเกรนประพฤติตัวเสมือนแม่เหล็กอิสระที่มีแมกนีโตเซชันที่สามารถพลิกกลับได้โดยสัญญาณแม่เหล็กจากหัวเขียนในกระบวนการเขียนข้อมูลลงบนสื่อบันทึกข้อมูล



© 2004 Hitachi Global Storage Technologies

ภาพที่ 5 ลักษณะของสื่อแบบต่อเนื่อง (ซ้าย) และสื่อที่มีรูปแบบแน่นอน (ขวา)

ที่มา: Hitachi Global Storage Technologies (2004)

เกรนแม่เหล็กทั้งหมดในบิตเซลล์ (bit cell) สามารถถูกแมกนีไตซ์กลับไป-มาได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้มีโครงสร้างซิกแซกเกิดขึ้นระหว่างบิตที่ถูกแมกนีไตซ์ในทิศตรงกันข้ามกันสองบิตเซลล์ เมื่อเกรนแม่เหล็กมีขนาดเล็กพอ บริเวณที่เป็นรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างตรงจะเกิดขึ้น จึงง่ายต่อการตรวจสอบของบิตเซลล์ อย่างไรก็ตาม หากขนาดเกรนไม่ได้ลดลงพอๆ กับที่เพิ่มความหนาแน่น สัญญาณจากพื้นที่รอยต่อจะเริ่มมีสัญญาณรบกวนมากขึ้นตามไปด้วย ในที่สุดระบบอ่านกลับจะไม่สามารถเรียกคืนข้อมูลได้อย่างแม่นยำ สิ่งนี้เรียกว่าสัญญาณรบกวนจากรอยต่อ (transitional noise) เพื่อให้สัญญาณรบกวนนี้ต่ำพอสำหรับสัญญาณอ่านกลับ บิตเซลล์ควรมีจำนวนเกรนประมาณ 50 ถึง 100 เกรน

ดังนั้นวิธีการง่ายๆ คือพยายามสร้างเกรนให้เล็กเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากรอยต่อในขณะเดียวกันก็เพิ่มความหนาแน่นด้วย เป้าหมายนี้ประสบความสำเร็จมาเป็นเวลาหลายสิบปีแล้ว โดยมีเทคนิคมากมายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในการลดขนาดยังผลของเกรนแม่เหล็ก ในปัจจุบันสื่อที่ใช้เก็บข้อมูลแม่เหล็กจะเป็นฟิล์มบางแบบต่อเนื่องที่มีเกรนประมาณ 7 nm

อย่างไรก็ตาม การลดขนาดเกรนให้เล็กลงไปอีกจะทำให้แมกนีไตเซชันของเกรนแม่เหล็กไม่เสถียร พลังงานความร้อนของเกรนแม่เหล็กมีค่า $k_B T$ (k_B คือค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann) และ T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน) จะสามารถเอาชนะพลังงานแมกนีไตเซชันซึ่งมีค่า $K_u V$ (K_u คือแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กและ V คือปริมาตร) ซึ่งทำให้เกรนเกิดการหมุนกลับได้เอง ทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลหรือข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากต้องการขนาดที่ลดลง (หรือการลดปริมาตร V) เพื่อให้ได้การบันทึกที่ความหนาแน่นสูง วิธีการในการรักษาเสถียรภาพทางความร้อนทำได้โดยการเพิ่มแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก K_u อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม K_u จะส่งผลกระทบอย่างมากต่อสนามลบล้างแม่เหล็ก (H_C) ให้สูงมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ข้อมูลจะมีเสถียรภาพทางความร้อน แต่ก็อาจจะไม่มีหัวเขียนไหนมีสนามแม่เหล็กแรงพอที่จะเขียนข้อมูลได้เหมือนกัน ดังนั้นเสถียรภาพทางความร้อนจะเป็นสิ่งที่จำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นให้มากขึ้นในตัวบันทึกข้อมูลฟิล์มบางต่อเนื่อง

แนวคิดเรื่องสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1994 โดย New *et al.* (1994) และ Chou *et al.* (1994) สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนจะประกอบด้วยแถวที่เป็นระเบียบของอนุภาคแม่เหล็ก โดยแต่ละอนุภาคแม่เหล็กมีแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กแกนเดียว โดยแกนง่าย (easy axis) อาจจะขนานหรือตั้งฉากกับระนาบของวัสดุรองรับ ในสื่อที่มีรูปแบบแน่นอน หนึ่งบิตมีหนึ่งหน่วยแม่เหล็กที่ตั้งตรงตามแท่งและมีช่วงระยะสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 5 (ขวา) เนื่องจากบิตมีการแยกกันด้วยระยะพอประมาณ ทำให้ไม่มีการจับคู่แลกเปลี่ยนทางแม่เหล็กระหว่างบิต วัสดุที่มีสนามลบล้างแม่เหล็กสูงเป็นสิ่งจำเป็นในสื่อที่มีรูปแบบแน่นอน

เนื่องจากสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนมีเกรนเดียวต่อบิตเซลล์ ความหนาแน่นของการเก็บข้อมูลจึงเพิ่มขึ้นถึงสองเท่า ในปี 2005 บริษัทไดนาซีได้นำเสนอเทคโนโลยีสื่อบันทึกตั้งฉากที่มีความหนาแน่น 230×10^9 b/in² เนื่องจากแต่ละอนุภาคเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนจึงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี แม้แต่ที่ความหนาแน่นที่สูงเกินกว่าสื่อแบบเดิม เสถียรภาพทางความร้อนของสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนเกิดขึ้นที่ความหนาแน่นสูง ประมาณ 20 Tb/in² สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนไม่มีสัญญาณรบกวนที่รบกวน เพราะวาล์วจะแยกกันอยู่ไม่มีรอยต่อแบบรูปฟันปลาระหว่างสองโดเมนที่ถูกแมกนีไตซ์ในทิศตรงข้ามกันเหมือนในสื่อแบบฟิล์มบางที่แต่ละบิตมีเกรนจำนวนมาก หัวอ่าน/เขียนจะตรวจวัดแมกนีไตเซชันเฉลี่ยจากเกรนทั้งหมดภายในบิต แอนไอโซโทรปีของบิตทั้งหมดในสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนจะมีการจัดเรียงตามมุมเฉพาะที่สัมพันธ์กับหัวอ่าน สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด ขึ้นกับทิศแมกนีไตเซชันของบิตกับผิวฟิล์ม คือ 1) ตามยาว – แนวขนาน 2) ตามขวาง – แนวตั้งฉาก

ในกรณีของสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนตามยาว มักจะจัดวางบิตทั้งหมดในแนวเส้นรอบวงของวัสดุรองรับ การจัดตำแหน่งแกนง่ายสำหรับสื่อตามยาวสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนตามยาวที่เตรียมโดยการปลูกฟิล์มของฟิล์ม Co หนา 20 nm บนชั้น Cr แบบอีพิทาคี (epitaxy) บนวัสดุรองรับ MgO วิธีการนี้ยังสามารถเตรียมรูปแบบแน่นอนของฟิล์มบางโลหะผลึกเดี่ยวบนวัสดุรองรับเซฟไฟร์ ซึ่งพบว่าสามารถสร้างเป็นโครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอนได้โดยตรง อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างยากและใช้ต้นทุนสูง

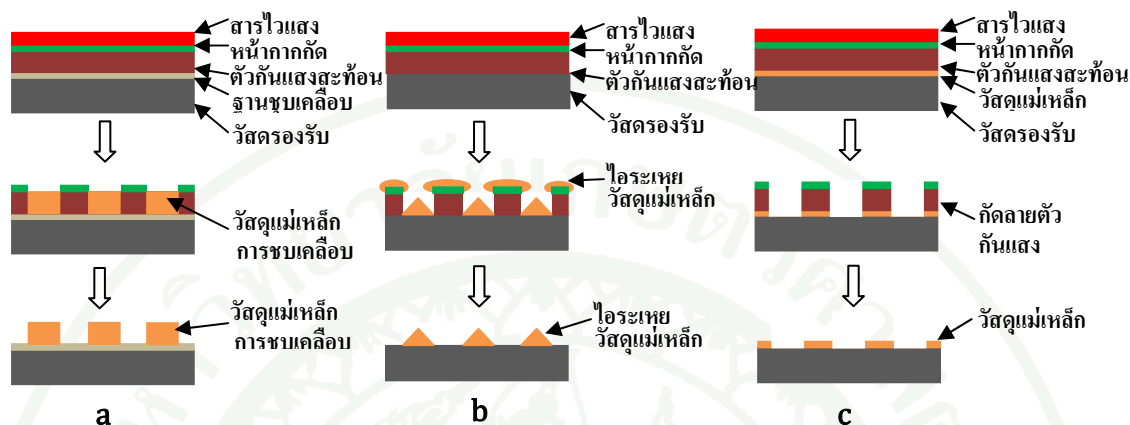
ในทางกลับกัน บิตที่มีรูปแบบแน่นอนสามารถวางตำแหน่งให้ตั้งฉากกับผิวฟิล์มได้ง่ายกว่าในการสร้างเป็นสื่อบันทึกตั้งฉาก ได้มีการศึกษาวัสดุอันหลากหลายสำหรับการประดิษฐ์สื่อบันทึกแม่เหล็กตั้งฉากที่มีรูปแบบแน่นอน เช่น อัลลอยของ Co/Pt, Co/Pd และ CoPtCr ถูกปลูกโดยใช้แก๊ส c ตั้งฉากกับวัสดุรองรับ ซึ่งใช้ทั่วไปในสื่อต่อเนื่อง สื่อบันทึกแม่เหล็กตั้งฉากที่มีรูปแบบแน่นอนเป็นทางเลือกของสื่อที่มีรูปแบบแน่นอนเนื่องจากสนามเขียนที่สูงเหมือนกับสื่อแบบฟิล์มบางดั้งเดิม

ในทั้งสองกรณี มักจะเคลือบสารแม่เหล็กเป็นฟิล์มบาง เพราะสามารถป้องกันการเหนี่ยวนำที่ไม่พึงประสงค์จากบิตข้างเคียงเนื่องจากเกรเดียนท์ของสนามจากหัวเขียนในสื่อที่หนา ในเสาที่สูงกว่าจะมีสนามจากหัวเขียนที่มากกว่าซึ่งจะไปรบกวนบิตข้างเคียง ด้วยเหตุนี้ สื่อที่มีรูปแบบแน่นอนจึงถูกออกแบบให้มีระยะระหว่างบิตกว้างๆ ซึ่งในกรณีของสื่อตั้งฉากเพื่อให้ได้แอนไอโซโทรปีตั้งฉากสูงๆ จึงไม่ต้องการอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่สูงมากนัก

2. การประดิษฐ์โครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอนระดับไมโคร

วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ประดิษฐ์โครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอนขนาดเล็ก ได้แก่ ลิโทกราฟี (lithographic) เทคนิคลิโทกราฟีสามารถแบ่งออกได้เป็น ลิโทกราฟีเชิงแสง เอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอน และ ลิโทกราฟีพิมพ์ลาย (imprint lithography: IL) หรือ NIL ตัวอย่างของขั้นตอนกระบวนการมาตรฐานสามกระบวนการแสดงดังภาพที่ 6 เทคนิคลิโทกราฟีทั้งหมดมีขั้นตอนที่คล้ายๆ กันคือ การสร้างรูปแบบที่ต้องการบนชั้นของสารไวแสง (resist) ต่อมาจึงถ่ายทอดลงบนวัสดุแม่เหล็กด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น การกัดลาย (etching) หรือการเคลือบ ในกระบวนการกัดลาย (ภาพที่ 6(c)) ชั้นของวัสดุแม่เหล็กถูกเคลือบบนวัสดุรองรับก่อน ตามด้วยตัวกันแสงสะท้อนหน้ากากกัดลายและสารไวแสง รูปแบบเฉพาะถูกถ่ายทอดจากหน้ากากที่สร้างโดยกระบวนการลิโทกราฟีลงบนสารไวแสง แล้วกัดลายจนเหลือเฉพาะวัสดุแม่เหล็ก ส่วนในกระบวนการเคลือบ (ภาพที่ 6(a) และ 6(b)) โดยเริ่มจาก การถ่ายทอดรูปแบบจากหน้ากากที่สร้างโดยกระบวนการลิโทกราฟีลง

บนสารไวแสง ใช้กระบวนการทางเคมีทำให้เกิดเป็นโครงของรูปแบบเฉพาะแบบกลับด้าน จากนั้นจึงเคลือบวัสดุแม่เหล็กไปเติมในช่องลวดลายให้เต็ม และเอาโครงเหล่านั้นออกจนเหลือเพียงวัสดุแม่เหล็กตามรูปแบบที่ต้องการ



ภาพที่ 6 กระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอน (จากซ้ายไปขวา) (a) การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) (b) การเคลือบไอระเหย (evaporative deposition) (c) การกัดลาย (etching)

ที่มา: Ross (2001)

2.1 วิธีลิโทกราฟีเชิงแสง (optical lithography: OL)

ลิโทกราฟีเชิงแสงเป็นกระบวนการที่ใช้แสงความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (10 – 400 nm) ในการสร้างรูปแบบที่ต้องการบนสารไวแสง โดยใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น หลอด KrF (ความยาวคลื่น 248 nm) ArF (ความยาวคลื่น 193 nm) F₂ (ความยาวคลื่น 157 nm) ฉายภาพของรูปแบบที่ต้องการลงบนผิวหน้าของวัสดุรองรับผ่านหน้ากากแสง (photomask) แล้วใช้กระบวนการทำให้เกิดลวดลาย เช่น การกัดลาย การเคลือบ การชุบเคลือบ หรือ การเคลือบไอระเหย ลิโทกราฟีเชิงแสงได้มีการพัฒนาอีกหลายแบบ เช่น ลิโทกราฟีแบบอัลตราไวโอเล็ตขั้วยิ่ง (extreme ultraviolet: EUV) ลิโทกราฟีแบบแทรกสอด (interference lithography: IL) ลิโทกราฟีเชิงแสงแทรกสอดแบบไม่มีสี (achromatic interference lithography: AIL)

ลิโทกราฟีเชิงแสงมีข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียด ขนาดที่เล็กที่สุดหาได้จากสูตร

$$W = \frac{k_1 \lambda}{NA} \quad (1)$$

เมื่อ k_1 คือค่าคงที่สำหรับกระบวนการลิโทกราฟี
 λ คือความยาวคลื่น
 NA คือจำนวนช่องรับแสง

จากสมการ (1) ความละเอียดมีค่าสูง (W มีค่าน้อย) เมื่อใช้ความยาวคลื่นสั้นหรือใช้จำนวนช่องรับแสงมากๆ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดหลักอื่นๆ ก็คือความลึกของการโฟกัส (depth of focus: DOF) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$DOF = \frac{k_2 \lambda}{NA^2} \quad (2)$$

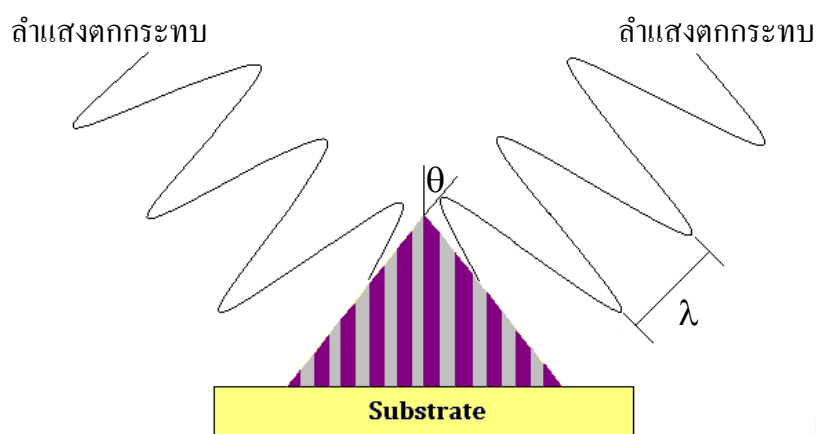
เมื่อ k_2 คือค่าคงที่สำหรับกระบวนการลิโทกราฟี โดยทั่วไปต้องการค่า DOF ที่สูงๆ สำหรับการประดิษฐ์สื่อที่มีรูปแบบแน่นอน ข้อจำกัด DOF จะไม่ค่อยสำคัญนักเมื่อเทียบกับความละเอียดหรือขนาดที่ต้องการ

ลิโทกราฟีแบบอัลตราไวโอเลตขั้วตึง เป็นลิโทกราฟีเชิงแสงความคลื่น 13.5 nm วัสดุทุกชนิดจะมีการดูดกลืนความยาวคลื่นนี้ได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามเทคนิคลิโทกราฟีความยาวคลื่นสั้นยังคงไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง

ลิโทกราฟีแบบแทรกสอด เป็นรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้ได้ความละเอียดสูง ลิโทกราฟีเชิงแสงทำให้เกิดการแทรกสอดของลำแสงที่รวมกัน ณ มุมจำเพาะ บนระนาบฉายแสงตกกระทบบการแทรกสอดของสองลำแสงเกิดเป็นรูปแบบความเข้มแสงดังสมการ

$$P = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นและ θ คือครึ่งของมุมที่แสงมาพบกัน แผนภาพการทำงานแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 หลักการของลิโทกราฟีแบบแทรกสอด

นอกจากนี้เทคนิคลิโทกราฟีแทรกสอดแบบไม่มีสี ได้ถูกพัฒนาให้มีความละเอียดสูงขึ้น โดยใช้แสงความยาวคลื่น 193 nm กระเจิงโดยอนุกรมของเกรตติงการกระเจิงเพื่อสร้างรอยของการแทรกสอด ช่วงระยะของรูปแบบเป็นครึ่งหนึ่งของช่วงระยะของเกรตติง โดยไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง มีจุดแม่เหล็กที่มีช่วงระยะเป็น 100 nm สามารถทำงานร่วมกับของระบบการฉายซอฟต์แวร์รังสีเอ็กซ์เรย์ (soft x-ray radiation) 100 nm ซึ่งทำให้สามารถประดิษฐ์รูปร่างขนาด 25 nm ได้ บนพื้นฐานของลิโทกราฟีแทรกสอดแบบไม่มีสี

2.2 ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอน (electron beam lithography)

ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนเป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ระบบลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนโดยทั่วไปประกอบด้วยเครื่อง SEM ที่มีระบบวาดลำอิเล็กตรอนที่ติดตั้งเข้ามา ดังแสดงในภาพที่ 8 ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนเป็นหนึ่งในวิธีที่จะสร้างรูปร่างที่มีความละเอียดไมโครเมตร ซึ่งมีความละเอียดสูงเทียบกับลิโทกราฟีแบบอื่น ความกว้างของเส้นในระดับ 10 nm หรือต่ำกว่าได้ถูกประดิษฐ์โดยลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอน ส่วนใหญ่ ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนถูกใช้ในการสร้างรูปแบบบนพอลิเมทิลเมทาไครเลต (polymethyl methacrylate: PMMA) นำไปกัดลายต่อหลังจากสร้างรูปร่างที่ต้องการ ชั้น PMMA ที่สร้างรูปแบบที่ต้องการแล้วสามารถใช้เป็นหน้ากากสำหรับการถ่ายทอดรูปแบบไปบนชั้นแม่เหล็กด้านล่างโดยตรง หรือสำหรับประดิษฐ์แม่พิมพ์ต้นแบบสำหรับการพิมพ์ลาย



ภาพที่ 8 ระบบลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนมาตรฐาน

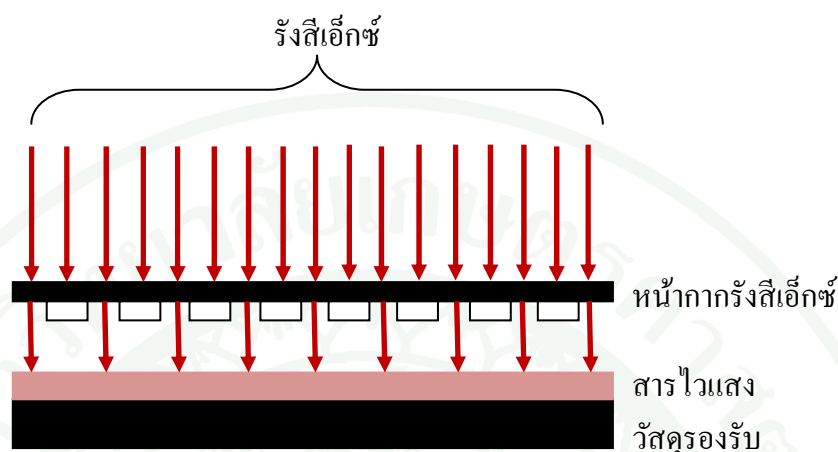
ที่มา: Elionix Inc. (JP) (2011)

แม้ว่าลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนจะมีความละเอียดสูง แต่มีข้อเสียหลักๆ ก็คือรูปแบบจะถูกส่งกราดเป็นลำดับอนุกรม ทำให้กระบวนการทั้งหมดใช้เวลานาน โดยเฉพาะในกรณีการทำสำเนาอุปกรณ์ขนาดเล็กบนพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้กระบวนการมีต้นทุนสูง ทำให้ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนไม่เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรม ขณะที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ แทนที่จะสร้างรูปแบบดิสก์ ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนสามารถทำงานร่วมกับ NIL ที่ซึ่งเป็นตัวเลือกที่ได้รับการคาดหวังเพื่อใช้ในงานเชิงพาณิชย์ในอนาคต

2.3 เอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี (x-ray lithography)

เอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีสามารถสร้างรูปแบบขนาดไมโครเมตรบนวัสดุรองรับขนาดใหญ่ แสดงกระบวนการเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีดังภาพที่ 9 เพื่อให้ได้ลักษณะแนวตั้งและเฉียงคมของฟิล์มสารไวแสง และรูปแบบที่มีความคมชัด กระบวนการจะใช้น้ำกากรังสีเอ็กซ์แผ่นบางๆ โดยทั่วไปจะใช้ SiN เป็นฐาน เคลือบด้วยตัวดูดซับทองหรือทังสเตน เคลือบด้วยสารไวแสงอีกชั้นเพื่อสร้างเป็นรูปแบบจากการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ เจือปนไขต่างๆ ในเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี เช่น ความหนาของตัวดูดซับรังสี ความละเอียดของหน้ากากรยะห่าง ล้วนมีผลต่อความละเอียดของรูปแบบ ข้อจำกัดที่จะได้โครงสร้างที่ระดับเล็กกว่า 100 nm มีสาเหตุมาการผลิตหน้ากากร และการปรับตั้งระยะห่างที่ต่ำกว่า 5 μm เนื่องจากหน้ากานิยมใช้ลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนในการทำรูปแบบ

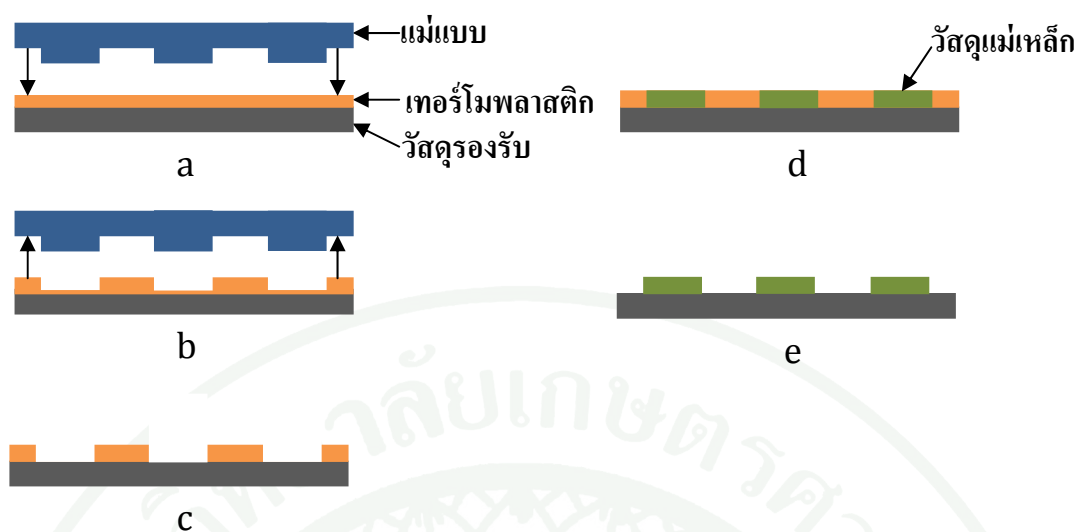
และทำสำเนาแบบ 1:1 ในกระบวนการพิมพ์ ดังนั้นความละเอียดของเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีจึงถูกจำกัด โดยเทคนิคลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนด้วย



ภาพที่ 9 กระบวนการเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี

2.4 ลิโทกราฟีพิมพ์ลาย หรือ ลิโทกราฟีพิมพ์ลายระดับนาโน (imprint lithography: IL or nonoimprinting lithography: NIL)

ลิโทกราฟีพิมพ์ลาย หรือ ลิโทกราฟีพิมพ์ลายระดับนาโน เป็นเทคนิคที่ได้ปรับปรุงให้มีผลผลิตเพิ่มขึ้น ใช้งานได้จริง และต้นทุนต่ำลง โดยการใช้ตัวแม่แบบหลัก ที่มีรูปแบบตามที่ต้องการซึ่งประดิษฐ์จากกระบวนการลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอนหรือเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีซึ่งจะมีความละเอียดสูง แล้วนำตัวแม่แบบหลักมาใช้ในการพิมพ์ให้เกิดเป็นตัวแม่แบบจำนวนมาก เพื่อนำไปสร้างตัวสื่ที่มีรูปแบบแน่นอน ถ้าตัวแม่แบบหลักมีความแข็งแรงและคงทนพอ อาจสามารถนำมาสร้างตัวสื่ที่มีรูปแบบแน่นอนได้โดยตรง กระบวนการพื้นฐานของเทคนิคลิโทกราฟีพิมพ์ลายเป็นดังภาพที่ 10 เริ่มจาก กดแม่แบบลงบนเทอร์โมพลาสติก (10(a)) เมื่อนำแม่แบบออกเกิดเป็นโครงสร้างรูปแบบตามรอยกดของแม่แบบ แล้วจึงให้ความร้อนหรือผ่านแสงยูวีเพื่อให้พลาสติกเกิดการคงตัว (10(b)) จากนั้นทำการกัดลายด้วยกระบวนการ reactive ion etching (10(c)) ตามด้วยการชุบเคลือบวัสดุแม่เหล็กด้วยไฟฟ้า (10(d)) ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำพลาสติกออกด้วยกระบวนการ lift-off เพื่อให้เหลือโครงสร้างขนาดเล็กที่ต้องการ (10(e))

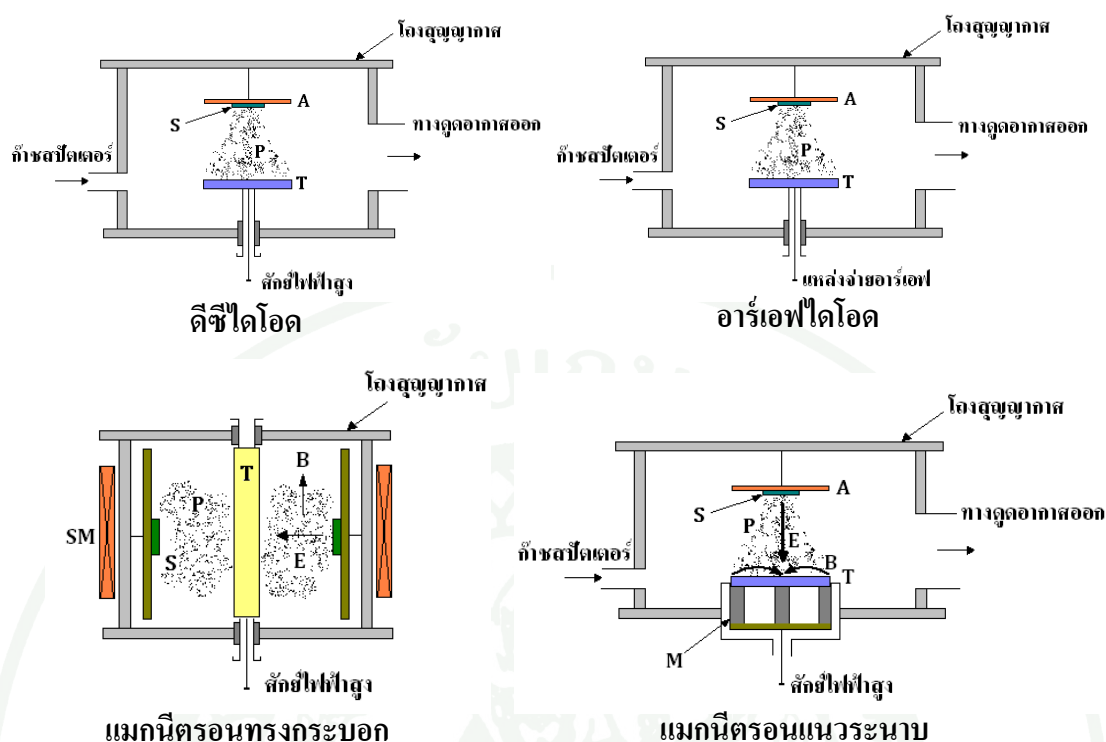


ภาพที่ 10 ขั้นตอนพื้นฐานในการทำลิโทกราฟีพิมพ์ลาย

3. เทคนิคการสเปตเตอริง

ระบบสเปตเตอริงโดยทั่วไปมักมีวัตถุประสงค์เพื่องานเคลือบฟิล์มบาง การออกแบบถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 11 รุ่นที่เป็นพื้นฐานของระบบสเปตเตอริงก็คือ ระบบ ดีซีไดโอดสเปตเตอริง (DC diode sputtering) ระบบสเปตเตอริงอื่นๆ เป็นการปรับปรุงระบบของ ดีซีไดโอดสเปตเตอริง ได้แก่ อาร์เอฟไดโอดสเปตเตอริง (RF diode sputtering) และ แมกนีตรอนสเปตเตอริง (magnetron sputtering)

ระบบดีซีไดโอดสเปตเตอริงประกอบด้วยคู่แผ่นอิเล็กโทรด อิเล็กโทรดด้านหนึ่งเป็นแคโทดเย็น และอีกด้านเป็นแอโนด ผิวหน้าส่วนที่ต้องพบกับพลาสมาด้านบนของอิเล็กโทรดถูกคลุมไว้ด้วยวัสดุที่ใช้เป็นเป้า และอีกด้านเป็นส่วนทำความเย็นด้วยน้ำ วัสดุรองรับวางอยู่บนแอโนด เมื่อโถงสเปตเตอริงเต็มไปด้วยก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 0.1 ทอร์ จ่ายศักย์ดีซีระดับกิโลโวลต์กับความดันต่ำตั้งแต่ 1 ถึง 10 กิโลโวลต์ให้ขั้วอิเล็กโทรด จนเกิดโกลว์ดีสชาร์จ (glow discharge) ไอออนอาร์กอนในโกลว์ดีสชาร์จถูกเร่งไปตกที่แคโทด ทำให้วัสดุที่ใช้เป็นเป้าถูกสเปตเตอริงออกมาเป็นไอออน ไปเคลือบเป็นชั้นฟิล์มบนวัสดุรองรับ



ภาพที่ 11 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบสเปตเตอริงแบบต่างๆ S คือ วัสดุรองรับ (substrates), A คือ แอโนด (anode), T คือ เป้า (target), P คือ ไอออนพลาสมา (plasma ion), SM คือ ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid magnet), M คือ แม่เหล็ก (magnet), E คือ สนามไฟฟ้า (electric field) และ B คือ สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

ที่มา: Wasa *et al.* (2004: 135)

ในกรณีของเป่าฉนวน ระบบดิสชาร์จไดโอดสเปตเตอริงไม่สามารถรักษาการเกิดโกล์ดดิส์ชาร์จ์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดของประจุที่ผิวของไอออนบวกบนด้านหน้าของฉนวน เพื่อรักษาโกล์ดดิส์ชาร์จ์สำหรับเป่าฉนวน แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ระบบนี้ถูกเรียกว่า ระบบอาร์เอฟสเปตเตอริง การสเปตเตอริงในอาร์เอฟดิส์ชาร์จ์ได้พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Robertson และ Clapp ในปี 1933 (Robertson *et al.*, 1933) เมื่อพบว่า ผิวหน้าแก้วของหลอดดิส์ชาร์จ์ (discharge tube) ถูกสเปตเตอริงระหว่างการดิส์ชาร์จ์ที่ความถี่ช่วงอาร์เอฟ การสเปตเตอริงในการดิส์ชาร์จ์อาร์เอฟได้ถูกใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไดอิเล็กตริก และระบบอาร์เอฟสเปตเตอริงก็ถูกพัฒนาเป็นเชิงปฏิบัติการ จนปัจจุบันอาร์เอฟสเปตเตอริงกลายเป็นเทคนิคสำคัญในงานเคลือบฟิล์มบางเชิงพาณิชย์

ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานเคลือบฟิล์มบางมีสองแบบคือ ชนิดทรงกระบอก และแบบระนาบ โดยมีแม่เหล็กถาวรถูกฝังเอาไว้ภายในเป่าแคโทด ทำให้สนามแม่เหล็กมีถึงหลายร้อยเกาส์ โกลด์คิสต์ซาร์จมีความหนาแน่นในบริเวณสนามแม่เหล็กสูง ดังนั้นจึงมีการเปล่งแสงแคโทดวกลมที่ไม่สม่ำเสมอบนผิวหน้า ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของเป่าแคโทดสั้นลง เป่าแมกนีตรอนที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นมีหลายแบบ รวมถึงเป่าแมกนีตรอนที่มีแม่เหล็กเคลื่อนที่ หรือแม่เหล็กหลายอัน เพื่อให้มีพื้นที่สุกที่ร้อนที่สม่ำเสมอ และเพิ่มอายุการใช้งานของเป่า

ในปัจจุบันกระบวนการสปีดเตอริงใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการเคลือบวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงการออกแบบการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กด้วยแม่เหล็กถาวรแรงที่ทำจากธาตุหายาก ในระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง แรงดันขณะเคลือบคือ 10^{-5} ถึง 10^{-3} ทอร์และในกระบวนการสปีดเตอริงมีอัตราการกระเจิงในโกลด์คิสต์ซาร์จต่ำ

4. โครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็ก

สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดเรียกว่าเกิดผลกระทบจากขนาด (size effect) ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กในโครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็กสามารถเข้าใจได้โดยพิจารณาสถานะของแมกนีไตเซชัน ซึ่งเป็นผลจากการรวมกันของพลังงาน 4 ชนิด คือ พลังงานแลกเปลี่ยน (exchange energy) พลังงานซีมาน (Zeeman energy) พลังงานแมกนีโตคริสตัลไลน์แอนไอโทรปี (magnetocrystalline anisotropy energy) และ พลังงานแมกนีโตสแตติก (magnetostatic energy) ทั้งนี้ พลังงานแมกนีโตสแตติก จะเพิ่มผลกระทบของขนาดต่อการเปลี่ยนแปลงแมกนีไตเซชันกับสนาม ซึ่งพลังงานแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

4.1 พจน์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในโครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็ก

4.1.1 พลังงานแลกเปลี่ยน (exchange energy)

พลังงานแลกเปลี่ยน E_{ex} เกิดจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบสปิน-สปิน ของคู่อิเล็กตรอน ซึ่งเกิดขึ้นในสถานะแม่เหล็กเฟอร์โร อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนจะพยายามรักษาโมเมนต์แม่เหล็กให้ขนานกัน ซึ่งหมายความว่าแมกนีไตเซชันที่สม่ำเสมอจะมีพลังงานแลกเปลี่ยนต่ำสุด ความหนาแน่นพลังงานแลกเปลี่ยนสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$E_{ex} = -A \cos \theta_{ij} \quad (5)$$

A คือค่าคงที่สทิฟเฟเนสแลกเปลี่ยน (exchange stiffness constant) เป็นค่าสทิฟเฟเนสของการจับคู่ของระบบสปิน A เป็นสมบัติของวัสดุและถูกวัดในรูปพลังงาน/ความยาว ค่าปกติสำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ คือ 2×10^{-11} θ_{ij} คือมุมระหว่างทิศสปินข้างเคียงในอะตอมติดกัน

4.1.2 พลังงานซีมาน (Zeeman energy)

พลังงานซีมาน E_z คือพลังงานของแมกนีไทเซชันในสนามแม่เหล็กภายนอก มักจะถูกอ้างอิงกับพลังงานศักย์แม่เหล็ก พลังงานซีมานมีค่าน้อยสุดเมื่อแมกนีไทเซชันถูกจัดเรียงตามสนามภายนอก ซึ่งสามารถอธิบายดังสมการ

$$E_z = -\vec{H}_{ext} \cdot \vec{M} \quad (6)$$

เมื่อ $\vec{H}_{ext}$ เป็นเวกเตอร์สนามภายนอก และ $\vec{M}$ เป็นเวกเตอร์แมกนีไทเซชัน

4.1.3 พลังงานแมกนีโตคริสตัลไลน์แอนไอโซโทรปี (Magnetocrystalline anisotropy energy)

วัสดุแม่เหล็กส่วนใหญ่มีทิศทางของผลึกที่เฉพาะเจาะจงทิศหนึ่งที่ทิศแมกนีไทเซชันจะชี้ไปตามทิศนั้น ซึ่งเรียกว่าแกนง่าย เป็นสมบัติของแมกนีโตคริสตัลไลน์แอนไอโซโทรปี ความหนาแน่นพลังงานแอนไอโซโทรปี E_{ani} ที่มีแกนเดียวจะเขียนได้เป็น

$$E_{ani} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad (7)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่พลังงานแอนไอโซโทรปี และ θ เป็นมุมระหว่างแอนไอโซโทรปีในแกนง่าย และทิศแมกนีไทเซชัน สำหรับความหนาแน่นพลังงานแอนไอโซโทรปีของผลึกแบบลูกบาศก์สามารถเขียนได้เป็น

$$E_{ani} = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) \quad (8)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่พลังงานแอนไอโซโทรปี ส่วน α_1, α_2 และ α_3 คือ ค่าโคไซน์ของมุมระหว่างเวกเตอร์แมกนีโตเซชันกับแกนของผลึกลูกบาศก์ทั้งสามแกน

โคบอลต์โครงสร้างแบบ HCP มีคริสตัลไลน์แอนไอโซโทรปีแกนเดียว โดยมีแกนง่ายในทิศ [0001] และแกนยากในทิศ [1000] $K_1 = 4.1 \times 10^5$ J/m และ $K_2 = 1.5 \times 10^5$ J/m

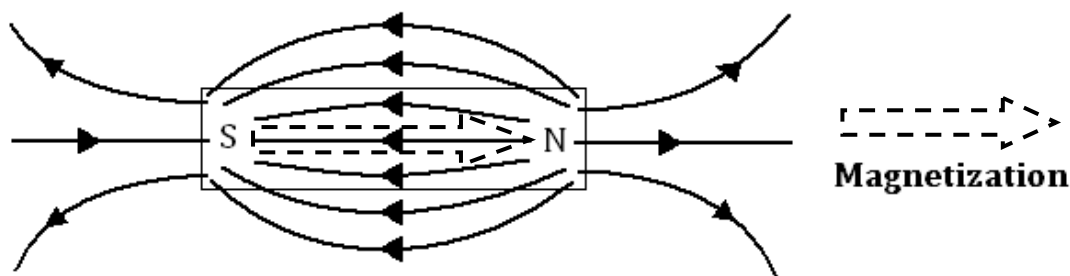
4.1.4 พลังงานแมกนีโตสแตติก (Magnetostatic energy)

ในอนุภาคแม่เหล็กใดๆ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมใกล้เคียงกันภายในอนุภาคจะหักล้างกันเอง ในขณะที่บริเวณผิวของอนุภาคแม่เหล็กจะมีประจุแม่เหล็กกระจายอยู่ โดยในอนุภาคแม่เหล็กทรงกลมสม่ำเสมอ การกระจายของประจุที่ครึ่งทรงกลมด้านหนึ่งจะเป็นบวกและอีกด้านจะเป็นลบ ประจุที่เกิดตรงผิวหน้าเหล่านี้เรียกว่า ประจุแม่เหล็กที่ผิว (magnetic surface charges) ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขององค์ประกอบตั้งฉากของแมกนีโตเซชันที่ผิว เกิดเป็นสนามแม่เหล็กภายในที่จะมีทิศตรงข้ามกับแมกนีโตเซชัน เรียกว่าสนามดีแมกนีไทซ์ (demagnetizing field) การกระจายของประจุแบบนี้ทำให้เกิดเป็นพลังงานแมกนีโตสแตติก มีค่าเท่ากับปริมาณของงานที่ขั้วแม่เหล็กใช้ในการต้านสนามแม่เหล็กภายในที่ผิวของแม่เหล็ก

แม่เหล็กจะสร้างโดเมนแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเพื่อลดพลังงานแมกนีโตสแตติกให้ต่ำที่สุด โดยโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลง สนามดีแมกนีไทซ์จึงในแต่ละโดเมนก็จะเล็กลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นการลดพลังงานแมกนีโตสแตติก พลังงานแมกนีโตสแตติกเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของขนาดต่อสมบัติแม่เหล็กในโครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็ก และยังสามารถอธิบายได้ในรูปของแอนไอโซโทรปีรูปร่าง

4.2 แอนไอโซโทรปีรูปร่าง (Shape anisotropy)

สำหรับแม่เหล็กที่มีรูปทรงกลม สนามแม่เหล็กภายนอกที่เหมือนกันจะสามารถแมกนีไทซ์ในขนาดเดียวกันในทิศใดๆ แต่หากไม่เป็นทรงกลม จะแสดงปรากฏการณ์ของแอนไอโซโทรปีรูปร่างที่แมกนีโตเซชันไปตามแกนยาวกว่าแกนสั้น ที่พลังงานแมกนีโตสแตติกของแมกนีโตเซชันตามแกนยาวจะต่ำกว่าตามแกนสั้น



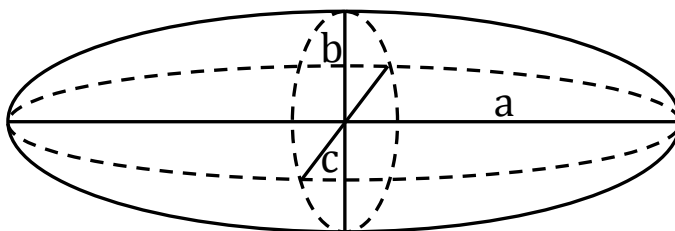
ภาพที่ 12 สนามแม่เหล็กภายนอกแท่งแม่เหล็ก ที่ออกจากขั้วเหนือและไปจบที่ขั้วใต้ และสนามแม่เหล็กภายในจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ ที่พยายามจะลดการแมกนีไตซ์ หรือดีแมกนีไตซ์ของวัสดุจากการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก

พลังงานแมกนีโตสแตติกเปลี่ยนแปลงเนื่องจากรูปร่างสามารถอธิบายได้โดย ให้พิจารณาแท่งแม่เหล็กสี่เหลี่ยมตามภาพที่ 12 ซึ่งถูกแมกนีไตซ์โดยสนามภายนอกจากซ้ายไปขวา ต่อมาประจุที่ผิวจะปรากฏขึ้นที่ปลายทั้งสองด้าน ขั้วเหนือ (N) จะเกิดที่ปลายด้านขวา และขั้วใต้ (S) ที่ปลายทางด้านซ้าย สนามแม่เหล็กจึงพุ่งออกจากขั้วเหนือ และจบลงที่ขั้วใต้ ประจุที่ผิวจะสร้างสนามแม่เหล็กภายในแท่งซึ่งจะชี้จากขั้วเหนือไปขั้วใต้ สนามที่เกิดภายในนี้จะพยายามดีแมกนีไตซ์ในทิศแมกนีโตเซชันสวนทิศกับสนามภายนอก ซึ่งก็คือสนามดีแมกนีไตซ์ $\vec{H}_d$ กระทำในทิศตรงกันข้ามกับทิศการแมกนีโตเซชัน $\vec{M}$ และขนาดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแมกนีโตเซชันดังสมการที่ 9

$$\vec{H}_d = -N_d \vec{M} \quad (9)$$

เมื่อ N_d คือค่าแฟกเตอร์หรือสัมประสิทธิ์ดีแมกนีโตเซชัน ซึ่งขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ และสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องสำหรับรูปทรงคล้ายทรงรีเท่านั้น (สนามดีแมกนีไตซ์และแมกนีโตเซชันสม่ำเสมอผ่านตลอดทั้งปริมาตรทรงรี และความสม่ำเสมอนี้สามารถเกิดได้ในทรงรีเท่านั้น) ดังนั้นพลังงานแมกนีโตสแตติก (E_{ms}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{ms} = H_d M = N_d M^2 \quad (10)$$



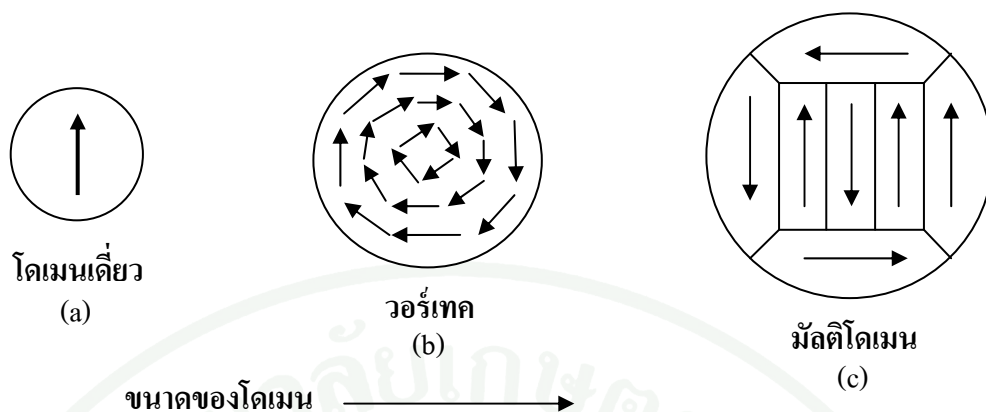
ภาพที่ 13 ทรงรีทั่วไปซึ่งมีสามแกน $2a$, $2b$ และ $2c$ แฟกเตอร์ดีแมกนีโตเซชันตามแกนทั้งสามนี้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง

เนื่องจากสนามดีแมกนีโตเซชันตามแกนสั้นจะแรงกว่าตามแกนยาว สนามที่จ่ายให้ตามแกนสั้นจึงมากกว่า ดังนั้นรูปร่างเพียงอย่างเดียวก็สามารถเป็นแหล่งกำเนิดแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก

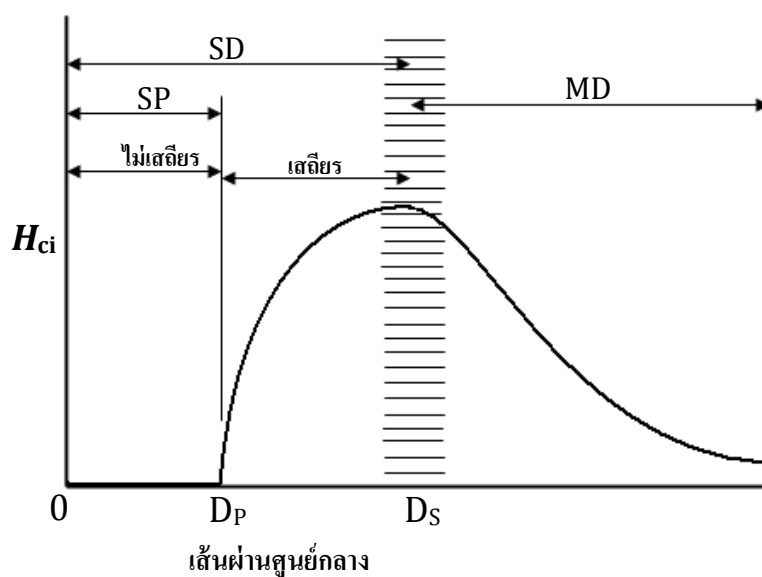
สำหรับฟิล์มบางแม่เหล็ก แฟกเตอร์ดีแมกนีโตเซชัน N_d ตามทิศของความหนาจะมีค่ามาก ดังนั้นแมกนีโตเซชันทั้งหมดจึงวางในแนวระนาบของฟิล์ม เว้นแต่จะมีพจน์พลังงานอื่นๆ ที่ทำให้แมกนีโตเซชันตั้งฉากกับฟิล์ม ที่มากกว่าพลังงานแมกนีโตสแตติก

4.3 รูปแบบของโดเมนสำหรับโครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็ก

การจัดโดเมนขึ้นกับสมดุลของพลังงานแลกเปลี่ยน และพลังงานแมกนีโตสแตติก เช่น ในเกรนขนาดใหญ่พลังงานแมกนีโตสแตติกจะมีขนาดมากกว่าพลังงานในการสร้างผนังโดเมน ขนาดที่องค์ประกอบของการเริ่มเป็นโดเมนเดี่ยว จะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ แอนไอโซโทรปีและโมเมนต์อิ่มตัว (saturation moment: M_s) ความยาวในการแลกเปลี่ยนซึ่งมีค่าเป็น $\lambda_{ex} = \sqrt{A/M_s^2}$ (cgs) เมื่อ A คือค่าคงที่แลกเปลี่ยนเป็นความยาวที่ใช้ในการอธิบายรูปแบบแมกนีโตเซชันในวัสดุแม่เหล็ก ค่าปกติของ λ_{ex} สำหรับโลหะแม่เหล็กเฟอร์ไรต์อยู่ในช่วงประมาณนาโนเมตร (เช่น $\lambda_{ex}(\text{Fe}) = 15 \text{ nm}$ และ $\lambda_{ex}(\text{Co}) = 2 \text{ nm}$) โครงสร้างแม่เหล็กขนาดเล็กที่มีขนาดใกล้เคียงกับ λ_{ex} จะถูกแมกนีโตเซชันสม่ำเสมอ หากว่าขนาดเพิ่มขึ้น การกระจายแมกนีโตเซชันก็จะสม่ำเสมอลดลง และแมกนีโตเซชันรูปแบบอื่นๆ เช่น สถานะดอกไม้มัน (flower state) หรือออร์เทค (vortex) (ภาพที่ 14 b) ก็เกิดขึ้น โดเมนจะก่อตัวเป็นหลายโดเมน (ภาพที่ 14 c) หรือเป็นองค์ประกอบที่ใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 14 แผนภาพรูปแบบการแมกนีไทเซชัน เมื่อขนาดของโดเมนเพิ่มขึ้น แมกนีไทเซชันเปลี่ยนจากสถานะ(ก)โดเมนเดี่ยวที่แมกนีไทเซชันทิศเดียว เป็นแมกนีไทเซชันสมำเสมออ่อนลง มีรูปแบบเหมือน (ข) สถานะวอร์เทค และสุดท้ายเป็น (ค) สถานะหลายโดเมน (multi domain)



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อสถานะทางแม่เหล็กของวัสดุ โดย SP คือสถานะซูเปอร์พาราแมกเนติก, SD คือ โดเมนเดี่ยว และ MD คือ หลายโดเมน

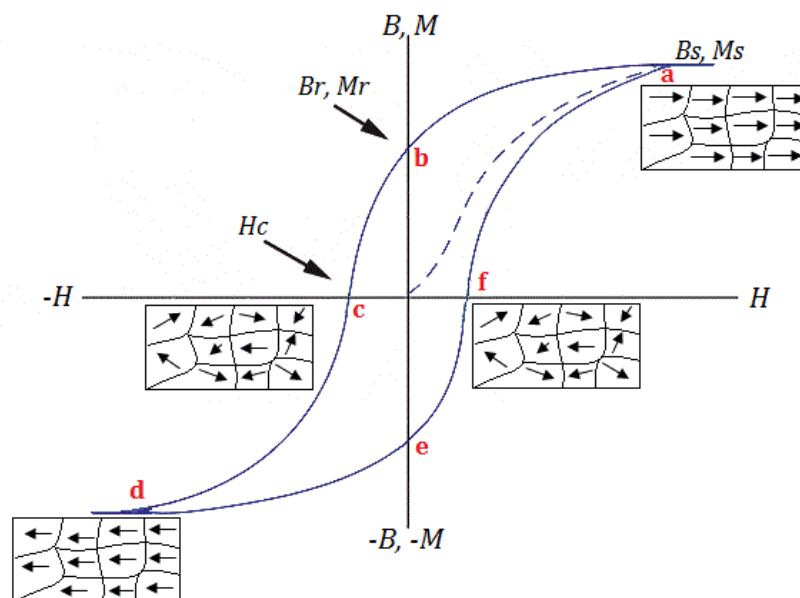
ที่มา: Cullity *et al.*, 2009: 361

สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมาก นั้นหมายถึงไม่มีผนังโดเมน จึงเป็นโดเมนเดี่ยว จำนวนอะตอมของโดเมนเดี่ยวจะมีน้อยกว่า 1000 อะตอมตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดที่ถูกพิจารณาว่าเป็นโดเมนเดี่ยวจะไม่เกินกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤติ D_s ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 10 nm ถึง 100 nm ขึ้นกับชนิดของวัสดุ โดเมนเดี่ยวจะมีทิศของโมเมนต์แม่เหล็กเพียงทิศเดียว และมีค่าสนามลบด้างแม่เหล็กสูงสุด แมกนีโตเซชันของโดเมนเดี่ยวจะอิ่มตัวเสมอ เนื่องจากการถูกแมกนีโตไซด์ได้โดยธรรมชาติ (spontaneously magnetized) ในทิศทางเดียวตลอดทั้งปริมาตร แมกนีโตเซชันของโดเมนเดี่ยวจะขึ้นกับการหมุนของสปิน เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความหนาเพิ่มขึ้นสถานะทางแม่เหล็กอาจเปลี่ยนเป็นสถานะอื่น เช่น วอร์เทค ที่แมกนีโตเซชันจะหมุนวนเป็นวงกลม เนื่องจากการเหนี่ยวนำของพลังงานแลกเปลี่ยนที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อขนาดใหญ่พอที่จะเปลี่ยนสถานะเป็นหลายโดเมน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแมกนีโตเซชันจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน และสำหรับวัสดุบางชนิด ค่าสนามลบด้างแม่เหล็กจะขึ้นกับขนาด และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า D_p วัสดุจะแสดงสถานะเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกซึ่งจะมีสนามลบด้างแม่เหล็กเป็นศูนย์ เนื่องจากความร้อนสามารถเอาชนะพลังงานแมกนีโตสแตติกจนเกิดการกลับทิศแมกนีโตเซชันได้ด้วยตัวเอง ในภาพที่ 15 แสดงค่าสนามแม่เหล็กลบด้างของวัสดุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

แบบจำลองการสลับแมกนีโตเซชันเชิงทฤษฎีสำหรับอนุภาคโดเมนเดี่ยวที่แท้จริง คือแบบจำลองการหมุนแบบโคอีเรนซ์ โดยในปี 1949 Wohlfarth *et al*, 1949 ตั้งสมมติฐานว่า สปินของอะตอมทั้งหมดในอนุภาคนานกั้นขณะหมุนแมกนีโตเซชัน ซึ่งจะบอกให้ทราบถึงขีดจำกัดสูงสุดสำหรับสนามกลับทิศ (switching field) เนื่องจากการหมุนโคอีเรนซ์เป็นกระบวนการที่มีกำแพงพลังงานที่สูงที่สุด (energy barriers) ซึ่งองค์ประกอบทางแม่เหล็กถูกแบ่งออกเป็นหลายๆ เซล และในแต่ละเซลล์จะพิจารณาว่าแมกนีโตเซชันสม่ำเสมอ การสร้างแบบจำลองตั้งเป้าในการหาสนามเวกเตอร์แมกนีโตเซชันที่ลดพลังงานรวมที่ประกอบด้วย พลังงานแมกนีโตสแตติก พลังงานแลกเปลี่ยน พลังงานแอนไอโซโทรปี และพลังงานชีมาน

4.4 กราฟฮิสเทอรีซิส

สมบัติแม่เหล็กของวัสดุสามารถแสดงได้ด้วยกราฟฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (H) หรือแมกนีโตเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H)



ภาพที่ 16 ตัวอย่างกราฟฮิสเทอรีซิส

กราฟฮิสเทอรีซิสแสดงดังภาพที่ 16 เกิดจากการวัดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ หรือแมกนีโตเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหรือเฟอร์ริกายใต้ความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กให้กับวัสดุแม่เหล็กที่ไม่เคยถูกแมกนีโตเซชันมาก่อนหรืออยู่ในสถานะดีแมกนีโตเซชัน ค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือแมกนีโตเซชันจะเป็นไปตามเส้นประ จนถึงจุด a โดเมนแม่เหล็กทั้งหมดจะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก โดยที่แม้ทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กต่อไปก็ไม่สามารถทำให้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นได้อีก นั่นคือวัสดุแม่เหล็กได้ไปถึงจุดอิ่มตัวทางแม่เหล็ก เรียกว่า สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำอิ่มตัว B_s หรือ แมกนีโตเซชันอิ่มตัว M_s เมื่อลดสนามแม่เหล็กลงไปถึงจุด b ที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ แต่สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือแมกนีโตเซชันยังคงมีค่าอยู่ เรียกว่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำคงค้าง B_r หรือแมกนีโตเซชันคงค้าง M_r ถึงจุดนี้สนามแม่เหล็กจะถูกกลับทิศไปในทางตรงกันข้ามซึ่งทำให้กราฟเคลื่อนมาที่จุด c ที่ซึ่งสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือแมกนีโตเซชันลดลงจนเป็นศูนย์ เป็นจุดที่เรียกว่าสนามลบค้างแม่เหล็ก H_c ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กมีความแรงพอที่จะให้โดเมนทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนทิศจนทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กหรือแมกนีโตเซชันรวมเป็นศูนย์ เมื่อทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กต่อไปในทิศทางลบ วัสดุก็จะไปถึงจะอิ่มตัวอีกครั้งที่จุด d จากนั้นทำการลดสนามแม่เหล็กจนเป็นศูนย์อีกครั้งเพื่อที่จุด e ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างหรือแมกนีโตเซชันคงค้างที่ระดับเดียวกับที่จุด b แต่เป็นทิศที่เป็นลบ ทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กต่อไปจนถึงจุด f ก็จะเป็นจุดที่สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือแมกนีโตเซชันเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่ง จะพบว่ากราฟจะไม่กลับไปจุดกำเนิดเนื่องจากต้องใช้แรงจากสนามแม่เหล็ก

ในการลบล้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือแมกนีโตเซชันที่ตกค้างอยู่ หากเพิ่มสนามแม่เหล็กต่อไปอีก ก็จะกลับไปสู่สถานะอิ่มตัวอีกครั้งจึงจะครบเป็นกราฟฮิสเทอรีซิส

กราฟฮิสเทอรีซิสที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมฮิสเทอรีซิสจะมีความสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้งานของวัสดุแม่เหล็กในเชิงอุตสาหกรรมจริง การวัดความเป็นสี่เหลี่ยมของกราฟฮิสเทอรีซิสจะวัดจากค่าสแควร์เนส (squareness: S) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าแมกนีโตเซชันคงค้างหารด้วยค่าแมกนีโตเซชันอิ่มตัว M_r/M_s

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ศึกษาสัณฐานวิทยาหรือโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอก และพื้นผิวน้ำตัดของโลหะและวัสดุ โดยใช้คลื่นอิเล็กตรอน และบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นลำเล็กๆ ทำได้ภาพที่มีความลึก และความละเอียดสูง โดยมีความละเอียดได้ถึง 0.2 nm กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 3 ระบบ ดังภาพที่ 16 ดังนี้

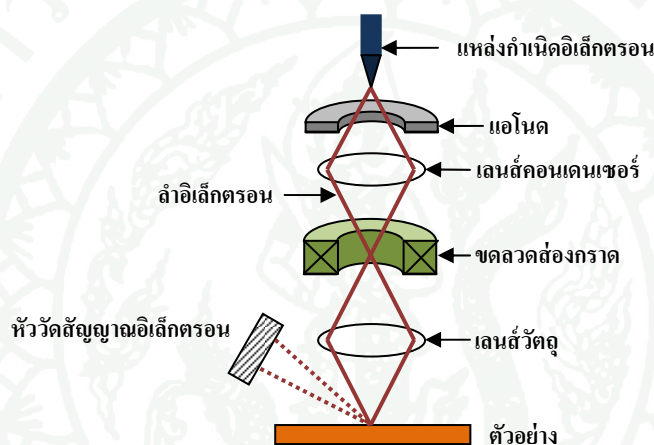
ระบบของลำอิเล็กตรอน ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอน เลนส์คอนเดนเซอร์ เลนส์วัตถุ และขดลวดสำหรับส่องกราด

ปืนอิเล็กตรอนหรือแคโทด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหลายชนิด เช่น แคโทดที่ทำจากโลหะทั้งสแตน แคโทดที่ทำจากแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ แคโทดชนิดหลังสามารถให้อิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นมากกว่า และมีอายุการใช้งานนานกว่าแคโทดที่ทำจากทั้งสแตน

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์เพื่อปรับขนาดลำอิเล็กตรอน โดยลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กมีความเข้มของลำอิเล็กตรอนสูง จึงทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดมาก หลังจากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้ตกลงบนชิ้นตัวอย่าง โดยมีสนามแม่เหล็กจากขดลวดส่องกราดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ใน แนวระดับ

ระบบควบคุมความดันและสุญญากาศ มีไว้เพื่อให้ภายในคอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีสภาพเป็นสุญญากาศ โดยควบคุมให้บริเวณด้านบนมีความดันอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-8} ทอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ลำอิเล็กตรอนถูกอะตอมจากก๊าซต่างๆ ดูกกลืนหรือกระเจิงกลับ

ระบบแปลโครงสร้างและบันทึกภาพ จะประกอบด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน ซึ่งจะเลือกรับสัญญาณที่ต้องการแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณภาพ เมื่อนำไปขยายสัญญาณภาพด้วยเครื่องขยายสัญญาณวิดีโอ แล้วจึงแปลงสัญญาณภาพเป็นภาพบนจอของหลอดรังสีแคโทด หรือจอคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

6. แมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง (vibrating-sample magnetometer; VSM)

แมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ โดยการทำให้ตัวอย่างสั่นในสนามแม่เหล็ก ตัวอย่างที่สั่นจะถูกแมกนีไทซ์โดยสนามแม่เหล็ก เหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวดตัวตรวจวัด ขนาดของการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับโมเมนต์แม่เหล็กของตัวอย่าง ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขดลวด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ ($d\Phi$) ผ่านพื้นที่หน้าตัดของขดลวด สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V = n \frac{d\Phi}{dt} = na \frac{dB}{dt} \quad (11)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนรอบของขดลวด และ a เป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ถ้าหากขดลวดถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กคงที่ จะได้ว่า

$$B = \mu_0 H \quad (12)$$

เมื่อนำตัวอย่างที่มีแมกนีไทเซชัน M เข้ามาในขดลวด จะได้

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (13)$$

ฟลักซ์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น

$$\Delta B = \mu_0 M \quad (14)$$

เมื่อรวมสมการที่ (11) กับ (14) จะได้

$$V dt = -na\mu_0 M \quad (15)$$

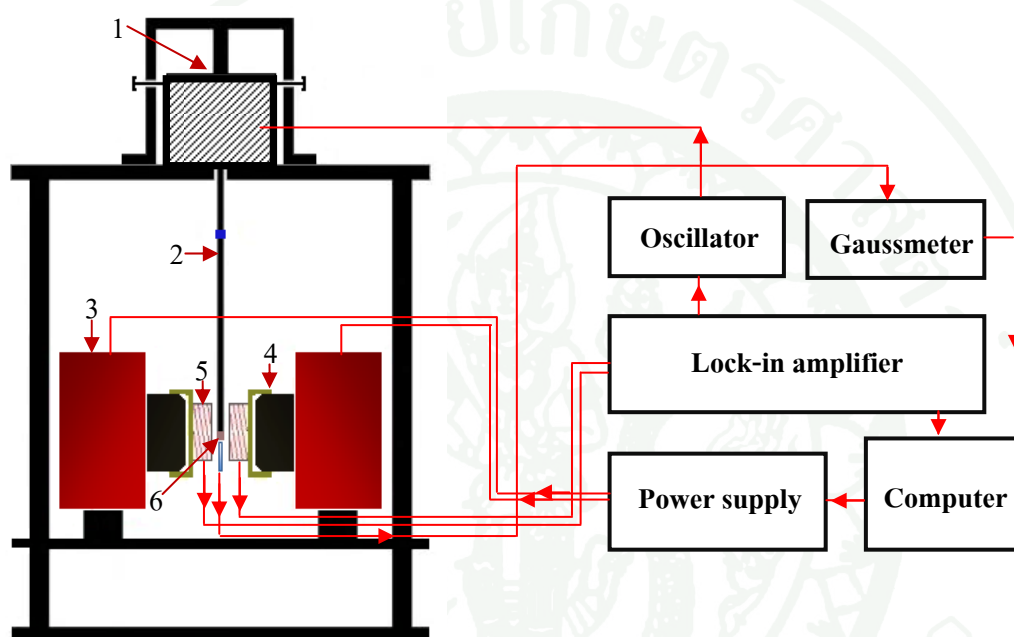
ซึ่งแสดงว่าสัญญาณขาออกของขดลวดแปรผันตรงกับแมกนีไทเซชัน M และเป็นอิสระจากสนามแม่เหล็กที่มีขนาดแมกนีไทเซชัน M

ใน VSM ตัวอย่างมีการสั่นด้วยความถี่ ν และเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ที่สอดคล้องกันในขดลวดรับสัญญาณ (pickup coils) สัญญาณไฟฟ้าขาออกของขดลวดรับสัญญาณมีความถี่ ν เช่นกัน ความเข้มของสัญญาณแปรผันตรงกับโมเมนต์แม่เหล็ก m ของตัวอย่าง แอมพลิจูดการสั่น A และความถี่ โดยความต่างศักย์ระหว่างขั้วของขดลวดจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็ก m ในวัสดุ

ภาพแสดงการทำงานของ VSM เป็นดังภาพที่ 18 ตัวอย่างถูกวางไว้ตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กที่สามารถผลิตสนามแม่เหล็กในการวัด H_0 แท่งตัวอย่างแนวตั้งถูกติดไว้บนที่จับตัวอย่างที่เชื่อมติดกับชุดเครื่องแปรสัญญาณ ซึ่งจะแปลงสัญญาณขับ AC ที่จ่ายจากวงจรขยายสัญญาณหรือออสซิลเลเตอร์ให้กับการสั่นในแนวตั้ง ดังนั้นตัวอย่างก็สั่นในสนามสม่ำเสมอ H_0

ขดลวดที่ติดอยู่กับขั้วแม่เหล็กจะรับสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง สัญญาณ AC ที่สั่นด้วยความถี่ ν จะแปรผันตรงกับขนาดของการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก

สัญญาณ AC นี้แปรผันตรงกับแอมพลิจูด และความถี่การสั่นด้วย การอ่านค่าการเคลื่อนที่จึงทำได้ง่ายๆ โดยวัดแอมพลิจูดของสัญญาณ เทคนิคนี้ใช้ตัวเก็บประจุการสั่นสำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ แอมพลิจูดการสั่น และความถี่การสั่น ในช่วงเดียวกับสัญญาณจากขดลวดรับสัญญาณ เมื่อสัญญาณทั้งสองเกิดในช่วงเดียวกัน จะช่วยกำจัดผลการเคลื่อนไปของแอมพลิจูดและความถี่ของการสั่น ในกรณีนั้นการอ่านค่าก็จะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเท่านั้น



ภาพที่ 18 การทำงานและส่วนประกอบของ VSM คือ (1) เครื่องสั่นเชิงกล (2) แท่งสำหรับสั่นตัวอย่าง (3) แม่เหล็กไฟฟ้า (4) ขั้วแม่เหล็ก (5) ขดลวดรับสัญญาณ (6) ที่ยึดสารตัวอย่าง

อุปกรณ์และวิธีการ

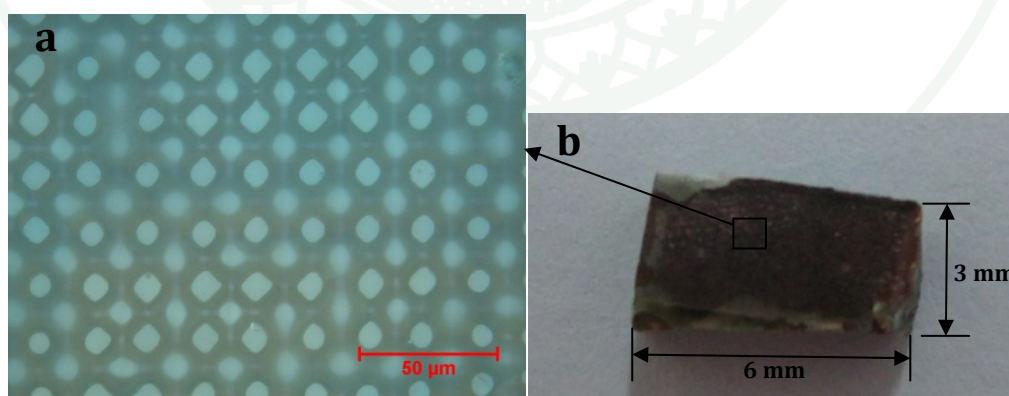
อุปกรณ์

1. วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอน

วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับการสังเคราะห์โดยเทคนิคเอกซ์เรย์-ลิโทกราฟี ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) มีด้วยกันสองแบบดังนี้

1.1 วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา

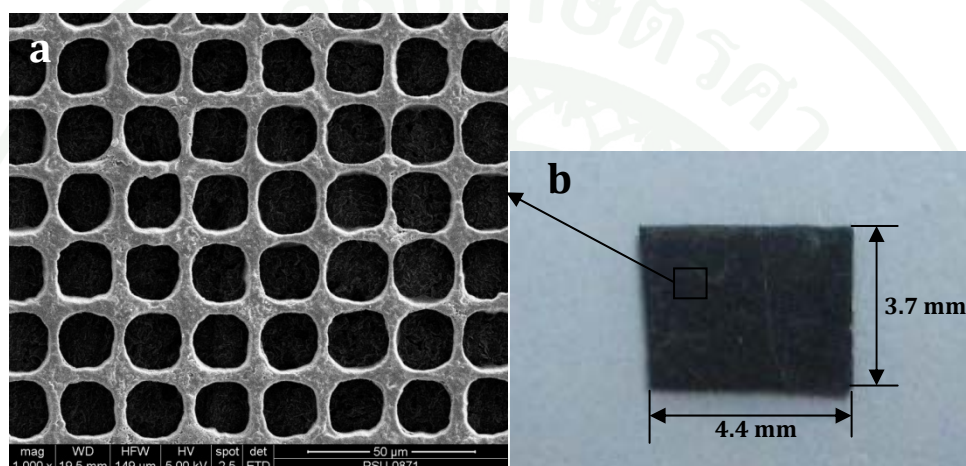
วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาใช้แผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board: PCB) เป็นวัสดุตั้งต้น สร้างกลายเป็นแบบเสาด้วยสารไวแสง SU-8 ดังภาพที่ 19(a) จาก กล้องจุลทรรศน์แสง ที่แสดงโครงสร้างเสาที่สังเคราะห์โดยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี มีการกระจายขนาดและรูปร่างของหน้าตัด โดยขอบจะมนโค้งมีความกว้างที่ส่วนกลางประมาณ $9.6 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างจุดกลางของแต่ละเสาเฉลี่ยเป็น $18.4 \pm 1.7 \mu\text{m}$ และเสามีความสูงระหว่าง $44 - 45 \mu\text{m}$ ขึ้นตัวอย่างมีขนาดโดยประมาณ $3 \times 6 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในภาพที่ 19(b)



ภาพที่ 19 (a) สารไวแสง SU-8 บนแผ่น PCB ที่ผ่านการพัฒนาแล้ว (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (b) ชิ้นตัวอย่างที่มีเสาสารไวแสง

1.2 วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม

วัสดุรองรับที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นวัสดุรองรับ สร้าง หลอดลายเป็นแบบหลุมด้วยสารไวแสง SU-8 ดังภาพที่ 20 จาก SEM ที่แสดงโครงสร้างแบบหลุมที่ สังเคราะห์โดยเทคนิคอิเล็กซ์เรย์ลิโทกราฟี ตัวอย่างมีจำนวน 5 ตัวอย่าง มีขนาดความกว้างของหลุม 11.2 μm ถึง 16.6 μm



ภาพที่ 20 (a) สารไวแสง SU-8 ที่ผ่านการพัฒนาแล้วบนแกรไฟต์ ที่เป็นวัสดุรองรับ (สเกลแสดง ระยะ 50 μm) (b) ขึ้นตัวอย่างที่มีหลุมสารไวแสง

2. เป้าโคบอลต์

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง เป็นเป้าโคบอลต์ (Co) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.250 นิ้ว ของบริษัท Kurt J. Lesker ความบริสุทธิ์ 99.95เปอร์เซ็นต์

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

3.1 อะซิโตน

3.2 ที่ตัดกระจกและถุงมือยาง

3.3 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

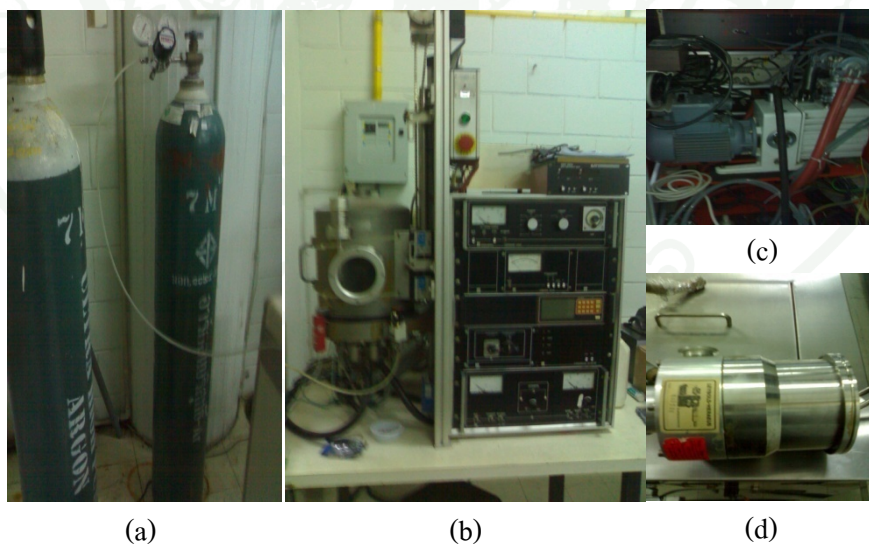
3.4 อุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิก

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดผิวเคลือบตัวอย่าง

- 4.1 กระจกทรายเบอร์ 1200
- 4.2 กระจกสามเหลี่ยมสำหรับขัดตัวอย่าง
- 4.3 กาวขัดตัวอย่าง
- 4.4 อะซิโตน
- 4.5 ก่อจูลทรศน์แสง
- 4.6 ที่บีบเป่าลม

5. เครื่องสปัตเตอริง รุ่น UNIVEX 300

เครื่องสปัตเตอริงผลิตโดยบริษัท Leybold-Heraeus GMBH Gottingen ประเทศเยอรมนี สามารถเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ดีซีสปัตเตอริง และ อาร์เอฟสปัตเตอริง



ภาพที่ 21 ส่วนประกอบของเครื่องสปัตเตอริง (a) ภาชนะสุญญากาศ เกจวัดความดัน และตัวควบคุมการไหลของแก๊ส, (b) ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน, (c) โรตารีปั๊ม, (d) เทอร์โบปั๊ม, (e) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า, (f) เครื่องระบายความร้อน



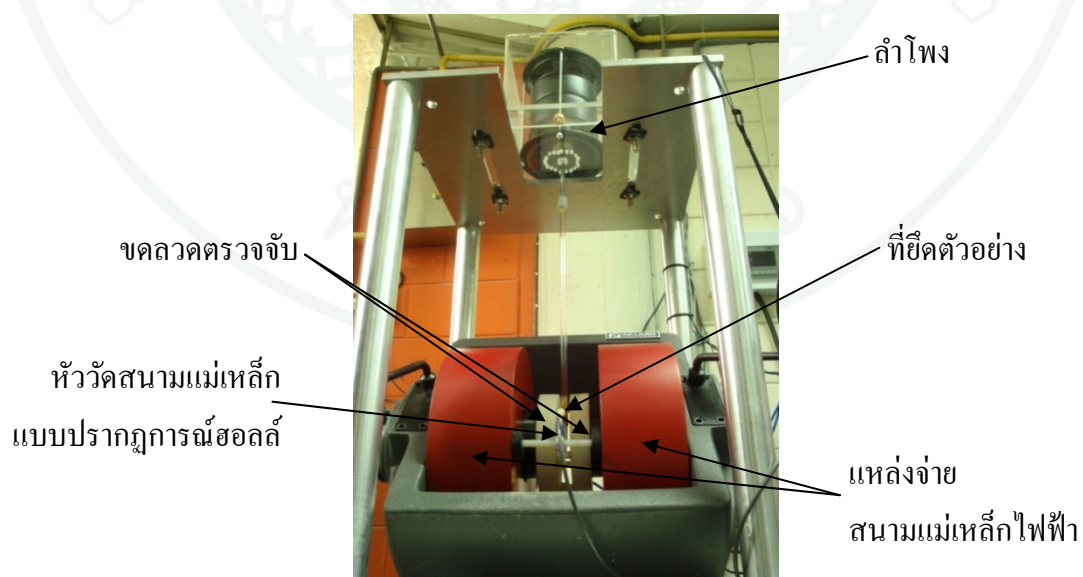
(e)

(f)

ภาพที่ 21 (ต่อ)

6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิคการสั่นตัวอย่าง (vibrating sample magnetometer: VSM)

เครื่อง VSM ภายใต้อานแม่เหล็กสูงสุด 1 T ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก หน่วยปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน



ภาพที่ 22 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิคการสั่นตัวอย่าง

6. กล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสงผลิตโดยบริษัท Nikon รุ่น Eclipse LV100POL ประเทศญี่ปุ่น ของห้อง Liquid Crystals Laboratory ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 กล้องจุลทรรศน์แสง

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope: SEM) รุ่น Quanta 400

เครื่อง SEM ผลิตโดยบริษัท FEI ประเทศสาธารณรัฐจีน รุ่น Quanta 400 ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่



ภาพที่ 24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีการ

1. การเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

1.1 ตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา

1.1.1 ทำความสะอาดผิวหน้าตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาด้วยอะซิโตนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง

1.1.2 ติดตัวอย่างบนแผ่นรองรับตัวอย่างของเครื่องเคลือบฟิล์ม

1.1.3 วางเป้าโคบอลต์บนฐานรองรับ

1.1.4 วางแผ่นรองรับตัวอย่างที่มีตัวอย่างติดไว้เรียบร้อยแล้ว บนที่วางแผ่นรองรับของเครื่องเคลือบฟิล์ม แล้วทำการปั๊มอากาศออกจากเครื่องเคลือบฟิล์ม จนกระทั่งความดันภายในห้องลดลงเหลือประมาณ 10^{-5} ทอร์

1.1.5 ปลดปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ อัตราการไหล 50 SCCM จนกระทั่งความดันภายในมีค่าประมาณ 10^{-3} ทอร์

1.1.6 ทำการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอรिंग โดยใช้กำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 3 นาที

1.1.7 นำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เทคนิค SEM และ VSM ตามลำดับ

1.2 ตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม

1.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้าตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาด้วยอะซิโตน ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง

1.2.2 ติดตัวอย่างบนแผ่นรองรับตัวอย่างของเครื่องเคลือบฟิล์ม

1.2.3 วางเป้าโคบอลต์บนฐานรองรับ

1.2.4 วางแผ่นรองรับตัวอย่างที่มีตัวอย่างติดไว้เรียบร้อยแล้ว บนที่วางแผ่นรองรับของเครื่องเคลือบฟิล์ม แล้วปั๊มอากาศออกจากเครื่องเคลือบฟิล์ม จนกระทั่งความดันภายในห้องลดลงเหลือประมาณ 10^{-5} ทอร์

1.2.5 ปลดปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ อัตราการไหล 33 SCCM จนกระทั่งความดันภายในมีค่าประมาณ 10^{-3} ทอร์

1.2.6 ทำการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสเปดเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า 300 W เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

1.2.7 นำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ และแม่เหล็กด้วยเทคนิค SEM และ VSM ตามลำดับ

2. การขัดผิวเคลือบตัวอย่าง

2.1 ตัดตัวอย่างบนกระจกยึดตัวอย่างด้วยกาว โดยใช้กาวปริมาณน้อย เพื่อความสะดวกเวลานำตัวอย่างออกจากกระจกโดยง่าย

2.2 ขัดตัวอย่างบนกระดาษเบอร์ 1200 เบาๆ

2.3 ขณะทำการขัดตรวจสอบผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงควบคู่กันไป เพื่อดูสภาพผิวหน้าจนกว่าฟิล์มที่เคลือบหลุดออกหมด โดยสังเกตความวาวของฟิล์มเคลือบไม่เหลืออยู่ และระวังไม่ให้รูปแบบถูกทำลายไปด้วย

2.4 ใช้อะซิโตนหยดที่ขอบตัวอย่างเพื่อล้างกาวให้ตัวอย่างหลุดออก

2.5 ใช้ที่บีบเป่าลมทำความสะอาดตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กตัวอย่างด้วยเครื่อง VSM

3.1 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งตัวอย่าง บันทึกค่าน้ำหนักไว้เพื่อใช้วัดค่าแมกนีไทเซชันและกราฟฮิสเทอรีซิส

3.2 นำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้ติดลงบนที่ยึดชิ้นงานตัวอย่างของ VSM

3.3 ปรับที่ยึดชิ้นงานตัวอย่างของ VSM ให้อยู่ในแนวระนาบ หรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กขึ้นกับเงื่อนไขการวัดที่ต้องการ

3.4 ใส่ค่าน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในโปรแกรมการวัด โดยกำหนดเงื่อนไขในการวัดเป็น $\text{Max} = 5$, $\text{Step} = 50$ และ $\text{Average} = 4$ หรือ 1 (สำหรับตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาหรือหลุมตามลำดับ)

3.5 วัดค่าแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก (-5.7 ถึง 5.7 kOe) ภายใต้อุณหภูมิห้อง

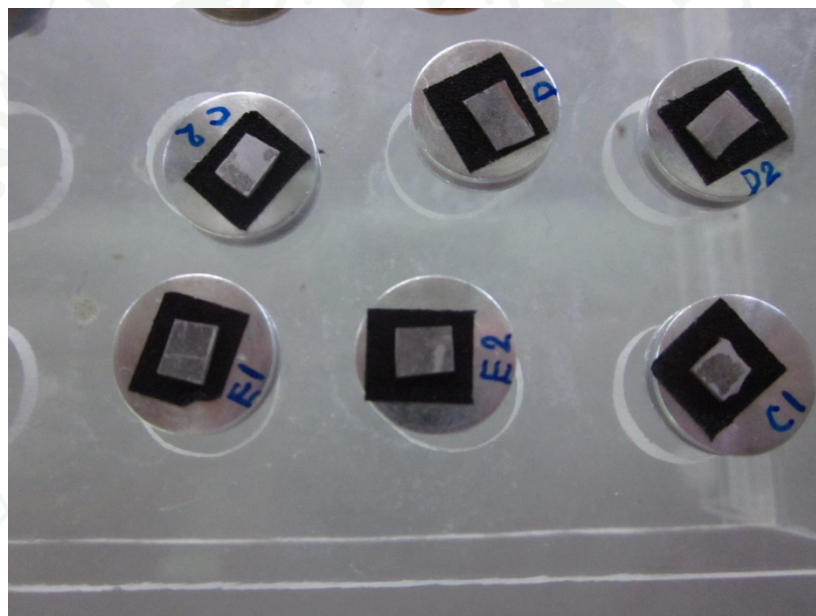
3.6 นำค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้องมาเขียนกราฟความสัมพันธ์สนามแม่เหล็กกับค่าแมกนีไทเซชัน

4. การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM

4.1 ติดชิ้นงานตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง โดยติดชิ้นตัวอย่างให้ราบไปกับแท่นวาง ตัวอย่างหากต้องการศึกษาพื้นผิว หรือติดชิ้นตัวอย่างในแนวตั้ง หากต้องการศึกษาความหนาของฟิล์ม

4.2 นำตัวอย่างเข้าเครื่อง SEM

4.3 ศึกษาสภาพพื้นผิว และความหนาตัวอย่างในระบบสุญญากาศที่กำลังขยายต่างๆ โดยการถ่ายภาพ



ภาพที่ 25 ชิ้นตัวอย่างที่ติดบนแท่นวางตัวอย่างด้วยเทปคาร์บอนสำหรับทดสอบด้วย SEM

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาและสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา และผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาและสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

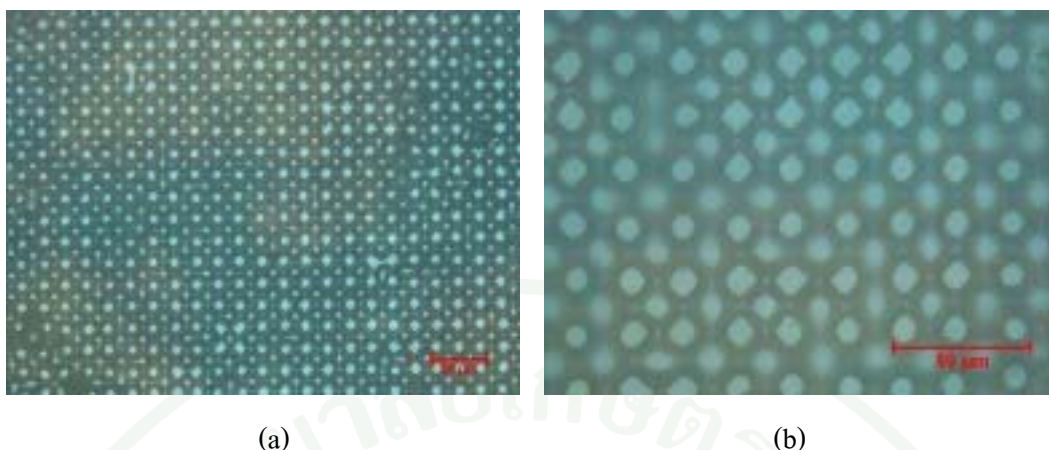
ผลการทดลองของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา

ตัวอย่างที่มีรูปแบบที่แน่นอนแบบเสาถูกเตรียมโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีบนแผ่น PCB โดยส่วนที่เป็นรูปแบบที่แน่นอนถูกเตรียมขึ้นบนพื้นที่ $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ของพื้นที่ทั้งหมดของแผ่น PCB ขนาด $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ โดยประมาณ ในการทดลองได้ทำการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ลงบนชิ้นงานแผ่น PCB ทั้งชิ้นด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอริงที่อุณหภูมิห้องที่เวลาการเคลือบ 3 นาที กำลังในการสปัตเตอริงที่ 200 วัตต์ ความดัน 10^{-5} ทอร์ และความดันอาร์กอนสปัตเตอร์ 10^{-3} ทอร์ แล้วแบ่งชิ้นงานเป็นส่วนที่มีรูปแบบแน่นอน กับส่วนที่เป็นผิวเรียบจากขอบด้านข้างที่ได้รับการเคลือบไปพร้อมกัน โดยตัดเป็นขนาดเท่าๆ กัน เพื่อศึกษาความแตกต่างของสมบัติแม่เหล็กระหว่างฟิล์มแม่เหล็กบนตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาเทียบกับฟิล์มแม่เหล็กต่อเนื่องบนตัวอย่างผิวเรียบ ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยา และสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างเป็นดังนี้

1. ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แสงและ SEM

1.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงก่อนเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก

ลักษณะทางกายภาพโดยรวมของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาก่อนทำการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ส่องกำลังขยายดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงของโครงสร้างแบบเสาที่เป็นระเบียบ มีความสม่ำเสมอ (ภาพที่ 26 (a)) ส่วนที่เป็นเสาคือจุดลายสว่าง คั่นด้วยพื้นที่เข้มของส่วนที่เป็นร่องลึกลงไป เสาแต่ละอันมีการแยกกันอย่างชัดเจน แต่มีความชัดไม่เท่ากัน เนื่องจากกล้องไม่สามารถโฟกัสเสาที่สูงไม่เท่ากันพร้อมกันได้ เสามีลักษณะค่อนข้างกลม หรือเป็นสี่เหลี่ยมมุมโค้งมน (ภาพที่ 26 (b)) มีความคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น โครงสร้างเสาที่เหลื่อมตามที่ออกแบบมา แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างบางส่วน ซึ่งมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการพัฒนาแผ่น PCB ที่มีการชะเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกไปโดยไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาก่อนทำการเคลือบฟิล์ม (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) ภาพที่กำลังขยายต่ำ (b) ภาพที่กำลังขยายสูง

1.2 ภาพถ่ายจาก SEM ภายหลังเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก

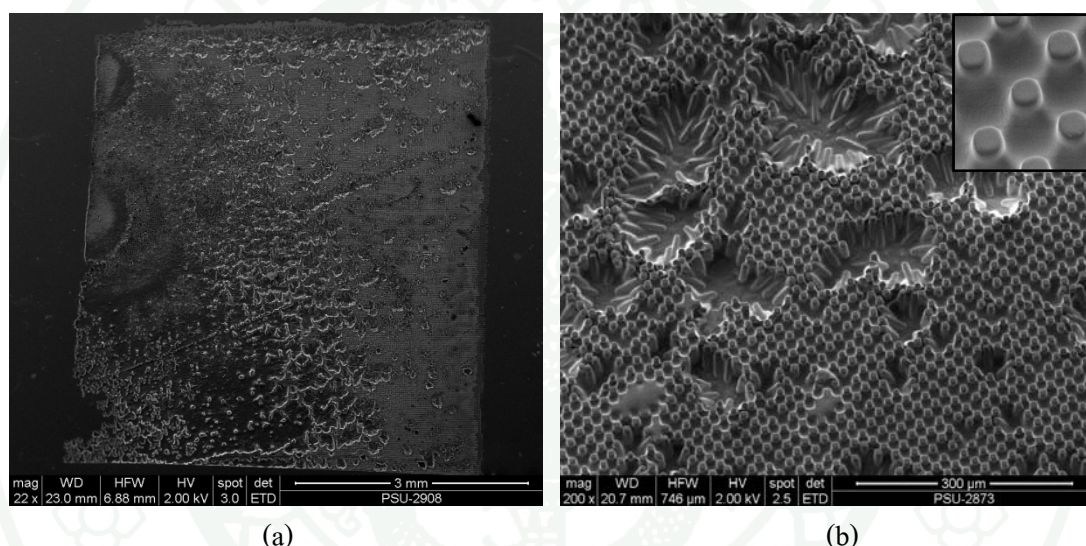
ผลการทดลองจาก SEM เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาหลังจากทำการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กแล้ว โดยแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาลักษณะผิวหน้าและโครงสร้างของตัวอย่าง และศึกษาความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่ได้จากการเคลือบผิว รายละเอียดของผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

1.2.1 ลักษณะพื้นผิว

ลักษณะโดยทั่วไปของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาที่แสดงในภาพที่ 27 เป็นภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยายต่ำเพื่อดูลักษณะโดยรวมของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา หลังจากทำการเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก ภาพที่ได้สอดคล้องกับภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่แสดงให้เห็นถึงความไม่สมบูรณ์บางส่วน โครงสร้างจากภาพที่ 27 (a) โครงสร้างที่ผ่านกระบวนการลิโทกราฟีจะอยู่บริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด $5.4 \times 5.9 \text{ mm}^2$ บริเวณส่วนกลางของภาพ พบว่าพื้นที่เกินครึ่งหนึ่งเกิดเป็นโครงสร้าง โดยอยู่ทางด้านขวาของภาพเป็นส่วนใหญ่ บริเวณด้านซ้ายล่างเป็นโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์และบางจุดคล้ายที่โค้งที่โครงสร้างหลุดออกไป ภาพที่ 27 (b) แสดงภาพที่กำลังขยายประมาณ 200 เท่า บนพื้นที่ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ของโครงสร้างทั้งหมด พบว่าโครงสร้างเสาบางส่วนเกิดการล้ม สาเหตุน่าจะเกิดจากโครงสร้างในบริเวณนั้น ยึดติดกับแผ่น PCB

ได้ไม่แน่นอน เมื่อเกิดแรงคาปิลลารีและการละลายในระหว่างการพัฒนาจึงทำให้เสาล้มลงได้ แต่ก็ยังมี ส่วนที่เป็นเสาที่สมบูรณ์ โดยในรูปเล็กจะแสดงรายละเอียดของเสาที่กำลังขยายสูงขึ้น เสามีความ สมบูรณ์และเป็นระเบียบ

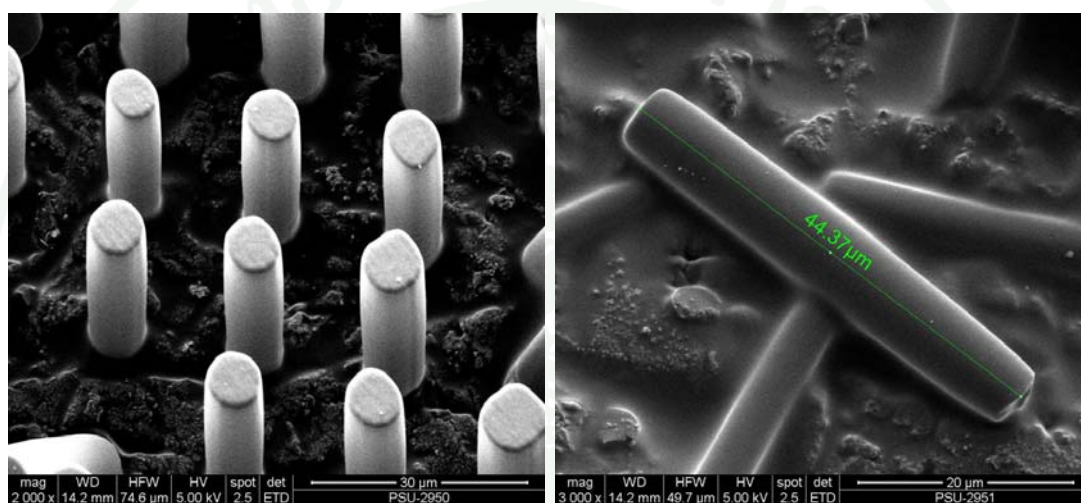
ภาพที่ 27 (a) ยังแสดงส่วนที่เป็นผิวเรียบจากขอบด้านข้างที่ได้รับการเคลือบไป พร้อมกัน เป็นส่วนที่ไม่ได้สร้างเป็นรูปแบบจึงมีผิวเรียบของฟิล์มแม่เหล็กต่อเนื่อง ซึ่งฟิล์มแม่เหล็ก ในบริเวณนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มแม่เหล็กของบริเวณโครงสร้าง ในส่วนของการศึกษา สมบัติแม่เหล็กในส่วนถัดไป



ภาพที่ 27 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะโดยรวมของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาหลังทำการ เคลือบฟิล์ม (a) ภาพที่กำลังขยายประมาณ 22 เท่า (สเกลแสดงระยะ 3 mm) (b) ภาพที่ กำลังขยายประมาณ 200 เท่า (สเกลแสดงระยะ 300 μm) รูปเล็กแสดงรายละเอียดของเสา ที่กำลังขยายสูง

เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นศึกษาบริเวณที่เสาเรียงกันได้ค่อนข้างสมบูรณ์ เพื่อ วิเคราะห์ความสูงและลักษณะของแต่ละเสาให้ชัดเจนขึ้นจากการเพิ่มมุมเอียงในการถ่ายภาพ ดัง แสดงในภาพที่ 28 (a) ฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ที่เคลือบบนเสา และผิวด้านข้างของเสาตัวอย่างมี ลักษณะเรียบ มีความเรียบแบนสูง ส่วนที่เป็นเสาจะมีสีขาวเทาสว่าง และยื่นสูงขึ้นดูมีมิติ แตกต่าง จากส่วนพื้นล่างที่เป็นสีดำอย่างชัดเจน การวัดความสูงจากภาพของเสาที่ล้มนอนอยู่ ซึ่งจะให้ค่า ไกล่เคียงค่าจริงที่สุด พบว่าเสามีความสูงเฉลี่ยเป็น $44.2 \pm 1.3 \mu\text{m}$ เป็นโครงสร้างระดับที่มีอัตราส่วน

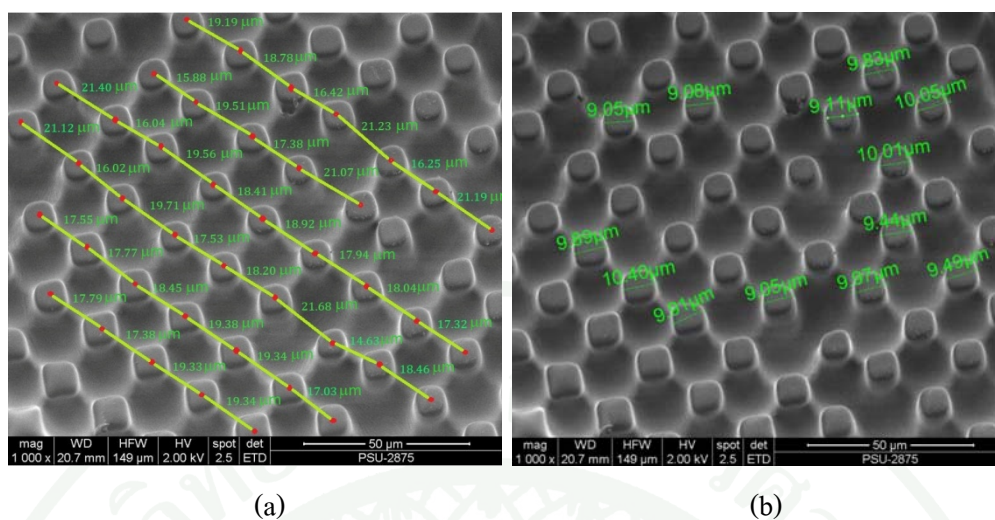
ระหว่างความสูงกับความกว้างสูง (ภาพที่ 28 (b)) จากภาพที่ 29 รูปแบบของเสามีความเป็นระเบียบค่อนข้างมาก จะพบการกระจายขนาดและรูปร่างของหน้าตัด โดยขอบจะโค้งมนมีความกว้างที่ส่วนกลางประมาณ $9.6 \pm 0.5 \mu\text{m}$ เมื่อลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดกลางของหน้าตัดในแต่ละแถว จะไม่ได้เส้นตรง แสดงถึงความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งของเสา ระยะห่างระหว่างเสาคู่เสาคู่ในแนวทแยงจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของเสาเป็น $18.4 \pm 1.7 \mu\text{m}$ ความสูงและระยะห่างของเสามีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กจากเสาข้างเคียง และจากสารแม่เหล็กบนพื้นด้านล่าง (Adeyeye *et al.*, 1997)



(a)

(b)

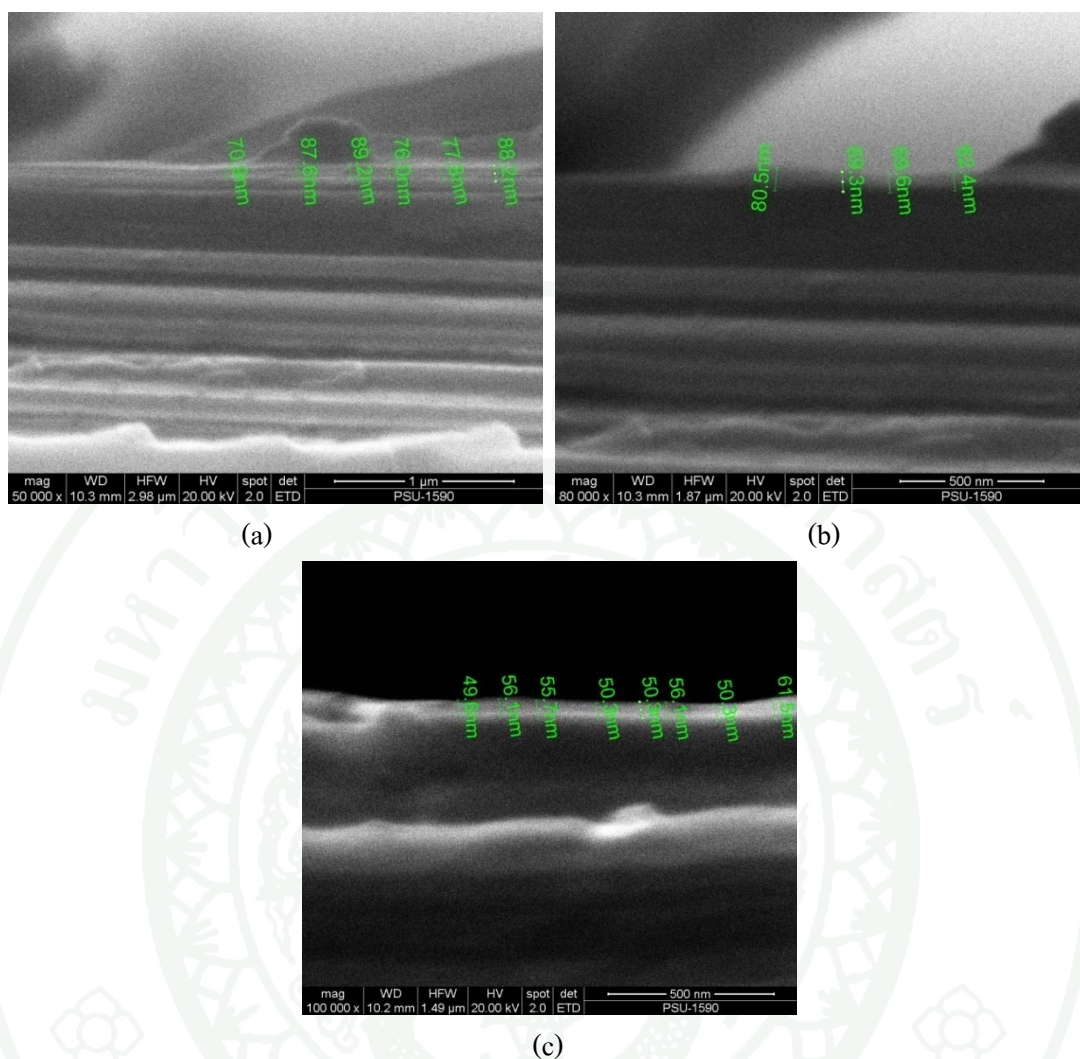
ภาพที่ 28 ภาพจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ ที่เคลือบบนแผ่น PCB ของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา (สเกลแสดงระยะ $30 \mu\text{m}$ (a) และ $20 \mu\text{m}$ (b)) (a) ภาพมุมเอียงของโครงสร้างเสา (b) ภาพโครงสร้างเสาที่ลึ้มสามารถใช้วัดความยาวได้



ภาพที่ 29 ภาพจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ที่เคลือบบนแผ่น PCB ของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสา (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) แสดงระยะระหว่างเสา (b) แสดงความกว้างของเสา

1.2.1 การวัดความหนาของฟิล์มโคบอลต์จากการเคลือบ

เพื่อศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ ได้เทียบกับการถ่ายภาพในแนวตัดขวางของตัวอย่างที่เคลือบโคบอลต์ด้วยเงื่อนไขเดียวกันบนกระจก เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์มดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าการเคลือบด้วยเวลา 3 นาที ทำให้ได้ฟิล์มบางระดับนาโนเมตร ที่มีความหนาประมาณ $70 \pm 7 \text{ nm}$ (ภาพที่ 30 (a)), $82 \pm 8 \text{ nm}$ (ภาพที่ 30 (b)) และ $54 \pm 4 \text{ nm}$ (ภาพที่ 30 (c)) นั่นคือจากภาพทั้งสาม ฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์มีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ โดยมีความหนาอยู่ในช่วงตั้งแต่ 50 nm ถึง 80 nm



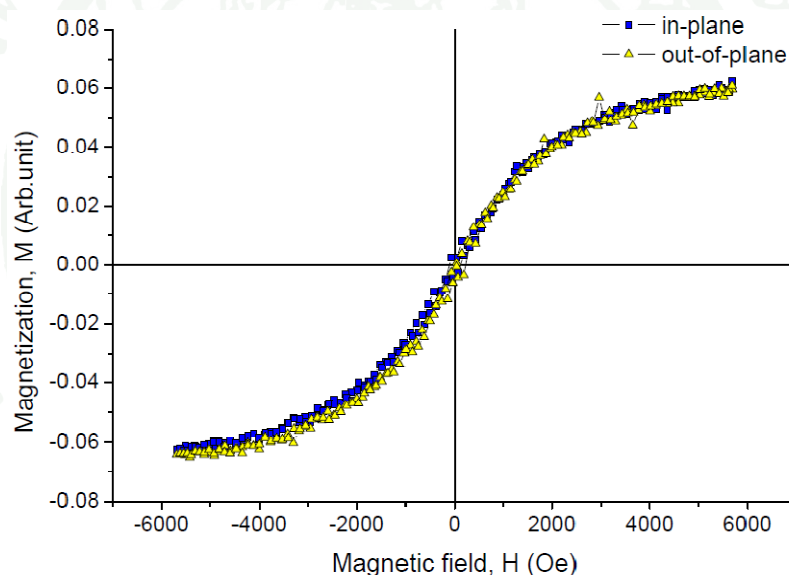
ภาพที่ 30 ภาพตัดขวางจาก SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์ที่เคลือบด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอริงที่อุณหภูมิห้องเวลาการเคลือบ 3 นาที กำลังในการสปีดเตอริงที่ 200 วัตต์ ความดัน 10^{-5} ทอร์ และความดันอาร์กอนสปีดเตอริง 10^{-3} ทอร์ สเกลแสดงระยะ (a) 1 μm , (b) และ (c) 500 nm

2. ผลการศึกษาสมบัติแม่เหล็กจากเครื่อง VSM

การวัดด้วย VSM ให้สนามแม่เหล็กจากทางบวกไปทางลบและย้อนกลับจนครบเป็นวง (ระหว่าง ช่วง -5.7 ถึง 5.7 kOe) เพื่อศึกษากราฟฮิสเทอรีซิสของขึ้นตัวอย่างในแนวระนาบ (in-plane) และตั้งฉาก (out-of-plane) กับฟิล์มบางโคบอลต์ โดยทำการวัดสมบัติแม่เหล็กของทั้งฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ที่เคลือบบนตัวอย่างผิวเรียบเป็นฟิล์มต่อเนื่อง และตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอน

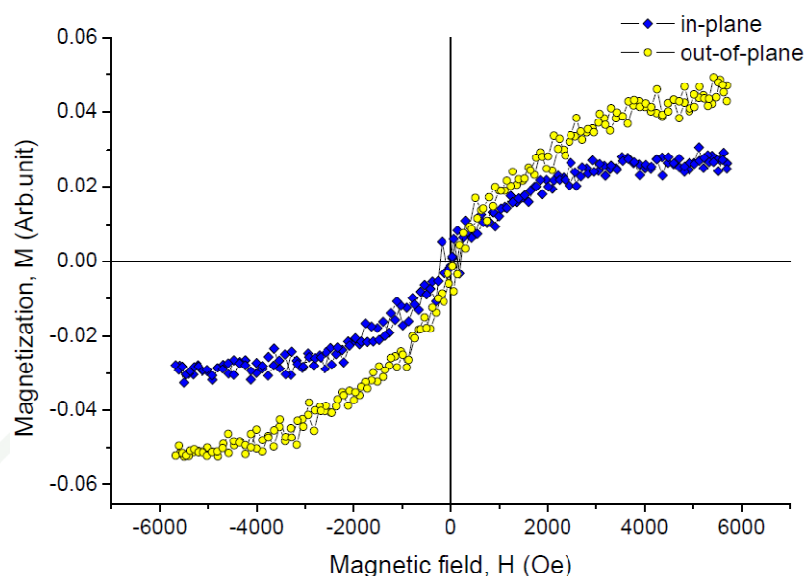
แบบเสา ผลการทดลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบกันระหว่างสนามแม่เหล็กต่างทิศเมื่อใช้ตัวอย่างเดียวกัน และเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่แตกต่างกันในสนามทิศเดียวกัน

ภาพกราฟฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างฟิล์มต่อเนื่องที่วางในแนวตั้งฉาก และแนวขนาน กับสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 31 แมกนีไทเซชันมีอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงสนามที่ต่ำกว่า 2000 Oe แต่เมื่อสนามสูงขึ้นไปอัตราจะช้าลงและเริ่มเข้าใกล้แมกนีไทเซชันอิ่มตัว ซึ่งต้องใช้สนามสูงกว่าในการทดลองนี้ จึงจะไปถึงแมกนีไทเซชันอิ่มตัวที่สมบูรณ์ (complete saturation magnetization) กราฟฮิสเทอรีซิสแสดงความเป็นแม่เหล็กแบบซอฟต์แวร์ที่แมกนีไทซ์และดีแมกนีไทซ์ได้โดยสนามแม่เหล็กค่าน้อยๆ (ฮิสเทอรีซิสน้อย) โดยค่าแมกนีไทเซชันของทั้งสองแนวมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างฟิล์มต่อเนื่องมีความเป็นไอโซโทรปีแม่เหล็ก



ภาพที่ 31 กราฟฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างฟิล์มโคบอลต์ต่อเนื่อง เปรียบเทียบสนามแนวตั้งฉากกับขนาน

ภาพที่ 32 แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสของฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์บนตัวอย่างรูปแบบเสา ที่วางในแนวขนานและตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ในสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉาก แมกนีไทเซชันมีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงที่สนามน้อยกว่า 2000 Oe ค่าแมกนีไทเซชันเริ่มอิ่มตัวที่สนามสูงกว่า 3000 Oe แต่ยังสูงไม่ถึงแมกนีไทเซชันอิ่มตัวในสนามแม่เหล็กสูงสุดของการทดลองนี้ ค่าแมกนีไทเซชันสูงสุดสูงกว่าการวัดในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กเกือบสองเท่า นอกจากตัวอย่างมีค่าแมกนีไทเซชันต่ำในสนามแนวขนาน ยังเกิดการกระตุกของเส้นกราฟในบางช่วง การที่แมกนีไทเซชันในสนามทั้งสองทิศทางมีความแตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนมีแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก



ภาพที่ 32 กราฟฮิสเทอรีซิสของตัวอย่างรูปแบบเสา เปรียบเทียบสนามแนวตั้งฉากกับขนาน

ในสนามแม่เหล็กทั้งสองทิศทาง แมกนีไตเซชันของตัวอย่างที่เป็นฟิล์มต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่าในฟิล์มของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนบนเสา ซึ่งสาเหตุเกิดจากขนาดของโดเมนในฟิล์มต่อเนื่องมีขนาดใหญ่กว่า ในขณะที่สนามในแนวที่แตกต่างกันจะไม่ค่อยมีผลต่อค่าแมกนีไตเซชันของตัวอย่างฟิล์มต่อเนื่อง แสดงว่าการจัดโมเมนต์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวขนานของฟิล์มแบบต่อเนื่องมีสัดส่วนใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฟิล์มบนตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาจะมีแมกนีไตเซชันไม่เท่ากันในแนวของสนามที่แตกต่างกัน โดยสนามในแนวตั้งฉากกับตัวอย่างมีแมกนีไตเซชันสูงกว่าสนามที่ให้ในแนวขนานกับตัวอย่าง นั่นคือเมื่อฟิล์มแม่เหล็กถูกจำกัดพื้นที่ให้มีขนาดเล็กลงไม่เป็นฟิล์มต่อเนื่อง การจัดโมเมนต์แม่เหล็กในโดเมนจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวฟิล์มแม่เหล็กมากกว่าในแนวขนาน ทำให้ฟิล์มแม่เหล็กบนตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบเสาความเป็นแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก

ตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม

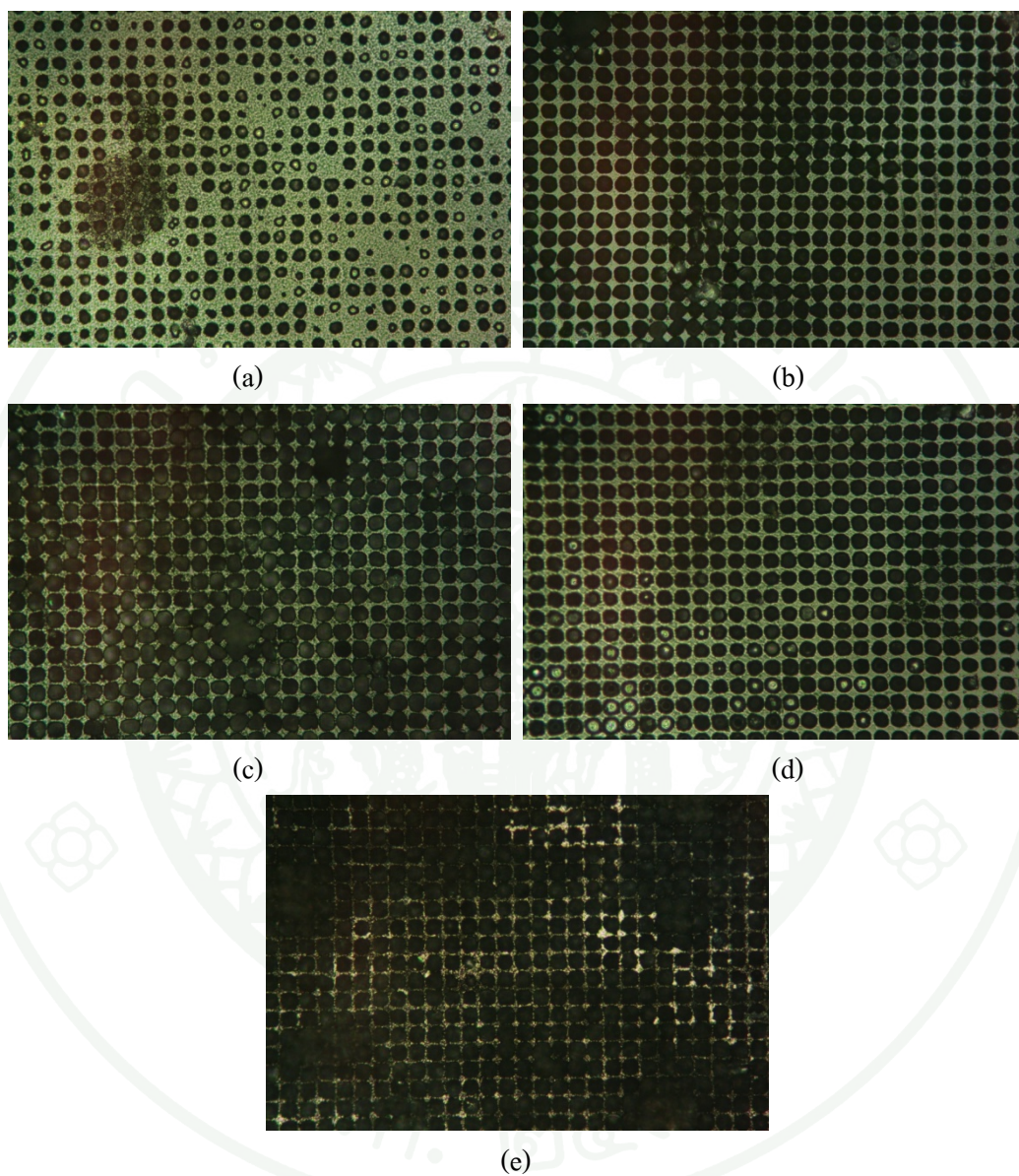
ตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมในงานวิจัยนี้มีจำนวน 5 ตัวอย่าง ตามขนาดของหลุมเรียงจากเล็กไปใหญ่ คือ A, B, C, D และ E แต่ละชิ้นตัวอย่างมีขนาดพื้นที่ทั้งหมดเป็น $3.5 \times 6.4 \text{ mm}^2$, $3.9 \times 4.95 \text{ mm}^2$, $3.7 \times 3.8 \text{ mm}^2$, $3.9 \times 5.4 \text{ mm}^2$ และ $3.7 \times 4.4 \text{ mm}^2$ ตามลำดับ การศึกษาตัวอย่างได้แบ่งเป็น 2 ครั้งคือ ครั้งแรกตัวอย่างที่ได้ทำการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์แล้ว ถูกนำไปทดสอบเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ และสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM ซึ่งฟิล์มโคบอลต์จากการสปัตเตอร์จะเคลือบลงไปบนผิวหน้าของตัวอย่างทั้งหมดและในหลุม ในครั้งที่สอง ตัวอย่างที่เคลือบถูกนำไปขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดฟิล์มโคบอลต์ด้านบนผิวหน้าออก เพื่อให้เหลือโคบอลต์เฉพาะในหลุมเท่านั้น แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยา และสมบัติแม่เหล็ก อีกครั้ง โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แสงและเครื่อง SEM

1.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงก่อนเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แสงใช้ศึกษาลักษณะทางกายภาพทั่วไปของโครงสร้างหลุมบนตัวอย่าง โดยภาพที่ 33 เป็นภาพถ่ายที่กำลังขยายต่ำให้เห็นลักษณะภาพรวมของตัวอย่างบนพื้นที่ประมาณ 27×18 หลุม โครงสร้างหลุมโดยทั่วไปของตัวอย่างก่อนเคลือบฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ปรากฏเป็นบริเวณที่เป็นจุดมืด และบริเวณสว่างคือผิวหน้าของตัวอย่าง หลุมส่วนใหญ่มีสองลักษณะคือ ค่อนข้างกลมและสี่เหลี่ยมมุมมน มีส่วนที่เป็นจุดบัพพร้อมบ้าง โดยในตัวอย่าง A (ภาพที่ 33 (a)) บริเวณสว่างซึ่งเป็นผิวหน้าจะมีค่อนข้างมาก เนื่องจากหลุมมีขนาดเล็ก ส่วนที่คั่นหลุมแต่ละหลุมให้แยกจากกันจึงค่อนข้างกว้าง มีบางส่วนแสดงการยุบตัวของโครงสร้าง ในตัวอย่าง D (ภาพที่ 33 (d)) เกิดจุดสว่างบางบริเวณซึ่งน่าจะเป็นลักษณะของหลุมที่มีความลึกไม่มาก แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง ในตัวอย่าง B, C, และ E (ภาพที่ 33 (b), (c) และ (e)) เกิดบริเวณที่มีความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง ที่ทำให้หลุมบางส่วนเชื่อมต่อกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของตัวอย่าง B, C, D และ E เป็นพื้นที่ของหลุม สำหรับตัวอย่างที่มีหลุมขนาดใหญ่ ส่วนที่เป็นพื้นผิวหน้าจึงมีน้อยกว่าบริเวณที่เป็นหลุม และผนังที่กั้นแต่ละหลุมออกจากกันค่อนข้างบางกว่า โดยจะเห็นได้ชัดในตัวอย่าง E ที่หลุมมีขนาดใหญ่ที่สุด ทำให้ส่วนที่เป็นผนังกั้นแต่ละหลุมบางที่สุด และภาพที่ได้มีความไม่ชัดเจนในหลายบริเวณ เนื่องจากความสูงที่ไม่เท่ากันของพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมยังคงมีการจัดเรียงที่เป็นระเบียบอยู่มาก และขนาดของหลุมยังมี

ความใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ โดยตัวอย่าง A, B, C, D และ E มีความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่าง ประมาณ 23, 16, 20, 15 และ 22 เปอร์เซ็นต์ของหลุมทั้งหมด ตามลำดับ



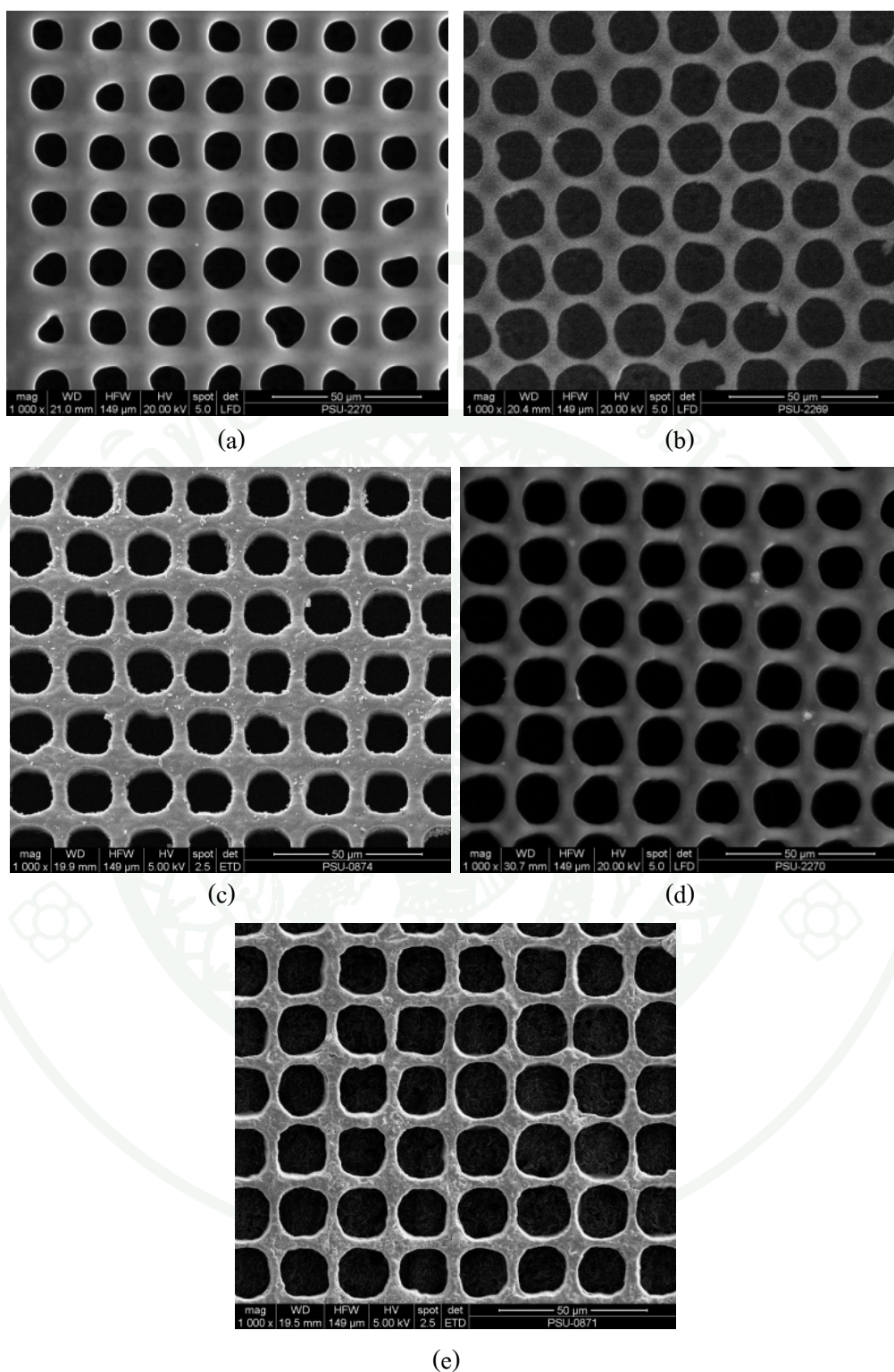
ภาพที่ 33 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E บนพื้นที่ประมาณ 27×18 หลุม

1.2 ภาพ SEM

ภาพจาก SEM แสดงสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมที่เคลือบฟิล์มแม่เหล็กแล้ว (as-coated) และหลังจากขัดฟิล์มแม่เหล็กบริเวณผิวหน้าออก (polished) โดยแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ศึกษาลักษณะผิวหน้าและโครงสร้างของตัวอย่าง และศึกษาความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่ได้จากการเคลือบผิว รายละเอียดของผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมหลังจากการเตรียมด้วยเทคนิคอิเล็กซ์เรย์ลิโทกราฟีเป็นดังภาพที่ 34 ซึ่งแสดงให้เห็นรูปแบบหลุมที่สร้างขึ้นบนชั้น SU-8 บนวัสดุรองรับแกรไฟต์ ส่วนสีดำคือหลุมที่ได้จากการสร้างรูปแบบบนชั้น SU-8 ซึ่งจะพบว่าในแต่ละชิ้นงานเอง หลุมมีขนาดแตกต่างกัน ทำการวัดขนาดของหลุมบนพื้นที่ $100 \times 100 \mu\text{m}$ จากภาพที่ 34 ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ 0.04 ถึง 0.07 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ตัวอย่างทั้งชิ้น วัดความกว้างตรงกลางของหลุมจำนวน 36 หลุม เพื่อหาค่าขนาดหลุมเฉลี่ย ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 1 ซึ่งขนาดที่แตกต่างกันตั้งแต่ $11.2 \mu\text{m}$ ถึง $16.6 \mu\text{m}$ เป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการพัฒนาตัวอย่าง ส่วนระยะห่างระหว่างหลุมจากขอบถึงขอบตอนกลางมีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ $8.7 \mu\text{m}$ ถึง $3.1 \mu\text{m}$ นั่นคือความหนาของผนังที่กั้นแต่ละหลุมของตัวอย่างที่มีหลุมขนาดเล็กจะหนากว่าตัวอย่างที่มีหลุมขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม รูปแบบของหลุมยังคงมีการจัดเรียงที่ค่อนข้างเป็นแนวลำดับที่ดี จากตารางที่ 1 ระยะห่างในแนวทแยงจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของตัวอย่าง A, B, C, D และ E มีค่าประมาณ $28 \mu\text{m}$ ใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสม่ำเสมอของตัวแม่แบบที่ใช้ในการสร้างรูปแบบซึ่งเป็นแม่แบบอันเดียวกัน ซึ่งทำเป็นตารางหลุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}$ ตัวอย่างจึงมีความสมมาตรกัน แต่จากกระบวนการพัฒนาตัวอย่างที่ทำให้ขนาดของหลุมแตกต่างกัน โดยความลึกของหลุมประมาณค่าเป็น $50 \mu\text{m}$ เท่ากับความหนาของชั้น SU-8

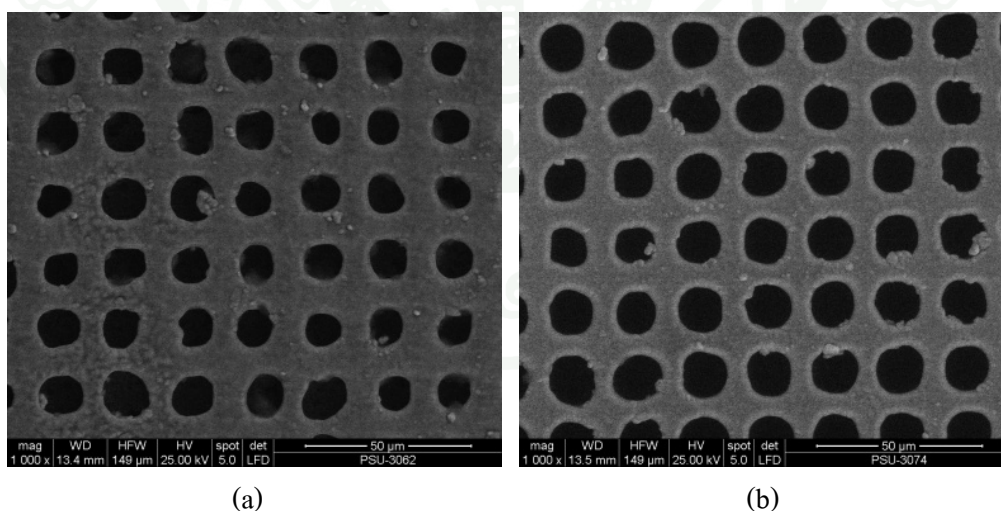


ภาพที่ 34 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมก่อน
สปีดเตอริง (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E

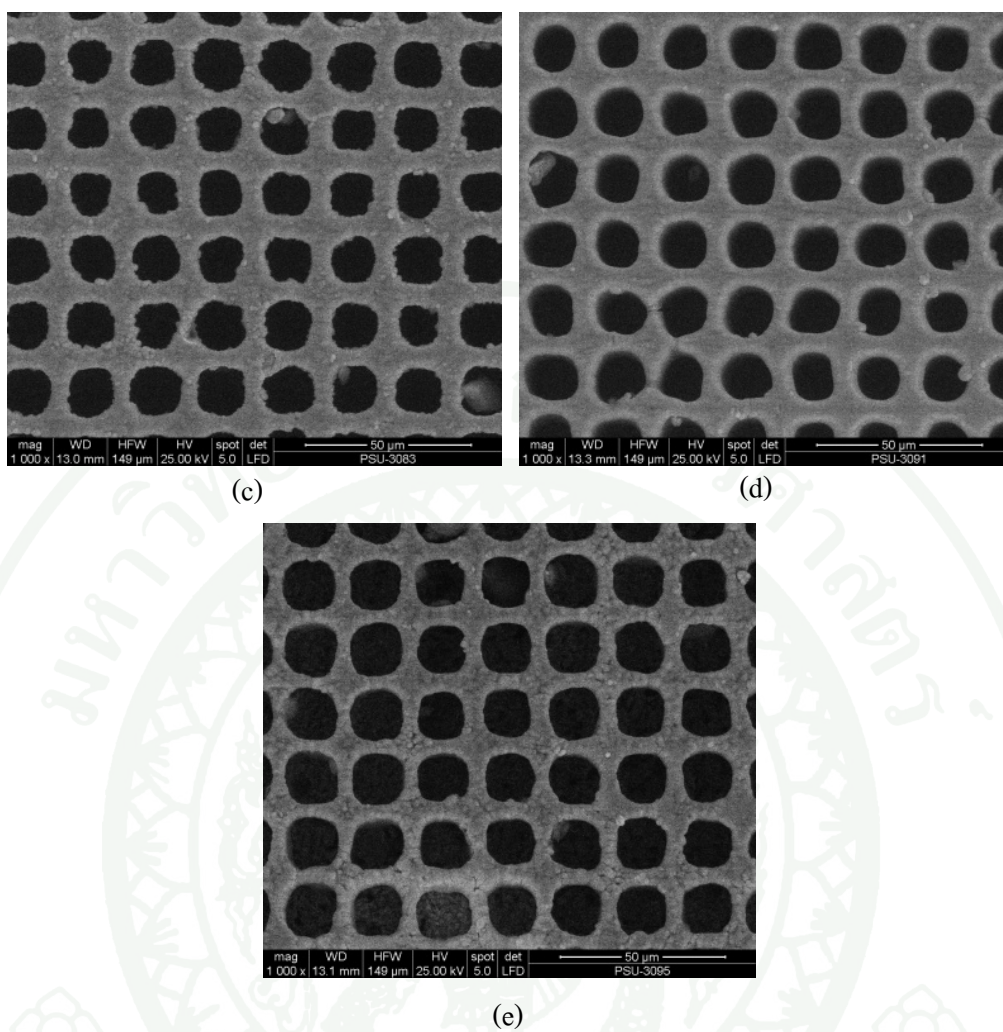
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยขนาดหลุม ระยะขอบถึงขอบ และระยะแนวทแยงจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม

ตัวอย่าง	ขนาดหลุม (μm)	ระยะขอบถึงขอบ (μm)	ระยะระหว่างหลุมแนว ทแยง (μm)
A	11.2 ± 1.2	8.7 ± 1.8	27.9 ± 1.2
B	15.1 ± 2.3	4.0 ± 0.7	28.0 ± 5.3
C	15.3 ± 0.6	4.8 ± 0.8	28.7 ± 0.3
D	15.4 ± 0.7	4.4 ± 0.7	28.4 ± 0.7
E	16.6 ± 1.0	3.1 ± 0.9	28.7 ± 0.7

ตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบฟิล์มโคบอลต์ลงไปบนผิวหน้ามีลักษณะพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 35 จากภาพพบว่าโดยทั่วไปผิวเคลือบโคบอลต์ค่อนข้างเรียบ แต่บางบริเวณมีลักษณะเป็นก้อนเล็กของโคบอลต์ ขนาดความกว้างของหลุมลดลงเมื่อเทียบกับก่อนทำการเคลือบ แสดงว่าสารแม่เหล็กที่เคลือบลงไปเกาะตัวหนาบริเวณปากหลุมทำให้ขนาดของปากหลุมเล็กลง แต่ยังคงมีขนาดเรียงตามลำดับจากเล็กไปใหญ่เหมือนเดิม ในทางกลับกันระยะระหว่างขอบถึงขอบด้านบนผิวหน้าจึงเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ ค่าความกว้างของหลุมและระยะขอบแสดงดังตารางที่ 2



ภาพที่ 35 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม หลังสัปดาห์เตอริง (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E



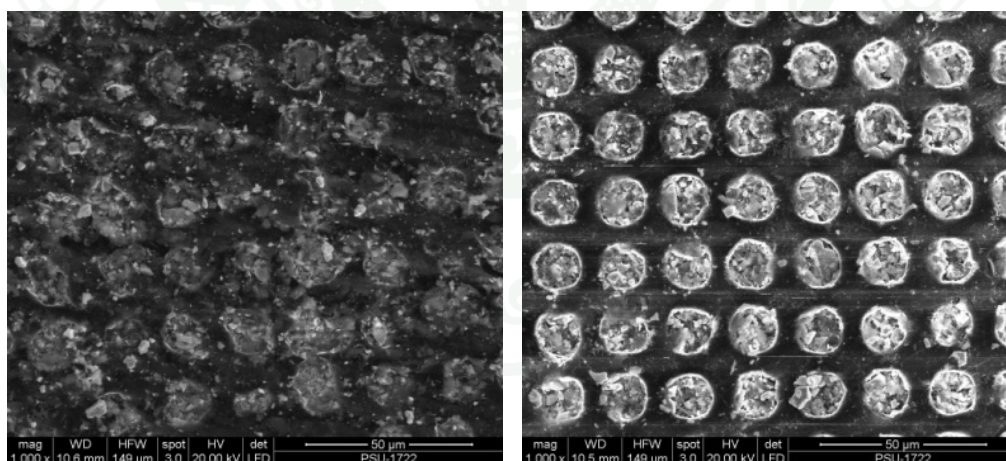
ภาพที่ 35 (ต่อ)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยขนาดหลุมและระยะจากขอบถึงขอบของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม หลังการเคลือบฟิล์ม

ตัวอย่าง	ขนาดหลุม	ระยะขอบถึงขอบ
	(μm)	(μm)
A	11.0 ± 1.4	8.7 ± 1.4
B	13.0 ± 1.0	6.7 ± 0.7
C	13.5 ± 1.1	6.6 ± 0.8
D	13.9 ± 1.0	5.7 ± 0.7
E	14.8 ± 0.6	5.0 ± 0.6

ภาพที่ 36 แสดงลักษณะของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมที่ขัดผิวเคลือบโอบอลต์ด้านบนออก พบว่ามีเศษของฟิล์มโอบอลต์และ SU-8 จากการขัดลงไปอยู่ในหลุมจำนวนมาก ทำให้ส่วนที่เป็นหลุมสีดำกลายเป็นบริเวณที่มีความสว่าง โดยเฉพาะในตัวอย่าง B และ D (ภาพที่ 36 (b) และ (d)) การที่เศษของฟิล์มและ SU-8 ของตัวอย่างมีจำนวนมาก เนื่องจากการทำความสะอาดตัวอย่างทำได้อย่างจำกัด เพราะหากใช้วิธีการทำความสะอาดที่รุนแรงมากๆ เช่น การเขย่าด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ อาจทำให้ตัวอย่างเสียหาย จึงใช้ที่บีบลมเป่าทำความสะอาดเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ฟิวที่ขัดแล้วมีความเรียบค่อนข้างดี ดังแสดงในภาพที่ 36 (b), (c), (d) และ (e) แต่การขัดด้วยมือค่อนข้างควบคุมยากทำให้ระดับความสูงของหลุมในแต่ละตัวอย่างแตกต่างกัน โดยเฉพาะในตัวอย่าง A (ภาพที่ 36 (a)) ที่มีบางบริเวณขัดไปจนชั้น SU-8 หลุดไปมาก

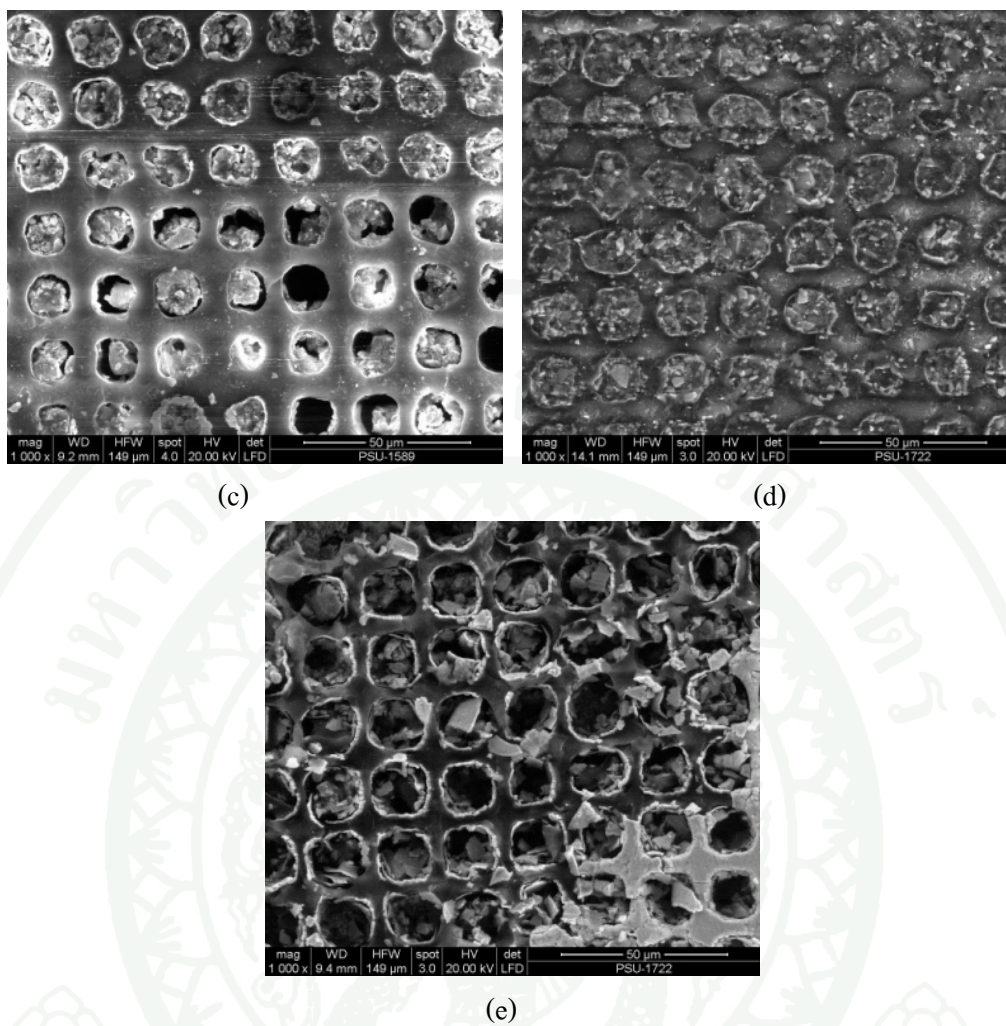
ความกว้างหลุมของตัวอย่างหลังขัดผิวเคลือบออกแสดงดังตารางที่ 3 โดยเมื่อเทียบกับค่าความกว้างหลุมของตัวอย่างก่อนเคลือบ (ตารางที่ 1) และหลังเคลือบ (ตารางที่ 2) จะพบว่าตัวอย่างก่อนเคลือบจะมีขนาดหลุมใหญ่ที่สุดแล้วมีขนาดลดลงเมื่อเคลือบฟิล์ม เนื่องจากที่บริเวณปากหลุมจะมีฟิล์มเกาะหนา จึงทำให้ปากหลุมเล็กลง ในทางกลับกันก็จะทำให้ระยะระหว่างขอบถึงขอบเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อขัดผิวเคลือบด้านบนออกขนาดหลุมกลับเพิ่มขึ้น และระยะระหว่างขอบถึงขอบกลับลดลงอีกครั้ง แสดงว่าฟิล์มที่เคลือบบริเวณผนังตอนบนของหลุมหนากว่าฟิล์มบนผนังที่อยู่ลึกลงไป



(a)

(b)

ภาพที่ 36 ภาพ SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมหลังขัดผิวเคลือบด้านบนออก (สเกลแสดงระยะ 50 μm) (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E

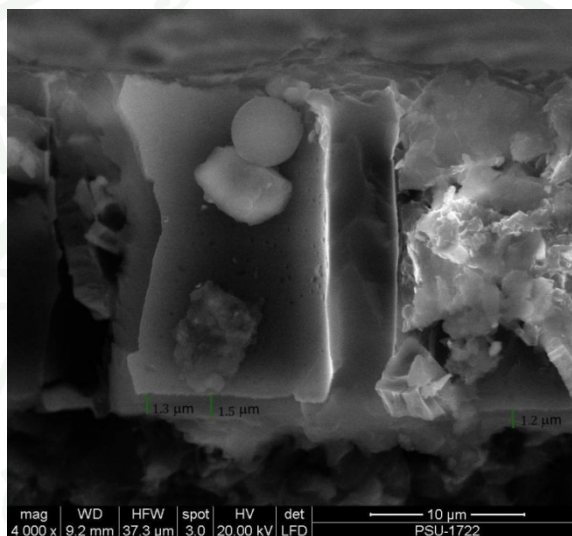


ภาพที่ 36 (ต่อ)

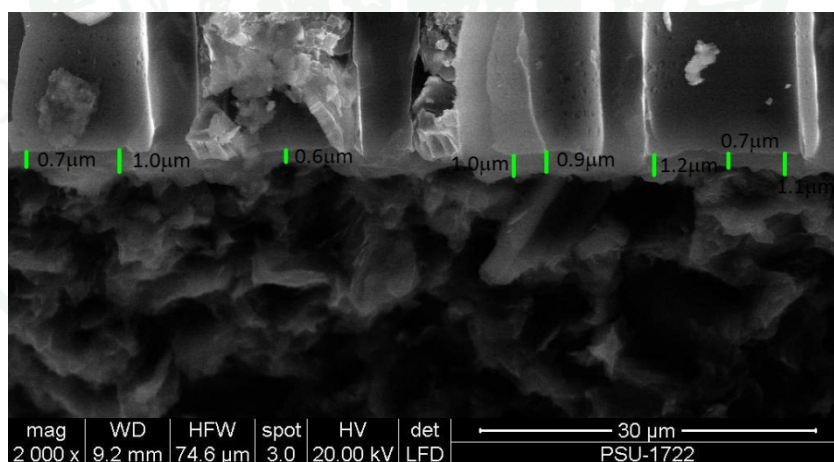
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยขนาดหลุมและระยะจากขอบถึงขอบของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม หลังการขัดผิวเคลือบฟิล์มออก

ตัวอย่าง	ขนาดหลุม (μm)	ระยะขอบถึงขอบ (μm)
A	12.3 ± 0.9	6.9 ± 1.4
B	13.6 ± 0.7	5.7 ± 0.7
C	13.2 ± 1.0	5.7 ± 0.9
D	13.9 ± 1.6	5.2 ± 1.2
E	16.6 ± 1.0	3.3 ± 0.8

ภาพที่ 37 แสดงภาพความหนาของฟิล์มโพลีเมอร์บนชั้น SU-8 ภายในหลุมสองบริเวณ ผิวเคลือบที่เกิดจากเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอริง (300 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้องและความดันอาร์กอน 10^{-3} ทอร์) เคลือบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ $0.9\ \mu\text{m}$ ถึง $1.4\ \mu\text{m}$ ความหนาของผิวเคลือบทำให้หลุมมีความกว้างลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ จากภาพที่ 37 (a) ยังพบว่าสารแม่เหล็กโพลีเมอร์ถูกเคลือบลงไปที่ผนังของหลุมต่อเนื่องไปจนถึงก้นหลุม



(a)

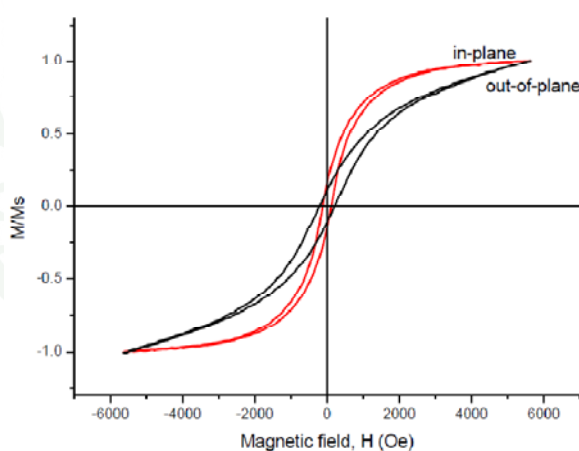


(b)

ภาพที่ 37 ภาพ SEM แสดงความหนาของฟิล์มโพลีเมอร์ในหลุมของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอน แบบหลุมสองบริเวณ (a) และ (b)

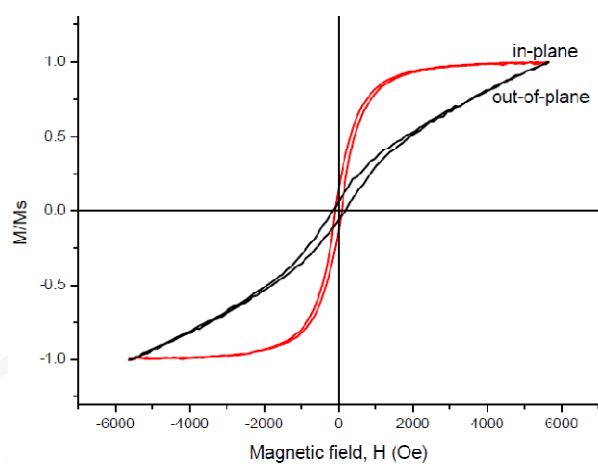
2. ผลการศึกษาสมบัติแม่เหล็กจาก VSM

จากผลการวัด VSM ที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก (ระหว่างช่วง -5.7 ถึง 5.7 kOe) ในแนวระนาบและตั้งฉากกับฟิล์มบางโคบอลต์ ที่มีความหนาในช่วงประมาณ 0.9 μm ถึง 1.4 μm สามารถแสดงค่ามอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชัน ของตัวอย่างเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก A, B, C, D และ E ในสนามแนวนานเปรียบเทียบกับแนวตั้งจากดังภาพที่ 38 พบว่าในสนามแนวนานแมกนีไทเซชันของทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสนามแม่เหล็กต่ำกว่า 2000 Oe และช้าลงเมื่อเข้าสู่แมกนีไทเซชันอิ่มตัว ในขณะที่ในสนามแนวตั้งจากแมกนีไทเซชันเพิ่มด้วยอัตราที่ช้ากว่า แล้วจึงเริ่มเข้าใกล้แมกนีไทเซชันอิ่มตัว แต่ไม่สามารถไปถึงแมกนีไทเซชันอิ่มตัวที่สมบูรณ์ได้ด้วยสนามแม่เหล็กในการทดลองนี้ กราฟฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างกันในสนามทั้งสองแนวแสดงถึงความเป็นแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม โดยถูกแมกนีไทซ์ในแนวนานได้ดีกว่าแนวตั้งจาก เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นการจัดเรียงโดเมนแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุมจะชี้ไปในแนวนานกับผิวหน้าของฟิล์มแม่เหล็ก

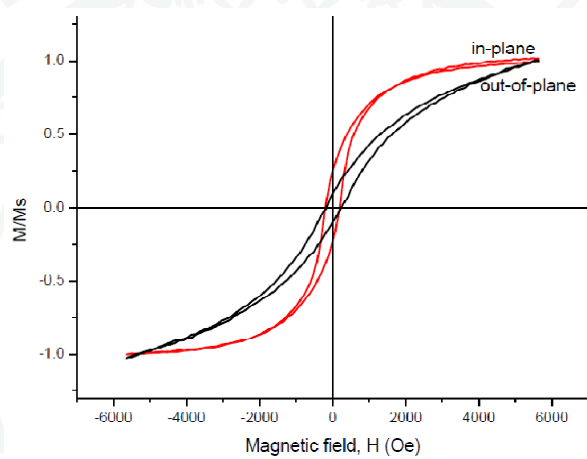


(a)

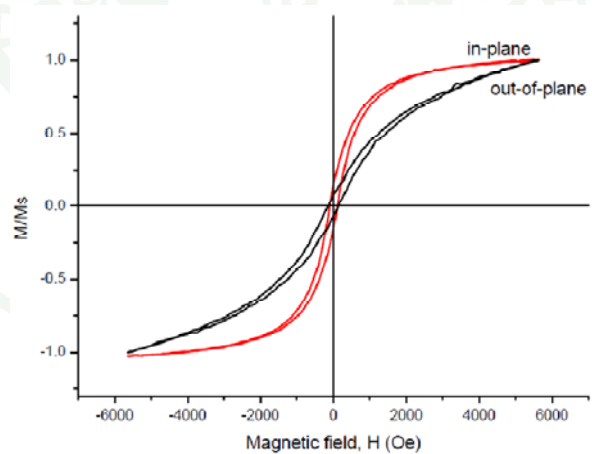
ภาพที่ 38 นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันของตัวอย่างเคลือบฟิล์มแม่เหล็กในสนามแนวนาน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E



(b)

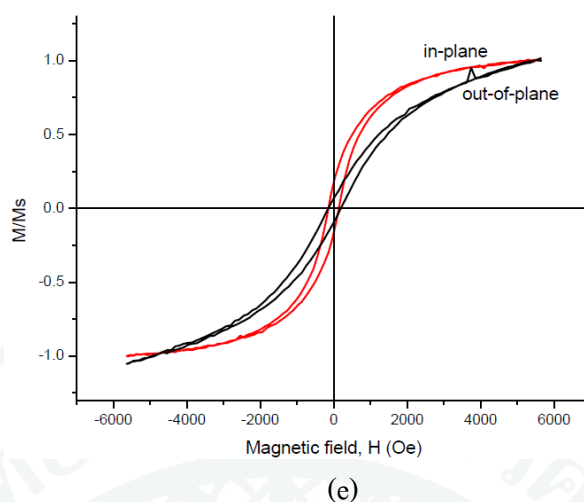


(c)



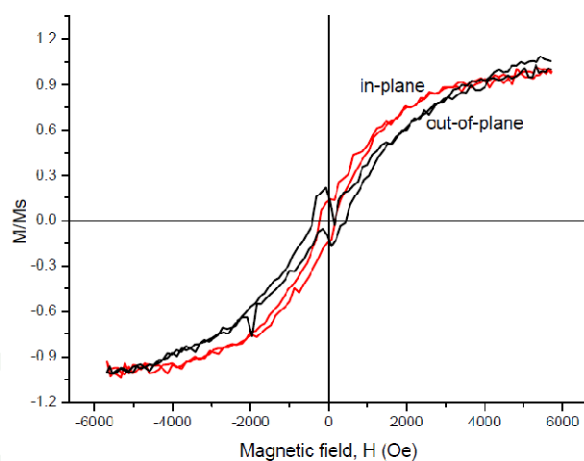
(d)

ภาพที่ 38 (ต่อ)

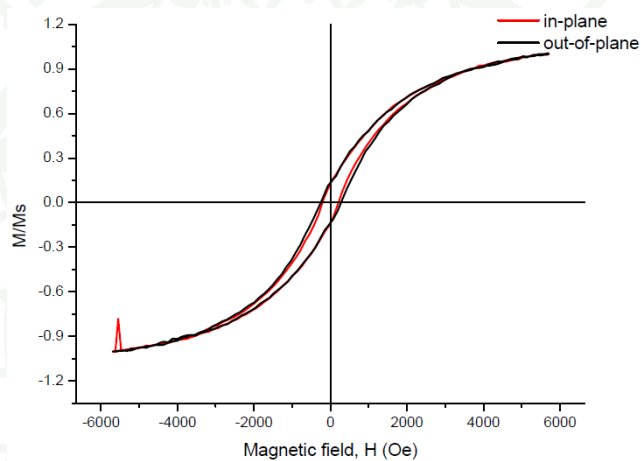


ภาพที่ 38 (ต่อ)

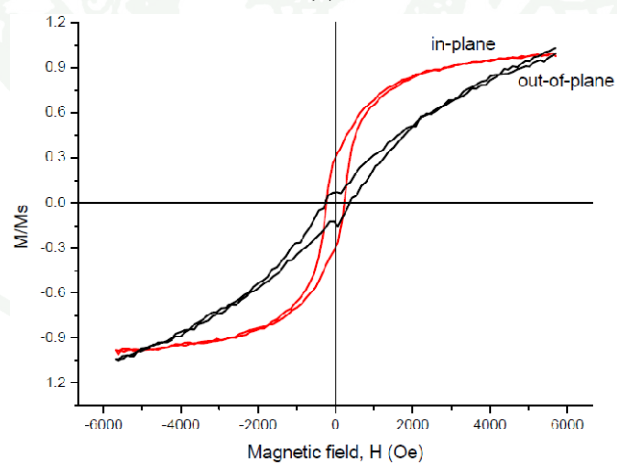
ค่าแอมพลิจูดของแม่เหล็กไนโตรเจนของตัวอย่างหลังจัดฟิล์มแม่เหล็กที่ผิวหน้าออก A, B, C, D และ E แสดงดังภาพที่ 39 จากภาพจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของแม่เหล็กไนโตรเจนของตัวอย่างที่วางในสนามแนวนอนยังคงรวดเร็วกว่าในแนวตั้งฉาก และเริ่มช้าลงเมื่อเข้าสู่แม่เหล็กไนโตรเจนอิ่มตัว แต่ความแตกต่างของฮิสเทอรีซิสมีน้อยลง ซึ่งแสดงถึงความเป็นแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กที่ลดลง อีกทั้งพบว่าในตัวอย่าง B และ D จะมีฮิสเทอรีซิสที่เกือบซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงถึงความเป็นไอโซโทรปีแม่เหล็ก ซึ่งจากภาพ SEM (ภาพที่ 36) ของตัวอย่างหลังจัดผิวเคลือบออกไป ในตัวอย่างทั้งสองจะมีเศษ SU-8 ที่มีฟิล์มแม่เหล็กรวมอยู่ด้วยไปอัดอยู่เป็นจำนวนมาก โคบอลต์ที่ตกค้างอัดอยู่สามารถส่งสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้การแม่เหล็กไนโตรเจนสองทิศทางที่ตั้งฉากกันมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น



(a)

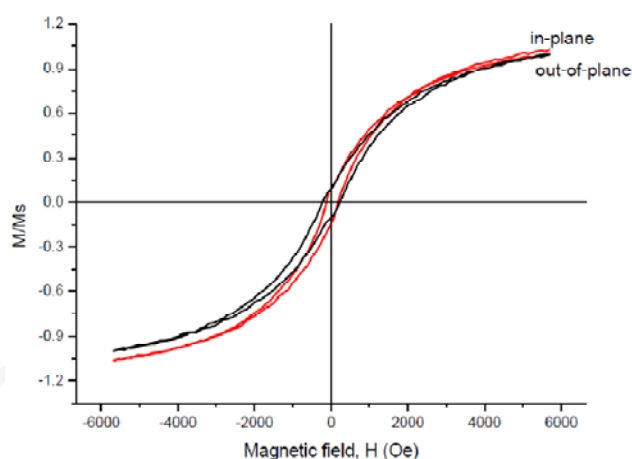


(b)

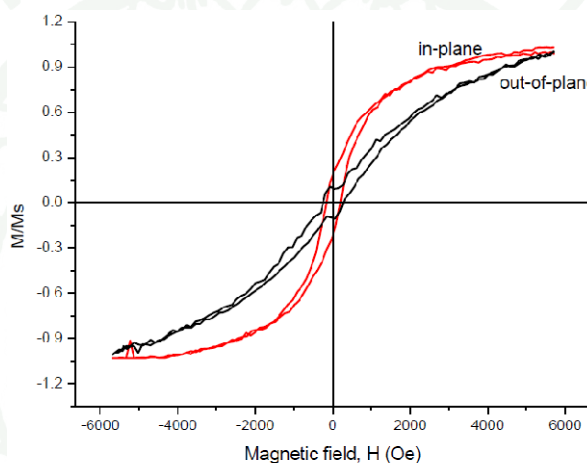


(c)

ภาพที่ 39 นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันของตัวอย่างหลังขัดฟิล์มแม่เหล็กที่ผิวหน้าออกในสนาม
แนวขนาน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E



(d)



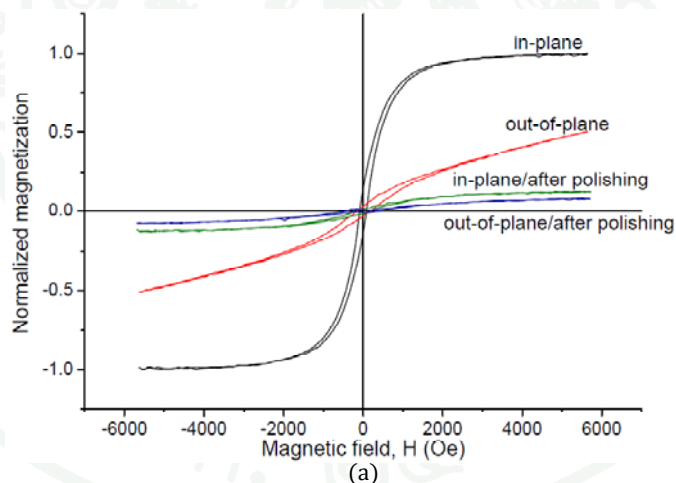
(e)

ภาพที่ 39 (ต่อ)

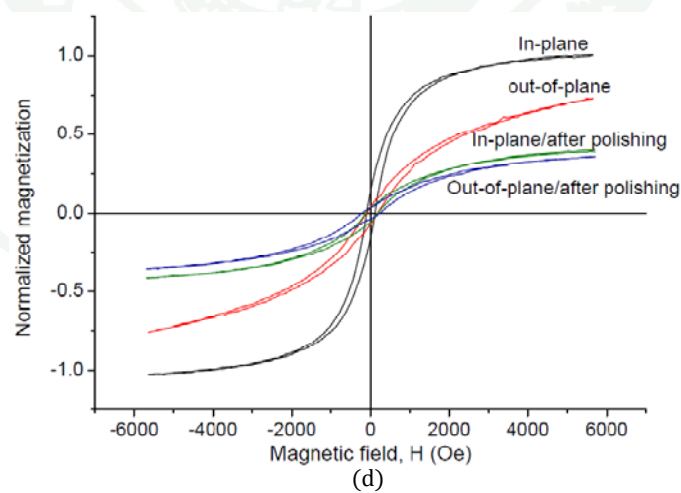
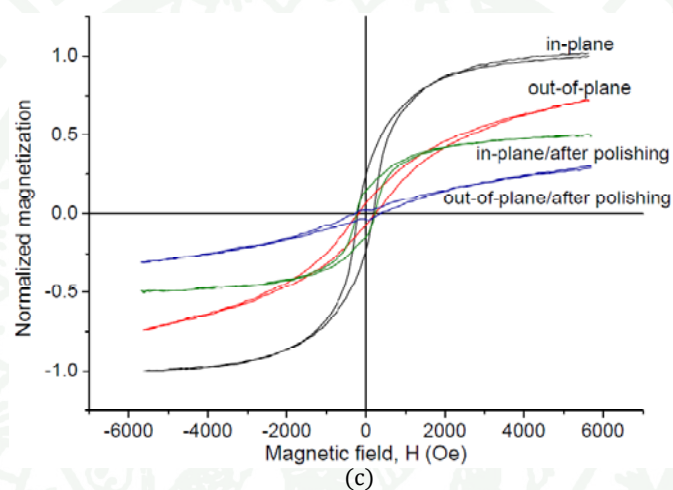
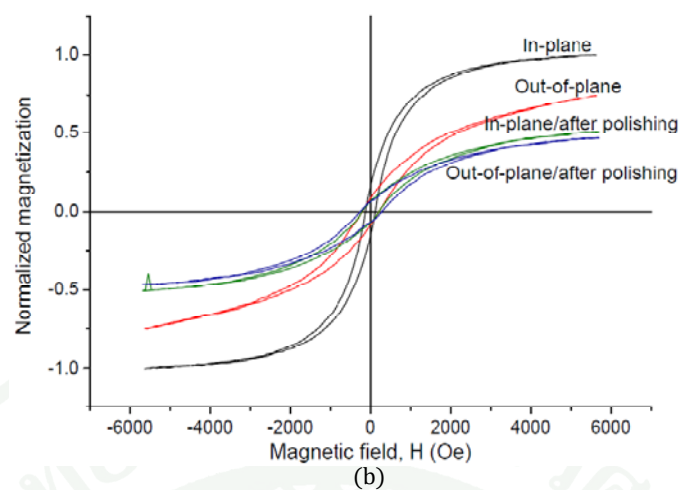
เมื่อนำค่าแมกนีไตเซชันของตัวอย่างเดียวกันในทั้งสองทิศของสนามแม่เหล็ก ทั้งก่อนและหลังขัดผิวออก ไปนอร์มอลไลซ์เทียบกับแมกนีไตเซชันอิ่มตัวของตัวอย่างเคลือบในสนามขนาน แล้วเปรียบเทียบในภาพที่ 40 พบว่าเมื่อหลุมมีขนาดกว้างขึ้นแมกนีไตเซชันของสนามทั้งสองแนวกลับมีความแตกต่างลดลง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อหลุมมีขนาดกว้างขึ้นอิทธิพลของแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กจะลดลง เนื่องจากหลุมที่มีขนาดใหญ่จะมีระยะระหว่างขอบลดลง ค่าแมกนีไตเซชันโดยรวมของตัวอย่างจึงถูกกำหนดโดยพื้นที่ฟิล์มในหลุมที่มีขนาดของโดเมนใหญ่ และฟิล์มบนขอบที่มีโดเมนขนาดเล็ก การจัดเรียงโดเมนที่มีแนวโน้มนต่างกันในส่วนทำให้แมกนีไตเซชันในสนามทั้งสองทิศทางมีความต่างลดลง ในทางกลับกันที่หลุมขนาดเล็กระยะระหว่างขอบถึงขอบก็จะเพิ่มขึ้น ความกว้างของขอบกับความกว้างของหลุมใกล้เคียงกันมากขึ้น ขนาดของโดเมนแม่เหล็กของฟิล์มที่อยู่บนขอบจะมีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ใกล้เคียงกับขนาดโดเมนของฟิล์มแม่เหล็กในหลุมที่

ลดลง ทำให้การจัดเรียงโดเมนทั้งสองส่วนนี้มีแนวโน้มเหมือนกันคือในแนวนาน ในกรณีเช่นนี้ แมกนีไตเซชันโดยสนามแม่เหล็กในแนวนานจึงมีค่าสูงกว่าแนวตั้งฉากมาก

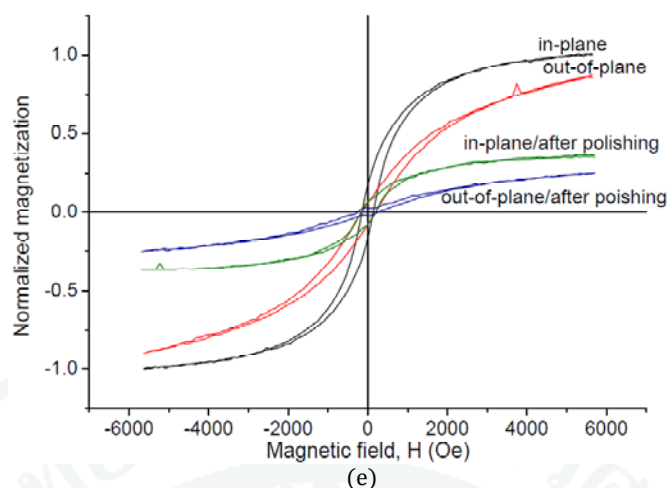
หลังจากขัดผิวเคลือบออกไปจนเหลือเฉพาะโคบอลต์ในหลุม แมกนีไตเซชันลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างเคลือบ เนื่องจากฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบอยู่ด้านบนถูกกำจัดออกไป จะเห็นได้จากตัวอย่าง A ที่มีพื้นที่ฟิล์มเคลือบด้านบนมากที่สุด แมกนีไตเซชันก็ลดลงไปมากเช่นเดียวกัน โดยเมื่อไม่มีฟิล์มแม่เหล็กด้านบนค่าแมกนีไตเซชันโดยรวมของตัวอย่างจะถูกกำหนดจากฟิล์มแม่เหล็กในหลุมเป็นหลัก โดยฟิล์มแม่เหล็กในหลุมขนาดใหญ่ก่อนขัดจะมีอิทธิพลของฟิล์มในหลุมเป็นตัวกำหนดค่าแมกนีไตเซชันโดยรวมเนื่องจากมีโดเมนขนาดใหญ่กว่าฟิล์มบนขอบ ดังนั้นเมื่อไม่มีฟิล์มด้านบน ฟิล์มในหลุมขนาดใหญ่จึงยังคงเป็นปัจจัยหลักเหมือนเดิม ดังนั้นแมกนีไตเซชันในสนามทั้งสองทิศทางของตัวอย่างก่อนและหลังขัดจึงมีความแตกต่างใกล้เคียงกัน ในขณะที่ในหลุมขนาดเล็ก อิทธิพลของฟิล์มด้านบนจะมีมากขึ้น ทำให้ความแตกต่างของแมกนีไตเซชันในสนามทั้งสองแนวของตัวอย่างหลังขัดลดลงมาก แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแม่เหล็กที่อยู่บนผิวด้านบนมีอิทธิพลอย่างมากต่อแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก



ภาพที่ 40 ภาพเปรียบเทียบตัวอย่างก่อน และหลังขัดในสนามแนวนาน และตั้งฉากโดยนอร์มอลไลซ์ ค่าแมกนีไตเซชันเทียบกับ แมกนีไตเซชันอิ่มตัวของตัวอย่างเคลือบในสนามแนวนาน ของ ตัวอย่าง (a) A, (b) B, (c) C, (d) D และ (e) E



ภาพที่ 40 (ต่อ)



ภาพที่ 40 (ต่อ)

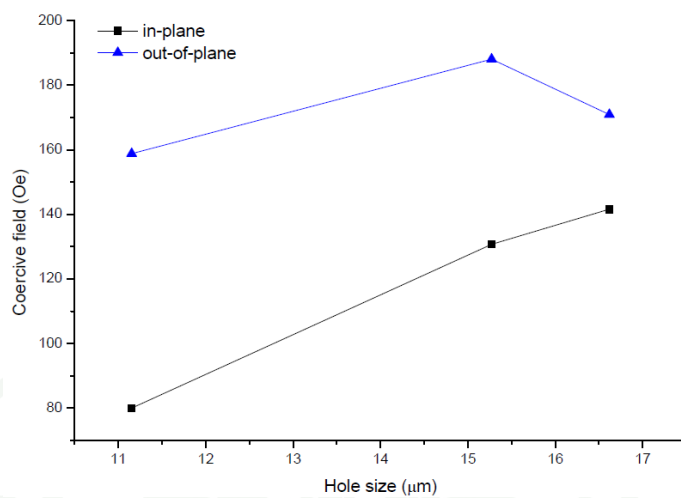
ตารางที่ 4 แสดงค่าสนามลบล้างแม่เหล็กและค่าสแควร์เนสจากกราฟฮิสเทอรีซิสในภาพที่ 40 ในสนามทั้งสองแนวเปรียบเทียบตัวอย่างก่อนและหลังขัดฟิล์มแม่เหล็ก ค่าสนามลบล้างแม่เหล็กสำหรับตัวอย่างเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกลับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกจากแนวขนานเป็นตั้งฉาก ในขณะที่สแควร์เนสกลับมีค่าลดลง สอดคล้องกับคำอธิบายว่าตัวอย่างก่อนขัดมีแนวโน้มนำการจัดโดเมนที่มีแมกนีไทเซชันในแนวขนานกับระนาบพื้นผิว สำหรับตัวอย่างที่ขัดผิวเคลือบออก สนามลบล้างแม่เหล็กและสแควร์เนสก็มีแนวโน้มในทางเดียวกันกับตัวอย่างเคลือบ นั่นคือเมื่อกลับทิศของสนามภายนอกจากแนวขนานเป็นตั้งฉาก สนามลบล้างแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่สแควร์เนสมีค่าลดลง แต่ค่าสนามลบล้างแม่เหล็กของตัวอย่างขัดจะสูงกว่าตัวอย่างเคลือบ ในขณะที่สแควร์เนสในตัวอย่างขัดจะต่ำกว่าตัวอย่างเคลือบ การที่โครงสร้างภายหลังการขัดดีแมกนีไทซ์ได้ยากขึ้น อาจเป็นผลมาจากแม่เหล็กส่วนที่ถูกขัดออกแล้วติดค้างอยู่ ส่งผลแม่เหล็กออกมาในทิศสุ่ม

ตารางที่ 4 ค่าสนามลบด้างแม่เหล็ก (H_c) และค่าสแควร์เนส (S) ในสนามทั้งสองแนว เปรียบเทียบ ตัวอย่างเคลือบและหลังขัด

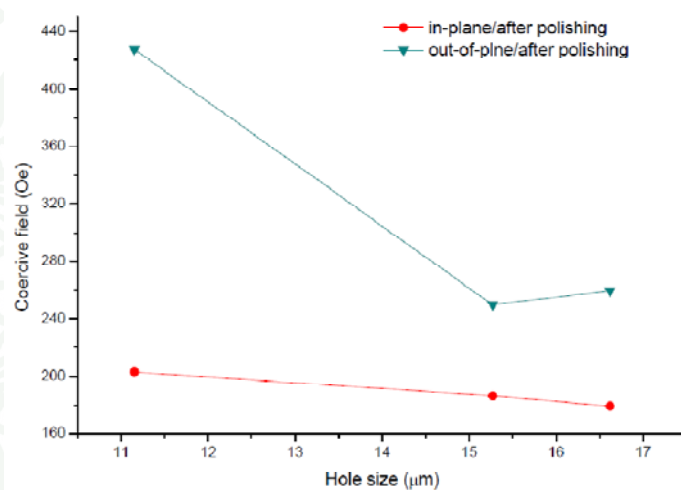
ตัวอย่าง	ขนาดหลุม (μm)	H_c ขนาด (Oe)		H_c ตั้งฉาก (Oe)		S ขนาด		S ตั้งฉาก	
		เคลือบ	หลังขัด	เคลือบ	หลังขัด	เคลือบ	หลังขัด	เคลือบ	หลังขัด
A	11.2 $\pm$ 1.2	80.0	203.1	158.8	427.7	0.136	0.017	0.031	0.011
B	15.1 $\pm$ 2.3	117.3	209.9	207.8	208.3	0.155	0.067	0.082	0.063
C	15.3 $\pm$ 0.6	171.8	196.8	217.2	314.7	0.236	0.110	0.070	0.030
D	15.4 $\pm$ 0.7	103.0	152.4	139.2	225.8	0.145	0.046	0.052	0.035
E	16.6 $\pm$ 1.0	141.6	179.3	170.9	259.6	0.172	0.072	0.069	0.025

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาเขียนเป็นกราฟ เพื่อให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนถึงอิทธิพลของขนาดหลุม (ภาพที่ 41 และ 42) โดยเลือกเฉพาะตัวอย่าง A, C และ E เนื่องจากตัวอย่าง A และ E เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ขนาดหลุมใหญ่สุดและเล็กสุด ส่วนตัวอย่าง B, C และ D จะมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงนำค่าเฉลี่ยจากทั้งสามตัวอย่างมาแทน จากกราฟพบว่าสำหรับตัวอย่างก่อนขัด สนามลบด้างแม่เหล็กและสแควร์เนสทั้งในสนามแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวมีค่าน้อยที่สุดอย่างชัดเจนในตัวอย่าง A เนื่องจากขนาดของโดเมนแม่เหล็กใกล้เคียงกันทั้งบริเวณหลุมและขอบด้านบน จึงสามารถดีแมกนีไตซ์ได้ง่าย และเป็นแม่เหล็กอ่อน แต่เมื่อหลุมมีขนาดใหญ่ขึ้น โดเมนมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นในขณะที่ขนาดโดเมนของฟิล์มที่อยู่ด้านบนมีขนาดเล็กลงตามพื้นที่ที่สามารถดีแมกนีไตซ์ได้ยาก ส่งผลให้สนามลบด้างแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

สำหรับตัวอย่างที่ขัดผิวเคลือบออก จะไม่มีอิทธิพลของฟิล์มแม่เหล็กด้านบน ค่าสแควร์เนสทั้งสนามแนวขนาน และตั้งฉากยังคงมีค่าน้อยที่สุดในตัวอย่าง A ที่มีความเป็นแม่เหล็กอ่อน แต่ค่าสนามลบด้างแม่เหล็กกลับมีค่าสูงสุดในทั้งสองแนวสนาม และในสนามแนวตั้งฉากยังคงมีค่าสูงกว่าในสนามแนวขนาน แสดงถึงการถูกดีแมกนีไตซ์ได้ยากขึ้นของฟิล์มแม่เหล็กในหลุมขนาดเล็ก โดยเฉพาะในสนามแนวตั้งฉาก และเมื่อขนาดหลุมใหญ่ขึ้นค่าสนามลบด้างแม่เหล็กกลับลดลง ซึ่งน่าจะเป็นเพราะภายหลังการขัดไม่มีอิทธิพลของฟิล์มแม่เหล็กที่ขอบด้านบนที่มีขนาดเล็ก ที่ดีแมกนีไตซ์ได้ยาก อย่างไรก็ตามผลการทดลองอาจมีความไม่แน่นอนสูงเนื่องจากแม่เหล็กส่วนที่ถูกขัดออกยังติดค้างอยู่ และส่งสนามแม่เหล็กออกมาในทิศสุ่ม

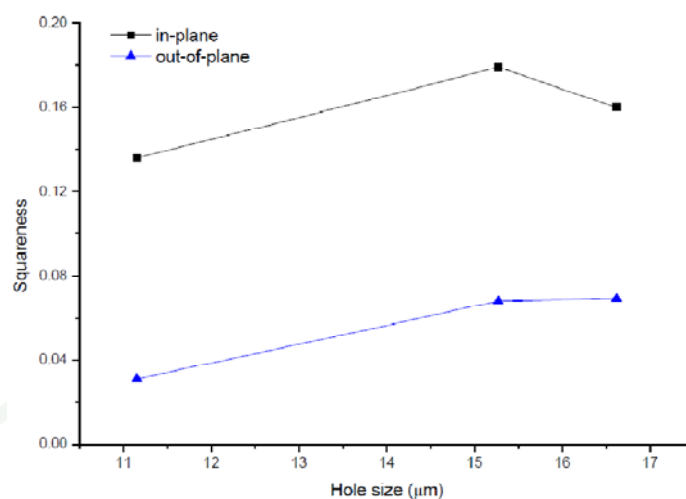


(a)

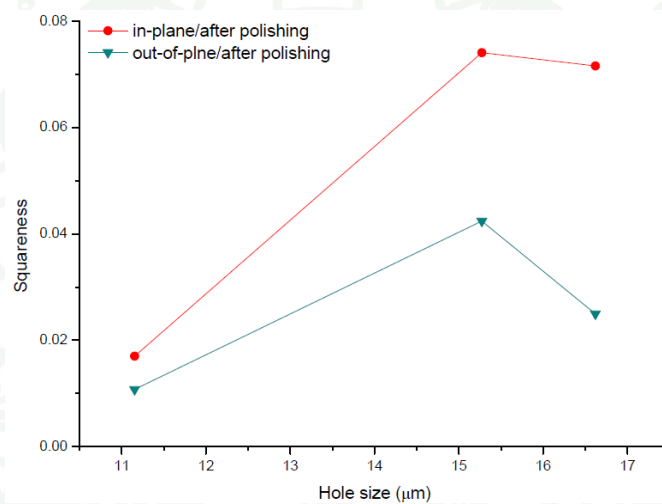


(b)

ภาพที่ 41 กราฟเปรียบเทียบค่าสนามลบล้างแม่เหล็กในสนามแวนอน และตั้งฉากของ ตัวอย่าง (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด



(a)



(b)

ภาพที่ 42 กราฟเปรียบเทียบค่าสแควร์เนสในสนามเนเวนอน และตั้งฉากของตัวอย่าง (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

ตัวอย่างสารไวแสง SU-8 ที่มีรูปแบบแน่นอนที่เตรียมจากวิธีการเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟีที่เคลือบด้วยฟิล์มแม่เหล็กโคบอลต์ ด้วยเทคนิคสปีดเทอริง แสดงแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กอย่างเด่นชัด สังเกตได้จากค่าแมกนีไตเซชันที่แตกต่างกันเมื่อได้รับการแมกนีไตซ์ด้วยสนามแม่เหล็กที่มีทิศแตกต่างกัน สำหรับตัวอย่างแบบเสาที่เคลือบฟิล์มแม่เหล็กหนาประมาณ 50 - 80 nm จะถูกแมกนีไตซ์ได้ง่ายในสนามแนวตั้งฉาก เนื่องจากพื้นที่จำกัดของฟิล์มแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดบนยอดเสาประมาณ $9.6 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ทำให้การจัดโมเมนต์แม่เหล็กในโดเมนมีแนวโน้มไปในทิศตั้งฉาก ส่งผลให้แมกนีไตเซชันในโดเมนมีแนวโน้มที่จะชี้ในทิศตั้งฉากกับระนาบฟิล์ม ต่างจากฟิล์มต่อเนื่องที่มีความหนาเท่ากันและไม่ได้ถูกจำกัดพื้นที่ของฟิล์มแม่เหล็ก โดเมนจึงมีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้การจัดโมเมนต์แม่เหล็กในโดเมนมีแนวโน้มไปในสองทิศทางใกล้เคียงกัน แมกนีไตเซชันในสนามทั้งสองแนวจึงไม่แตกต่างกัน ไม่แสดงแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กออกมา

สำหรับตัวอย่างแบบหลุมที่กว้างประมาณ 11.2 μm ถึง 16.6 μm และผ่านการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กหนาประมาณ 0.9 - 1.4 μm แมกนีไตเซชันที่วัดได้เป็นผลรวมของแมกนีไตเซชันจากฟิล์มแม่เหล็กจากขอบด้านบนและในหลุม ตัวอย่างมีความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน และมีแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก เนื่องจากการจัดโดเมนแม่เหล็กมีแนวโน้มจะชี้ไปในแนวขนานกับผิวหน้าของฟิล์มแม่เหล็ก จึงถูกแมกนีไตซ์ในแนวขนานได้ดีกว่าแนวตั้งฉาก และทำให้สนามลบล่างแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในสนามแนวตั้งฉาก นอกจากนี้ความกว้างของหลุมที่เพิ่มขึ้นทำให้แอนไอโซโทรปีแม่เหล็กลดลง เนื่องจากพื้นที่ฟิล์มในหลุมที่เพิ่มขึ้นหมายความว่าขอบด้านบนมีขนาดของโดเมนแม่เหล็กลดลง ในขณะที่ขนาดของโดเมนของฟิล์มในหลุมเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงในทิศทางที่ต่างกัน ทำให้แอนไอโซโทรปีลดลง และดีแมกนีไตซ์ได้ยากขึ้น ตรงกันข้ามกับในหลุมขนาดเล็กที่โดเมนแม่เหล็กในหลุมและบนขอบด้านบนใกล้เคียงกัน แนวโน้มการจัดโดเมนจะชี้ไปในแนวขนานมากกว่า จึงแสดงแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กสูงกว่า และดีแมกนีไตซ์ได้ง่ายกว่า

การขัดฟิล์มแม่เหล็กบนผิวด้านบนออกมีผลอย่างมากต่อแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก เนื่องจากเมื่อไม่มีฟิล์มแม่เหล็กบนผิวด้านบน ตัวอย่างแสดงสมบัติแม่เหล็กที่แตกต่างจากตัวอย่างก่อนขัดผิวอย่างชัดเจน เห็นได้จากแมกนีไตเซชันที่ลดลงมาก และความแตกต่างของสนามแม่เหล็กในสนามทั้งสองแนวแม้จะยังต่างกันอยู่โดยแมกนีไตซ์ในแนวขนานได้ดีกว่า แต่ก็ต่างน้อยลงกว่าตัวอย่างก่อนขัด แต่โครงสร้างภายหลังการขัดดีแมกนีไตซ์ได้ยากขึ้น อาจเป็นผลมาจากแม่เหล็กส่วนที่ถูกขัดออกแล้วติดค้างอยู่ ส่งผลแม่เหล็กออกมาในทิศสุ่ม ดังนั้นวิธีการเอาฟิล์มแม่เหล็กที่

ผิวหน้าออกโดยการขัดผิวฟิล์มซึ่งทำให้มีเศษจากการขัดเหลือติดค้างอยู่ เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมจะใช้ในการกำจัดฟิล์มแม่เหล็ก ต้องพัฒนาวิธีในการเอาฟิล์มแม่เหล็กออกแบบอื่นๆ ที่จะทำให้ไม่เหลือสิ่งตกค้าง เพื่อให้ตัวอย่างแสดงสมบัติแม่เหล็กที่แท้จริงของโครงสร้าง



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

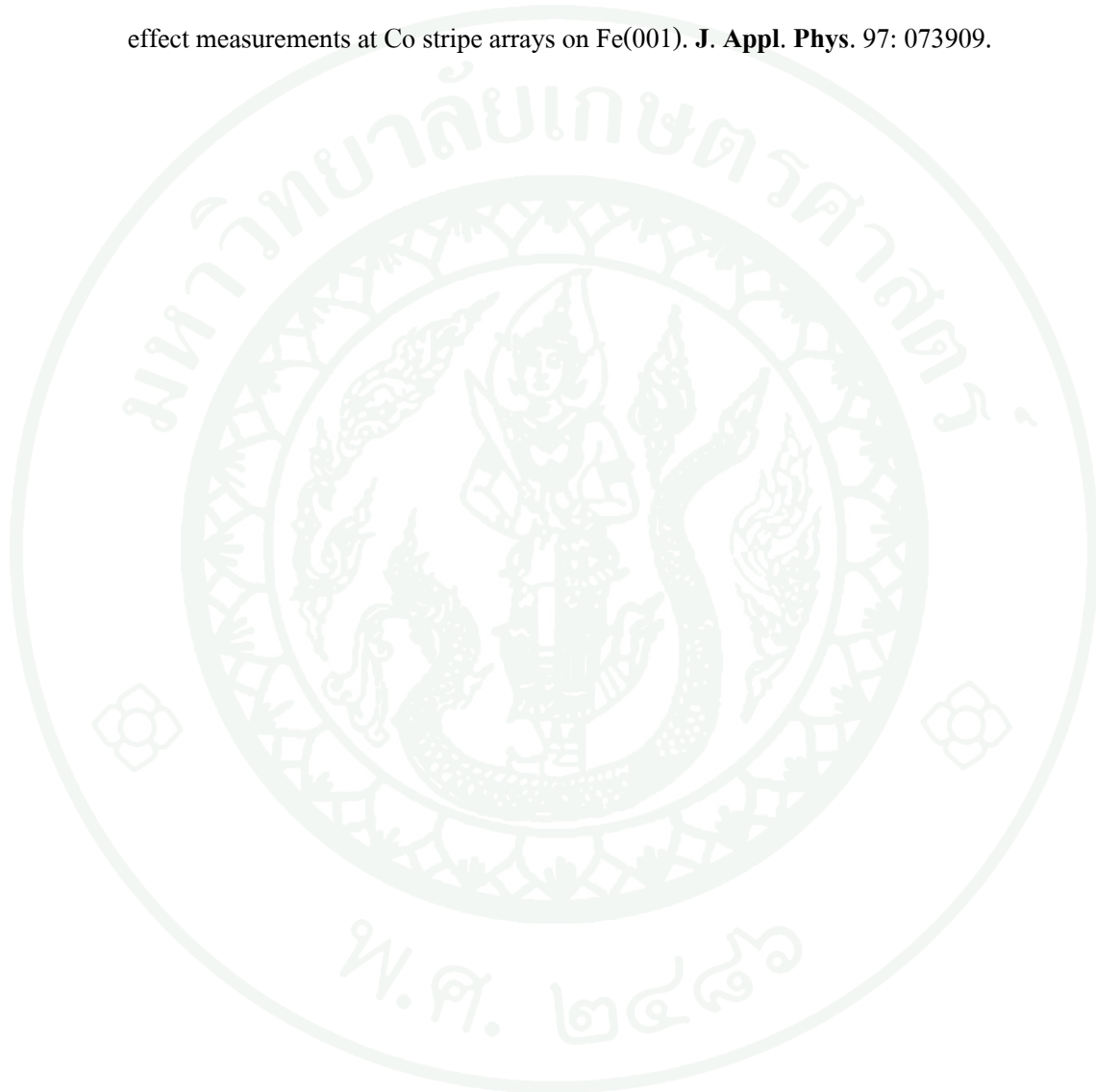
- Adeyeye, A.O., J.A.C. Bland, C. Daboo and D.G. Hasko. 1997. Magnetostatic interactions and magnetization reversal in ferromagnetic wires. **Phys. Rev. B** 56(6): 3265-3270.
- Becherer M., G. Csaba, W. Porod, R. Emling, P. Lugli and D. Schmitt-Landsiedel. 2008. Magnetic ordering of focused-ion-beam structured Cobalt-Platinum dots for field-coupled computing. **IEEE Trans. Nanotechnol.** 7: 316-320.
- Chou, S. Y., M. S. Wei, P. R. Krauss and P. B. Fischer. 1994. Single-domain magnetic pillar array of 35 nm diameter and 65 Gbits/in² density for ultrahigh density quantum magnetic storage **J. Appl. Phys.** 76: 6673-6675.
- Cullity, B.D. and C.D. Graham. **Introduction to Magnetic Materials**. 2nd ed. IEEE Press, Piscataway, NJ.
- Dumpich, G., T.P. Krome and B. Hausmanns. 2002. Magnetoresistance of single Co nanowires. **J. Magn. Magn. Mater.** 248: 241-247.
- Elionix Inc. (JP). 2011. **Ultra-High Precision Electron Beam Lithography System**. Available Source: <http://www.elionix.co.jp/english/products/ELS/ELS7500EX.html>, May 23, 2012.
- Gurovich, B.A., K.E. Prikhodko, E.A. Kuleshova, A. Y. Yakubovsky, E.Z. Meilikhov and M.G. Mosthenko. 2010. Magnetic properties of high-density patterned magnetic media. **J. Magn. Magn. Mater.** 322: 3060-3063.
- Hitachi Global Storage Technologies , 2004, **Patterned Magnetic Media**, Available Source: <https://www1.hitachigst.com/hdd/research/storage/pm/index.html>, February 6, 2012.

- Hoga, M., K. Itoh, M. Ishikawa, N. Kuwahara, M. Fukuda, N. Toyama, S. Kurokawa and T. Doi. 2011. Comparison of quartz and silicon as a master mold substrate for patterned media UV-NIL replica process. **Microelectron. Eng.** doi:10.1016/j.mee.2010.12.122.
- Kläui, M., C. A. F. Vaz, L. Lopez-Diaz and J. A. C. Bland. 2003. Vortex formation in narrow ferromagnetic rings. **J. Phys.: Condens. Matter.** 15: R985–R1023.
- Mellor, C. 2009. **TDK to Haul Out HAMR Heads: Next-Gen Read/Write Reportedly on Way.** The Register. Available Source: http://www.theregister.co.uk/2009/10/06/tdk_hamr_demo/, May 23, 2012.
- Morán, O., F. Perez and E. Bac. 2008. Effect of the in-plane/out-of-plane applied magnetic field on the magnetic response of symmetric epitaxial $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ junctions. **Solid State Commun.** 147: 134–137
- Morecroft, D. 2003. **In-Situ Magnetoresistance Measurement During Patterning of Spin Valve Devices.** Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- New, R. M. H., R. F. W. Pease and R. L. White. 1994. Submicron patterning of thin cobalt films for magnetic storage. **J. Vac. Sci. Technol. B** 12: 3196-3201.
- Okamoto, S., N. Kikuchi, T. Kato, O. Kitakami, K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, H. Muraoka, H. Aoi and J.C. Lodder. 2008. Magnetization behavior of nanomagnets for patterned media application. **J. Magn. Magn. Mater.** 320: 2874-2879.
- Piramanayagam, S.N. and T. C. Chong. 2012. **Developments in Data Storage: Materials Perspective.** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Piramanayagam, S.N. and K. Srinivasan. 2008. Recording media research for future hard disk drives. **J. Magn. Magn. Mater.** 321: 485-494.

- Potzger, K., L. Bischoff, M. O. Liedke, B. Hillebrands, M. Rickart, P. P. Freitas, J. McCord and J. Fassbender. 2005. Domain structure of magnetically micro-patterned PtMn/NiFe exchange bias bilayers. **IEEE Trans. Magn.** 41: 3610-3612.
- Robertson, J.K. and C.W. Clapp. 1933. Removal of Metallic Deposits by High-Frequency Currents. **Nature** 132: 479-480.
- Ross, C.A. 2001. Patterned magnetic recording media. **Annu. Rev. Mater. Res.** 31: 203–235.
- Schabes, M.E. 2008. Micromagnetic simulations for terabit/in² head/media systems. **J. Magn. Magn. Mater.** 320: 2880–2884.
- Schmitte, T., K. Westerholt and H. Zabel. 2002. Magneto-optical Kerr effect in the diffracted light of Fe gratings. **J. Appl. Phys.** 92: 4524-4530.
- Terris, B.D. 2009. Fabrication challenges for patterned recording media. **J. Magn. Magn. Mater.** 321: 512-517.
- Theis-Brohl, K., T. Schmitte, V. Leiner, H. Zabel, K. Rott, H. Brückl and J. McCord. 2003. CoFe stripes: magnetization reversal study by polarized neutron scattering and magneto-optical Kerr effect. **Phys. Rev. B** 67: 184415.
- Thomson, T., G. Hu, and B. D. Terris. 2006. Intrinsic distribution of magnetic anisotropy in thin films probed by patterned nanostructures. **Phys. Rev. Lett.** 96: 257204.
- Varvaro, G. 2012. **Magnetic Recording**. Available Source: <http://nmrphysics.unipv.it/magnet-school/sito/pdf/mr.pdf>, May 23, 2012.
- Wasa, K., M. Kitabatake and H. Adachi. 2004. **Thin Film Materials Technology : Sputtering of Compound Materials**. William Andrew, Inc., Norwich, NY.

Westphalen, A., K. Theis-Bröhl, H. Zabel, K. Rott and H. Brückl. 2006. Magnetization reversal of micropattern Fe bar array: combination of vector and bragg magneto-optical Kerr effect measurements. **J. Magn. Magn. Mater.** 302: 181-189.

Westphalen, A., T. Schmitte, K. Westerholt and H. Zabel. 2005. Bragg magneto-optical Kerr effect measurements at Co stripe arrays on Fe(001). **J. Appl. Phys.** 97: 073909.

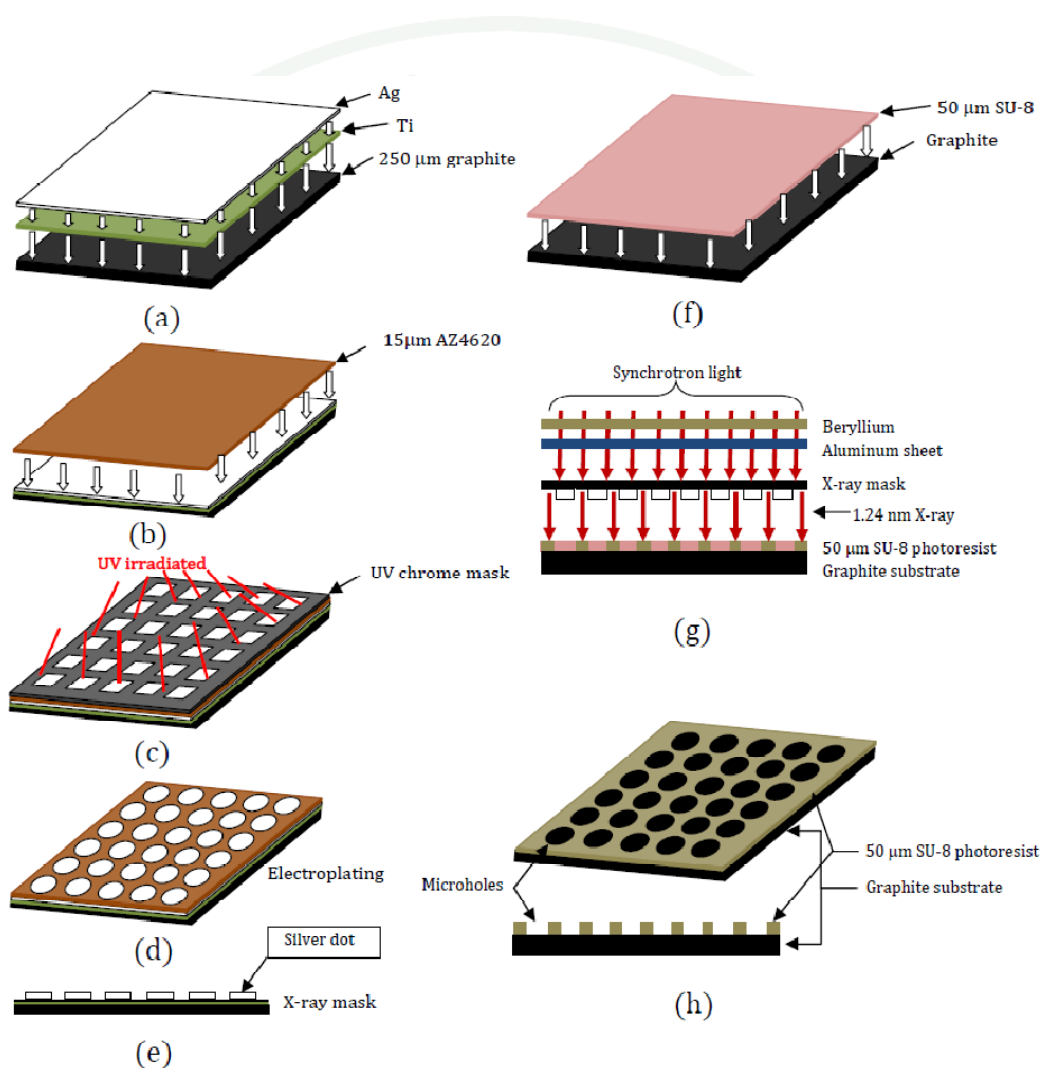






ภาคผนวก ก
กระบวนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี

ชิ้นงานโครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอนระดับไมโคร ถูกเตรียมขึ้นที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) beam line BL6a โดยใช้สารไวแสง SU-8 แบบ negative ที่มีความไวต่อรังสีเอ็กซ์ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี สารไวแสง SU-8 มีองค์ประกอบหลักคือ Bisphenol A Novolak epoxy oligomer และเกลือ triarylsulfonium hexafluoroantimonate เป็นแผ่นแบบสำหรับเคลือบโคบอลต์ลงไป



ภาพผนวกที่ ก1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโครงสร้างระดับไมโครที่มีรูปแบบแน่นอนแบบหลุม โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี

การเตรียมชิ้นงานแบ่งออกได้เป็นสองส่วนด้วยกันคือ การสร้างหน้ากาก และการฉายรังสีเอ็กซ์ การสร้างหน้ากากจะใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นแผ่นแบบ โดยนำแกรไฟต์มาขัดให้มีความหนา 250 μm แล้วเคลือบไทเทเนียมและเงินลงไปบางๆ บนผิวหน้าของแกรไฟต์ ตามลำดับ ดังภาพผนวกที่ ก1a จากนั้นทำการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงสารไวแสง AZ4620 ลงไปอีกชั้นที่ความหนา 15 μm ดัง

ภาพผนวกที่ ก1b ก่อนนำไปอบแบบอ่อนประมาณ 150 นาติ แล้วทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หน้ากากโครเมียมสำหรับบังรังสีอัลตราไวโอเลต (ultraviolet chrome mask) ถูกสร้างขึ้นจากแม่แบบฟิล์มที่เขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ระยะห่าง $20\ \mu\text{m}$ จากศูนย์กลางสู่ศูนย์กลาง นำหน้ากากโครเมียมวางบนชิ้นงานที่เตรียมไว้เพื่อบังรังสีอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น $365\ \text{nm}$ ให้ผ่านลงบนชิ้นงานตามรูปแบบของหน้ากากโครเมียมในเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นเวลา 90 วินาที ดังภาพผนวกที่ ก1c จากนั้นนำชิ้นงานไปจุ่มในน้ำยา AZ developer เป็นเวลา 3 นาที รูปแบบที่ต้องการก็จะปรากฏบนหน้ากากแกรไฟต์ ดังภาพผนวกที่ ก1d แล้วนำไปชุบเคลือบไฟฟ้าด้วยโลหะเงินที่มีความหนาแน่นกระแส $1\ \text{mA}/\text{cm}^2$ เพื่อให้ได้จุดของเงินเกิดขึ้นบนหน้ากากแกรไฟต์ดังภาพผนวกที่ ก1e จุดของเงินที่ได้มีรูปร่างค่อนข้างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $10\ \mu\text{m}$ ต่างจากรูปแบบดั้งเดิมที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์ แผ่นแกรไฟต์ได้รับการเคลือบโดยการหยดสารไวแสง SU-8 ขณะที่หมุนเหวี่ยงจนมีชั้นความหนา $50\ \mu\text{m}$ ดังภาพผนวกที่ ก1f ก่อนนำไปอบแบบอ่อนที่ $95\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที เพื่อไล่สารละลาย และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปฉายรังสีเอ็กซ์ โดยมีหน้ากากแกรไฟต์ที่เตรียมในขั้นตอนแรกทำหน้าที่บังรังสีเอ็กซ์ให้ผ่านลงบนผิวหน้าของสารไวแสง SU-8 ตามรูปแบบที่เตรียมไว้เป็นเวลา 10 นาที ดังภาพผนวกที่ ก1g จะเกิดรูปแบบบนผิว SU-8 บนพื้นที่ขนาด $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนจะนำไปจุ่มในน้ำยา developer แฉวของหลุมขนาดเล็กจะปรากฏบนชั้นสารไวแสง SU-8 ดังภาพผนวกที่ ก1h ซึ่งเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่มีรูปแบบแน่นอนที่จะนำมาใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ต่อไป

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน Advanced Materials Research Vols. 335-336 (2011) pp 1000-1003

พ.ศ. ๒๕๕๖

Characterization of Cobalt Films on X-ray Lithographic Micropillars

PATCHARA Sukonrat ^{1,a}, CHANWUT Sriphung ^{2,b},
 WATCHAREE Rattanasakulthong ^{1,c}, and CHITNARONG Sirisathitkul ^{3,d}

¹Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

²Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)

Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

³Molecular Technology Research Unit, School of Science, Walailak University,
 Nakhon Si Thammarat, 80161, Thailand

^apatchara.su@hotmail.com (corresponding author), ^bchanwut@slri.or.th, ^cfsciwr@ku.ac.th,
^dschitnar@wu.ac.th

Keywords: X-ray lithography, Micropillar, SU-8 photoresist, Magnetic thin film, VSM.

Abstract. Arrays of SU-8 photoresist pillars ($10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$) on copper substrates were fabricated by X-ray lithography. The photoresist-coated substrates were irradiated by X-ray from a synchrotron source through patterned silver dots on a graphite mask. After the resist development, the chemically stable and mechanically hardened SU-8 pillars exhibited smooth vertical sidewalls and cross section with up to 10 % dimensional errors from the designated pattern. Cobalt of thickness ranging from 50 to 80 nm was then deposited on these patterned substrates by RF sputtering. These cobalt films on SU-8 pillars showed a lower in-plane magnetization than that of continuous cobalt films because of their smaller grain size. The measurement with out-of-plane magnetic field gave rise to a higher magnetization and this anisotropic behavior was observed only in cobalt-coated pillars.

Introduction

A variety of ferromagnetic micropatterned structures has been fabricated using lithography techniques [1]. The understanding of such structures provides a bridge between bulk and nanoscale magnets because the magnetic properties evolve according to the reduction in dimensions. For examples, the size of magnetic microwires regulated the exchange bias and magnetoresistance effect [2,3]. Previous works also showed that the magnetization reversal process in microstrip arrays was sensitive to their dimensions and spacing [4,5]. Magnetic dots of orders ranging from ten nm to μm have been actively investigated regarding the effect of anisotropy distribution on their magnetic recording characteristics [6-8].

With current technology, the X-ray lithography can fabricate microstructures with high-aspect-ratio geometry. A designated pattern is transferred onto a substrate by using masked irradiation on a layer of sensitive polymer resist such as SU-8 whose main components are Bisphenol A Novolak epoxy oligomer and triarylsulfonium hexafluoroantimonate salt [9]. X-ray is able to penetrate a thick photoresist layer creating a pillar with vertical sidewalls. This high-aspect-ratio structure is desirable because stray fields from the magnetic deposits in the trenches do not interfere with those on the pillars [10]. It follows that the etching process can be avoided. In this work, arrays of SU-8 micropillars with an aspect ratio of 5 were patterned by X-ray lithography using the synchrotron radiation. After cobalt deposition, morphology and magnetic properties were characterized.

Experimental procedure

The masked irradiation was performed at the beam line BL6 of the Synchrotron Light Research Institute, Thailand. Each copper substrate was spin-coated with a layer of 50 μm thick SU-8 photoresist. To remove the solvent and improve the adhesion of photoresist, the substrates were

soft-baked at 95 °C for 40 min and dried at room temperature for 24 h before the X-ray exposure. In a pattern transfer from 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ silver dots on a graphite mask to a layer of SU-8, X-ray of wavelength 1.24 nm was irradiated onto the substrate placed under the mask for 10 min. The exposed resist in an area about 5 mm $\times$ 5 mm was then left at room temperature for 24 h before developing. The pattern on the substrate after the resist development was observed under an optical microscope

The patterned substrates were used in the RF sputtering of cobalt. A cobalt disk (99.95%) of 7.7 cm in diameter and 0.6 cm in thickness was installed as target in the sputtering chamber filled with argon gas of 51 sccm. The cobalt film was grown on the patterned substrate using the RF power of 200 W for 3 min. After the deposition, the surface of cobalt films on SU-8 pillars was inspected by scanning electron microscopy (SEM) and the thickness was estimated from side view micrographs. Their magnetic properties were measured by vibrating sample magnetometry (VSM) and compared to those of continuous cobalt films surrounding the patterned area.

Results and discussion

Micrographs of developed SU-8 resist are shown in Fig. 1. Since the cross-linking reduces the solubility to the developer, only the hardened parts of SU-8 remain on the copper substrate while the rest is washed away. From the top view in Fig 1(a), the cross sections of the pillars appeared as bright dots has some distortion in lateral dimensions from 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. Their corners are curved resulting in the rounded features. By analyzing an SEM micrograph in Fig. 1(b), an average width of the cross section is 9.64 μm with a standard deviation of 0.46. The deviation from the designated position can be determined by connecting a straight line between the center of each cross section and the bending of these lines then indicates the positional errors in each row. The interfeature distance is averaged as 18.73 μm (with a standard deviation of 2.44) whereas the designated spacing is 20 μm . These size and shape distributions come from both heat treatments and imperfect resist developments [1,9]. From two side view micrographs of continuous films, the cobalt thickness at different points ranges from 50 to 80 nm with average value of 54 ± 4 and 70 ± 7 nm.

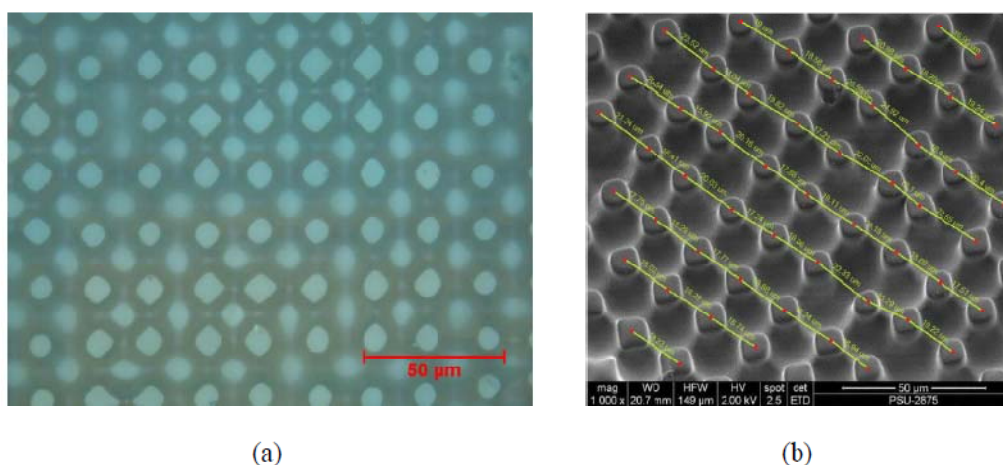


Fig. 1: (a) Top view optical micrograph of SU-8 pillars after the resist development and (b) SEM micrograph of SU-8 pillars after cobalt deposition.

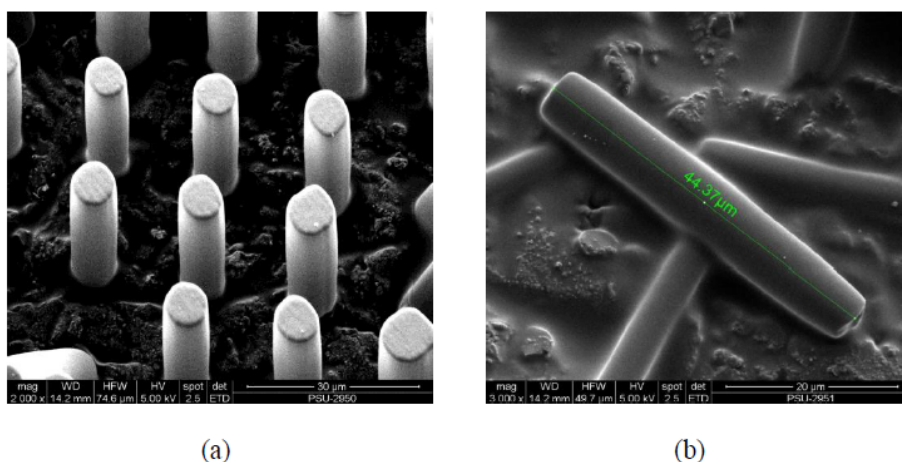


Fig. 2: SEM micrographs of cobalt-coated micropillars in (a) patterned and (b) collapsed regions.

With a tilt angle and a higher magnification of a patterned region, the smooth cobalt film was observed in Fig. 2(a) implying that the SU-8 pillars possess small flatness errors. Pattern collapse exemplified in Fig. 2(b) occurs when the adhesion between SU-8 and copper is weak. The capillary force in the developments and rinsing stage is a major factor in the debonding between the resist and copper layer [9]. In a collapse region as shown in Fig. 2(b), the smooth vertical sidewalls of pillars are revealed without T-profiles meaning that the effects of diffraction and photon absorption are minimal [1]. The height average with two other pillars is $44 \pm 1 \mu\text{m}$.

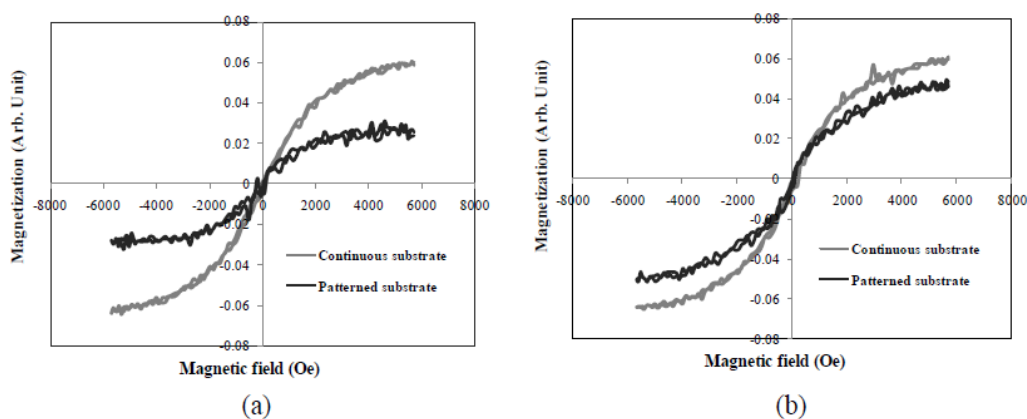


Fig. 3: VSM measurement of (a) in-plane and (b) out-of-plane magnetizations of cobalt on micropillars compared to continuous films.

Magnetization characteristics of cobalt films on continuous and patterned substrates are compared in Fig. 3. When a magnetic field is increasingly applied parallel to the surface of continuous films, the in-plane magnetization in Fig. 3(a) initially increases with a high rate but its sensitivity to the change in magnetic field beyond 2000 Oe is reduced. The cobalt-coated micropillars have a lower magnetization and the saturation is clearly obtained within 6000 Oe field. Since it was reported that the magnetization of nickel was increased by the grain growth [11], this can be explained by the tendency to form smaller cobalt grains on the pillars. By applications of magnetic field in the perpendicular direction to the film surface, the out-of-plane magnetization

cobalt-coated micropillars markedly rises and approaches the values of continuous films in Fig. 3(b). Whereas this anisotropic behavior is observed in the case of patterned substrates, the cobalt films on continuous substrates have comparable in-plane and out-of-plane magnetizations. It implies that the perpendicular anisotropy was slightly developed when the cobalt deposited on microscale areas.

Conclusions

- 1) X-ray lithography can be used to patterned SU-8 micropillars with smooth vertical sidewalls. Each pillar has an aspect ratio about 5 and exhibit around 10% distortion in geometry.
- 2) Cobalt films can be sputtered on array of SU-8 micropillars with small flatness errors.
- 3) Magnetizations of cobalt films on patterned micropillars are anisotropic in respect to the direction of applied magnetic field and lower than those of continuous film because of their grain sizes.

Acknowledgements

This work is funded by the Thailand's Synchrotron Light Research Institute (Grant 2552/PS01). The micrographs were taken at Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. The authors would like to thank Dr. Pongsakorn Jantaratana for his advice in VSM measurements.

References

- [1] A. del Campo and C. Greiner: J. Micromech. Microeng. Vol. 17 (2007), p. R81
- [2] D. Morecroft, P. L. Prieto and M. G. Blamire: J. Appl. Phys. Vol 97 (2005), Article no. 10C518
- [3] G. Dumpich, T. P. Krome and B. Hausmanns: J. Magn. Magn. Mater. Vol. 248 (2002), p. 241
- [4] K. Potzger, L. Bischoff, M. O. Liedke, B. Hillebrands, M. Rickart, P. P. Freitas, J. McCord and J. Fassbender: IEEE Trans. Magn. Vol. 41 (2005), p. 3610
- [5] A. Westphalen, K. Theis-Brohl, H. Zabel, K. Rott and H. Bruckl: J. Magn. Magn. Mater. Vol. 302 (2006), p. 181
- [6] T. Thomson, G. Hu, and B. D. Terris: Phys. Rev. Lett. Vol. 96 (2006), Article no. 257204
- [7] M. Becherer, G. Csaba, W. Porod, R. Emling, P. Lugli and D. Schmitt-Landsiedel: IEEE Trans. Nanotechnol. Vol. 7 (2008), p. 316
- [8] S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Kato, O. Kitakami, K. Mitsuzuka, T. Shimatsu, H. Muraoka, H. Aoi and J. C. Lodder: J. Magn. Magn. Mater. Vol. 320 (2008), p. 2874
- [9] A. del Campo and E. Arzt: Chem. Rev. Vol. 108 (2008), p. 911
- [10] C. Choi, D. Hong, Y. Oh, K. Noh, J. Y. Kim, L. Chen, S. H. Liou and S. Jin: Elec. Mater. Lett. Vol. 6 (2010), p. 113
- [11] O. A. Fouad: Int. J. Nanosci. Vol. 7 (2008), p. 1

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวพัชรา สุกรัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2515
สถานที่เกิด	สงขลา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผลงานตีพิมพ์	Sukonrat, P., C. Sripung, W. Rattanasakulthong and C. Sirisathitkul. 2011. Characterization of Cobalt Films on X-ray Lithographic Micropillars. Adv. Mat. Res. 335-336: 1000-1003
ทุนวิจัยที่ได้รับ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน)