

การศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์

STUDY OF MAGNETIC THIN FILM BY KERR EFFECT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

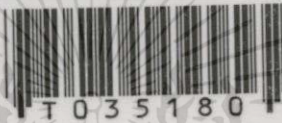
พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-650-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์

STUDY OF MAGNETIC THIN FILM BY KERR EFFECT



วีชรี รัตนสกุลทอง

WATCHAREE RATTANASAKULTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2543

ISBN 974-622-650-9

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...35180
วัน, เดือน, ปี 2 3 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF MAGNETIC THIN FILM BY KERR EFFECT

WATCHAREE RATTANASAKULTHONG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSIC
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2000

ISBN 974-622-650-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

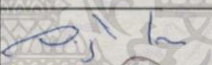
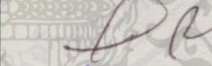
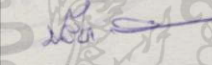

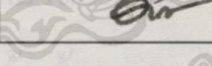
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รร
STUDY OF MAGNETIC THIN FILM BY KERR EFFECT
ชื่อนักศึกษา นางสาววัชรีย์ รัตนสกุลทอง
รหัสประจำตัว 39065003
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สุรพล รักวิจิย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา	
ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี	
ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
รศ.สุรพล รักวิจิย์	
รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 ธันวาคม 2542 เวลา 15.00 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ ห้อง 424 ห้องประชุม-สัมมนา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 24 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2543

หัวข้อวิทยานิพนธ์

นักศึกษา

รหัสประจำตัว

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

การศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์

นางสาววีรี รัตนสกุลทอง

39065003

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

ฟิลิกส์ประยุกต์

2543

รศ.สุรพล รักวิชัย

รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

ระบบศึกษาปรากฏการณ์ของเคอร์(Kerr Effect) เป็นชุดตรวจวัดลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กชนิดฟิล์มบางที่สำคัญวิธีหนึ่งของการศึกษาลักษณะสมบัติทางแม่เหล็ก โดยในชุดปรากฏการณ์ของเคอร์ ได้ทำการวัดปรากฏการณ์ของเคอร์บนชั้นงานที่ให้สนามแม่เหล็กในแนวขวางด้วยความแรงสนามแม่เหล็ก H ถึง 5 kOe โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงโพลาไรซ์ ΔI ที่สะท้อนจากวัสดุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการแมกนีโตเซชันของวัสดุ M สามารถแสดงผลด้วยกราฟฮีสเทอรีซิส $M-H$ ชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นใช้ศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางในรูปของรีจิดิตส์ก เพื่อวัดค่าเชิงเปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าสนามโคเออร์ซิวิตี H_c ค่ารีมานนท์ สแควร์เนส S และ ค่าโคเออร์ซิวิตี สแควร์เนส S^* โดยใช้แสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ค่าสนามโคเออร์ซิวิตีที่วัดอยู่ระหว่าง 2.0 kOe-2.7 kOe ชุดของเคอร์เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับงานด้านวัดฟิล์มบางเชิงเปรียบเทียบและ ทดสอบได้อย่างรวดเร็ว เวลาในการทดสอบประมาณ 15 วินาที

Thesis Title	Study of Magnetic Thin Film by Kerr Effect
Student	Miss. Watcharee Rattanasakulthong
Student ID	39065003
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Surapol Rukvichai
Thesis Co.Advisor	Assoc. Prof. Dr.Aree Wichainchai

ABSTRACT

Magneto-Optic Kerr effect set is a important laboratory system to study characterization of magnetic thin film materials. The set measure Kerr effect of samples in transverse magnetic field geometry , the magnetic field \vec{H} up to 5 kOe. The change of reflection polarized light intensity ΔI is detected directly proportional to magnetization of materials \vec{M} and displayed with $M-H$ hysteresis loop. This equipment setup is enable us to study magnetic thin film of rigid disk to bear comparison with essential parameters such as coercivity H_c , remanance squareness S and coercivity squareness S^* . Utilization of linear polarized light He-Neon laser of wavelength 632.8 nm. , coercivity can be detected between 2.0-2.7 kOe. The developed setup to be appropriate with thin film comparative measurements and fast for testing , the measurement time is about 15 seconds.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและปรึกษาทางวิชาการ จาก รศ. สุรพล รักวิชัย และ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จาก ท่านทั้งสองมาก และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Dr.Pavel Nabokin ผู้เชี่ยวชาญด้านวิชาแม่เหล็กที่ให้คำแนะนำทางด้านเทคนิค และคำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการพื้นฐาน

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และความสะดวก

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจ และช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่เป็นกำลังใจตลอดเวลาการทำวิทยานิพนธ์ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นางสาววัชรีย์ รัตนสกุลทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
รายการสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5.1 แผนการดำเนินการ.....	4
1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติก.....	5
2.1 ปรากฏการณ์ทางด้านแมกนีโต-ออปติก.....	5
2.1.1 ปรากฏการณ์ของซีมาน.....	5
2.1.2 ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์.....	6
2.1.3 ปรากฏการณ์ของวอห์จ.....	7
2.1.4 ปรากฏการณ์ของ คัตตัน-มุดัน.....	7
2.1.5 ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์.....	8
2.2 ฟิสิกส์ของปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติก.....	9
2.3 ฟิสิกส์ของปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์.....	12
2.3.1 ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวโพลาไรซ์.....	15
2.3.2 ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามยาว.....	16
2.3.3 ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามขวาง.....	16
2.4 วัสดุทางแมกนีโต-ออปติก.....	22
2.4.1 วัสดุโปร่งแสง.....	22
2.4.2 วัสดุสะท้อนแสง.....	22
2.4.3 สารไดอิเล็กตริก.....	23
2.4.4 ผลึกเฟอร์ไรต์แมกนีติก.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 โลหะและโลหะผสม.....	23
2.4.6 สารกึ่งตัวนำกึ่งแม่เหล็ก.....	23
2.4.7 สารโครงสร้างหลายชั้น.....	23
2.5 ชุดวัดคุณสมบัติของวัสดุทางแม่เหล็กชนิดฟิล์มบาง.....	24
2.5.1 เครื่องมือวัดชนิด VSM.....	24
2.5.2 เครื่องมือวัดชนิด B-H มิเตอร์.....	26
2.5.3 เครื่องมือวัดชนิด AGM.....	27
2.5.4 เครื่องมือวัดชนิด TRDM.....	28
บทที่ 3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ.....	31
3.1 โมเมนต์แม่เหล็ก.....	31
3.2 การแมกนีไทเซชัน.....	32
3.2.1 ความหนาแน่นของการแมกนีไทเซชัน.....	34
3.2.2 คุณสมบัติของการแมกนีไทเซชัน.....	37
3.3 กราฟการแมกนีไทเซชัน.....	38
3.4 วัสดุแม่เหล็ก.....	42
3.4.1 วัสดุแม่เหล็กแบบง่าย.....	43
3.4.2 วัสดุแม่เหล็กแบบยาก.....	45
3.4.3 วัสดุแม่เหล็กกึ่งยาก.....	46
บทที่ 4 ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่.....	47
4.1 ไดอะแกรมการวัดด้วยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่.....	47
4.2 หัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	52
4.3 ตัวอย่างที่ทดสอบ.....	56
4.4 ภาคแสดงผล.....	59
4.5 แหล่งกำเนิดแสง.....	60
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	61
5.1 การทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนาม.....	61
5.2 การทดสอบวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิสของแผ่นฮาร์ดดิสก์.....	64
5.2.1 การอ่านค่าสนามโคเออร์ซีวิตี.....	65
5.2.2 การอ่านค่าโคเออร์ซีวิตี สแควร์เนส.....	65
5.2.3 การอ่านค่ารีมานนท์ สแควร์เนส.....	66
5.3 ผลการตรวจวัดของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่.....	67
5.3.1 ผลการทดลองของตัวอย่าง #1.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 ผลการทดลองของตัวอย่าง #2.....	68
5.3.3 ผลการทดลองของตัวอย่าง #3.....	69
5.3.4 ผลการทดลองของตัวอย่าง #4.....	70
5.3.5 ผลการทดลองของตัวอย่าง #5.....	71
5.3.6 ผลการทดลองของตัวอย่าง #6.....	72
5.3.7 ผลการทดลองของตัวอย่าง #7.....	73
5.3.8 ผลการทดลองของตัวอย่าง #8.....	74
5.3.9 ผลการทดลองของตัวอย่าง #9.....	75
5.3.10 ผลการทดลองของตัวอย่าง #10.....	76
5.3.11 ผลการทดลองของตัวอย่าง #11.....	77
5.3.12 ผลการทดลองของตัวอย่าง #12.....	78
5.3.13 ผลการทดลองของตัวอย่าง #13.....	79
5.3.14 ผลการทดลองของตัวอย่าง #14.....	80
5.3.15 ผลการทดลองของตัวอย่าง #15.....	81
5.3.16 ผลการทดลองของตัวอย่าง #16.....	82
5.3.17 ผลการทดลองของตัวอย่าง #17.....	83
5.3.18 ผลการทดลองของตัวอย่าง #18.....	84
5.3.19 ผลการทดลองของตัวอย่าง #19.....	85
5.3.20 ผลการทดลองของตัวอย่าง #20.....	86
5.3.21 ผลการทดลองของตัวอย่าง #21.....	87
5.3.22 ผลการทดลองของตัวอย่าง #22.....	88
5.3.23 ผลการทดลองของตัวอย่าง #23.....	89
5.3.24 ผลการทดลองของตัวอย่าง #24.....	90
5.3.25 ผลการทดลองของตัวอย่าง #25.....	91
5.3.26 ผลการทดลองของตัวอย่าง #26.....	92
5.3.27 ผลการทดลองของตัวอย่าง #27.....	93
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	94
บรรณานุกรม.....	101

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การตรวจวัดด้วยชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่..... 102

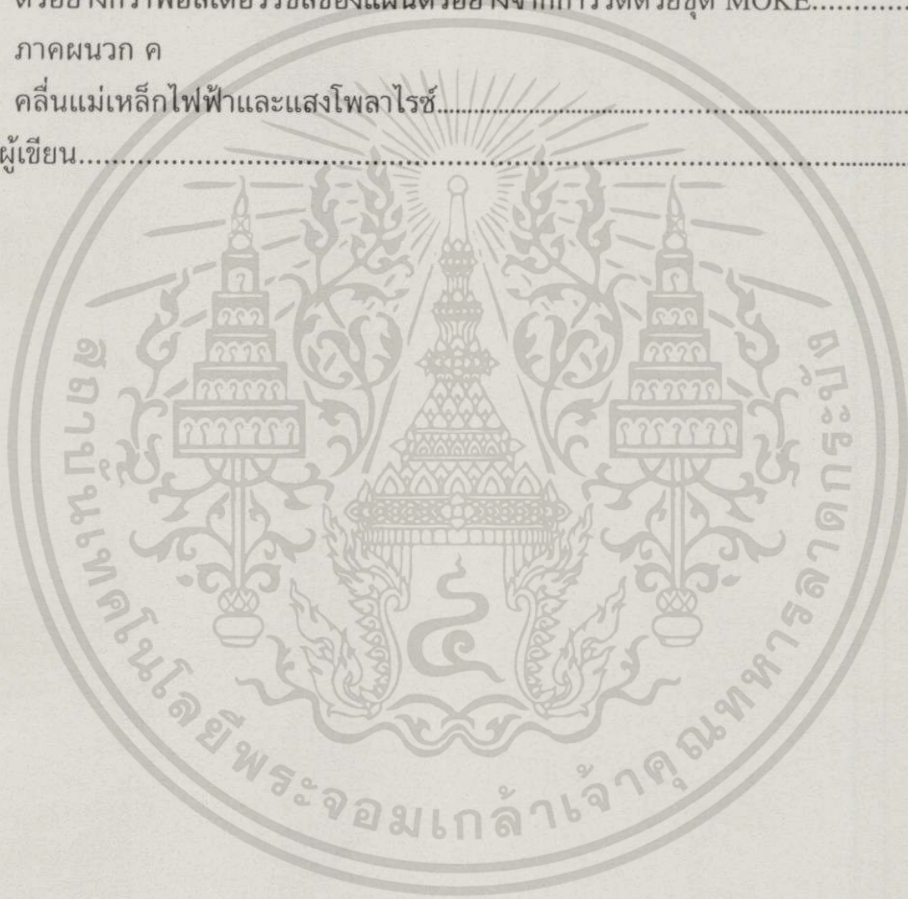
ภาคผนวก ข

ตัวอย่างกราฟฮีสเตอร์รีซิสของแผ่นตัวอย่างจากการวัดด้วยชุด MOKE..... 105

ภาคผนวก ค

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแสงโพลาไรซ์..... 119

ประวัติผู้เขียน..... 126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #1.....	67
5.2 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #1.....	67
5.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #2.....	68
5.4 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #2.....	68
5.5 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #3.....	69
5.6 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #3.....	69
5.7 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #4.....	70
5.8 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #4.....	70
5.9 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #5.....	71
5.10 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #5.....	71
5.11 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #6.....	72
5.12 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #6.....	72
5.13 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #7.....	73
5.14 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #7.....	73
5.15 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #8.....	74
5.16 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #8.....	74
5.17 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #9.....	75
5.18 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #9.....	75
5.19 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #10.....	76
5.20 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #10.....	76
5.21 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #11.....	77
5.22 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #11.....	77
5.23 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #12.....	78
5.24 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #12.....	78
5.25 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #13.....	79
5.26 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #13.....	79
5.27 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #14.....	80
5.28 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #14.....	80
5.29 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #15.....	81
5.30 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #15.....	81
5.31 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #16.....	82
5.32 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #16.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.33 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #17.....	83
5.34 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #17.....	83
5.35 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #18.....	84
5.36 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #18.....	84
5.37 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #19.....	85
5.38 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #19.....	85
5.39 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #20.....	86
5.40 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #20.....	86
5.41 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #21.....	87
5.42 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #21.....	87
5.43 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #22.....	88
5.44 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #22.....	88
5.45 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #23.....	89
5.46 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #23.....	89
5.47 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #24.....	90
5.48 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #24.....	90
5.49 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #25.....	91
5.50 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #25.....	91
5.51 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #26.....	92
5.52 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #26.....	92
5.53 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง #27.....	93
5.54 รายละเอียดของข้อมูลตัวอย่าง #27.....	93
6.1 ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากเครื่อง TRDM และ MOKE.....	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์รรและฟาราเดย์.....	12
2.2 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์รรในแนวโพลาร์(PKE).....	15
2.3 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์รรในแนวตามยาว(LKE).....	16
2.4 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์รรในแนวตามขวาง(TKE).....	16
2.5 การส่งผ่านแสงผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางที่เป็นแม่เหล็กและตัวกลางที่ไม่เป็นแม่เหล็ก.	17
2.6 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี VSM.....	25
2.7 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี M-H มิเตอร์.....	26
2.8 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี AGM.....	27
2.9 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี TRDM.....	28
2.10 กราฟฮีสเตอร์รีซิส ในช่วงลดสนามแม่เหล็ก.....	29
3.1 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กในสนามที่สม่ำเสมอ.....	31
3.2 ทิศทางสปินของอิเล็กตรอนในอะตอมของเหล็ก.....	34
3.3 โมเมนต์แม่เหล็กที่เป็นไปตามลักษณะการจัดเรียงแท่งแม่เหล็ก.....	35
3.4 การจัดเรียงตัวของโดเมนในโครงสร้างผลึกที่ไม่มีการแมกนีโตเซชัน.....	37
3.5 ขบวนการแมกนีโตเซชันของโดเมนเมื่อมีสนามแม่เหล็ก.....	37
3.6 กราฟ M-H ฮีสเตอร์รีซิส ลูป.....	39
3.7 พารามิเตอร์ที่สำคัญของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูป.....	40
3.8 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโดเมนที่สภาวะการแมกนีโตเซชันต่าง ๆ.....	41
3.9 ขบวนการเกิดแมกนีโตเซชัน.....	42
4.1 ระบบการศึกษาฟิล์มบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รร.....	48
4.2 ลักษณะระบบอุปกรณ์ของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รร.....	49
4.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางภายในตู้ของชุดการทดลองปฏิบัติการของเคอร์รร.....	49
4.4 ทางเดินแสงของแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์ผ่านโพลาไรเซอร์ตกกระทบลงบนตัวอย่างที่เป็นริจิดดิสก์.....	50
4.5 ทางเดินของแสงสะท้อน เมื่อสะท้อนจากตัวอย่างผ่านเลนส์รวมแสงผ่านต่อไปยังโพลาไรเซอร์ไปยังโฟโตดีเทคเตอร์.....	50
4.6 ลักษณะของโฟโต้ดีเทคเตอร์ส่วนของการรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างที่ทดสอบ.....	51
4.7 การแสดงผลกราฟฮีสเตอร์รีซิสบนหน้าจ้อออสซิลโลสโคป.....	51
4.8 ลักษณะและทิศทางของสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะขนาดของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	53
4.10 แหล่งกำเนิดสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	54
4.11 เครื่องขยายกำลังขนาด 300 วัตต์.....	55
4.12 หัวกำเนิดแม่เหล็กในชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รร.....	56
4.13 โครงสร้างภาคตัดขวางของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูล.....	57
4.14 ลักษณะของแผ่นฮาร์ดดิสก์ตัวอย่างที่ทดสอบในชุดวิจัย.....	57
4.15 การตำแหน่งการวางแผ่นฮาร์ดดิสก์ในสนามแม่เหล็กขณะตรวจสอบ.....	58
4.16 เครื่องออสซิลโลสโคป 2 ช่องสัญญาณ แบบดิจิทัล Textronix รุ่น TDS 350.....	59
4.17 ลักษณะของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูป จากการวัดจากเครื่องออสซิลโลสโคป.....	59
4.18 แหล่งจ่ายกำลังของเครื่องฮีเลียม-นีออนเลเซอร์.....	60
4.19 ลักษณะทางเดินแสงของฮีเลียม - นีออนเลเซอร์ในชุดวิจัย.....	60
5.1 เกาส์มิเตอร์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กในชุดวิจัย.....	62
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในขดลวดและสนามแม่เหล็กจากการวัด.....	62
5.3 สนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าในขดลวดจากความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รร.....	63
5.4 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #1.....	67
5.5 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #2.....	68
5.6 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #3.....	69
5.7 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #4.....	70
5.8 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #5.....	71
5.9 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #6.....	72
5.10 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #7.....	73
5.11 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #8.....	74
5.12 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #9.....	75
5.13 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #10.....	76
5.14 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #11.....	77
5.15 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #12.....	78
5.16 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #13.....	79
5.17 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #14.....	80
5.18 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #15.....	81
5.19 กราฟการแมกนีไซชั่นของตัวอย่าง #16.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #17.....	83
5.21 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #18.....	84
5.22 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #19.....	85
5.23 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #20.....	86
5.24 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #21.....	87
5.25 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #22.....	88
5.26 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #23.....	89
5.27 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #24.....	90
5.28 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #25.....	91
5.29 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #26.....	92
5.30 กราฟการแมกนีโซชันของตัวอย่าง #27.....	93
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากเครื่อง TRDM และ เครื่องMOKE	96
6.2 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE.....	97
6.3 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากเครื่องมือวัดชนิด TRDM.....	97
6.4 ลักษณะข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE และเครื่องมือวัดชนิด TRDM	98
6.5 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบาง โดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดชนิด TRDM.....	99

รายการสัญลักษณ์

\vec{k}	เวกเตอร์คลื่น
n	ดัชนีหักเห
p	ความแรงของขั้วแม่เหล็ก
m	โมเมนต์แม่เหล็ก
\hbar	ค่าคงที่ของพลังค์
V	ปริมาตร
σ	แมกนีโตเซชันจำเพาะ
\vec{B}	ความหนาแน่นของฟลักซ์
M_r	รีมานันซ์ แมกนีโตเซชัน
M_s	แมกนีโตเซชันอิ่มตัว
H_c	ค่าสนามโคเออร์ซีวิตี
S	ค่ารีมานันซ์ สแควร์เนส
S^*	ค่าโคเออร์ซีวิตี สแควร์เนส
λ	ความยาวคลื่นแสง
I	ความเข้มแสง
Δ	ความต่างเฟส
A	พื้นที่หน้าตัด
R	ความต้านทาน
v_0	ความถี่ของเส้นดูดกลืน
ν	ความถี่ของแสงที่ส่งผ่าน
e	ประจุอิเล็กตรอน
x	ทางเดินแสง
c	ความเร็วแสง
n_0	ดัชนีหักเหของแสงเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก
N	จำนวนอะตอมที่ดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
\vec{H}	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
f	ความถี่ในการออสซิลเลต
C_m	ค่าคงที่ของคัตตัน-มูตัน
m	มวลของอิเล็กตรอน
k	ค่าคงที่ของสปริง
b	ค่าคงที่ของการแดมป์
\vec{r}	การขจัดของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันไฟฟ้า การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω	ความถี่เชิงมุม
t	เวลา
μ_0	ค่าเพอร์เมียบิลิตี
ε_0	เพอร์เมียบิลิตีของอากาศ
χ	ซัสเซพติบิลิตี
Q	วอร์ท พารามิเตอร์
\bar{P}	การโพลารไรซ์ทางไฟฟ้า
\bar{M}	แมกนีโตเซชัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กราฟการแมกนีโตเซชันเป็นกราฟที่แสดงลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก H และการแมกนีโต M ของวัสดุแม่เหล็ก กราฟการแมกนีโตเซชันจะแตกต่างกันสำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ต่างชนิดกัน เช่น สารพาราแมกนีติก และสารไดอามกนีติก กราฟการแมกนีโตเซชันจะเป็นเส้นตรง นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ \bar{H} กับการแมกนีโตเซชัน M เป็นสัดส่วนกันโดยตรง ส่วนสารเฟอร์โรแมกนีติก และเฟอร์โรแมกนีติก กราฟการแมกนีโตเซชันจะมีลักษณะเป็น ฮิสเตอร์รีซิส ลูป สารแม่เหล็กทั้งสองชนิดนี้ ค่าการแมกนีโตเซชันของวัสดุเป็นฟังก์ชันกับสนามแม่เหล็ก ฮิสเตอร์รีซิส ลูป เป็นรูปแบบเฉพาะของสารแม่เหล็กทั้งสองชนิด การเกิดฮิสเตอร์รีซิสของสารเฟอร์โรแมกนีติก เป็นสภาวะปรากฏการณ์ซึ่งสภาวะของระบบไม่มีการย้อนกลับ หรือ กลับทางเดิมเนื่องมาจากตัวแปรจากภายนอก

แม้ว่ากราฟฮิสเตอร์รีซิสจะมีรูปร่างคล้าย ๆ กันแต่ค่าพารามิเตอร์ของกราฟของสารต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกัน พารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญที่จะใช้แยกแยะวัสดุในการนำไปใช้งาน เพื่อความเหมาะสมกับงาน และคุณภาพของงาน พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าโคเออร์ซิวิตี H_c ค่าสนามรีมานนซ์ M_r ค่าโคเออร์ซิวิตี สแควร์เนส S^* และค่ารีมานนซ์ สแควร์เนส S

ผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญ และได้มีการวิจัยเกี่ยวกับลักษณะของวัสดุทางแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกนีติกของฟิล์มบางในรูปของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ โดยใช้ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์รับเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานในการวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกราฟฮิสเตอร์รีซิสในเชิงเปรียบเทียบ ระบบแมกนีชดศึกษาโต-ออปติกของเคอร์รับที่พัฒนาขึ้น เป็นระบบตรวจวัดชนิดตรวจสอบแบบ 100 % ในระบบอุตสาหกรรมโดยเฉพาะวัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไประบบตรวจวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กชนิดฟิล์มบางเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องใช้เทคนิคหลายด้านผสมผสานกัน ทำให้การพัฒนาวัสดุทางแม่เหล็กมีอุปสรรค ในการพัฒนาระบบการวัดซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญอันหนึ่งของประเทศที่ยังขาด คือ การวางรากฐานการฝึกทักษะงานด้านการวิจัย และพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ เช่นทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก เป็นต้น

นอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นความต้องการของทางด้านบริษัทเอกชนที่ให้ช่วยพัฒนาเทคนิคขั้นมาตรวจวัด เพราะเป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการตรวจวิเคราะห์ข้อบกพร่อง (defect) ที่อาจจะเกิดขึ้นในแผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ เป็นระบบตรวจวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย และเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และรับรองคุณภาพของฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับการแมกนีโตเซชันของวัสดุทางแม่เหล็ก
- 1.2.2 เพื่อพัฒนานำเทคนิคการวัดด้วยปรากฏการณ์ของเคอร์รี ไปใช้งานทางด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย
- 1.2.3 เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในเชิงเปรียบเทียบของกราฟการแมกนีโตเซชันของฟิล์มบางชนิดเฟอร์โรแมกนีติก
- 1.2.4 เพื่อจะนำไปใช้งานได้จริง โดยได้ติดต่อกับทางบริษัทเอกชนที่ใช้งาน เช่น บริษัท ซีเทค เทคโนโลยี(ประเทศไทย) จำกัด

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

กราฟการแมกนีโตเซชันของวัสดุเป็นกราฟที่ใช้แสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็ก H ในแนวแกน x กับการแมกนีโตเซชัน M ของวัสดุในแนวแกน y สำหรับการวัดสารตัวอย่างในรูปฟิล์มบางสามารถอาศัยหลักการพื้นฐานจากปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์รีมาใช้ในการวัด โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าเคอร์รีโรเตชันของแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างขณะที่ถูกแมกนีโตเซชัน กับค่าการแมกนีโตเซชันของวัสดุ เนื่องจากการให้สนามแม่เหล็กกระทำลงไปในวัสดุซึ่งเป็นตัวกลางจะมีผลทำให้ในการดูดกลืนแสงของวัสดุเปลี่ยนไป โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงได้จากความเข้มแสง ΔI ของแสงเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ตกกระทบลงบนฟิล์มแม่เหล็กบางในรูปแบบของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากสารตัวอย่างจะมีสถานะการโพลาไรซ์เปลี่ยนไปเป็นการโพลาไรซ์แบบวงรี นำสัญญาณจากความเข้มแสงของวัสดุที่แปรโดยตรงกับการแมกนีโตเซชัน และสัญญาณจากสนามจากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กชนิด AC ไปยังสโคปชนิดดิจิตอลทำการเฉลี่ยในโหมด X-Y พล็อตเป็นกราฟฮิสเตอร์รีซิส $M-H$ การแมกนีโตเซชัน และแสดงค่าพารามิเตอร์ H_c , S และ S^* ของสารแม่เหล็กตัวอย่าง

งานวิจัยทางด้านแมกนีโต-ออปติกเป็นงานที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เป็นงานวิจัยที่สามารถทำการตรวจวัดได้สะดวก รวดเร็ว และเป็นการตรวจวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย งานวิจัยวัสดุทางด้านฟิล์มแม่เหล็กบางที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เครื่องมือวัดชนิด VSM เครื่องมือวัดชนิด B-H มิเตอร์ เครื่องมือวัดชนิด AGM และเครื่องมือวัดชนิด TRDM เครื่องมือเหล่านี้เป็นเครื่องมือวัดที่แสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่นเดียวกัน เครื่องมือวัดเหล่านี้เป็นส่วนใหญ่เป็นเครื่องมือแบบทำลาย และเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดตัวอย่างนาน ทางด้านผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือทางด้านแมกนีโต-ออปติกขึ้นเนื่องจากเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย และสามารถทำการวัดวิเคราะห์สารตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว และเป็นการพัฒนา

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยพื้นฐานของการวัดกราฟแมกนีโตเซนชันของฟิล์มบาง โดยใช้ปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติกที่ใช้ในการศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางที่อยู่ในรูปของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างการติดตั้งอุปกรณ์ อุปกรณ์ยึดจับ โดยคำนึงถึงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทางเดินของแสง และตำแหน่งในการวางแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูล และความสะอาด รวดเร็วในการทดสอบในแต่ละตัวอย่าง หลังจากนั้นเป็นการออกแบบอุปกรณ์ยึดจับอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในเครื่องมือ ได้แก่ ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์โพลาไรเซอร์ เลนส์รวมแสง ตัวโฟโตดีเทคเตอร์ และ หัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก

หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีขนาดรูปร่างคล้ายตัวยูพื้นที่หน้าตัด 20 ตารางมิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วมีขนาด 2 มิลลิเมตร โดยใช้แกนหม้อแปลงเป็นแกนในการพันขดลวด ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ(AC) จากนั้นตรวจวัดคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวกำเนิดสนาม ความแรงของสนามแม่เหล็กที่ได้จากหัวกำเนิดสนามที่สร้างขึ้นประมาณ 5 kOe โดยกระแสไฟประมาณ 10 แอมป์ และทำการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป พบว่าเป็นสัดส่วนกันโดยตรง

ทำการติดตั้งระบบด้วยอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบ และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า พร้อมทั้งทำการตรวจวัดแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟฮีสเตอร์รีซิส และวัดค่าพารามิเตอร์ H_c , S และ S^* จากกราฟ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน และปัจจัยที่มีผลต่อการวัด ทำการวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิสของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลทางคอมพิวเตอร์จากบริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด ที่มีค่าสนามโคเออร์ซิวิตี H_c 3 ค่าด้วยกันคือ 2.0 kOe 2.5 kOe และ 2.7 kOe รวมทั้งหมด 27 ตัวอย่าง

วิเคราะห์ผลจากการทดลอง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัด ความถูกต้อง แม่นยำ ของข้อมูลที่ได้จากการวัด แล้วทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดที่ใช้งานในระบบอุตสาหกรรม โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดด้วยชุดศึกษาฟิล์มบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ กับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดชนิด TRDM ของบริษัทซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้งานในระบบตรวจสอบแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ในระบบงานของบริษัทที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แนวทางพัฒนา และการประยุกต์ใช้งาน โดยทำการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลทั้งสองชุด วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสองชุด รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือทั้งสอง เพื่อการพัฒนาเครื่องมือการวัดฟิล์มบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ให้อยู่ในระดับมาตรฐานที่สามารถใช้งานได้ในระบบงานการผลิตในอนาคต

สรุปการทำงานในการพัฒนาชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ วิเคราะห์ถึงปัญหา ข้อจำกัด ความแม่นยำ แนวทางในการพัฒนาเครื่องมือในอนาคตเพื่อให้เป็นประโยชน์สูงสุด รวบรวมและนำเสนอ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 แผนการดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของกราฟการแมกนีโตเซชันของสารแม่เหล็กแต่ละชนิด รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ และ หลักการสร้างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและส่วนประกอบ

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพของเครื่องมือแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 4 ติดตั้งระบบและทดสอบการใช้งานให้สมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 5 วัดกราฟการแมกนีโตเซชันของสารตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน หรือวัดกับตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 7 สรุปการทำวิทยานิพนธ์ และนำเสนอวิทยานิพนธ์เพื่อพัฒนาได้ต่อไปในอนาคต

1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน

ลำดับ	0.5 เดือน	0.5 เดือน	1 เดือน	1 เดือน	1 เดือน	1 เดือน	1 เดือน
ขั้นตอนที่ 1						
ขั้นตอนที่ 2						
ขั้นตอนที่ 3						
ขั้นตอนที่ 4						
ขั้นตอนที่ 5						
ขั้นตอนที่ 6						
ขั้นตอนที่ 7						

รวมระยะดำเนินการประมาณ 6 เดือน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติก

2.1 ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติก

ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างแสงและวัสดุแม่เหล็กที่วางภายใต้แรงกระทำด้วยสนามแม่เหล็ก อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงระหว่างแสง และสนามแม่เหล็ก แต่เป็นปรากฏการณ์เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อวัสดุซึ่งเป็นตัวกลางในการปล่อย หรือ ดูดกลืนแสง วิชาแมกนีโต-ออปติกเป็นสาขาวิชาหนึ่งทางฟิสิกส์ ที่อธิบายเกี่ยวกับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อคุณสมบัติทางด้านแสงของวัสดุ

ในสมัยก่อนเป็นที่รู้จักกันว่าปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติก ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ จนกระทั่งในไม่ช้านี้เอง แมกนีโต-ออปติกได้มีการพัฒนานำไปใช้มากขึ้น และมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น แมกนีโต-ออปติก ดิสก์ เป็นหน่วยความจำที่สามารถนำมาลบและเขียนใหม่ได้หลายครั้ง และนำมาใช้เป็นตัวหลักในการเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแมกนีโต-ออปติกที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

2.1.1 ปรากฏการณ์ของซีมาน (Zeeman Effect)

ปรากฏการณ์ซีมาน (Zeeman effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เส้นสเปกตรัมเส้นเดี่ยวแยกออกเป็นหลายเส้น เมื่ออะตอมของต้นกำเนิดแสงอยู่ในสนามแม่เหล็ก ในทางกลับกันปรากฏการณ์ของซีมานจะหมายถึงลักษณะการแยกของเส้นดูดกลืน เมื่อสารที่ดูดกลืนแสงวางไว้ในสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย ซีมาน (Zeeman) ในปี ค.ศ. 1896 เขาได้ใช้ต้นกำเนิดแสงโซเดียมซึ่งให้เส้นสเปกตรัม 2 เส้น ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันในการศึกษาผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็ก แต่ในขณะนั้นเขาไม่สามารถสังเกตเห็นการแยกของเส้นสเปกตรัมทั้งสองออกเป็นหลายเส้นได้ เพียงแต่พบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงขึ้น สเปกตรัมแต่ละเส้นจะกว้างขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าเครื่องมือที่ใช้ดูการแยกของเส้นสเปกตรัมนั้นมีกำลังแยก (resolving power) ไม่สูงพอ อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมาเขาสามารถใช้เครื่องมือที่มีกำลังแยกสูงขึ้น ทำให้สามารถถ่ายภาพการแยกของเส้นสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ได้แก่ Cu Cd และ Zn โดยการใช้อปริซึมนิกอล (Nicol prism) ช่วยในการตัดเส้นสเปกตรัมบางเส้นที่เกิดขึ้นออกไปเพื่อให้เห็นการแยกของเส้นที่เหลือได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ต่อมาเพรสตัน (Preston) ได้ใช้เครื่องมือที่มีกำลังแยกสูงขึ้นไปอีก ทำให้สามารถศึกษาการแยกของเส้นสเปกตรัมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางและเห็นจำนวนเส้นที่แยกมากมายหลายเส้นด้วยกัน ดังนั้นการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ซีมานของธาตุต่าง ๆ ในขณะนั้นทำให้นักฟิสิกส์สามารถวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิในเนื้อหา ซึ่งเอกสารฉบับนี้เป็นการนำเสนอสู่สาธารณะโดยไม่หวังกำไร หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับความยินยอมจากเจ้าของเอกสาร หรือมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ในทางที่ผิด จะถือว่าผิดกฎหมาย

การเกิดเส้นสเปกตรัมที่มีความซับซ้อน และเป็นการพิสูจน์ทฤษฎีต่าง ๆ ของสเปกตรัมอะตอมได้เป็นอย่างดี

2.1.2 ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์(Faraday Effect)

ได้ค้นพบโดย ไมเคิล ฟาราเดย์ ในวันที่ 13 กันยายน ค.ศ. 1845 เป็นปรากฏการณ์ที่ระนาบการโพลาไรซ์ของแสง หมุนหรือเปลี่ยนสถานะเมื่อลำแสงผ่านสารที่ถูกแมกนีไทเซชัน ระบบทางแสงจะเหมือนกับของระบบของปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิด วิธีการ มีข้อจำกัดตรงที่ว่าตัวอย่างต้องบางพอที่จะให้แสงทะลุผ่านไปได้ ส่วนใหญ่ที่ใช้มักจะเป็นฟิล์มบางออกไซด์ของสารจำพวกเฟอร์ไรต์แมกนีติก (ferrimagnetic Oxides) มีความหนาประมาณ 0.1 mm แม้แต่ฟิล์มบางของพวกโลหะที่มีความบางน้อยกว่า 400 Å ก็เคยใช้มาแล้ว

คลื่นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น สามารถแยกออกเป็นคลื่นโพลาไรซ์แบบวงกลม 2 คลื่นด้วยกัน การหมุนของระนาบการโพลาไรซ์ของแสงที่แพร่ผ่านวัสดุในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กเรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่าปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ หรือ ฟาราเดย์โรเตชัน(Faraday rotation) ขนาดของการหมุน(rotation) เป็นไปดังสมการ

$$\Theta = VBI$$

โดยที่ Θ คือ มุมของการหมุน หรือ ฟาราเดย์โรเตชัน V คือ สัมประสิทธิ์ของเวเดต์(Verdet coefficient) B คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก และ I คือ ค่าความหนา ค่าสัมประสิทธิ์ของเวเดต์ V คือค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าความยาวคลื่น หรือ สนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ สามารถทำความเข้าใจได้ในเทอมของผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของสารเนื่องจากทิศทาง ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนซ้าย หรือการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา ค่าดัชนีหักเหและค่าการแพร่ของคลื่นจะแตกต่างกันไปตามแต่ละรูปแบบของการโพลาไรซ์ และสามารถหาค่าการหมุนของระนาบของคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นได้ การหมุนของระนาบการโพลาไรซ์ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก นั่นคือ ถ้าแสงถูกสะท้อนกลับและผ่านออกมาจากวัสดุตัวอย่าง ค่าฟาราเดย์โรเตชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สามารถหาค่าฟาราเดย์โรเตชันได้จากรูปแบบของการปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ ซึ่งประกอบด้วยลำแสงโพลาไรซ์แพร่ผ่านในแนวตามยาวตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์เป็นปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์ใช้ในการแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารกึ่งตัวนำ

2.1.3 ปรากฏการณ์ของวอจท์ (Voigt Effect)

สารเนื้อเดียวเมื่อวางในสนามแม่เหล็กจะเกิดการหักเหสองแนว และคุณสมบัติทางแสงจะเหมือนกับสารที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบแกนเดียว(Uniaxial) ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์เป็นผลที่เกิดมาจากการหักเหสองแนว เมื่อสังเกตขนานกับสนามแม่เหล็ก เมื่อเทียบกับการสังเกตในแนวตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กจะทำได้ยากกว่า และ เห็นว่าไม่จำเพาะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นน้อยมาก จนกระทั่งใน ค.ศ. 1898 ได้มีการค้นพบโดย W. Voigt และเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ของวอจท์

ปรากฏการณ์ของวอจท์ สามารถคำนวณได้ง่ายสำหรับสารที่มีปรากฏการณ์ของซีมานปกติ ถ้าเป็นปรากฏการณ์ซีมานที่ซับซ้อนผลที่เกิดขึ้นสามารถใช้ทำนายได้ แต่มีตัวอย่างจำนวนน้อยมากที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ ปรากฏการณ์ของวอจท์ ขึ้นกับค่าของดัชนี n_s และ n_p ของแสงโพลาไรซ์ตั้งฉากหรือขนานกับสนามแม่เหล็กซึ่งแตกต่างจากอันอื่นในสนามแม่เหล็กโดยที่เส้นดูดกลืนจะแสดงปรากฏการณ์ของซีมาน ค่าของ n_p เป็นอิสระกับสนามแม่เหล็กเพราะว่าองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ $n_s = \frac{1}{2}(n^+ + n^-)$ เส้นโค้งแสดงความแตกต่างระหว่าง $n_s - n_p$ ซึ่งเป็นรูปที่ใช้สังเกตปรากฏการณ์การหักเหสองแนวทางแม่เหล็ก สูตรทางทฤษฎีที่แทนการหักเหสองแนวเป็นสูตรที่ซับซ้อนมากที่สุด ความยาวคลื่นที่พิจารณาที่เลื่อนชั้นจากชั้นซีมาน ความแตกต่างเฟสแสงมีค่า

$$\delta = \frac{2\pi x}{c} (n_p - n_s) = \frac{e^4 f x}{32\pi^2 c^3 n_0 (v - v_0)^3} NH^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ v_0 คือ ความถี่ของเส้นดูดกลืน v คือ ความถี่ของแสงที่ส่งผ่าน e คือ ประจุของอิเล็กตรอน x คือ ระยะทางของแสงเดิน(Path length) c คือ ความเร็วแสง n_0 คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก N จำนวนอะตอมที่ดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร H คือ ความแรงของสนามแม่เหล็ก และ f คือ ความแรงในการออสซิลเลต ซึ่งเป็นการวัดปริมาณการดูดกลืน

2.1.4 ปรากฏการณ์ คัตตัน-มูตัน(Cotton-Mouton Effect)

ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์เนื่องจากการหักเหสองแนวของแสงในของเหลวเมื่อของเหลวถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็กในแนวตามขวาง จะคล้ายกับปรากฏการณ์อิลเลคโต-ออปติกของเคอร์ร์ และ ใช้ในการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของเหลวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน ถ้าโมเลกุลมีโมเมนต์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะพยายามหมุนโมเลกุล ขนาดการหมุนที่เกิดขึ้น จะขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าโมเลกุลมีออปติคัล เอนนีโซโทรปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Optical anisotropy) ของเหลวที่มีลักษณะแอนนิโซโทรปี (Anisotropy) จะแสดงพฤติกรรม การหักเหสองแนว ปรากฏการณ์ คัตตัน-มูตัน พบมากที่สุดในไนโตรเบนซีน (Nitrobenzen) ความต่างเฟสของแสงในปรากฏการณ์ คัตตัน-มูตัน แสดงได้ดังสมการ ที่ (2.2)

$$\delta = C_m \chi H^2 \tag{2.2}$$

โดยที่ C_m คือ ค่าคงที่ของคัตตัน-มูตัน $C_m = 2.53 \times 10^{-2} / (m \cdot T^2) = 2.53 \times 10^{-12} / (cm \cdot gauss)^2$ χ_m คือค่าชัสเซพติบิลิตี ไนโตรเบนซิลที่ อุณหภูมิ 61.3 องศาฟาเรนไฮน์ (16.3 องศาเซลเซียส) และความยาวคลื่น 578 นาโน เมตร ถ้าสนามแม่เหล็กใหญ่ ($H = 4.65 T = 46,500 Gauss$) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่พอเหมาะการหมุนของระนาบการโพลาไรซ์จะมีค่าจนถึง 27

2.1.5 ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์รั

เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในคุณสมบัติของแสงที่ สะท้อนจากผิวของสารเฟอร์โรแมกนีติกในขณะที่สารถูกแมกนีโตเซชัน ในกรณีของ ปรากฏการณ์ของเคอร์รัทำให้เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงรีในแสงสะท้อน ในขณะที่กฎ การสะท้อนของโลหะจะเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเท่านั้น องค์ประกอบที่เกิดจาก สนามแม่เหล็กในขณะที่การแมกนีโตเซชันเกือบจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว มีค่าเคอร์รัโรเตชัน ประมาณ 10^{-3} ที่พบได้ทั่วไป การอธิบายต้องเริ่มมาจากการสั่นที่แท้จริงของอิเล็กตรอน นำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบ

ปรากฏการณ์ของเคอร์รัเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดเนื่องจากการหมุนของระนาบการ โพลาไรซ์ของแสงที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ระหว่างที่สะท้อนออกจากวัสดุที่ถูกกระทำ ด้วยสนามแม่เหล็ก ขนาดการหมุนของระนาบการโพลาไรซ์มีค่าน้อยมาก มีค่าน้อยกว่า 1 องศา ปรากฏการณ์จะเกิดขึ้นชัดเจนหรือไม่ ขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของสนามแม่ เหล็กที่สัมพันธ์กับระนาบการตกกระทบของลำแสง เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านโพลาไร เซอร์ ซึ่งจะยอมให้แสงที่มีการโพลาไรซ์แบบระนาบผ่านเท่านั้น ตกกระทบลงบนวัสดุขณะ ที่ถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็ก ระหว่างการสะท้อนระนาบการโพลาไรซ์จะมีการหมุนไป ทิศทางหนึ่ง โดยที่ทิศทางการหมุนขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุ ปรากฏการณ์ของเคอร์รัส่วนนำไปประยุกต์ใช้งานในการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของ ผันงโดเมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฟิสิกส์ของปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติก

ทฤษฎีของลอเรนซ์ (Lorentz's Law) ที่อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งมุ่งสำหรับการสอนได้อธิบายในเชิงจุลภาคถึงจุดกำเนิดของปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติก พิจารณาระบบของอิเล็กตรอนที่ถูกกักอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ออสซิลเลต เมื่อให้สนามแม่เหล็กคงที่ \vec{H}_a ให้กับระบบในทิศทางแกน Z สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของแต่ละอิเล็กตรอน ดังนี้คือ

$$m\ddot{\vec{r}} + b\dot{\vec{r}} + k\vec{r} = e\vec{E}_0 \exp j\omega t + e\mu_0\dot{\vec{r}} \times \vec{H}_a \quad (2.3)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน m คือ มวลของอิเล็กตรอน k คือ ค่าคงที่ของสปริง ค่า b คือ ค่าคงที่ของการแดมป์ \vec{r} คือ การขจัดของอิเล็กตรอน \vec{E}_0 คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า $\omega = 2\pi f$ เป็นความถี่เชิงมุม t เป็นเวลา และ μ_0 คือค่าเพอร์เมียบิลิตี แทนค่า $\vec{r} = \vec{r}_0 \exp(j\omega t)$ ด้วย $\vec{r}_0 = x\hat{e}_x + y\hat{e}_y$ และ $\vec{E}_0 = E_x\hat{e}_x + E_y\hat{e}_y + E_z\hat{e}_z$ จะได้ระบบสมการ โดยที่สมการสำหรับองค์ประกอบด้านแกน x และแกน y เป็นคู่ลำดับที่สอดคล้องกับแรงของลอเรนซ์ (Lorentz force) ซึ่งง่ายในการทำความเข้าใจ ในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าตามแกนของตัวอย่างเช่นเป็นแกน y อิเล็กตรอนจะขจัดไปจากสภาวะสมดุลเดิม การเคลื่อนที่ที่จะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กคงที่ทำให้เกิดการขจัดของอิเล็กตรอนในแนวแกน x เนื่องจากแรงของลอเรนซ์นิยามเป็น $\dot{\vec{r}} \times \vec{H}_a$ ในการหาผลเฉลยของระบบสมการทั้งสามสมการนี้ จะให้ค่า x , y และ z การสั้นของอิเล็กตรอนที่มี อิเล็กตริกไดโพลโมเมนต์ (Electric Dipole Moment) \vec{P} มีค่าตามสมการ

$$P_u = Neu \quad (2.4)$$

โดยที่ $u = x, y$ หรือ z และ N คือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และ \vec{P} เป็นฟังก์ชันกับสนาม \vec{E} ตามสมการ

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

โดย ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของอากาศ และ χ คือ อิเล็กตริกซ์สเซนซิวิตี เทนเซอร์ จากสมการ (2.3) (2.4) และ (2.5) องค์ประกอบของ χ นิยามได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \chi_{xx} &= \chi_{yy} \\ &= \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)^2 - 4\omega^2\omega_L^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\chi_{xy} &= -\chi_{yx} \\ &= \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{2j\omega\omega_L}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)^2 - 4\omega^2\omega_L^2}\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\chi_{zz} = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)} \quad (2.8)$$

และ

$$\chi_{xz} = \chi_{zx} = \chi_{yz} = \chi_{zy} = 0 \quad (2.9)$$

โดยที่ $\gamma = \frac{b}{m}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ คือค่าความถี่เรโซแนนซ์ของอิเล็กตรอน และ $\omega_L = e\mu_0 H_a / 2m$ คือความถี่ของลาร์มอร์ (Lamor pecession frequency) ในกรณีนี้ $H_a = 0$, $\chi_{xy} = \chi_{yx} = 0$, $\chi_{xx} = \chi_{yy} = \chi_{zz}$ และ χ เป็นปริมาณสเกลาร์ ข้อจำกัดอิเล็กตรอนอิสระสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_0 \rightarrow 0$ ค่าไดอิเล็กตริกแทนเซอร์ ϵ สามารถหาได้จาก χ โดยความสัมพันธ์

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi) \quad (2.10)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าออฟดีคัล เอนนิโซโทรปีเกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากที่ความถี่ออฟดีคัล และสนามของสนามโมเลกุลคงที่ จะได้ $\omega_L \ll \omega$

ในทางปฏิบัติค่า ϵ สามารถขยายได้ในรูปของอนุกรมกำลังในรูปของ H_a เฉพาะเทอมที่เป็นเชิงเส้น และเทอมที่ยกกำลังสอง ดังนั้นสมการที่ (2.10) เขียนได้ใหม่คือ

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_0 + \frac{Ne^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma} \times \left[1 + \frac{(e\mu_0\omega/m)^2 H_a^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)^2} \right] \quad (2.11)$$

$$\epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx} = j \frac{Ne^2/m}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)} \frac{(e\mu_0\omega/m)H_a}{(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)} \quad (2.12)$$

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_0 + \frac{Ne^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma} \quad (2.13)$$

และ

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = 0 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ ในตอนนี้ไดอิเล็กตริกเทนเซอร์สามารถอธิบายในรูปของฟังก์ชันของแมกนีโต-ออปติก พารามิเตอร์(Magneto-optic parameter) หรือเรียกว่า วอจท์พารามิเตอร์(Voigt parameter) Q ซึ่งสอดคล้องตามสมการ

$$Q = \frac{j\chi_{xy}}{(1 + \chi_{zz})} \quad (2.15)$$

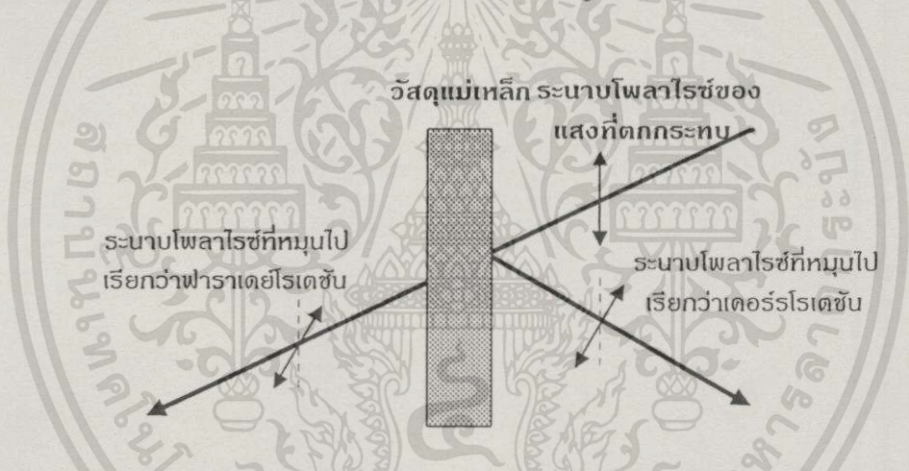
และ ϵ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\epsilon = n^2 \begin{bmatrix} 1+S & -jQ & 0 \\ jQ & 1+S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

โดยที่ $n^2 = \epsilon_0(1 + \chi_{zz})$ และ $S = (\chi_{xx} - \chi_{zz})/(1 + \chi_{zz})$ โดยที่ n เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางที่ไม่ถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็ก ปริมาณ S เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของสนามแม่เหล็ก และ Q แปรผันตรงกับสนามแม่เหล็ก

2.3 ฟิสิกส์ของปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์

ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์ค้นพบโดยบังเอิญ โดย จอห์น เคอร์ (John Kerr) นักฟิสิกส์ชาวสกอตในปี ค.ศ 1888 เมื่อมีแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นถูกสะท้อนตั้งฉากกับผิวที่ตกกระทบจากขั้วแม่เหล็กที่ขัดเป็นมันเงาของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Electromagnet) แสงที่สะท้อนออกมาจะมีสถานะการโพลาไรซ์แบบวงรี แกนหลักของวงรีที่หมุนจะขึ้นกับระนาบการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ และเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแสงของวัสดุที่ถูกทำให้เกิดการแมกนีโตเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และเกิดการหมุนของระนาบโพลาไรซ์เป็นค่าเฉพาะแต่ละวัสดุ ปรากฏการณ์ของเคอร์จะมีลักษณะคล้ายกับปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ มีความแตกต่างกันที่ปรากฏการณ์ของเคอร์เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อน (Reflection) บนผิววัสดุ แต่ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์เป็นการส่งผ่านแสง (Transparent) ผ่านวัสดุ ซึ่งแสดงลักษณะปรากฏการณ์ของเคอร์ และฟาราเดย์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์ และฟาราเดย์

โดยทั่วไปเมื่อลำแสงโพลาไรซ์แบบระนาบตกกระทบลงบนผิวของโลหะ แสงที่สะท้อนออกมาจะมีสถานะการโพลาไรซ์แบบระนาบอยู่ แต่ถ้าผิวที่แสงตกกระทบถูกทำให้เกิดการแมกนีโต แสงที่สะท้อนออกมาจากผิวจะมีการเปลี่ยนสถานะการโพลาไรซ์ไปเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงรี ไม่ว่าจะแสงจะตกกระทบในแนวขนานหรือในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ ปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการโพลาไรซ์ของแสงเนื่องจากสนามแม่เหล็กในลักษณะนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์ (MOKE)

เมื่อแสงสะท้อนจากตัวอย่างที่ถูกแมกนีโต สถานะการโพลาไรซ์และขนาดแอมพลิจูดจะเปลี่ยนไป สัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถหาได้จากการหาผลเฉลยของปัญหาเงื่อนไขขอบเขต ที่ผิวรอยต่อของตัวกลางที่สะท้อน องค์ประกอบในแนวสัมผัส (Tangential) ของสนามไฟฟ้า E และองค์ประกอบในแนวตั้งฉากของสนามแม่เหล็ก B จะยังคงต่อเนื่อง การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของเคอร์จากมุมที่ตกกระทบไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะว่าในตัวกลางสถานะการโพลาไรซ์จะเป็นแบบผสมกันระหว่าง โพลาไรซ์แบบวงกลม และแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช่เป็นการตกกระทบในแนวตั้งฉาก และมืองค์ประกอบของ \vec{M} ทั้งในแนวตั้งฉากหรือแนวขนานยกตัวอย่างเช่นปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวโพลาไรซ์ (PKE) ที่ตกกระทบในแนวตั้งฉาก ค่าเจาะจง จะเหมือนกับปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ คลื่นมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา และหมุนซ้าย สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นฟังก์ชันของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ที่เป็นไปตามสมการของเฟรสเนล (Fresnel's equation)

$$r^\pm = -(n^\pm - 1)/(n^\pm + 1) \quad (2.17)$$

โดยที่ n^+ และ n^- เป็นดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลาง ถ้าแสงตกที่กระทบเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น มันจะสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบของการโพลาไรซ์วงกลม 2 องค์ประกอบที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากัน ทิศทางการหมุนต่างกัน เครื่องหมายบวก(+) แทนการโพลาไรซ์หมุนขวา เครื่องหมายลบ(-) แทนการโพลาไรซ์หมุนซ้าย แสงที่สะท้อนออกมาจะมีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี เพราะสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแตกต่างกัน และแกนหลักจะหมุนจากทิศของเวกเตอร์โพลาไรซ์ของแสงตกกระทบ เพราะว่ามีค่าต่างเฟสระหว่างการสั่นของรอบต่างกัน แสงที่สะท้อนจะมีสนามไฟฟ้า

$$\vec{E}_r = r^+ \vec{E}^+ + r^- \vec{E}^- \quad (2.18)$$

จะมีผลทำให้แสงที่สะท้อนออกมามีสภาวะการโพลาไรซ์แบบวงรี(elliptically polarized) และถ้าพิจารณาจากเงื่อนไขที่ว่า $n^+ - n^- \ll n^-$ มุมที่หมุน ϕ_k ของแกนหลัก จะมีค่าเป็น

$$\phi_k = -\text{Im} \left(\frac{n^+ - n^-}{n^+ n^- - 1} \right) \quad (2.19)$$

และค่าความเป็นวงรี(ellipticity) จะเป็น

$$\psi_k = -R \left(\frac{n^+ - n^-}{n^+ n^- - 1} \right) \quad (2.20)$$

ที่มุมตกกระทบใด ๆ การวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนเล็กน้อย โดยสมมติให้ค่า

$$1 + \chi_{xx} = 1 + \chi_{zz} \approx n_0^2 \text{ และค่าสัมบูรณ์ของซัสเซพทิบิลิตีทางแม่เหล็กของสสาร } |\chi_{xy}| \ll 1 + \chi_{xx}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโพลาไรซ์ของแสงที่ตกกระทบทั้งในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบของแสง(s-โพลาไรซ์) หรือองค์ประกอบของแสงที่ขนานกับระนาบการตกกระทบ(p-โพลาไรซ์) ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของเฟรสเนล(ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนออกมาต่อแอมพลิจูดของคลื่นที่ตกกระทบ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกัน 3 รูปแบบ สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวโพลาไรซ์

$$r_{pp} = \frac{n_0\gamma - \gamma'}{n_0\gamma + \gamma'} \quad , \quad r_{ss} = \frac{\gamma - n_0\gamma'}{\gamma + n_0\gamma'} \quad (2.21)$$

$$r_{sp} = r_{ps} = \frac{\chi_{xy}}{n_0(\gamma + n_0\gamma')(\gamma + n_0\gamma')} \quad (2.22)$$

โดยที่ $\gamma = \cos\theta_0$ และ $\gamma' = \sqrt{1 - \sin^2\theta_0/n_0^2}$ สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวตามขวาง โดย

$$r_{pp} = \frac{n_0\gamma - \gamma'}{n_0\gamma + \gamma'} \quad , \quad r_{ss} = \frac{\gamma - n_0\gamma'}{\gamma + n_0\gamma'} \quad (2.23)$$

$$r_{sp} = -r_{ps} = \frac{-\sin 2\theta_0 \chi_{xy} / n_0^2}{2\gamma'(n_0\gamma + \gamma')(\gamma + n_0\gamma')} \quad (2.24)$$

สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวตามขวางทั่วไปของ s และ p-โพลาไรซ์ ซึ่งมีดัชนีหักเห ดังสมการ

$$n_s^2 = n_0^2$$

$$n_p^2 = 1 + \chi_{xx} + \frac{\chi_{xy}^2}{1 + \chi_{xx}} = n_0^2 + \frac{\chi_{xy}^2}{n_0^2} \quad (2.25)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ของเฟรสเนล

$$r_{pp} = \frac{n_0 \cos\theta_0 - 1}{n_0 \cos\theta_0 + 1} \left\{ 1 + \frac{(\sin 2\theta_0) \chi_{xy} / n_0^2}{n_0^2 \cos^2\theta_0 - 1} \right\}$$

$$r_{ss} = \frac{\cos\theta_0 - n_0}{\cos\theta_0 + n_0} \quad (2.26)$$

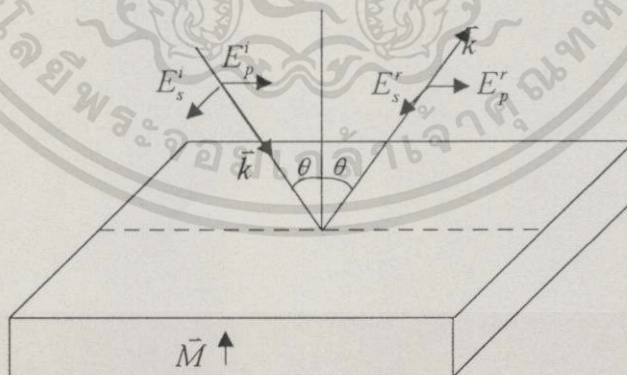
โดยที่ r_{pp} จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับ χ_{xy} ซึ่งแปรผันตรงกับค่าสนามภายนอก \vec{H}_0 หรือ \vec{M} ในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืนจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะเฟสของคลื่นสะท้อนเท่านั้น สำหรับในวัสดุที่มีการดูดกลืน ค่าแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนชนิด p-โพลาไรซ์จะขึ้นอยู่กับค่าการแมกนีโตเซชัน ในขณะที่ไม่มีผลต่อองค์ประกอบในแนว s-โพลาไรซ์

ปรากฏการณ์ของเคอร์จะเกิดมากขึ้นกับโครงสร้างที่เป็นแบบหลายชั้น และวัสดุพวกไดอิเล็กตริก ทฤษฎีโดยทั่วไปของปรากฏการณ์ของเคอร์จะซับซ้อนมาก แต่อย่างไรก็ตามก็เป็นที่ยอมรับและปฏิบัติกันมาในรูปแบบทั่ว ๆ ไปของการกระเจิงจากตัวกลางแมกนีโต-ออปติก และลักษณะการหมุนต่าง ๆ ของทิศทางการแมกนีโตเซชัน

ปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์ สามารถแบ่งตามทิศทางของสนามแม่เหล็กเทียบกับระนาบการตกกระทบของแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชนิดมีรูปแบบและที่ต่างกันเล็กน้อยคือ

2.3.1 ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวโพลาไรซ์ (Polar Kerr Effect)

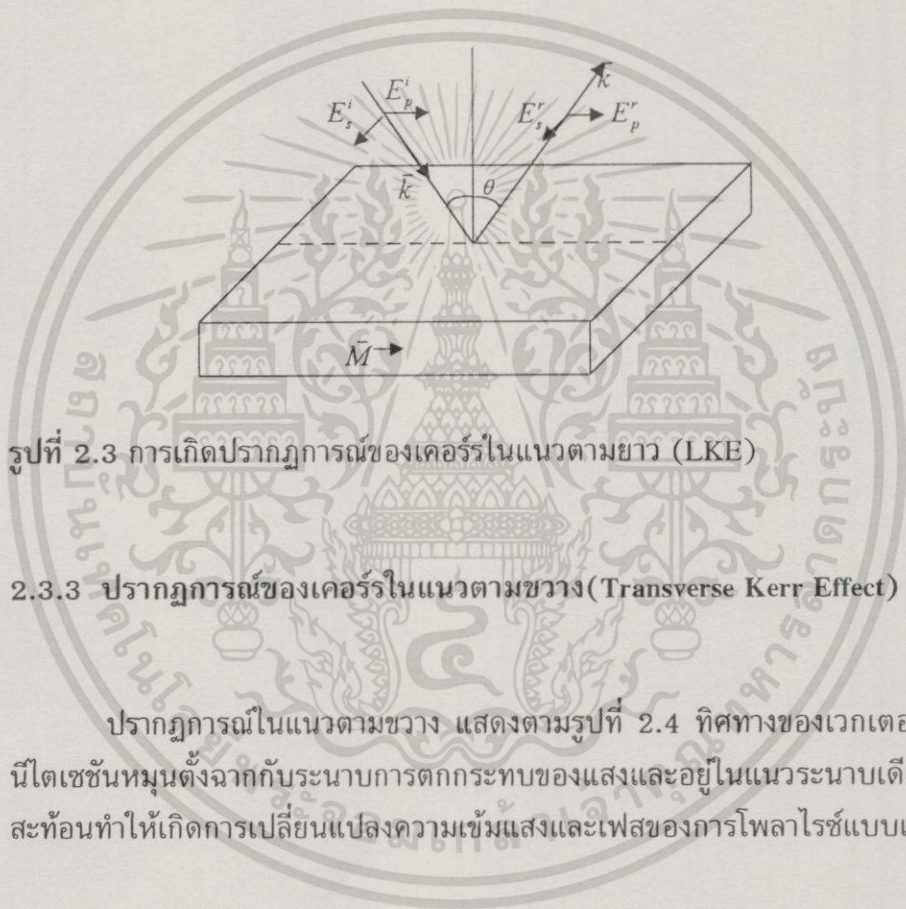
ปรากฏการณ์ในแนวโพลาไรซ์ แสดงตามรูป 2.2 ทิศทางของเวกเตอร์การแมกนีโตเซชัน \vec{M} ตั้งฉากกับผิวที่สะท้อนและขนานกับระนาบการตกกระทบของแสง ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่พบมากที่สุดและ เป็นสภาวะเดียวซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับแสงที่ตกกระทบตั้งฉากกับผิว



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวโพลาไรซ์ (PKE)

2.3.2 ปรากฏการณ์ในแนวตามยาว(Longitudinal Kerr Effect)

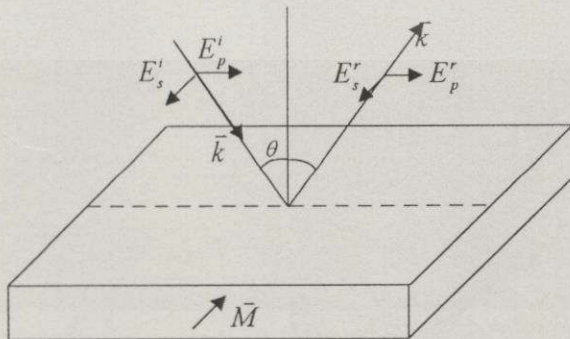
ปรากฏการณ์ในแนวตามขวางแสดงตามรูป 2.3 ทิศทางการโพลาไรซ์มีทิศทางเดียวกับระนาบของผิวที่สะท้อนและขนานกับระนาบของการตกกระทบ ปรากฏการณ์ในแนวตามยาวการหมุนของระนาบโพลาไรซ์จะน้อยกว่าปรากฏการณ์ในแนวโพลาไรซ์ด้วยเฟดเตอร์ 3 หรือ 4 โดยที่ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามยาวสามารถใช้ในการสังเกตโครงสร้างโดเมนของวัสดุได้เมื่อการแมกนีโตเซชันในแนวระนาบของผิว



รูปที่ 2.3 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามยาว (LKE)

2.3.3 ปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามขวาง(Transverse Kerr Effect)

ปรากฏการณ์ในแนวตามขวาง แสดงตามรูปที่ 2.4 ทิศทางของเวกเตอร์การแมกนีโตเซชันหมุนตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบของแสงและอยู่ในแนวระนาบเดียวกับผิวที่สะท้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและเฟสของการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์ของเคอร์ในแนวตามขวาง (TKE)

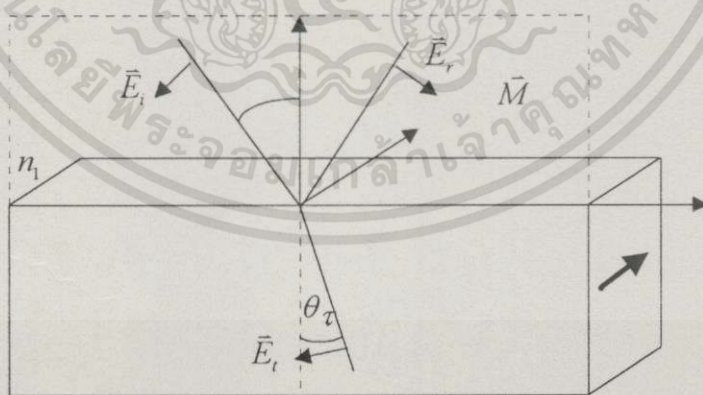
ตอนนี้มาพิจารณาถึงปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวตามขวาง (TKE) พิจารณาการส่งคลื่นแสงผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางแม่เหล็กและตัวกลางที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ตามรูปที่ 2.5 โดยจะเลือกระบบพิกัดแสดง ตามรูปที่ 2.5 ระนาบ xOy เป็นระนาบตกกระทบของแสง และเวกเตอร์การแมกนีโตเซชันวางตัวตามแนวแกน Oz โดยที่ n_1 คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวกลางที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ใช้การประมาณเฉพาะความเป็นเชิงเส้นกับการแมกนีโตเซชัน คุณสมบัติของตัวกลางที่เป็นวัสดุทางแม่เหล็กอธิบายได้โดยใช้ ไดอิเล็กตริกเพอร์มิตติวิตี เทนเซอร์ (Dielectric permittivity tensor) ตามสมการที่ (2.27)

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -ig & 0 \\ ig & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

โดยที่เวกเตอร์ \vec{D} มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + i[\vec{g} \times \vec{E}] + b(\vec{E} - m(m \cdot \vec{E})) \quad (2.28)$$

โดยที่ $m = \vec{M}/M$, $b(\vec{M}) = \epsilon_1 - \epsilon_0$ และ ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของตัวกลางเมื่อ $\vec{M} = 0$ และ \vec{g} เป็นโจเรชันเวกเตอร์ \vec{M} เป็นเวกเตอร์การแมกนีโตเซชัน โดยให้ $\epsilon_1 = \epsilon_0 = \epsilon$



รูปที่ 2.5 การส่งผ่านแสงผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางเป็นแม่เหล็กและไม่เป็นแม่เหล็ก

ค่าแมกนีติกเพอเมียบิลิตี μ ทั้งหมดของวัสดุสมมติให้มีค่าเป็น 1 และให้คลื่นแสงแบบระนาบตกกระทบ (\vec{E}_i) จากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 เป็นมุม โดยเวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ของสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบการตกกระทบ (p-โพลารไรซ์) เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน (\vec{E}_r) เมื่อเขียนในเทอมของแกนพิกัด ได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = E_i \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ -\cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega t + i(\omega/c)\vec{n}_i \cdot \vec{r}} \quad (2.29)$$

$$\vec{E}_r = E_r \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega t + i(\omega/c)\vec{n}_r \cdot \vec{r}} \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \vec{n}_i &= n_i (-\cos \theta, \sin \theta, 0) \\ \vec{n}_r &= n_r (\cos \theta, \sin \theta, 0) \end{aligned} \quad (2.31)$$

เมื่อลำแสงโพลารไรซ์ตกกระทบลงบนตัวกลางที่เป็นแม่เหล็กซึ่งมีค่าดัชนีหักเห $n_2 = \sqrt{\epsilon}$ แสงจะเดินทางบนผิวรอยต่อของตัวกลาง เวกเตอร์การหักเหคือ $\vec{n}_t = n_t (-\cos \theta_t, \sin \theta_t, 0)$ นั่นคือ $n_t = n_2(1-Q^2) \approx n_2$ และ $\sin \theta_t$ นี่ยามได้ตามกฎของสเนล (snell's Law) นั่นคือ $\sin \theta_t = (n_1/n_2) \sin \theta$ และ $\cos \theta_t = (1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$

สนามไฟฟ้าของคลื่นหาได้จากสมการคลื่นตามสมการที่ (2.32)

$$\vec{E}_t = E_t \begin{pmatrix} -\sin \theta_t + iQ/\cos \theta_t \\ -\cos \theta_t \\ 0 \end{pmatrix} e^{(-i\omega t + i(\omega/c)(\vec{n}_t \cdot \vec{r}))} \quad (2.32)$$

คลื่นตามสมการที่ (2.32) มีสถานะการโพลารไรซ์แบบวงรี ในระนาบที่ตกกระทบ สนามแม่เหล็กของคลื่นหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งในกรณีนี้อยู่ในรูป $\vec{H} = [\vec{n} \times \vec{E}]$ จากความสัมพันธ์อันนี้และจากสมการที่ (2.31) และ (2.32) จะได้

$$\vec{H}_{i,r,t} = (0, 0, H_{i,r,t}) \quad (2.33)$$

$$\text{โดยที่ } H_i = n_1 E_i, \quad H_r = n_1 E_r, \quad \text{และ } H_t = n_2 (1 - iQ \tan \theta_t) E_t$$

ตอนนี้มาพิจารณาองค์ประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} ที่ผิวรอยต่อ

$$E_{ty} + E_{ry} = E_{ty} \quad H_{iz} + H_{rz} = H_{iz} \quad (2.34)$$

นำสมการที่ (2.31) - (2.32) แทนค่าในสมการที่ (2.34) จะได้

$$\begin{aligned} (E_i - E_r) \cos \theta &= E_t \cos \theta, \\ n_1(E_i + E_r) &= n_2 E_t (1 - iQ \tan \theta) \end{aligned} \quad (2.35)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนในกรณีเป็นเชิงเส้นมีค่าตามความสัมพันธ์

$$\tilde{t}_{12}^p = \frac{E_t}{E_i} = t_{12}^p + i\delta t_{12}^p = t_{12}^p (1 + i\tau_{12}^p) \quad (2.36)$$

$$\tilde{r}_{12}^p = \frac{E_r}{E_i} = r_{12}^p + i\delta r_{12}^p = r_{12}^p (1 + i\rho_{12}^p) \quad (2.37)$$

โดยที่ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจะสมบูรณ์เมื่อค่าตัวแปร δt δr τ_{12}^p และ ρ_{12}^p มีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \delta t &= \frac{2 \sin^2 \theta \cos \theta_i}{(\eta \cos \theta + \cos \theta_i)^2} Q & \delta r_{12}^p &= -\frac{2 \sin \theta \cos \theta}{(\eta \cos \theta + \cos \theta_i)^2} Q \\ \tau_{12}^p &= \frac{(1 + r_{12}^p) Q \sin \theta}{2(\eta^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} & \rho_{12}^p &= \frac{r_{12}^p Q \sin \theta}{2(\eta^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.38)$$

และ t_{12}^p และ r_{12}^p เป็นสัมประสิทธิ์ของเฟรสเนล (Fresnel Coefficient)

$$t_{12}^p = \frac{2 \cos \theta}{\eta \cos \theta + \cos \theta_i} \quad r_{12}^p = \frac{\eta \cos \theta - \cos \theta_i}{\eta \cos \theta + \cos \theta_i} \quad (2.39)$$

โดยที่ $\eta = n_2/n_1$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคอร์โรเตชันกับความเข้มแสงที่สะท้อนตามสมการ

$$\delta_p = \frac{(I - I_0)}{I_0} = 2 \operatorname{Im} \rho_{12}^p \quad (2.40)$$

เมื่อ I เป็นความเข้มแสงที่สะท้อนเมื่อมีการแมกนีโตเซชัน และ I_0 เป็นความเข้มแสงที่สะท้อนเมื่อไม่มีสภาวะการแมกนีโตเซชันตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับการแมกนีโตเซชันสำหรับไดอะแกรมการวัดปรากฏการณ์ของเคอร์โรในแนวตามขวาง ในงานวิจัย เมื่อพิจารณาถึงความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากตัวอย่างผ่านโพลาริเซอร์ ค่าความเข้มแสงที่ผ่านจะเป็นไปตามกฎของมาลุส์ (Malus's Law) ดังสมการ

$$I_p = I_{io} \cos^2 \theta \quad (2.41)$$

โดยที่ I_p คือ ความเข้มแสงที่ผ่านตัวโพลาริเซอร์

I_{io} คือ ความเข้มของแสงตกกระทบ

θ คือ มุมระหว่างระนาบของคลื่นตกกระทบและโพลาริเซอร์

ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กกระทำต่อตัวอย่างจะทำให้ระนาบการโพลาไรซ์ของแสงเปลี่ยนไปเกิดเป็นปรากฏการณ์ของเคอร์โร ทำให้ระนาบของคลื่นหมุนไปเท่ากับค่าเคอร์โรโรเตชัน δ_k จากกฎของมาลุส์ ความเข้มแสงที่ผ่านเมื่อมีการแมกนีโตเซชันตัวอย่างอย่าง จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_p = I_{io} \cos^2(\theta + \delta_k) \quad (2.42)$$

จากความสัมพันธ์ $\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$ จะได้

$$I_p = I_{io} [\cos \theta \cos \delta_k - \sin \theta \sin \delta_k]^2 \quad (2.43)$$

เนื่องจากค่าเคอร์โรโรเตชันมีค่าน้อยมาก $\delta_k \ll \theta$ และ $\delta_k \rightarrow 0$ จะได้ $\cos \delta_k \approx 1$ และ $\sin \delta_k \approx \delta_k$ จากสมการที่ (2.43) จะได้

$$I_p = I_{io} [\cos \theta - \delta_k \sin \theta]^2$$

$$I_p = I_{io} [\cos^2 \theta - 2\delta_k \cos \theta \sin \theta + \delta_k^2 \sin^2 \theta]$$

เทอมที่ 3 มีค่าน้อยมาก จะได้

$$I_p = I_{io} [\cos^2 \theta - 2\delta_k \cos \theta \sin \theta] = I_{io} \cos^2 \theta - I_{io} \delta_k \sin 2\theta$$

จากสมการจะเห็นว่าแสงที่ผ่านโพลาไรเซอร์ ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ เทอม $I_{io} \cos^2 \theta$ เป็นส่วนที่ความเข้มแสงไม่ขึ้นกับเวลา และ เทอม $I_{io} \delta_k \sin 2\theta$ เป็นส่วนของความเข้มแสงที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งแทนได้ด้วยความสัมพันธ์

$$I_p = I_{dc} + I_{ac}$$

โดยที่ I_{dc} คือความเข้มของแสงที่ไม่ขึ้นกับเวลา I_{ac} คือความเข้มแสงที่ขึ้นกับเวลา จะได้

$$I_p = I_{dc} + I_{ac} = I_{io} \cos^2 \theta - I_{io} \delta_k \sin 2\theta$$

พิจารณา

$$I_{ac} = I_{io} \delta_k \sin 2\theta$$

$$\Delta I_{ac} = I_{io} \Delta \delta_k \sin 2\theta$$

จะได้

$$\frac{\Delta I_{ac}}{I_{io}} = \Delta \delta_k \sin 2\theta = K \Delta \delta_k \quad (2.45)$$

โดยที่ Δ แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ และ K คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน จากสมการที่ (2.45) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคอร์โรโรเตชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง จากความสัมพันธ์

$$I_{ac} = I_{io} \delta_k \sin 2\theta$$

จากความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าเคอร์โรโรเตชันและค่าการแมกนีโตเซชันจะได้

$$I_{ac} = I_{io} \delta_k \sin 2\theta = I_{io} K_t M \sin 2\theta$$

และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจะได้ความสัมพันธ์

$$\Delta I_{ac} = I_{io} K_t \Delta M \sin 2\theta \quad (2.46)$$

เมื่อ K_t เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างการแมกนีโตเซชันและเคอร์โรโรเตชันสำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์โรโรเตชันในแนวตามขวาง

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการแมกนีโตเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วัสดุทางแมกนีโต-ออปติก(Magneto-Optic Material)

ในทางด้านแมกนีโต-ออปติกได้แบ่งประเภทของวัสดุจากลักษณะการประยุกต์ใช้งานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทด้วยกัน คือ วัสดุโปร่งแสง(Transparents materials) และ วัสดุสะท้อนแสง(Reflection material)

2.4.1 วัสดุโปร่งแสง (Transparents materials)

วัสดุส่วนใหญ่นำไปใช้ในเครื่องมือการส่งผ่านเป็นวัสดุซึ่งมีค่าคงที่ Verdet สูง(ไดอาแมกนีติก หรือ พวคพาราแมกนีติก) หรือวัสดุที่มีค่าพาราเดย์โรเตชันมาก (วัสดุพวกเฟอร์โรแมกนีติก) หรือ วัสดุที่มีปรากฏการณ์จอร์จสูง (หรือ ปรากฏการณ์ คัตตัน-มุตัน)

2.4.2 วัสดุสะท้อนแสง (Reflection material)

เป็นวัสดุที่เกิดปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ ที่มีค่าเคอร์รี่เตชัน ซึ่งงานหลักจะนำไปใช้งานในการเก็บข้อมูลทางแมกนีโต-ออปติก ได้มีการจำลองการวิจัยเพื่อหาวัสดุที่มีปรากฏการณ์ของเคอร์รี่สูง วัสดุที่เป็นทางเลือกในเทคโนโลยีส่วนมากจะเป็นพวก โลหะผสมของธาตุทรานซิชันพวกแรร์เอิร์ท (RE-TM) เป็นวัสดุที่มีค่าเคอร์รี่โรเตชันมาก เช่น พวกเหล็ก

ในช่วง 20-30 ปีได้มีการศึกษาวัสดุทางแม่เหล็กอย่างกว้างขวาง วัสดุแมกนีโต-ออปติกสามารถแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ด้วยกันตามองค์ประกอบของสาร กลุ่มแรกประกอบด้วยพวกโลหะและโลหะผสม ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุที่โปร่งแสงเฉพาะฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยกว่า 100 nm. เป็นวัสดุที่เกิดปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวโพลาไรซ์ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญเพราะว่าวัสดุเหล่านี้จะรวมการสะท้อนแสงจากผิวของตัวกลางที่ถูกแมกนีโตเซชัน โลหะผสมของธาตุทรานซิชันพวกแรร์เอิร์ท (Rare-Earth-Transition-Metal alloy) เป็นวัสดุที่สำคัญของกลุ่มนี้ เพราะว่าในระบบหน่วยความจำของแมกนีโต-ออปติกดีสก์ใช้ฟิล์มบางของโลหะผสมเหล่านี้อย่างกว้างขวาง

อีกกลุ่มที่สำคัญของวัสดุแมกนีโต-ออปติกประกอบด้วยสารไดอิลเลคตริก และ วัสดุกึ่งแม่เหล็กซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในอวกาศ แมกนีติกไดอิลเลคตริก เช่น ผลึกของพวกเฟอร์ไรซ์แมกนีติก ออร์โธเฟอร์ไรซ์(orthoferrite) สปินเนล เฟอร์ไรซ์(Spinel ferrites) และออกไซด์อื่น ๆ สารเหล่านี้ค่อนข้างจะเป็นตัวกลางโปร่งแสง ในทางปฏิบัติผลึกเฟอร์ไรซ์แมกนีติกเป็นสารที่มีประโยชน์มากที่สุด

2.4.3. สารไดอิเล็กตริก

วัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติทางแมกนีโต-ออปติกแตกต่างกันไป เช่น ออร์โธเฟอร์ไรต์ และ แมกกาไนต์ และ สฟิเนล เฟอร์ไรต์ ปรากฏการณ์ฟาราเดย์ และ ปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ที่เกิดขึ้น ค่าโรเตชันของปรากฏการณ์ขึ้นอยู่กับสารประกอบเหล่านี้

2.4.4. ผลึกเฟอร์ไรต์แมกนีติก

ผลึกเฟอร์ไรต์แมกนีติกมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น $Bi_{2.2}Tm_{2.5}Fe_{3.9}Ga_{1.1}O_{12}$ (Bismuth-substituted iron garnets) มีการนำไปใช้พัฒนาเครื่องมือทางแมกนีโต-ออปติกในระบบประมวลสัญญาณทางแสง และระบบการติดต่อสื่อสารทางแสง

2.4.5 โลหะและโลหะผสม

คุณสมบัติทางแมกนีโต-ออปติกของโลหะและโลหะผสมขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร(Population)ใกล้ระดับเฟอร์มี(Fermi level)การสปีนขึ้น และสปีนลงของอิเล็กตรอน และความแรงในการออสซิลเลตในการทรานซิชัน เพราะว่าความแรงขึ้นกับ ระบบของสารซึ่งยากในแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ทางแมกนีโต-ออปติก และจุดกำเนิดที่สามารถสังเกตเห็นได้ ได้มีการค้นหาคำความจริงเหล่านี้โดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในฟิล์มแม่เหล็กบาง เพราะว่าการบันทึกลงทางแมกนีโต-ออปติกสามารถลบได้สำหรับฟิล์มบางของโลหะทรานซิชันพวกแรร์เอิร์ท เช่น $CoPt$ $MnBi$ และรวมไปถึงโลหะผสมที่ใช้ทำหน่วยความจำทางแมกนีโต-ออปติก

2.4.6 สารกึ่งตัวนำกึ่งแม่เหล็ก(Semimagnetic semiconductors)

สารกึ่งตัวนำกึ่งแม่เหล็กเป็นวัสดุกลุ่มใหม่เป็นวัสดุที่รวมคุณสมบัติทั่วไปและสารกึ่งตัวนำกึ่งแม่เหล็ก วัสดุเหล่านี้ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำของโลหะทรานซิชันที่มี 3d ไอออน และ สารละลายของแข็งที่ประกอบด้วยองค์ประกอบแม่เหล็ก

2.4.7 สารโครงสร้างหลายชั้น(Multilayer)

สารแม่เหล็กที่โครงสร้างหลายชั้นได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากคุณสมบัติที่แปลกใหม่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอันหนึ่งคือ ได้มีการค้นพบแมกนีติกแอนนิโซโทรปี(anisotropy) ในแนวตั้งฉาก ในโครงสร้างหลายชั้นของโคบอลต์ / โลหะที่ไม่ใช่แม่เหล็ก โดยที่แม่เหล็กเหล่านี้้อาจจะเป็น Pt , Pd , Au , หรือ

I_r ลักษณะโครงสร้างหลายชั้นแบบง่าย ๆ ของตัวกลางที่ใช้บันทึกทางแม่เหล็ก โت-ออปติกแบบง่าย ๆ โดยมีการสะท้อนหลายชั้นในชั้นที่เคลือบสารไดอิเล็กตริกบนชั้นของสารแม่เหล็ก โครงสร้างจะเป็น 4 ชั้นด้วยกันประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็กบางอยู่ระหว่างชั้นของสารไดอิเล็กตริก 2 ชั้น และชั้นที่ทำหน้าที่สะท้อนส่วนในโครงสร้างแบบ 2 ชั้นประกอบด้วยชั้นของสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก(non-magnetic) และชั้นของสารแม่เหล็ก

2.5 ชุดวัดคุณสมบัติของวัสดุทางแม่เหล็กชนิดฟิล์มบาง

การวัดคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเป็นกราฟการแมกนีโตเซชัน หรือ ฮีสเทอรีซิส ลูป และรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับกราฟ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญทางแม่เหล็ก วิธีอื่น ๆ ที่เป็นวิธีวัดฮีสเทอรีซิส ลูป ก็มีหลายชนิดด้วยกัน ส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการพื้นฐานทางแม่เหล็กเป็นพื้นฐานทางการวัด เครื่องมือที่วัดกราฟการแมกนีโตเซชันของวัสดุแม่เหล็กที่เป็นที่รู้จัก และบันทึกผลการวัดออกมาในรูปกราฟ แต่ละวิธีก็มีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป ในบทนี้จะยกตัวอย่างเครื่องมือวัดกราฟการแมกนีโตเซชัน ได้แก่ เครื่อง VSM , B-H มิเตอร์ , AGM และเครื่อง TRDM เพื่อให้ทราบหลักการพื้นฐานเพื่อเป็นทางเลือกในการพิจารณาสร้างเครื่องมือวัดฮีสเทอรีซิสของวัสดุทางแม่เหล็ก ดังต่อไปนี้

2.5.1 เครื่องมือวัดชนิด VSM(Vibrating Sample Magnetometer)

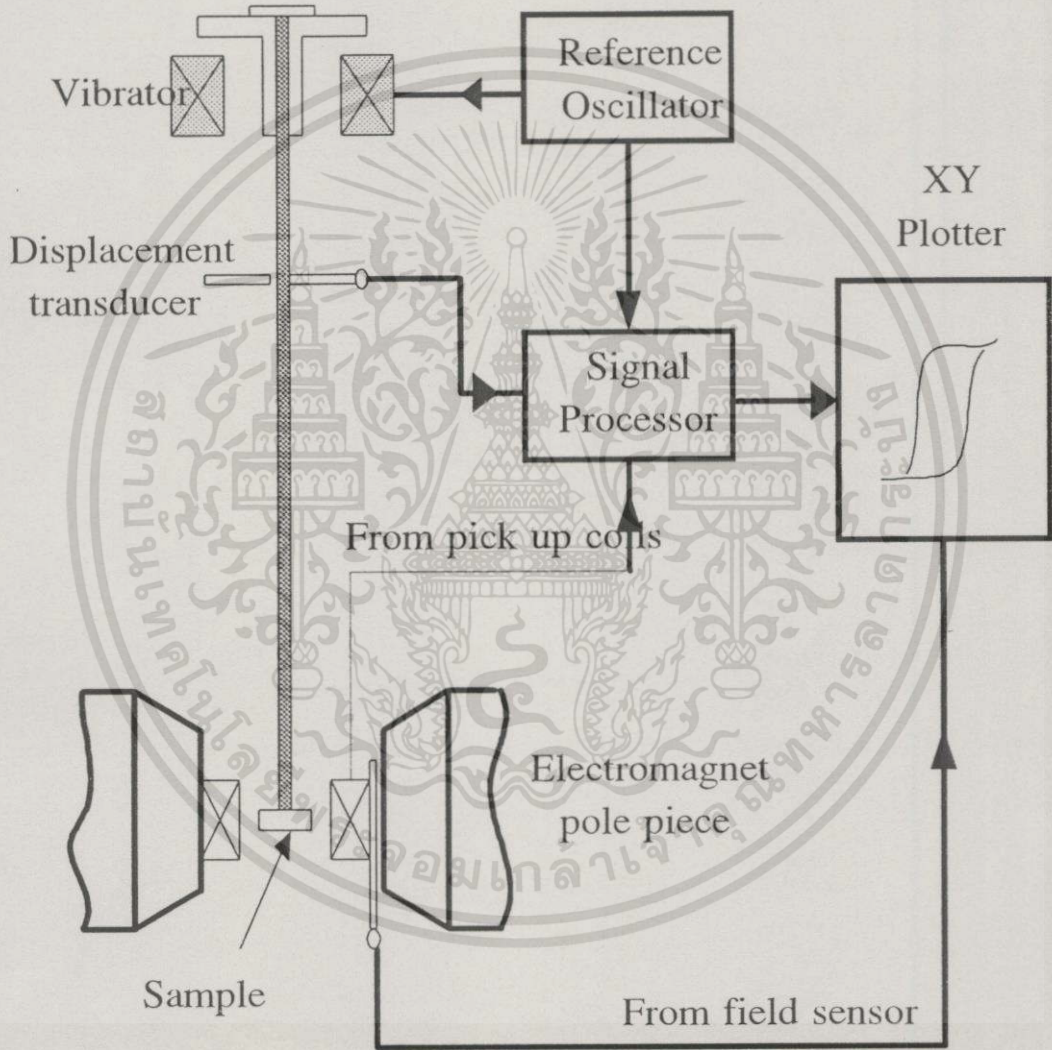
เครื่องมือวัดกราฟการแมกนีโตเซชันของวัสดุที่เป็นที่รู้จัก และใช้ในการบันทึกทางแม่เหล็กเครื่องมือเหล่านี้ส่วนใหญ่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง เนื่องจากเป็นเครื่องมือสำคัญในทางอุตสาหกรรมของวัสดุแม่เหล็ก

เครื่องวัดแบบ VSM มักจะใช้เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวกลางประเภทบันทึกข้อมูล รูปที่ 2.6 แสดงถึงลักษณะของเครื่องมือ แหล่งกำเนิดแม่เหล็กขนาดใหญ่ให้สนาม DC ที่สม่ำเสมอกับสารตัวอย่างที่วัด ผลจากการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างวัดได้จากการสั้นของตัวอย่างที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดโวลต์เกิดขึ้นในขดลวดพิคอัพ (Pick up Coil) สัญญาณจากขดลวด ร่วมกับสัญญาณทรานสดิวเซอร์ที่วัดการขจัดเป็นสัญญาณของการแมกนีโตเซชัน แอมพลิฟิเคชันการสั้น และ ความถี่ที่แตกต่างจากสัญญาณจะถูกตัดออก ตรวจจับสัญญาณด้วยตัวขยายแบบล็อกอิน(Lock in Amplifier) และส่งไปพร้อมกับสัญญาณของสนามแม่เหล็กส่งไปยัง XY พลอตเตอร์ เกิดเป็นฮีสเทอรีซิสลูปขึ้นมา ในทางการค้าเครื่อง VSM จะมีลักษณะเฉพาะหลายอย่าง เช่น การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การเขียนข้อมูลโดยอัตโนมัติ และ การควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง การหมุนตำแหน่งของตัวอย่าง VSM เหมาะที่จะวัดฮีสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของ VSM คือ สามารถควบคุมสนามจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กได้อย่างถูกต้องและเป็นขั้นตอนกับตัวอย่าง

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ราคาแพง และในการบันทึกแต่ละครั้งใช้เวลานาน ตัวอย่างที่ใช้สอบเทียบต้องเป็นผงนิเกิล



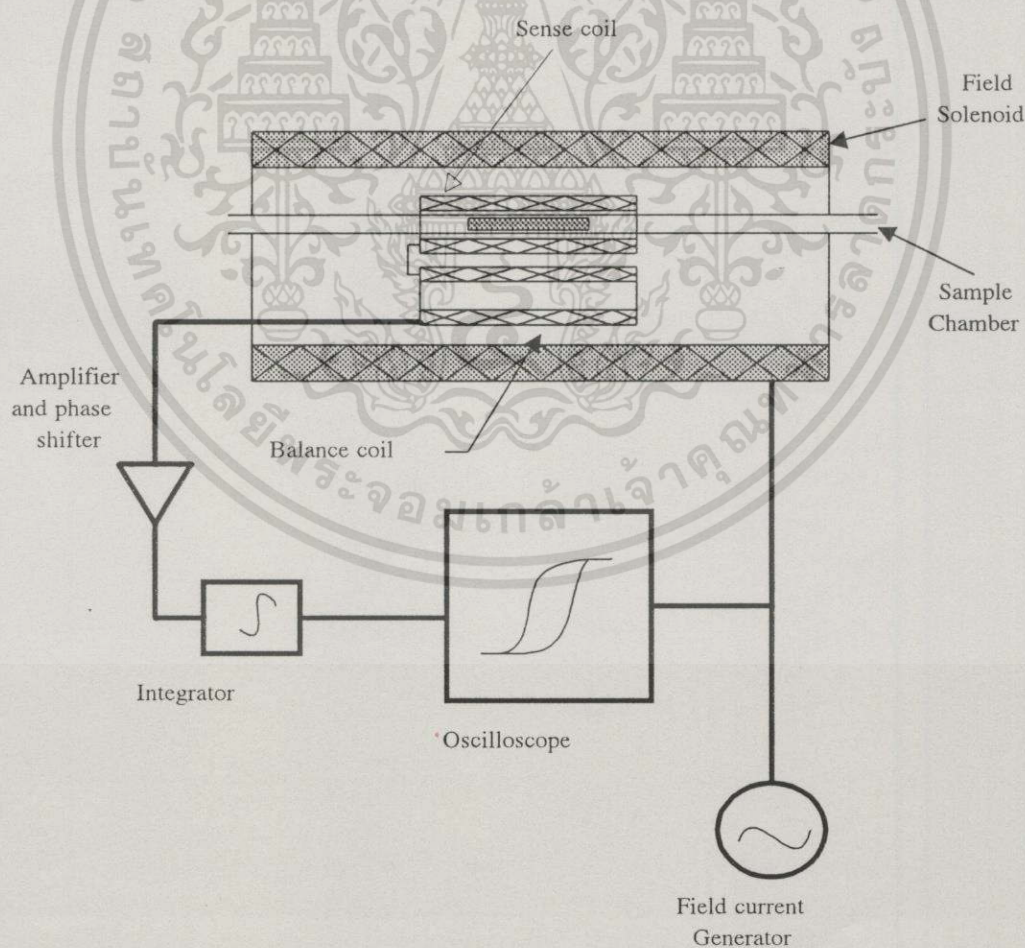
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี VSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เครื่องมือวัดชนิด B-H มิเตอร์ (Hysteresis loop Tracers)

การวัดชนิดนี้เป็นการวัดที่รู้จักดี คือ B-H มิเตอร์ วัด กราฟฮีสเตอร์รีซิส ที่ สม่่าเสมอด้วยการให้สนาม AC กับตัวอย่าง การเหนี่ยวนำวัดโดยการวัดค่าโวลต์เหนี่ยวนำ ของตัวขดลวดรับสัญญาณ(sense coil) แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อไม่มีตัวอย่างสนามที่ให้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์ตกคร่อมขดลวดรับสัญญาณ สัญญาณนี้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน ต้องตัดออกได้ด้วยการใช้ขดลวดสมดุล(Balance coil) ต่ออนุกรมกับขดลวดรับสัญญาณ เพื่อจะได้ลูปที่ถูกต้อง การตรวจสอบลูปชนิดนี้ เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็ว ในการวัด พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสาร ตัวอย่าง ซึ่งสามารถวัดสารตัวอย่างที่เป็นผง หรือ เป็นชิ้น ส่วนขนาดเล็ก

ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นวิธีที่ถูกต้องที่สุด และ ความแม่นยำสูง และ รวดเร็ว ข้อเสีย คือ ไม่เหมาะกับ หรือวัสดุที่เป็นดีสก์เพราะว่าต้องใช้กำลังในการสวิตซ์ที่ ความถี่สูง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของขดลวดทอรอยด์



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมการวัดด้วยวิธี B-H มิเตอร์

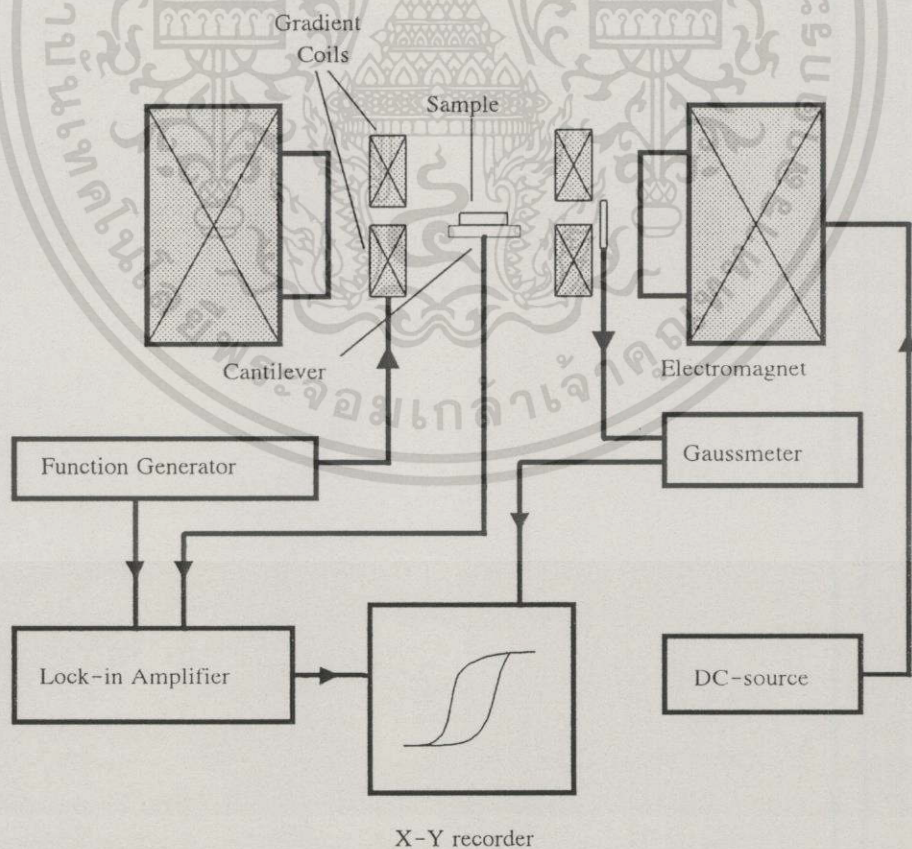
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เครื่องมือวัดชนิด AGM (Alternating Gradient Magnetometer)

โครงสร้างการวัดของเครื่องมือชนิด AGM แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยชิ้นตัวอย่างยึดติดบนปลายของแท่นวางชิ้นงาน (Cantilever) และวางอยู่ในสนามที่สม่ำเสมอระหว่างสนามที่เกิดจากตัวสร้างสนาม (Electromagnet) จะมีขดลวดเกรเดียนท์ทำหน้าที่สร้างเกรเดียนท์อ่อน ๆ ทำให้สารตัวอย่างมีโมเมนต์แม่เหล็กเคลื่อนที่ในสนามเกรเดียนท์ ตัวอย่างจะสั่นด้วยแอมพลิจูดน้อย ๆ ซึ่งแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่างแปรผันกับโมเมนต์แม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของสนามอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง และสัญญาณการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างวัดได้จากแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง สัญญาณของแอมพลิจูด และสัญญาณจากสนามแม่เหล็กทั้งสองถูกส่งไปยังตัวบันทึกแบบ XY พลอตเป็นฮิสเตอร์รีซิส ลูป

ข้อดีของ VSM คือ สามารถควบคุมสนามจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กได้อย่างถูกต้องและเป็นขั้นตอนกับตัวอย่าง

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ราคาแพง และในการบันทึกแต่ละครั้งใช้เวลานาน เป็นการตรวจสอบแบบทำลาย ขนาดของตัวอย่างมีขนาดจำกัด

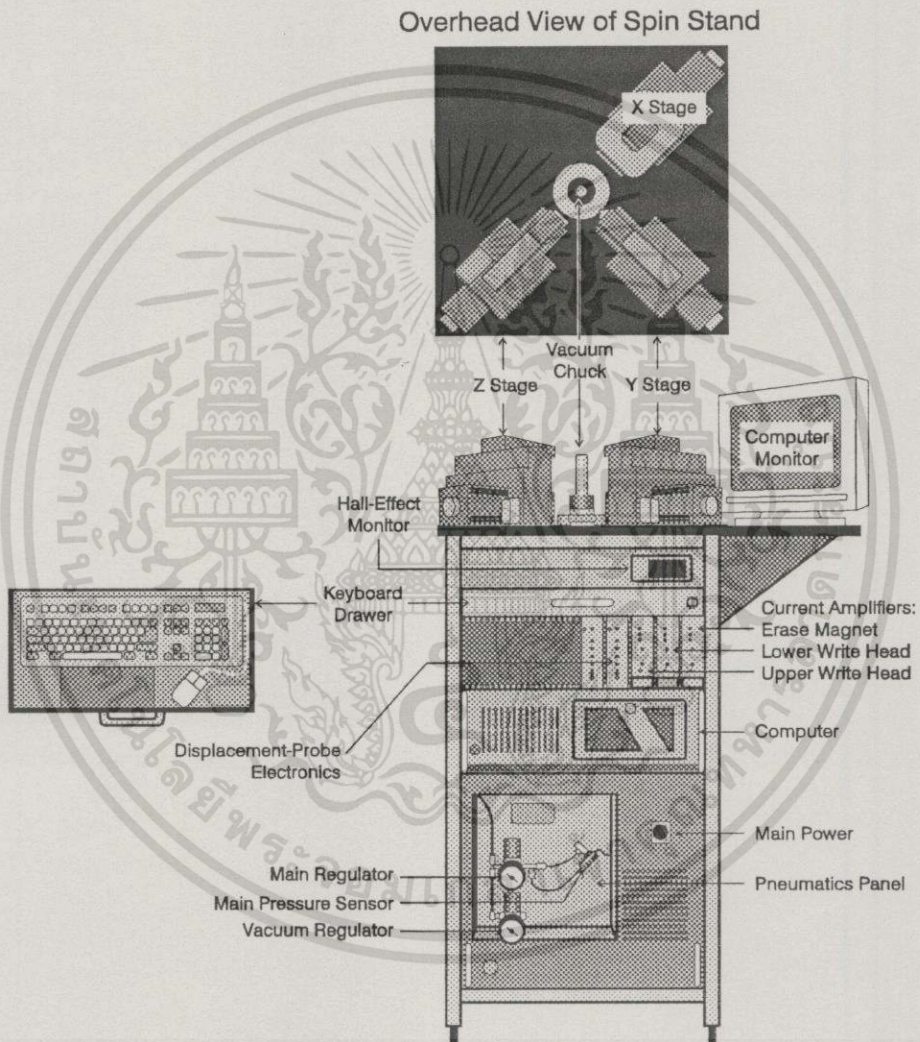


รูปที่ 2.8 โดอะแกรมการวัดด้วยวิธี AGM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 เครื่องมือวัดชนิด TRDM

เครื่องมือวัดชนิด TRDM (Turbo Rotating Disc Magnetometer) ลักษณะของเครื่องมือชนิด TRDM แสดงดังรูปที่ 2.9 เครื่องมือวัดชนิด TRDM เป็นระบบเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางของแผ่นดิสก์ที่ใช้บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ เครื่อง TRDM ประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมการวัดเครื่องมือวัดชนิด TRDM

ส่วน X ในส่วนนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ตัวรับสัญญาณฮอลล์ ตัววัดระยะการขจัดชนิดไฟเบอร์ออปติก แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กใช้ในการควบคุมการลบข้อมูลซึ่งจะใช้ในการวัดค่าสนามโคเออร์ซิวิตีของตัวกลางที่ตรวจสอบ ตัวรับสัญญาณของฮอลล์วางในสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ให้กับตัวอย่าง ตัววัดระยะการขจัดใช้ในการวัดความหนาของแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่จะ

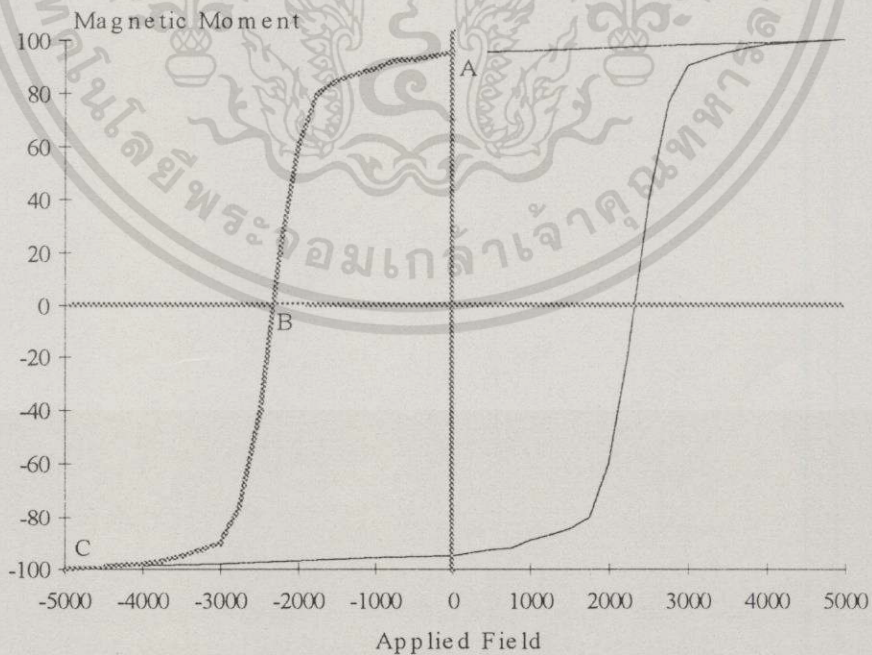
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบความหนาของแผ่นดิสก์ที่วัดกับแผ่นที่ที่บันทึกลงไป ถ้าความหนาของทั้งสองส่วนไม่ตรงกันระบบการวัดก็จะไม่ทำงาน เพราะเป็นความจำเป็นที่ต้องป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับหัวอ่านและหัวเขียนข้อมูล ในส่วน Y และ ส่วน Z เพราะการเขียน และอ่านข้อมูลใกล้เคียงกับดิสก์ที่ตรวจสอบมาก

ส่วน Y ในส่วนนี้ประกอบด้วยเครื่องมือของหัวเขียนข้อมูล ซึ่งมีสเกลการเขียนข้อมูลแบบมาตรฐาน

ส่วน Z ในส่วนนี้ประกอบด้วยเครื่องมือของหัวอ่านข้อมูล ตัววัดระยะการขจัด และ วงจรที่ทำหน้าที่บันทึกค่าความหนาของแผ่นดิสก์ที่ตรวจสอบ

ระบบของเครื่อง TRDM ใช้พื้นฐานการเปรียบเทียบกราฟฮิสเตอร์รีซิส ในช่วงที่มีการลดสนาม (Demagnetized field) ที่ได้จากตัวรับสัญญาณของหัวบันทึก และสอบเทียบกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก พารามิเตอร์พื้นฐานที่เครื่องทำการวัด ได้แก่ ค่าสนามโคเออร์ซิวิตี H_c และค่าผลคูณระหว่างค่ารีมานนท์กับความหนาของตัวอย่าง $M_r \cdot T$ และค่าโคเออร์ซิวิตี สแควร์เนส S^* โดยระบบเครื่องวัดชนิด TRDM สามารถวัดพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ด้วยความละเอียดสูงประมาณ 180 จุดต่อ 1 รอบของการวัด ลักษณะเด่นของเครื่อง TRDM คือสามารถทำการวัดพารามิเตอร์ดังกล่าวได้อย่างรวดเร็ว เวลาที่ใช้ในการบันทึกขึ้นอยู่กับค่าสนามโคเออร์ซิวิตีของแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ทดสอบ แต่สำหรับแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่มีสนามโคเออร์ซิวิตี 2500 Oe เวลาที่ใช้ในการวัดประมาณ 15 วินาที โดยวัดทั้งสองด้านพร้อมกันในครั้งเดียว



รูปที่ 2.10 กราฟฮิสเตอร์รีซิส ในช่วงลดสนามแม่เหล็ก(Demagnetize)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดค่า Mr_T ของเครื่องมือวัดชนิด TRDM ทำงานโดยอ่านค่าสัญญาณกลับ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผลคูณ Mr_T ของตัวกลาง เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นจริงถ้าตัวกลางที่วัดได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอกจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูล

ค่าสนามโคเออร์ซีวิตีวัดได้จากการลงข้อมูล โดยการให้สนามแม่เหล็กในการลบข้อมูล เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่ยังคงเหลืออยู่ในตัวอย่างลดลงไปยังจุดเริ่มต้นในการเขียนข้อมูล ซึ่งสัญญาณที่ลบข้อมูลจะเป็นฟังก์ชันกับสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการลบข้อมูล ของกราฟในช่วง ลดสนามแม่เหล็ก โดยทำการลดสนามแม่เหล็กจากค่าริมาแนทที่ไปจนถึงช่วงสภาวะอิ่มตัวย้อนกลับ แสดง ช่วงการลบข้อมูล หรือ ลดสนามแม่เหล็กของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ดังรูปที่ 2.10



บทที่ 3

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

3.1 โมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment)

การพิจารณาที่มาของความหมายของโมเมนต์ และหน่วย สามารถพิจารณาจากการสมมติว่าแม่เหล็กที่มีความแรงของขั้วเป็น p อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง l โดยสมมติให้อยู่ในกรณีทั่วไป โดยแม่เหล็กวางในแนวทำมุม θ กับสนามที่สม่ำเสมอ H แสดงตามรูปที่ 3.1 จะเกิดแรงคู่ควบกระทำบนแท่งแม่เหล็กในทิศทางที่จะหมุนให้ขนานกับสนาม และ โมเมนต์แรงคู่ควบสามารถหาค่าได้ ดังนี้

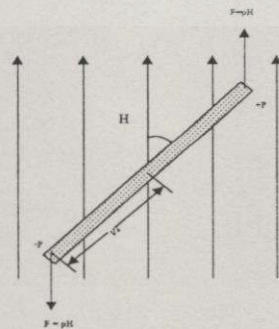
$$(pH \sin \theta)(l/2) + (pH \sin \theta)(l/2) = pHl \sin \theta \quad (3.1)$$

เมื่อสนาม $H = 1 \text{ Oe}$ และ $\theta = 90^\circ$ ค่าโมเมนต์จะมีค่าตามสมการ

$$m = pl$$

โดยที่ m เป็นโมเมนต์แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก และเป็นโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นบนแท่งแม่เหล็ก และเมื่อแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับสนามที่สม่ำเสมอขนาด 1 Oe (ถ้าสนามไม่สม่ำเสมอจะเกิดแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของแท่งแม่เหล็ก) โมเมนต์แม่เหล็กปริมาณสำคัญและเป็นปริมาณพื้นฐาน

ขั้วแม่เหล็ก(Magnetic pole) อาจจะแทนค่าจำกัดความทางคณิตศาสตร์มากกว่าทางกายภาพ เพราะว่าไม่สามารถที่จะแยกออกจากกัน และวัดค่าได้ หรือบอกตำแหน่งที่จุดใด ๆ ได้ ซึ่งหมายความว่าระยะทาง l ระหว่างขั้วนั้นไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แม้ว่าค่า p และ l เป็นปริมาณที่ไม่แน่นอน แต่ผลคูณของสองค่านี้เป็นค่าโมเมนต์แม่เหล็ก m ซึ่งสามารถทำการวัดได้



รูปที่ 3.1 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กในสนามสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.1 เราจะเห็นว่าแท่งแม่เหล็กไม่ขนานกับสนามต้องมีพลังงานศักย์ที่แน่นอนค่าหนึ่งเพื่อที่จะทำให้ได้ตำแหน่งที่ขนานกับสนาม งาน (dE_p) ที่ใช้ในการหมุนให้แท่งแม่เหล็กหมุนทำมุม $d\theta$ กับสนามแม่เหล็กคือ

$$dE_p = 2(pH \sin \theta)(l/2)d\theta = mH \sin \theta d\theta \quad (3.2)$$

เพื่อความสะดวกพิจารณาที่พลังงานมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งตำแหน่งมุม $\theta = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$E_p = \int_{90}^{\theta} mH \sin \theta d\theta \quad (3.3)$$

$$E_p = -mH \cos \theta$$

พลังงาน $E_p = -mH$ เมื่อแท่งแม่เหล็กวางขนานกับสนามแม่เหล็ก และพลังงานจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแท่งแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และมีค่าเป็น $E_p = +mH$ เมื่อแท่งแม่เหล็กวางขนานกับสนามแม่เหล็กแต่ทิศทางตรงกันข้าม ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก m เป็นเวกเตอร์ซึ่งสำหรับแท่งแม่เหล็กแล้วจะกวาดจากขั้วใต้ไปสู่ขั้วเหนือ ดังนั้นในรูปของเวกเตอร์ สมการที่ (3.3) เขียนได้คือ

$$E_p = -\vec{m} \cdot \vec{H} \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.3) และ (3.4) เป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญที่ใช้อยู่ ในหน่วย cgs พลังงาน E_p มีหน่วย ergs ดังนั้นหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กจึงมีหน่วยเป็น ergs/Oe

3.2 แมกนีไทเซชัน (Magnetization)

การแมกนีไทเซชัน เป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในอะตอม ดังนั้นค่าการแมกนีไทเซชันของอากาศซึ่งเป็นที่ว่างในวัสดุจะนิยามให้มีค่าเป็นศูนย์ ทุกอะตอมวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสทำให้เป็น โปรตอน และนิวตรอน

ภายในอะตอม อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่สองส่วนแยกกัน อันแรกจะเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสซึ่งจะเหมือนกับการเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ ด้วยรัศมีวงโคจรน้อยมาก ส่วนที่สองจะเป็นการสปินของอิเล็กตรอนบนแกนของอิเล็กตรอนเองเหมือนกับโลกหมุนรอบตัวเอง การเคลื่อนที่ทั้งสองแบบนี้เป็นไปตามกฎของฮันด์ (Hund's Law) การเคลื่อนที่ใด ๆ

เอกสารที่ตัวเองเคลื่อนที่ทั้งสองแบบนี้เป็นไปตามกฎของฮันด์ (Hund's Law) การเคลื่อนที่ใด ๆ ไม่ว่าการณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ อิเลคตรอนจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และก็เช่นเดียวกัน การเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนรอบขดลวดโซลินอยด์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และการเคลื่อนที่แบบสปินทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กแบบสปินของอิเลคตรอน กฎของฮันด์กำหนดว่าอิเลคตรอนหลาย ๆ อิเลคตรอนในวงโคจรของอิเลคตรอนมีทิศทางการหมุนตรงกันข้าม ดังนั้นค่า โมเมนต์รวมของวงโคจรจะมีค่าน้อย ในพวกของเชิงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับอะตอมใกล้เคียง เรียกว่า เควนซ์(Quench) จะเป็นตัวลดโมเมนต์ของวงโคจร สำหรับวัสดุที่ใช้บันทึกข้อมูลทางแม่เหล็ก ตัวที่ช่วยเพิ่มโมเมนต์ของวงโคจรเป็นการแมกนีโตเซชัน คือ อิเลคตรอนใกล้เคียง

โมเมนต์แม่เหล็กพื้นฐานของการหมุนรอบตัวเองของอิเลคตรอน เป็นหน่วยของโมเมนต์ของประจุที่เล็กที่สุด เรียกว่า บอร์แมกนีตอน (Bohr magneton) และมีขนาด

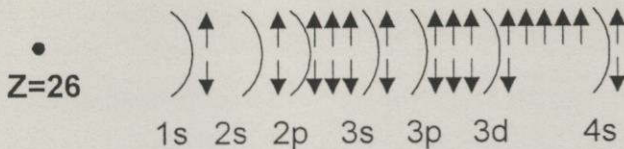
$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 0.93 \times 10^{-20} \quad (3.5)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเลคตรอน ในระบบหน่วย emu มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-20} ค่า \hbar คือ ค่าคงตัวของพลังค์หารด้วย 2π เท่ากับ 1.05×10^{-27} ค่า m คือ มวลของอิเลคตรอนมีค่า 9×10^{-28} กรัม

การหมุนรอบตัวเองของอิเลคตรอนจะมีเลขควันตัม $s = \frac{1}{2}$ และมีความเป็นไปได้ในการหมุนเพียงสองทิศทาง $(2s+1)$ สำหรับอะตอมในสุญญากาศ กฎของฮันด์ยืนยันได้ว่าทิศทางการหมุนรอบตัวเองของอิเลคตรอนจะมีทิศตรงกันข้าม ดังนั้นค่าโมเมนต์ของสปินจะมีค่าไม่มากกว่าบอร์แมกนีตอน นอกจากนั้นแล้ว ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของสปินจะมีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามความไม่เป็นระเบียบของกาหมุนรอบตัวเอง จะทำให้เกิดมีส่วนหนึ่งที่มีการทรานซิชัน ในส่วนการทรานซิชันของอิเลคตรอนวงนอกสุดของวงโคจร หรือ ชั้นนอกสุดจะมีโอกาสเกิดการทรานซิชันได้มากกว่าชั้นใน ประโยชน์ของลักษณะเช่นนี้ก็คือ อิเลคตรอนชั้นในจะมีโอกาสเต็มชั้น และค่าโมเมนต์ลัพท์ และยังมีอันตรกิริยากับอะตอมใกล้เคียงและเป็นส่วนที่บังจากอิเลคตรอนชั้นนอก

พิจารณาอะตอมของสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.2 เลขอะตอมของเหล็กคือ 26 หมายความว่าอะตอมเหล็กมี อิเลคตรอน 26 อิเลคตรอน ชั้นของการจัดเรียงอิเลคตรอน แสดงได้ด้วยเลขกำหนดจำนวนอิเลคตรอนที่อยู่ได้ในแต่ละชั้นที่เป็นควันตัม คือ เลขควันตัมหลัก(Principle quantum number) $(n=1,2,3,4)$ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานของอิเลคตรอนและเลขควอนตัมออปติคอล(Orbital quantum number) (s,p,d) นิยามได้เป็นรูปร่างวงโคจร นั่นคือ ในชั้น $1s, 2s, 2p, 3s, 3p$ และ $4s$ เท่ากับจำนวนสปินของอิเลคตรอนที่ทิศขึ้นและลง ดังนั้นค่าโมเมนต์สปินของอิเลคตรอนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ สปินของอิเลคตรอนเท่ากับศูนย์ ในชั้น $3d$ เกิดโมเมนต์สปินไม่เท่ากันมีค่า $4\mu_B$ เพราะว่ามีสปินทิศขึ้น 5 สปิน แต่มีทิศลงเพียง 1 สปิน ในสารที่มีการทรานซิชัน (Mn , Cr , Fe , Ni และ Co) จะมีชั้น $3d$ ไม่เต็ม และมีโมเมนต์แม่เหล็กสปินของอิเลคตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การสปินของอิเล็กตรอนของอะตอมเหล็ก

ในตอนนี้อมาพิจารณาปริมาตรของเหล็กที่ประกอบด้วยอะตอมหลายล้านอะตอม นั่นคือเปลี่ยนจากมุมมองระดับสปินของอิเล็กตรอนระดับอะตอม ในตอนนี้อมาพิจารณาที่หลายล้านอะตอม ค่าการแมกนีไทเซชัน \bar{M} นิยามได้เป็นโมเมนต์ของอะตอมเฉลี่ยตลอดปริมาตร เมื่อพิจารณา V ในระบบ cgs คือ ปริมาตร (cm^3) และ m คือ โมเมนต์แม่เหล็ก (electromagnetic unit: emu) ค่า N คือ จำนวนโมเมนต์อะตอมในปริมาตร V ดังนั้นหน่วยของการแมกนีไทเซชัน คือ โมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือ $emu/cm^3 = erg/Oe \cdot cm^3$

ถ้าให้สนามแม่เหล็กกับสารแม่เหล็กขนาดใหญ่มาก ทุกส่วนของโดเมนในวัสดุจะเกิดการแมกนีไทเซชัน จนกระทั่งอิ่มตัว ซึ่งจะหมายถึง ค่าการแมกนีไทเซชันอิ่มตัว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ และจะเริ่มมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิจุดวิกฤติที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นั่นคือ ค่าการแมกนีไทเซชัน จะใช้ในความหมายของ เทอมที่ใช้อธิบายขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีอยู่ในวัสดุ ลักษณะคล้ายกับการโพลาไรซ์ของแสง เพราะการให้สนามกับวัสดุจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ 2 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์การโพลาไรซ์ของอะตอม หรือ โมเลกุล อีกปรากฏการณ์หนึ่งก็คือ การโพลาไรซ์ของการจัดเรียงตัวของแมกนีตอน (Magneton)

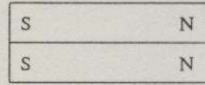
การแมกนีไทเซชันเป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพหลายอย่างของสาร คุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ความร้อนจำเพาะ ความเครียดยืดหยุ่น และการดูดกลืนแสง

3.2.1. ความหนาแน่นของการแมกนีไทเซชัน (Intensity of Magnetization)

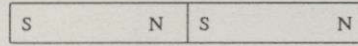
เมื่อมีวัสดุแม่เหล็กวางไว้ในสนามแม่เหล็กวัสดุเกิดการแมกนีไทเซชัน ค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความแรงของสนามที่ให้ และค่าความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เป็นค่าการแมกนีไทเซชันของวัสดุ

เมื่อพิจารณาแม่เหล็ก 2 แท่ง ที่มีขนาดและรูปร่างเท่ากัน แต่ละแท่งมีความแรงของขั้ว p และมีระยะระหว่างขั้ว l แต่ละขั้วอยู่ตอนปลายของแท่ง เมื่อวางให้ด้านข้างชิดกันตามรูป 3.3(a) ขั้วแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก $m = (2p)l = 2pl$ นั่นคือค่าโมเมนต์แม่เหล็กแต่ละอันจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ถ้านำมาต่อกับแบบปลายต่อปลายตามรูป 3.3(b) ขั้วแม่เหล็กจะหักล้างกัน ค่าโมเมนต์ $m = (2p)l = 2pl$ เหมือน

กับตอนแรก เห็นได้ชัดเจนว่า ค่าโมเมนต์แม่เหล็กทั้งหมด คือ ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของแม่เหล็กแต่ละอัน



(a)



(b)

รูปที่ 3. 3 โมเมนต์แม่เหล็กที่เป็นไปตามลักษณะการจัดเรียงแท่งแม่เหล็ก

ถ้าปริมาตรเพิ่มเป็น 2 เท่า ค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อ 1 หน่วยปริมาตร m จะไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณที่ใช้อธิบายขนาด (ปริมาตร) ของแม่เหล็กที่ถูกแมกนีไทต์ ซึ่งเรียกว่าเป็นความเข้มของการแมกนีไทเซชัน หรือเรียกง่าย ๆ ว่า การแมกนีไทเซชัน และเขียนแทนด้วย \vec{M} ดังสมการ

$$M = \frac{m}{v} \quad (3.6)$$

โดยที่ v เป็นปริมาตร และอาจเขียนได้เป็น

$$\vec{M} = \frac{p\ell}{v} = \frac{p}{v/\ell} = \frac{p}{a} \quad (3.7)$$

โดยที่ a คือ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็ก อีกนัยหนึ่งอาจนิยามการแมกนีไทเซชัน \vec{M} คือ ความแรงของขั้วต่อ 1 หน่วยพื้นที่

หน่วยของโมเมนต์แม่เหล็ก m คือ ergs/Oe ($E_p = -\vec{m} \cdot \vec{H}$) และหน่วยของการแมกนีไทเซชัน \vec{M} คือ ergs/Oe-cm^3 อย่างไรก็ตามหน่วยเหล่านี้นิยมเขียนในรูปง่าย ๆ คือ emu/cm^3 โดยที่ emu จะหมายถึงหนึ่งหน่วยแม่เหล็กไฟฟ้าของโมเมนต์แม่เหล็ก

บางครั้งนิยมบอกการแมกนีไทเซชันต่อมวลแทน การบอกต่อปริมาตรและเรียกเป็นการแมกนีไทต์จำเพาะ (specific magnetization) σ คือ

$$\sigma = \frac{m}{w} = \frac{m}{v\rho} = \frac{M}{\rho} \quad \frac{\text{emu}}{g} \quad (3.8)$$

โดยที่ w คือมวล และ ρ คือความหนาแน่น

ค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ(Induction Magnetic field)หรือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก(Magnetic flux) \vec{B} มีค่าตามสมการที่ (3.9)

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi M \quad (cgs) \quad (3.9)$$

โดยที่ \vec{H} คือ สนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเออสเตทส์(Oe) เทียบเท่ากับเกาส์ ในกรณีที่มี $M = 0$ หรือโดยสมการที่ (3.10) \vec{B} และ \vec{M} มีความสัมพันธ์ในระบบ SI ดังนี้

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + M \quad (mks) \quad (3.10)$$

ในระบบ msk \vec{B} มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร(Weber/m²) สนาม \vec{H} มีหน่วยเป็น แอมแปร์-รอบต่อเมตร(Ampere-turn/m) และค่า μ_0 เป็นค่าเพอร์เมียบิลิตีของอากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี่ต่อเมตร

ค่าเพอร์เมียบิลิตีแม่เหล็ก(Magnetic Permeability) μ ของสารในระบบหน่วย cgs นิยามในรูปของอัตราส่วนระหว่าง \vec{B}/\vec{H} และในระบบหน่วย mks นิยามเป็น $\vec{B}/\mu_0 \vec{H}$

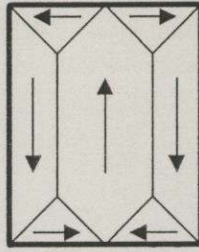
ค่าซัสเซพติบิลิตีแม่เหล็ก(Magnetic Susceptibility) χ นิยามเป็นอัตราส่วนระหว่าง \vec{M}/\vec{H} ในระบบหน่วย cgs และนิยามเป็น $\vec{M}/\mu_0 \vec{H}$ ในระบบหน่วย mks จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) จะได้สมการที่ (3.11)

$$\mu = 1 + (4\pi)\chi \quad (3.11)$$

โดยที่ค่า 4π ใช้เฉพาะในระบบหน่วย cgs จากสมการที่ (3.11) จะได้ขนาดของ μ มีหน่วยเดียวกันทั้งสองระบบ แต่ขนาดของ χ มีค่าแตกต่างกันด้วยเฟคเตอร์ 4π

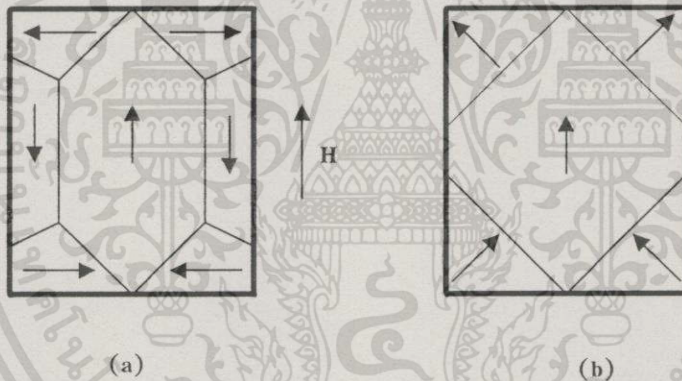
แมกนีโตเซชันในลักษณะทั่ว ๆ ไป จะหมายถึงวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดอยู่ในเนื้อวัสดุแล้ว หรือถ้าพิจารณาในรูปต่อหน่วยปริมาตรจะเรียกว่า การมีค่าการแมกนีโตอยู่แล้วโดยธรรมชาติ โดยไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H} วัสดุจำพวกนี้ได้แก่สารเฟอร์โรแมกนีติก สารเฟอร์ไรท์แมกนีติก

สารเฟอร์โรแมกนีติกประกอบด้วยบริเวณที่รวมการแมกนีโตโดยตามธรรมชาติอยู่แล้วเรียกว่า โดเมน (Domain) แต่ละโดเมนประกอบด้วยโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอม แต่ละโดเมนก็เปรียบเสมือนแม่เหล็กเล็ก ๆ ในสภาวะปกติที่สารเฟอร์โรแมกนีติกเมื่อไม่มีการแมกนีโตจะประกอบด้วยโดเมนที่หมุนไปตามทิศทางต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.4 แมกนีโตเซชันลัพท์ทั้งหมดจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3.4 การจัดเรียงของโดเมนในโครงสร้างผลึกที่ไม่มีการแมกนีโต

กระบวนการในการแมกนีโตเซชันเริ่มจากให้สนามแม่เหล็ก \vec{H} ภายนอกเข้ามากระทำกับวัสดุ จะทำให้เกิดการขยายของโดเมนให้หมุนไปในทิศทางของสนาม \vec{H} ซึ่งทำให้ขยายไปทับโดเมนอันอื่น แสดงตามรูปที่ 3.5a ตามด้วยการหมุนของทิศทางการแมกนีโตเซชัน ตามรูปที่ 3.5b เมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก \vec{H} ก็ยังคงมีการแมกนีโตเซชันตกค้าง เรียกว่าเป็นค่า M_r



รูปที่ 3.5 การแมกนีโตเซชัน (a) การขยายตัวของโดเมน (b) การหมุน

3.2.2. คุณสมบัติของการแมกนีโตเซชัน

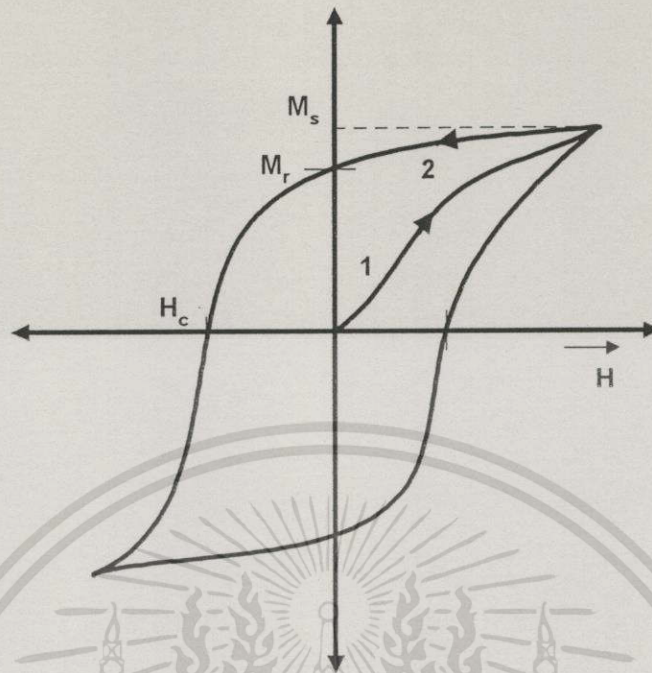
1. ในกรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก หรือ แรงจากสนามอื่น ๆ มากกระทำ ค่าการแมกนีโตเซชันของวัสดุรวมมีค่าเป็นศูนย์
2. เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก ค่าการแมกนีโตเซชัน จะเป็นฟังก์ชันกับความแรงของสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วนเป็นฟังก์ชันอย่างไรกับสนามแม่เหล็กภายนอกขึ้นกับชนิดของสารแม่เหล็ก
3. ในวัสดุจำพวก ไดอามกนีติก (Diamagnetic) ค่าการแมกนีโตเซชันจะมีค่าเป็นลบ โดยที่ในวัสดุชนิดอื่น ๆ จะมีค่าเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทั้งวัสดุประเภทไดอามagnetit และวัสดุพาราแมกnetit ค่าการแมกnetit เชนั้นจะเป็นสัดส่วนกับแรงสนามแม่เหล็กจากภายนอก และมีค่าต่ำ
5. ในวัสดุอื่น ๆ ค่าการแมกnetit เชนั้นจะเป็นฟังก์ชันกับแรงสนามแม่เหล็กจากภายนอกและเกี่ยวข้องกับแรงที่มีอยู่เดิม ค่าการแมกnetit เชนั้นในวัสดุเฟอร์โรแมกnetit จะเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนซึ่งสามารถอธิบายในรูปของ ฮีสเทอรีซิส ลูป หรือ กราฟการแมกnetit เชนั้น
6. ค่าการแมกnetit เชนั้นของวัสดุใด ๆ สามารถกำหนดเพื่อการอธิบายได้ในรูปของค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

3.3 กราฟการแมกnetit เชนั้น (Magnetization Curve)

กราฟการแมกnetit เชนั้น บางครั้งเรียกว่ากราฟ $M-H$ ซึ่งใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็ก เป็นกราฟที่เขียนขึ้นระหว่างสนาม H ในแนวแกนนอนกับทั้ง B หรือ M ในแนวแกนตั้งแสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นกราฟระหว่าง $M-H$ ค่า M_r คือค่าแมกnetit เชนั้นรีมาแนนท์ (remanent magnetization) สนาม H_c เป็นค่าสนามโคเออร์ซิฟ (Coercive fields) หรือค่าสนามที่ให้ในทิศย้อนกลับเมื่อต้องการทำให้ค่าการแมกnetit เชนั้น M มีค่าไปสู่ศูนย์ M_s คือค่าการแมกnetit เชนั้นอิ่มตัว (Saturation Magnetization) หรือ ค่าแมกnetit เชนั้นของการจัดเรียงตัวของทุกโดเมนได้สูงสุด ค่าการแมกnetit เชนั้นอิ่มตัวของวัสดุจะมีค่าเท่ากับค่าการแมกnetit เชนั้นธรรมชาติของโดเมนเดี่ยว ยกเว้นในบางกรณีที่สามารถเพิ่มการแมกnetit เชนั้นได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยการเพิ่มสนามที่มีความแรงมาก ค่าการแมกnetit เชนั้นอิ่มตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิ และจะมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี T_c ดังนั้นการกำหนดนิยามค่าอุณหภูมิคูรีจะหมายถึง สารเฟอร์โรแมกnetit จะเปลี่ยนเป็นสารพาราแมกnetit



รูปที่ 3.6 กราฟ $M-H$ ฮิสเตอร์รีซิส ลูป

จากกราฟการแมกนีโตเซชันของวัสดุทางแม่เหล็ก มีตัวแปรสำคัญของกราฟการแมกนีโตเซชันดังต่อไปนี้

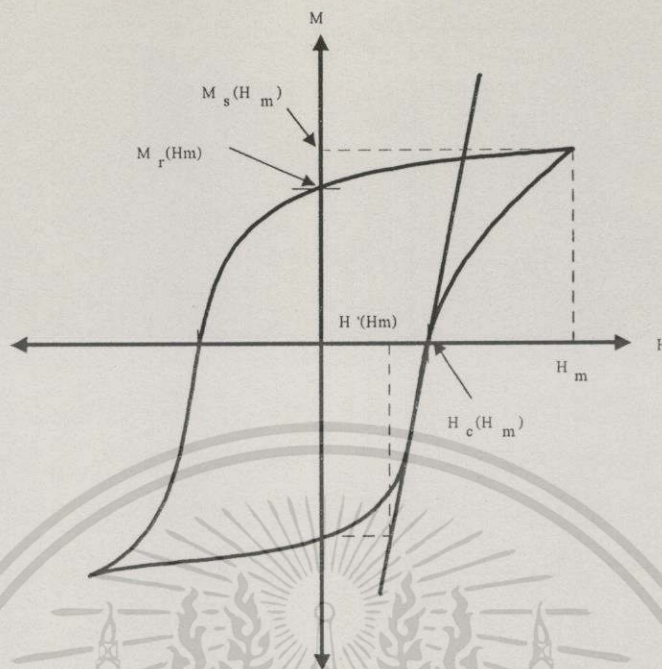
ริมาแนนซ์ แมกนีโตเซชัน : M_r คือ ค่าแมกนีโตเซชันที่เหลืออยู่ในวัสดุหลังจากไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแล้ว แทนได้ด้วยจุดตัดแกน M เมื่อ $H=0$ แสดงดังรูป 3.6

ค่าแมกนีโตเซชันอิ่มตัว : M_s คือ สภาวะที่เป็นค่าสูงสุดของของความหนาแน่นฟลักซ์ที่สามารถผ่านวัสดุได้โดยไม่เกี่ยวกับแรงแมกนีโต H ซึ่งจริง ๆ แล้วความหนาแน่นของฟลักซ์ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องและช้า ๆ

ค่าโคเออร์ซิวิตี : H_c คือ ค่าสนามที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้โดเมนกลับไปสู่สภาวะในตอนเริ่มต้นในตอนแรก หรือ ค่าการแมกนีโตเซชันของวัสดุเป็นศูนย์

ค่าริมาแนนซ์ สแควร์เนส : S คือ อัตราส่วนระหว่าง $S = \frac{M_r}{M_s}$ ถ้าในระบบมีการกระจายแบบสุ่มค่า $S = 0.5$

ค่าโคเออร์ซิวิตี สแควร์เนส : $S^* = \frac{H'}{H_c}$ คือ จุดตัดระหว่างความชันของกราฟการแมกนีโตเซชันที่จุด โคเออร์ซิวิตีที่ลากตั้งฉากกับค่า M_r แสดงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 พารามิเตอร์สำคัญของกราฟ $M-H$ ฮิสเตอร์รีซิส ลูป

เนื่องจากค่ารีมานนซ์ เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามฟลักซ์แม่เหล็ก หลังจากที่นำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว แต่ยังคงมีแรงการแมกนีโตอยู่ ซึ่งสามารถใช้ในการจำแนกวัสดุทางแม่เหล็กได้

ในกรณีที่วัสดุเป็นฮาร์ดแมกเนติก(Hard Magnetic Material) ค่ารีมานนซ์มีค่าสูง ในขณะที่ ซอร์ฟแมกเนติก (Soft Magnetic Material) ค่ารีมานนซ์ แมกนีโตเซชันจะมีค่าน้อย ในวัสดุประเภทซอร์ฟแมกเนติกจะนำไปใช้โดยตรงคือเป็นตัวให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน หรือใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กได้อย่างง่าย ส่วนพวกฮาร์ดแมกเนติกจะใช้เป็นแหล่งของแรงทางแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) ในการขับฟลักซ์ให้ผ่านวงจรแม่เหล็ก(Magnetic Circuit)

การจัดเรียงตัวของโดเมนกระบวนการในการแมกนีโตเซชัน แสดงตามรูปที่ 3.8 โดยพิจารณาการจัดเรียงตัวของเวกเตอร์ \vec{M} ในวงกลม โดยแต่ละชุดของเวกเตอร์แทนกลุ่มของโดเมน(Domain) ที่สภาวะเริ่มต้น ณ จุด O การเรียงตัวเวกเตอร์เป็นไปทุกทิศทุกทาง เมื่อสนามในทิศทางบวก โดเมนที่มีการแมกนีโตเซชันในทิศทางลบจะหายไป ซึ่งเกิดการรบกวน เข้าสู่สภาวะที่จุด B เมื่อสนามเพิ่มขึ้นไปอีกเวกเตอร์เหล่านี้จะหมุนเข้าสู่สภาวะอิมิตที่จุด C เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก เวกเตอร์ของ ผนังโดเมน(Domain wall) จะตกกลับไปสู่ทิศทางที่แต่ละเกรน(Grain) อยู่ไกลที่สุดซึ่งเป็นทิศทาง $+H$ นั่นคือเวกเตอร์ของโดเมนจะกระจายอย่างเป็นระเบียบในครึ่งวงกลม แสดงตามจุด D ถ้า M_s ในแต่ละโดเมนทำมุม θ กับทิศของสนามแม่เหล็ก $+H$ ดังนั้นค่าการแมกนีโตเซชันของโดเมนแต่ละอันจะมีค่า $M_s \cos\theta$ และค่า M_r ของชิ้นงานก็คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของทุกโดเมน ค่าเฉลี่ยนี้จะมีค่าตามความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_r = \int_0^{\pi/2} M_s \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{M_s}{2}$$

นั่นคืออัตราส่วน $\frac{M_r}{M_s}$ หรือเรียกว่า ริมาแนท์ สแควร์เนส (S) จะมีค่าประมาณ 0.5

และสามารถคำนวณหาได้ของสารแต่ละชนิด จากรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงผลเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็นลบเข้าไปต่อจากสภาวะริมาแนท์เป็นการแมกนีโตเซชันในช่วงแรก นำไปสู่สภาวะ E ที่จุด โคเออร์ซิวิตี (Coercivity) ซึ่งเป็นสภาวะที่ E , O และ E' มีค่าการแมกนีโตเซชันเป็นศูนย์ แต่การกระจายของโดเมนมีการกระจายแตกต่างกัน ที่จุด E , E' จะไม่คงที่ แต่ค่าการแมกนีโตลัฟท์ของวัสดุมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้รู้ว่าการให้สนามจำเป็นต่อการกระจายของโดเมน

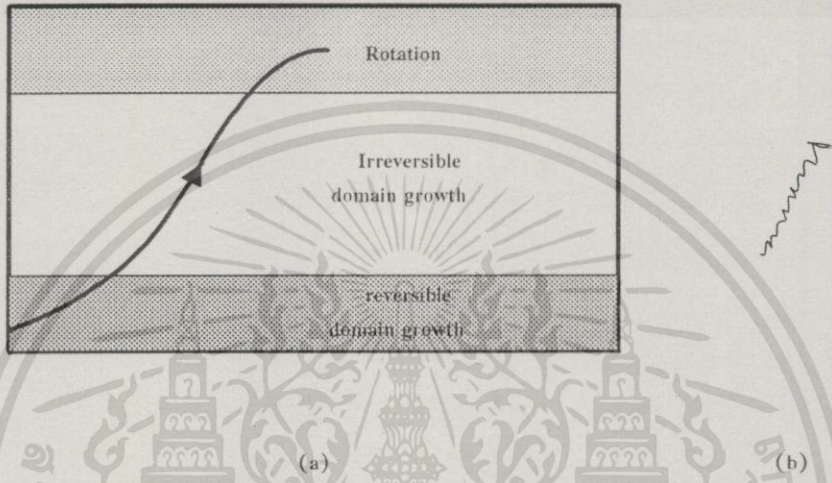


รูปที่ 3.8 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโดเมนที่สภาวะการแมกนีโตเซชัน ต่าง ๆ

กราฟการแมกนีโตเซชันของผลึกเดี่ยวจะขึ้นกับทิศทางของสนาม \vec{H} เทียบกับแกนของโครงสร้างผลึก ถ้ามีการให้สนามอ่อน ๆ ให้กับผลึก ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของโดเมนในส่วนของแกนกับ \vec{H} และจะมีขนาดเพิ่มขึ้นขยายไปทั่วโดเมนในทิศทางอื่น เมื่อเพิ่มสนามขึ้นไปอีกขอบเขตของโดเมนยังคงเปลี่ยนแปลง และ ค่า M เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเส้นโค้งของกราฟ พอเข้าสู่ใกล้จุดปลายของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์แม่เหล็กในโดเมนทั้งหมดหมุนไปในทิศทางที่ขนานกับสนามที่เพิ่มขึ้น การหมุนภายในโดเมนต้องใช้สนามภายนอกให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามที่มากพอ และดังนั้นค่าความชันที่เปลี่ยนในช่วงโค้ง เมื่อให้สนามเพิ่มมากขึ้น จะเกิดการหมุนของโดเมนจนกระทั่งโมเมนต์แม่เหล็กของทั้งหมดขนานกับสนาม และเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว

วัสดุเฟอร์โรแมกนีติกแต่ละชิ้นประกอบด้วยผลึกเดี่ยวจำนวนมากมายที่มีการหมุนจัดเรียงตัวเป็นแบบสุ่ม ในแต่ละผลึกเดี่ยวจะมีหลายโดเมน ค่าการแมกนีโตเซชันของทั้งวัสดุประกอบด้วยค่าแมกนีโตเซชันของหลาย ๆ ผลึกเดี่ยวในวัสดุ

การขยายของโดเมน ขบวนการแมกนีโตเซชันแสดงตามรูปที่ 3.9(a) การขยายของโดเมนดำเนินไปโดยการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนที่เรียกว่า ผนังบลอช(Bloch) ที่กั้นอยู่ระหว่างโดเมน ซึ่งจะเกิดขึ้นแบบย้อนกลับได้ในตอนแรก แล้วย้อนกลับไม่ได้ การเคลื่อนที่แบบย้อนกลับไม่ได้เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการแมกนีโตเซชันอย่างรวดเร็วและไม่ต่อเนื่อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์บาคเฮาเซน(Barkhausen)



รูปที่ 3.9 ขบวนการแมกนีโตเซชัน (a) ส่วนของกราฟการแมกนีโตเซชัน แสดงขบวนการแมกนีโตเซชัน (b) ช่วงที่เกิดปรากฏการณ์บาคเฮาเซน(Barkhausen effect)

3.4 วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Materials)

เมื่อวางวัสดุในสนามแม่เหล็ก \vec{H} วัสดุทั้งหมดจะเกิดการแมกนีโตเซชัน โดยที่ \vec{M} นิยามให้เป็นผลรวมของเวกเตอร์โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมหรือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ ซึ่งสามารถใช้ในการจำแนกแบ่งวัสดุออกเป็น 2 ชนิดกว้าง ๆ คือ วัสดุแม่เหล็กชนิดแรง(Strong Magnetic material) และวัสดุแม่เหล็กชนิดอ่อน(Weak Magnetic material) สำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างแรงมักจะเรียกง่าย ๆ ว่าเป็นวัสดุแม่เหล็ก เพราะว่ามีวัสดุเหล่านี้แสดงลักษณะค่าการแมกนีโตเซชันสูงมากที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ T_c และเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิวิกฤติ(Curie Temperature) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_c โมเมนต์ของอะตอมหรืออิเล็กตรอนจะวางตัวในหลายรูปแบบเพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นกลุ่มของวัสดุแม่เหล็กที่เฉพาะแตกต่างกันไป เช่น สารเฟอร์โรแมกนีติก แอนติเฟอร์โรแมกนีติก เฟอร์โรแมกนีติก และอื่น ๆ สารชนิดที่เป็นแม่เหล็กแบบแรงเป็นวัสดุพื้นฐานที่สำคัญทางด้านวิศวกรรม

วัสดุที่เป็นแม่เหล็กแบบอ่อนสามารถแบ่งเป็นชนิดได้โดยพิจารณาค่าซัสเซปติบิลิตีทางแม่เหล็ก ตามนิยาม $\chi = \vec{M}/\vec{H}$ วัสดุที่มีค่าซัสเซปติบิลิตี $\chi > 0$ จะเรียกว่าเป็นสารพาราแมกนีติก (paramagnetic) และวัสดุที่มีค่าซัสเซปติบิลิตี $\chi < 0$ เรียกว่าเป็นสารไดอแมกนีติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Diamagnetic) สารพาราแมกเนติกเกิดจากการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมถาวร เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้โมเมนต์แม่เหล็กวางตัวในแนวเดียวกับสนาม สารไดอาแมกเนติกเกิดจากการจัดตัวใหม่ของกระแสเลคตรอนโดยสนาม แต่ทิศทางของ \vec{M} จะมีทิศตรงกันข้ามกับ \vec{H}

โดยทั่วไปวัสดุที่เป็นแม่เหล็กแบบแรงจะมีคุณสมบัติเป็นสารพาราแมกเนติกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ T_c เป็นอุณหภูมิที่ความร้อนมีผลต่อทิศทางของสปิน ด้วยเหตุผลอันนี้วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อนจะเรียกว่าเป็นวัสดุไม่เป็นแม่เหล็ก(Nonmagnetic)

วัสดุที่เป็นวัสดุแม่เหล็กแบ่งแยกลงไปได้อีกเป็น วัสดุแบบง่าย(Soft material) วัสดุแบบยาก(Hard material) วัสดุกึ่งยาก(Semihard material) ในการอธิบายคุณสมบัติของสารจำพวกนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาจาก ฮิสเตอร์ีซิส ลูป นั่นคือ การแมกเนไทเซชันของวัสดุเป็นฟังก์ชันกับสนามภายนอก \vec{H} ซึ่งแทนได้ด้วยเส้นโค้งแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยที่ M_r คือสภาวะการแมกเนไทเซชันอิ่มตัว และ M_c ค่าการแมกเนไทเซชันรีมาเนนท์ในวัสดุเมื่อสนามมีค่าเป็นศูนย์ และ H_c คือ สนามโคเออร์ซิב นิยามได้เป็นสนามที่ต้องใช้ในทิศสวนกลับที่ต้องใช้ทำให้ค่าการแมกเนไทเซชัน \vec{M} มีค่าเป็นศูนย์ การแบ่งวัสดุแม่เหล็กเป็นแบบ วัสดุแบบอ่อน วัสดุแบบแรง วัสดุกึ่งแรง แบ่งแยกด้วยค่า H_c ในหน่วยเออสเทท (Oe) โดยที่ ถ้าพิจารณาค่า H_c

0.1 - 1000	Oe	วัสดุแบบง่าย
500 - 3,000	Oe	วัสดุกึ่งยาก
5,000 - 20,000	Oe	วัสดุแบบยาก

สารที่เป็นวัสดุแบบยากจะยากในการทำลายค่าการแมกเนไทเซชัน หมายถึง เป็นแม่เหล็กถาวรที่ดี สารพวกวัสดุแบบง่ายจะเป็นวัสดุที่ง่ายในการทำลายการแมกเนไทเซชัน ประโยชน์ที่นำไปใช้เป็นแกนของเครื่องมือที่กำเนิดกระแสสลับ และวัสดุกึ่งยาก เป็นพวกกลาง ๆ ซึ่งคุณสมบัตินำไปใช้ประโยชน์ในเครื่องมือที่เปลี่ยนทิศทางของ \vec{M} ที่ไม่ยุ่งเกินไป ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการบันทึกข้อมูล เช่น จานแม่เหล็ก และ เทป

3.4.1 วัสดุแม่เหล็กแบบง่าย(Soft Magnetic Material)

วัสดุแบบอ่อนส่วนใหญ่นำไปใช้งานวงจรไฟฟ้า สามารถใช้ในการรวม และขยายพลังซ์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะกระแสสลับ(AC) ใช้เป็นแกนตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลง ส่วนกระแสตรง (DC) ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสนาม และ ลำโพง

ลักษณะที่สำคัญของกราฟฮิสเตอร์ีซิส ลูปของวัสดุแบบง่าย คือ ค่า H_c ที่มีค่าต่ำมาก และมีค่าเพอร์เมียบิลิตีสูงมาก ซึ่งนิยามได้เป็นอัตราส่วน $\mu = \vec{B}/\vec{H}$ โดยที่ \vec{B} คือสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเกาส์(Gauss) $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}$ โดยค่า μ มีค่าสูงมากจนถึง 100,000 ที่ค่าสนามต่ำ ๆ แต่ค่าการแมกเนไทเซชันอิ่มตัวมีค่าสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ 100% ของสำนักพิมพ์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอก การพิมพ์ หรือการนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และไม่รับผิดชอบต่อการใช้งานที่ไม่ถูกต้องตามที่กล่าวถึงในเอกสารนี้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อสำนักพิมพ์

และสนาม H_c มีค่าต่ำมาก คุณสมบัตินี้แสดงให้เห็นชัดเจนด้วยพื้นที่ของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ซึ่งมีความเท่ากับพลังงานที่ต้องสูญเสียไปใน 1 รอบ จะมีค่าน้อยมาก ในกรณีที่ M_s มีค่าสูงมากหมายความว่าค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เป็นไปได้ในวงจรมแม่เหล็กที่อยู่ในตัวเหนี่ยวนำ หรือแกนหม้อแปลง

คุณสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุแม่เหล็กแบบง่ายมีดังต่อไปนี้

1. มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นอิสระจากเฟสอื่น ๆ เช่น สิ่งเจือ ความเค้น และความบกพร่องในผลึก นั่นคือ ค่าการแมกนีโตที่ย้อนกลับให้กับผนังโดเมนที่เคลื่อนที่จะง่าย ดังนั้น H_c จึงมีค่าน้อย
2. อุณหภูมิคูรีสูง
3. สภาพต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อที่จะลดพลังงานสูญเสียที่เกิดจาก กระแสไหลวน (Eddy Current)
4. มีความต้านทานการผุพัง และสนิมได้ดี และมีอุณหภูมิคงที่
5. ง่ายในงานเชิงกล
6. เป็นการผลิตที่ไม่แพง

ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในหม้อแปลง ทิศทางการแมกนีโตเซชันจะเปลี่ยน 60 ครั้งต่อวินาที ในลักษณะเช่นนี้ เหมือนกับจำนวนกลไกความเครียดต่อวินาทีมักจะทำให้เครื่องจักรมีเสียง ซึ่งเป็นกรณีพื้นฐานของปรากฏการณ์เหล่านี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแมกนีโตเซชัน และ กลไกความเครียดตรงนี้เรียกว่า แมกนีโตสตรักชัน (Magnetostriction) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับวัสดุ ซึ่งทางนักวิทยาศาสตร์ต้องการจะ ทำให้มีค่าน้อยที่สุด

โลหะผสมที่ใช้ในระบบกระแสไฟฟ้าสลับ ประกอบด้วย Fe-Si (iron-silicon) (ประมาณ 3 % ของน้ำหนัก Si) Fe-Al (iron-aluminum) และ Ni-Fe (nickel-iron) หรือเรียกว่า Permalloy จะมีค่า μ ไปจนถึง 3×10^5 และค่า H_c ที่ต่ำมาก 0.01 Oe ส่วนโลหะผสมอสัณฐาน (Amorphous alloy) เกิดขึ้นจากการทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเป็นไปอย่างรวดเร็วในอัตรา $10^6 K/s$ จึงได้เป็นวัสดุแม่เหล็กอย่างง่ายที่ดี ยกตัวอย่างเช่น $Fe_{80}B_{20}$ และ $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$

ต้องใช้ความถี่สูง ๆ เพื่อที่จะตัดปัญหากระแสไหลวน โครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ หรือ สารเฟอร์ไรซ์จะมีสูตรทั่วไปทางเคมี คือ $MO \cdot Fe_2O_3$ โดยที่ M เป็นโลหะทรานซิชัน เช่น Fe, Ni, Mn, หรือ Zn

3.4.2 วัสดุแม่เหล็กแบบยาก (Hard Magnetic Material)

เรียกอีกอย่างว่าเป็นแม่เหล็กถาวร มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เพราะมีสนามแม่เหล็กคงที่โดยไม่ต้องให้พลังงาน เช่นกระแสไฟฟ้า ในบริเวณที่สนามมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงกระทำให้วัตถุถูกแมกนีโต ซึ่งหลักการนี้นำไปประยุกต์ในเครื่องมือหลายชนิด เช่น ที่ยึดจับ ลำโพง และมอเตอร์ สนามที่มีแหล่งกำเนิดจากแม่เหล็กถาวรนำไปใช้ในการเบนเส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุใน Magnetic resonance imaging devices

คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวร คือ ผลคูณพลังงาน(Energy product) มีค่า $(BH)_{\max}$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของผลคูณระหว่าง B และ H ของกราฟฮิสเตอร์รีซิส ลูป หน่วยของผลคูณพลังงานคือ Million Gauss Oersted(MGOe) ในระบบหน่วยของเกาส์เซียน (Gaussian)

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแบบยากที่เด่นชัดประกอบด้วย

1. มีค่า M_s สูง เพราะค่าสูงสุดของพลังงานที่ได้มีค่า $4\pi^2 M_s^2$
2. มีค่าแมกนีโตเซชันรีมานนท์ M_r สูง
3. ฮิสเตอร์รีซิส ลูป เกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมโดยที่ $M_r \approx M_s$ และมีค่า H_c สูง ($> 2\pi M_s$)
4. อุณหภูมิคูรีสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้งานสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงได้
5. ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี
6. มีคุณสมบัติทางเชิงกลดี
7. เป็นผลผลิตที่ไม่แพง

จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้มีตลาดอย่างกว้างขวางสำหรับวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวร โดยมีมูลค่าทางตลาด 2 พันล้านดอลลาร์ เพราะสามารถทำความเข้าในได้ง่าย และมีการวิจัยมากมายที่จะอธิบายหรือเข้าใจลักษณะทางกายภาพของวัสดุประเภทนี้ ซึ่งเป็นการดี และองค์ประกอบในการผลิตมีราคาแพง

ในปี ค.ศ. 1880 ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าผลคูณพลังงานอยู่ในช่วงประมาณ 0.25 MGOe ในปี ค.ศ. 1880 สำหรับเหล็กคาร์บอน ไปจนถึง 50 MGOe ในปี ค.ศ. 1990 ซึ่งเป็นของสาร $Nd_2Fe_{14}B$

โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้จะประกอบด้วยอัลนิโค(Alnicos) ซึ่งคือ โลหะผสม $Al-Ni-Co$ ที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ รวมกันโดยใช้ความร้อนในสนามแม่เหล็กค่า $(BH)_{\max}$ สำหรับวัสดุเหล่านี้ประมาณ 10 MGOe สารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบยาก เช่น $BaFe_{12}O_{19}$ ราคาไม่แพง เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการศึกษาแร่ของสารประกอบประเภทเรร์เอิร์ททรานซิชัน(rare-earth transition) เช่น $SmCo_5$ [$H_c \approx 20 \text{ kOe}$] และ $(BH)_{\max} = 25 \text{ MGOe}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 วัสดุแม่เหล็กแบบกึ่งยาก (Semihard(recording) Magnetic Material)

วัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการเก็บข้อมูลบน ดิสก์ หรือ ฟลอปปีดิสก์(floppy disk) หรือเทปแม่เหล็ก วัสดุพวกนี้จัดอยู่ในจำพวก วัสดุแม่เหล็กแบบกึ่งยาก โดเมนเล็ก ๆ จะถูกเขียนบนฟิล์มโดยใช้สนามแม่เหล็กจากหัวเขียน ซึ่งสร้างสนามได้มากเพียงพอเขียนบนฟิล์ม โดยใช้หัวซึ่งสร้างสนามได้เพียงพอที่จะทำให้การแมกนีไตซ์ย้อนกลับได้เพื่อสร้างให้เป็นบิต (bit) ของข้อมูลซึ่งจะสอดคล้องกับแต่ละโดเมนที่ถูกแมกนีไตซ์ขึ้นในทิศทางที่แน่นอน เนื่องจากข้อมูลจะต้องถูกเก็บอย่างถาวร การแมกนีไตซ์ขึ้นต้องเสถียร และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง นั่นคือวัสดุต้องมีค่าการแมกนีไตซ์สูง ซึ่งสัมพันธ์กับค่า โคเออร์ซีฟสูงด้วย ลักษณะกราฟฮิสเตอร์รีซิส ลูปเกือบจะเป็นสี่เหลี่ยม ค่า H_c ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามบิตไม่สามารถสวิตได้ด้วยสนามน้อย การอ่านข้อมูลสามารถทำได้โดยใช้หัวอ่าน อาศัยพื้นฐานทั้งการตรวจจับสนามโดยวัดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในขดลวด หรือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุแม่เหล็กแบบง่าย โดยทำให้ตัวดิสก์หมุนผ่านหัวอ่าน

จำนวนข้อมูลที่เก็บในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของดิสก์(areal density) ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยอัตราจะมีการเปลี่ยนแปลงทุก 10 ปี ในปัจจุบันนี้ในทางการค้าจะอยู่ที่ประมาณ 10 เมกกะบิตต่อตารางนิ้ว (100 Mb/m^2)

วัสดุที่ใช้กันส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะผสมของโคบอลต์ Co เช่น CoCrTa หรือ CoCrPt ซึ่งมีค่า H_c ประมาณ 2,000 Oe และมีทิศทางการแมกนีไตซ์ขึ้นในระนาบของฟิล์ม ได้มีการวิจัยที่จะเพิ่มความสามารถในการเก็บข้อมูลให้สูงถึง $10,000 \text{ Mb/m}^2$ ในปี 2005 ในการเพิ่มความเข้มอาจจะต้องมีรูปแบบที่แตกต่างของทิศทางการแมกนีไตซ์ขึ้นของบิตโดยอาจจะตั้งฉากกับระนาบของฟิล์ม

ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่

ลักษณะชุดทดลองโดยอาศัยปรากฏการณ์เคอร์รี่อาศัยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่เป็นปรากฏการณ์พื้นฐาน ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่เป็นชุดตรวจวัดแบบไม่ทำลาย ที่มีความสะดวก และรวดเร็วในการวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกราฟฮีสเตอร์รีซิส และเป็นชุดศึกษาที่พัฒนาขึ้นด้วยวัสดุภายในประเทศ

ในการสร้างชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบาง ได้มีการออกแบบลักษณะโครงสร้างของชุดเครื่องมือเพื่อวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิสตัวอย่างฟิล์มแม่เหล็กบางในรูปของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ โดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ในแนวตามขวาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ให้สนามแม่เหล็กในแนวระนาบเดียวกับผิวที่สะท้อนและต้องฉากกับระนาบตกกระทบ ดังนั้นการแมกนีโตของตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดอยู่ในระนาบเดียวกับผิวของตัวอย่าง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสร้าง คือ ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ตำแหน่งการวางตัวอย่างในการตรวจวัด ทางเดินแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ตกกระทบลงบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ และแสงสะท้อนออกจากผิวของตัวอย่าง ในการสร้างชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ได้แบ่งออกเป็นส่วน ๆ ที่สำคัญดังนี้

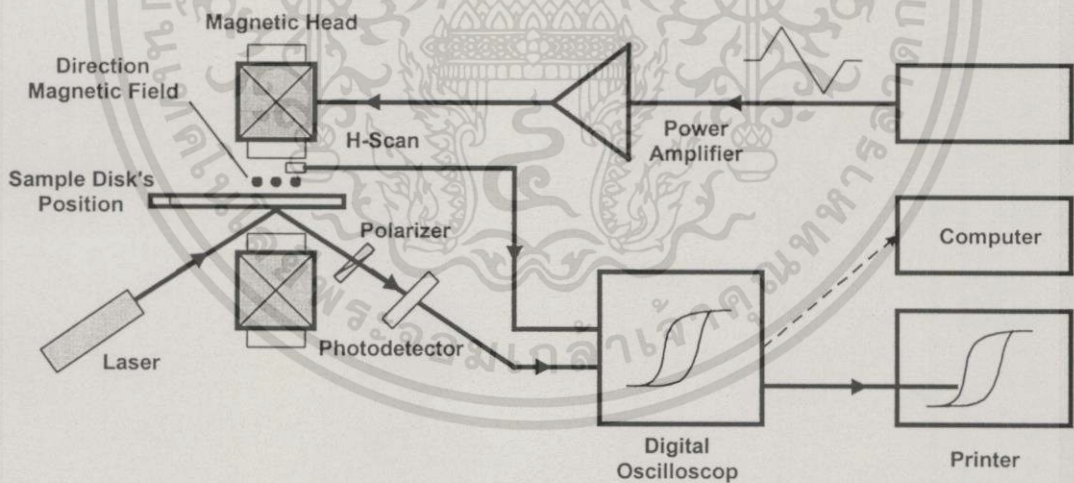
- ระบบแม่เหล็ก ประกอบด้วย หัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก เครื่องกำเนิดสัญญาณ เครื่องขยายกำลัง เป็นส่วนที่เกี่ยวกับการสร้างสนามแม่เหล็ก ที่ให้กับตัวอย่างขณะตรวจวัด
- ระบบแสง ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ แหล่งจ่ายกำลังของเลเซอร์ เลนส์รวมแสง โฟลาโรเซอร์
- ตัวอย่างที่ทดสอบ คือ ฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว ความจุประมาณ 1-4 Gbytes ต่อแผ่น
- ระบบรับสัญญาณ คือ โฟโตดีเทคเตอร์ที่ทำหน้าที่วัดความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงก่อนที่จะผ่านต่อไปยังออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงผล
- ระบบแสดงผล ประกอบด้วย ออสซิลโลสโคปดิจิตอลแบบ 2 ช่องสัญญาณ เครื่องพิมพ์เลเซอร์ เพื่อพิมพ์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดตัวอย่าง

4.1 ไตอะแกรมการวัดฟิล์มแม่เหล็กบางด้วยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่

ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางเป็นชุดตรวจวัดแบบไม่ทำลาย สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายในอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และราคาไม่แพงมากนัก ตัวอย่างเป็นฟิล์มบางในรูปของฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ ในการพัฒนาเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นมาเพื่อพัฒนาวิจัยวิธีการวัดพารามิเตอร์ของกราฟฮีสเตอร์รีซิสกลุ่มของตัวอย่างที่เป็นฮาร์ดดิสก์ เพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

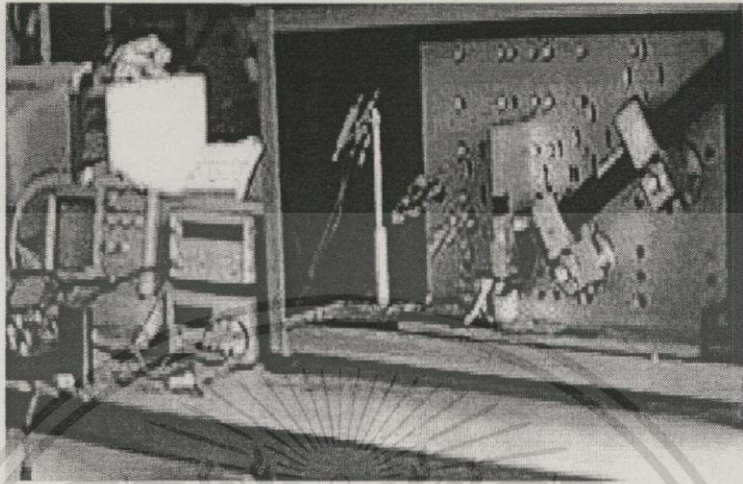
วัดทางแมกนีโต-ออปติกในขั้นสูงต่อไป รวมไปถึงเป็นการวิจัยเพื่อรองรับการพัฒนาของประเทศที่มีการเจริญเติบโตในด้านอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์(Hard disc)บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์

ลักษณะไดอะแกรมการวัดของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กที่ได้พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของระบบรวม ซึ่งประกอบด้วยฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนตัวอย่าง ที่ถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็ก จากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก(Magnetic Head) รูปที่ 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ของชุดวิจัยภายในตู้ รูปที่ 4.4 แสดงทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนตัวอย่างขณะตรวจวัด แสงจะสะท้อนจากตัวอย่างผ่านเลนส์รวมแสงไปยังโพลาไรเซอร์(Polarizer) ผ่านต่อไปยังโฟโตดีเทคเตอร์(Photodetector) รูปที่ 4.5 แสดงทางเดินของแสงที่สะท้อนจากตัวอย่าง โฟโตดีเทคเตอร์เครื่องวัดความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าการแมกนีโตเซชันของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.6 สัญญาณจากตัวโฟโตดีเทคเตอร์ซึ่งแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแมกนีโตเซชันของตัวอย่างจะส่งไปยังอินพุททางด้าน Y ของตัวออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล(Digital Oscilloscope) ซึ่งจะทำการเปลี่ยนรูปกราฟในโหมดของ X-Y กับสัญญาณที่เป็นอินพุททางแกน X ซึ่งเป็นสัญญาณจากตัวรับสัญญาณของ ฮอลล์ (Hall Sensor) โดยสัญญาณจะแปรเป็นสัดส่วนกับสนามแม่เหล็กที่ให้กับตัวอย่างเกิดการแมกนีโตเซชัน

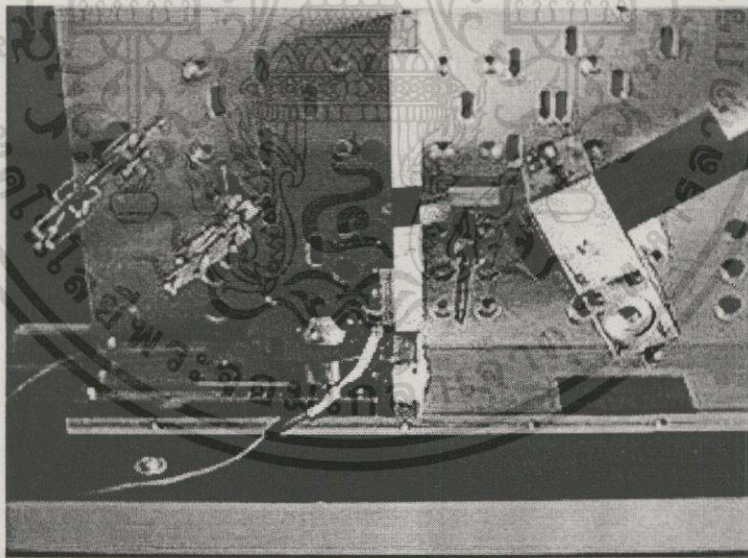


รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมแสดงระบบการศึกษาฟิล์มบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์ร์

กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างจะแสดงทางหน้าจอของออสซิลโลสโคป แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ทำการบันทึกโดยเครื่องออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล และพิมพ์ โดยเครื่องพิมพ์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องออสซิลโลสโคป ในการออกแบบสร้างสนามแม่เหล็กที่ให้กับตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการแมกนีโตเซชัน ดำเนินการสร้างจากระบบหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก(Magnetic Head) โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้า AC ซึ่งในส่วนนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) และเครื่องขยายกำลัง (Power Amplifier)

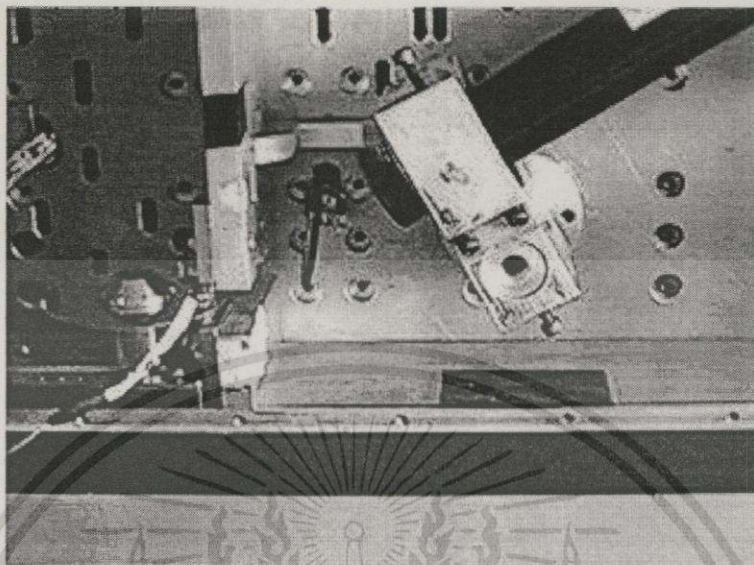


รูปที่ 4.2 ลักษณะระบบอุปกรณ์ของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่

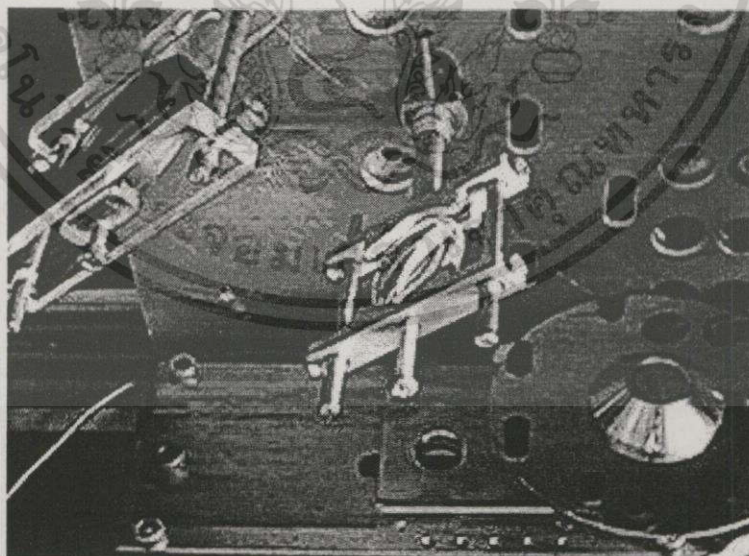


รูปที่ 4.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางภายในตู้ของชุดทดลองปฏิบัติการของเคอร์รี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

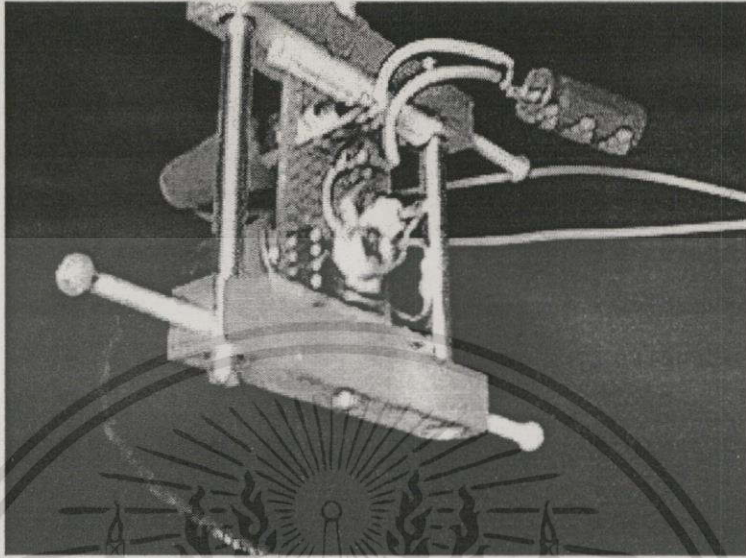


รูปที่ 4.4 ทางเดินของลำแสงตกกระทบของแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์ผ่านโพลาไรเซอร์ที่ตกกระทบลงบนตัวอย่างที่เป็นรีจิดติสก์

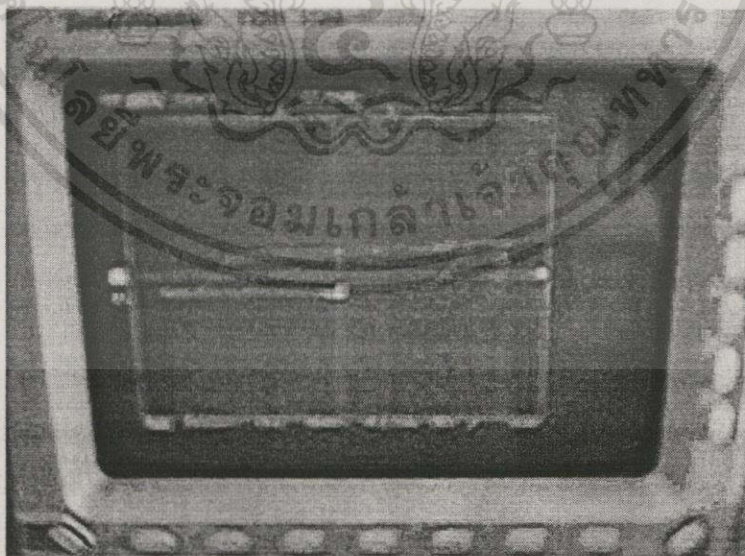


รูปที่ 4.5 ทางเดินของลำแสงสะท้อน เมื่อสะท้อนจากตัวอย่างผ่านเลนส์รวมแสงผ่านต่อไปยังโพลาไรเซอร์ไปยังโฟโตดีเทคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ลักษณะของโฟโตดีเทคเตอร์ส่วนของการรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างที่ทดสอบ

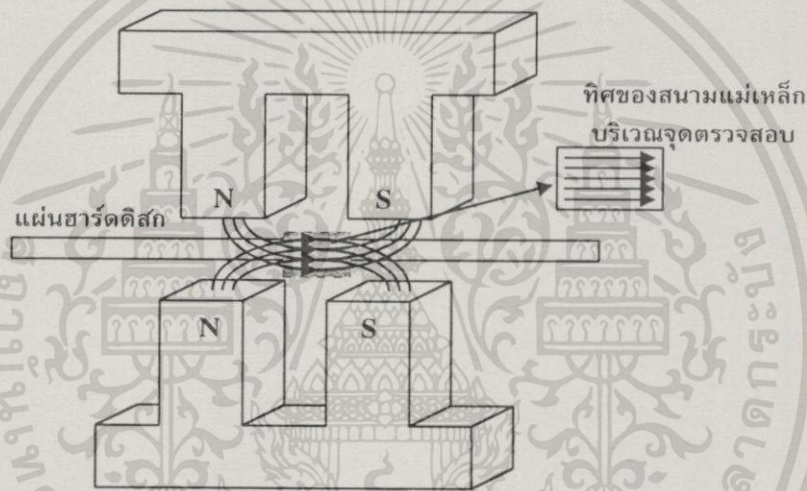


รูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบแสดงเป็นกราฟฮีสเตอร์รีซิสบนหน้าจอออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 หัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก(Magnetic Head)

หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ให้กับตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด ในการสร้างหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามแม่เหล็ก และความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก ในการตรวจวัดด้วยชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ ทิศทางของสนามแม่เหล็กต้องอยู่ในแนวระนาบเดียวกับผิวของแผ่นตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ที่ต้องการตรวจวัด เนื่องจากแผ่นตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดเป็นแผ่นกลม เพื่อความสะดวกจึงออกแบบให้หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบตัวยู แสดงลักษณะและทิศทางของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.8

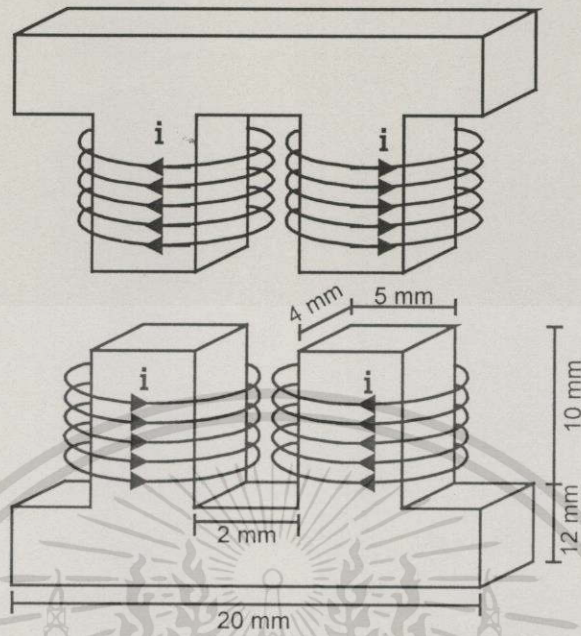


รูปที่ 4.8 ลักษณะและทิศทางของสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ในชุดการศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ ขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต้องการนำไปใช้งานขนาด 5 kOe ซึ่งสามารถวัดค่า H_c อยู่ในช่วง 2.0-3.0 kOe ซึ่งแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์จะมีค่า H_c อยู่ในช่วงดังกล่าว

หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้น แกนของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กทำจากเหล็กอ่อน เป็นสารแม่เหล็กแบบง่าย ของแกนหม้อแปลงนำมาทำเป็นแกนในการพันขดลวด พื้นที่หน้าตัดของขั้วทั้งสองของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กมีลักษณะผิวเรียบขนาด 20 ตารางมิลลิเมตร ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็กห่างกัน 2 มิลลิเมตร ขดลวดที่พันจำนวน 100 รอบต่อขั้วแม่เหล็ก ความต้านทานของขดลวด 4 โอห์ม

หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กชนิดที่สร้างขึ้นทำงานในโหมด AC จะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงถึง 5 kOe ที่กระแสประมาณ 10 แอมแปร์ ขนาดของหัวกำเนิดแม่เหล็กของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ แสดงดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะและขนาดของหัวกำเนิดแม่เหล็ก

ในส่วนของการสร้างสนามแม่เหล็กประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 4000 เฮิรตซ์ ขนาดของแอมพลิจูดประมาณ 1-1.5 โวลต์ รูปที่ 4.10 แสดงเครื่องกำเนิดสัญญาณ สัญญาณจรูปสามเหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ส่งผ่านไปยังเครื่องขยายกำลังขนาด 300 วัตต์ ผ่านไปยังขดขวดที่พันแกนของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 4.11

ค่าโวลต์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด เป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ซึ่งเป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(emf) ที่เกิดขึ้นในขดลวดจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวด และจำนวนรอบของขดลวด แสดงดังสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$e = 10^{-8} N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด และจากความสัมพันธ์ $\phi = HA$ สมการที่ (4.1) จะได้

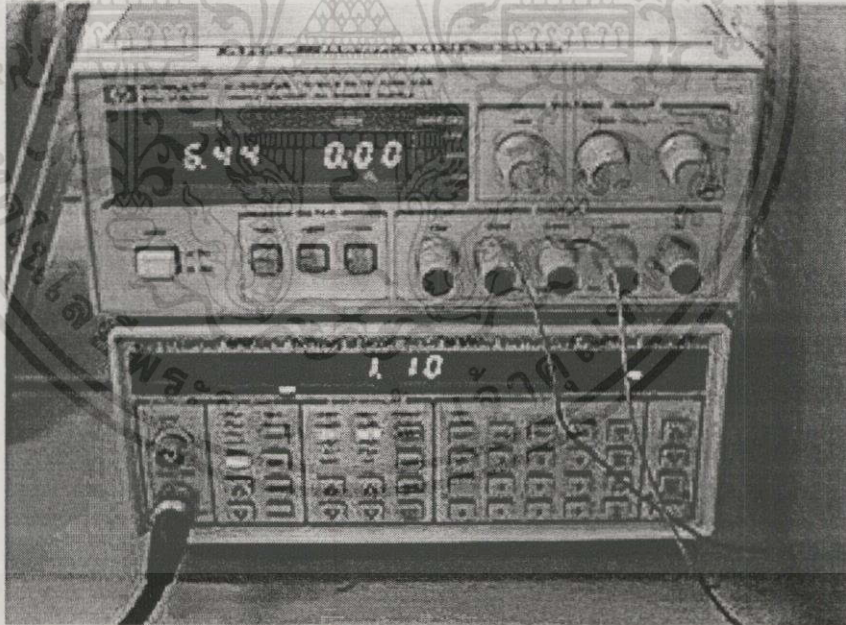
$$e = 10^{-8} NA \frac{dH}{dt} \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

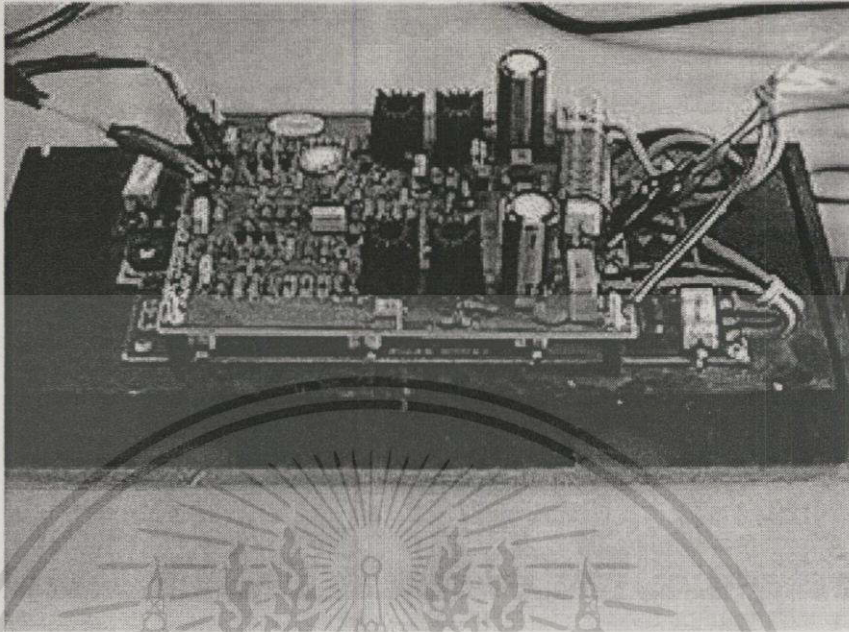
จาก $i = \frac{e}{R}$ โดยที่ R เป็นค่าความต้านทานของขดลวด กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะมีค่าโวลต์เหนี่ยวนำ

$$i = \frac{e}{R} = \frac{10^{-8} NA}{R} \frac{dH}{dt} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) ค่ากระแสจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสนามแม่เหล็ก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำมาคำนวณถึงจำนวนรอบและกระแสที่ต้องให้กับขดลวด และข้อจำกัดเกี่ยวกับความร้อนที่อาจจะเกิดขึ้นกับขดลวด เพื่อให้ได้สนามตามที่ต้องการ ขนาดระยะระหว่างขั้วของแม่เหล็ก(gap) ต้องมีขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กเพียงพอ ขั้วของสนามแม่เหล็กต้องมีความเรียบเพื่อเป็นการลดการสูญเสียของฟลักซ์แม่เหล็ก สำหรับแกนหม้อแปลงซึ่งเป็นสารแม่เหล็กอย่างง่าย



รูปที่ 4.10 แหล่งกำเนิดสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก

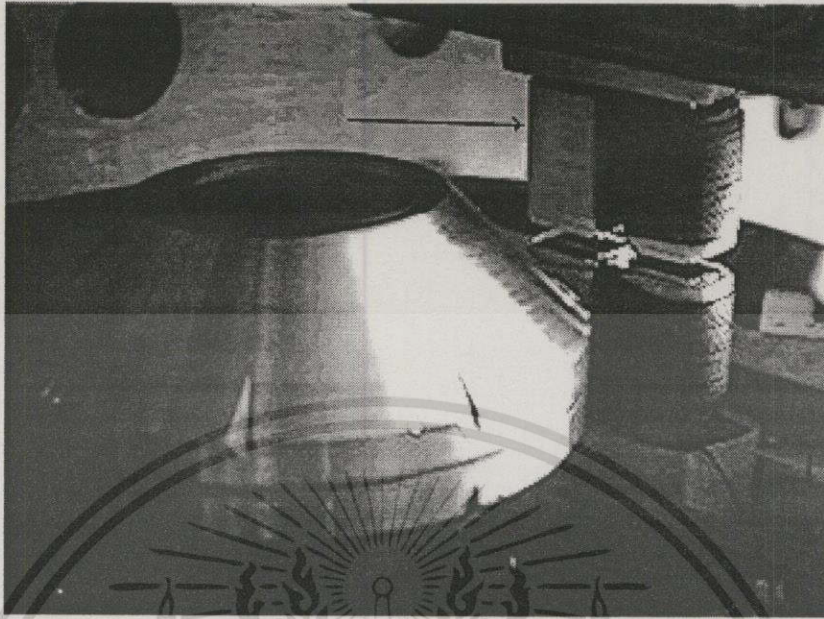


รูปที่ 4.11 เครื่องขยายกำลังขนาด 300 วัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ให้กับขดลวดและจำนวนขดลวด
ของสนามแม่เหล็กและระยะทางระหว่างขั้วแม่เหล็ก g ดังนี้

$$NI = Hg \quad (4.4)$$

N คือ จำนวนรอบของขดลวด I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน H คือ ความ
เข้มของสนามแม่เหล็ก g คือ ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก ในการพันขดลวดของหัวกำเนิด
สนามแม่เหล็กต้องมีการจัดเรียงขดลวดให้เป็นระเบียบ เพื่อลดการสูญเสียฟลักซ์แม่เหล็ก
และมีการป้องกันความร้อนให้กับขดลวด รวมถึงต้องคำนึงถึงความต้านทานของขดลวด
เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของกระแสที่จะป้อนเข้าไป ความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวกำเนิดสนาม
แม่เหล็กเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นปัญหาหนึ่งที่จะทำให้เกิดการเสียหายกับขดลวด
ดังนั้นในการทดสอบควรจะต้องสำรวจความร้อนที่เกิดขึ้นกับขดลวดเสมอ เป็นข้อควร
ระวังอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึง อุณหภูมิในห้องตรวจสอบไม่ควรเกิน 25 องศา ลักษณะ
ของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่
4.12



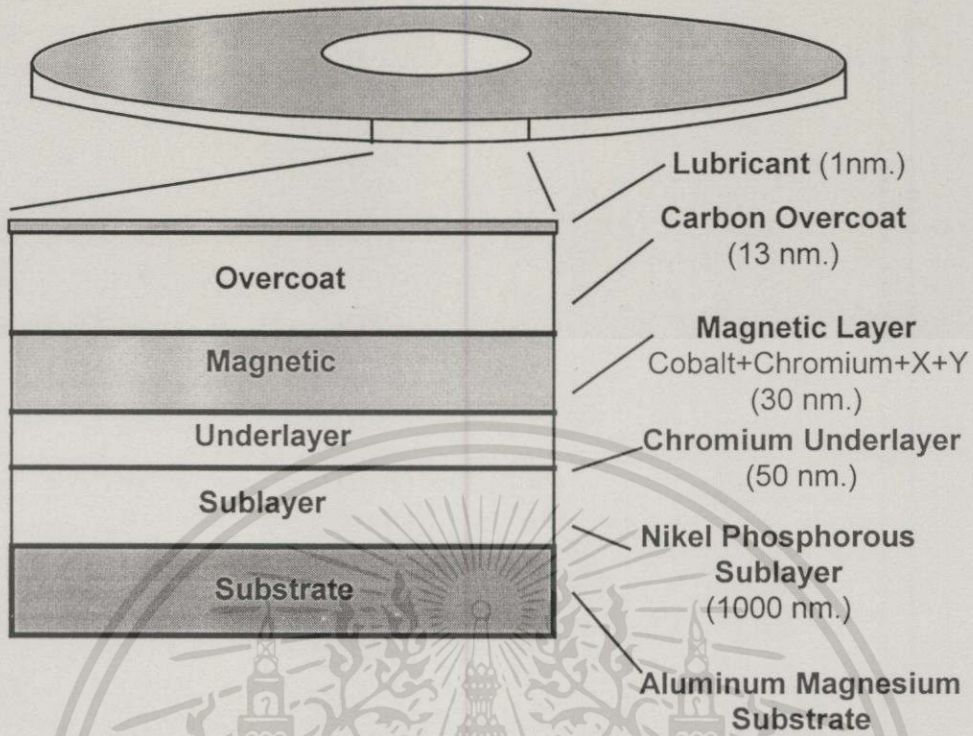
รูปที่ 4.12 หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กในชุดการศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่

4.3 ตัวอย่างที่ทดสอบ

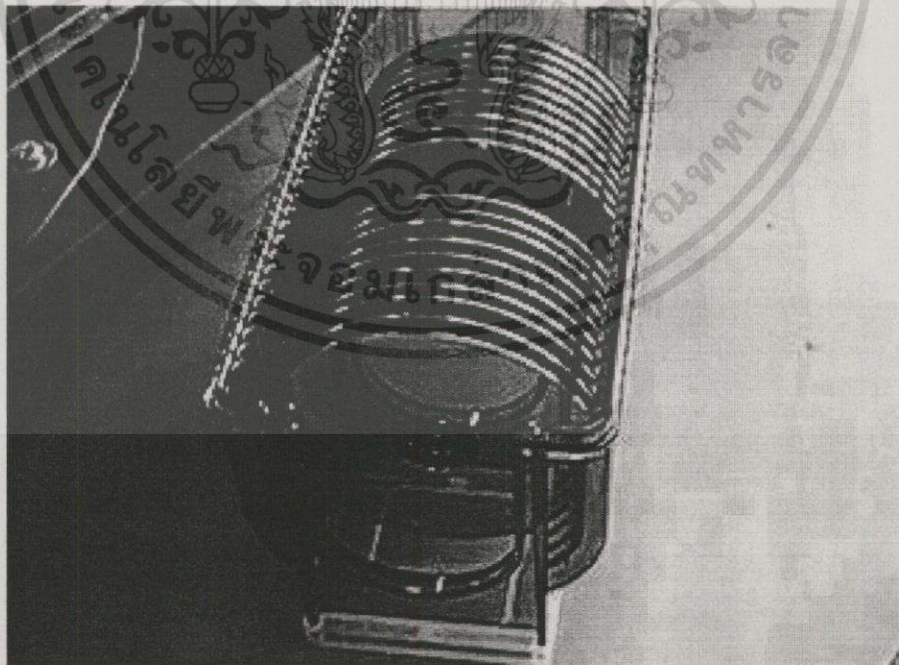
ตัวอย่างที่ใช้ตรวจวัดกราฟการแมกนีโตเซชัน เป็นฟิล์มแม่เหล็กบาง ที่อยู่ในรูปของฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.740 นิ้ว ความหนา 0.0315 นิ้ว ลักษณะผิวเรียบ เป็นมัน วาว ลื่น ผิวด้านบนสุดเป็นสารเคลือบ (Lubricant) เพื่อความลื่น และเคลือบเรียบหนา 1 นาโนเมตร ชั้นถัดไปเคลือบคาร์บอน (Carbon Overcoat) หนา 13 นาโนเมตร เป็นชั้นป้องกันชั้นฟิล์มแม่เหล็กบาง ต่อด้วยชั้นของฟิล์มแม่เหล็ก (Magnetic Layer) หนาประมาณ 30 นาโนเมตรด้วยสารประกอบของโคบอลต์-โครเมียม-และองค์ประกอบอีก 2 ชนิด คือ ส่วนประกอบชนิด X และ Y ต่อด้วยชั้นของโครเมียม (Chromium Underlayer) หนา 50 นาโนเมตร และนิกเกิลฟอสฟอรัส (Nickel Phosphorous) หนา 1000 นาโนเมตร บนสารตั้งต้นเพื่อเป็นชั้นให้ความแข็งแรง ประกอบด้วยสารอะลูมิเนียมแมกนีเซียม (Aluminum Magnesium Substrate) ส่วนประกอบที่สำคัญของดิสก์แสดงดังรูปที่ 4.13

สิ่งที่จำเป็นสำหรับฟิล์มบางที่ใช้ตรวจสอบที่ต้องคำนึงถึงคือ ความหนาของฟิล์มบางต้องสม่ำเสมอ ผิวเรียบ และมีความแข็งแรง คงตัว ในการเลือกตรวจสอบตัวอย่างที่เป็นแผ่นฮาร์ดดิสก์ เพราะเป็นวัตถุที่สำคัญในระบบอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ และเป็นแผ่นบันทึกข้อมูลที่สามารถทำการบันทึก ทำการเขียน และลบข้อมูลได้หลาย ๆ ครั้ง เป็นชิ้นส่วนที่ใช้งานได้หลายครั้ง และเวลาการใช้งานนานพอสมควร ดังนั้นในการตรวจสอบสภาพถึงเป็นสิ่งสำคัญ เป็นการลดการสูญเสียเวลา และค่าใช้จ่ายได้ระดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



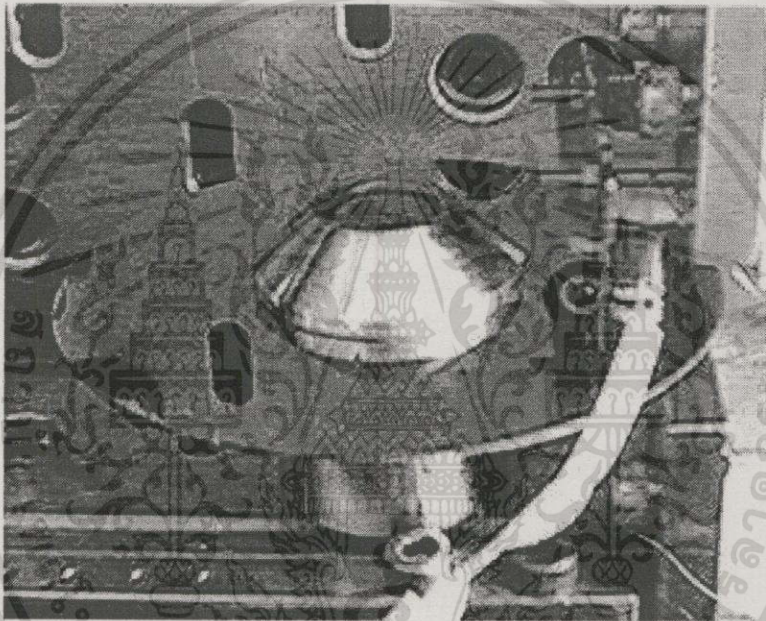
รูปที่ 4.13 โครงสร้างภาคตัดขวางของของดิสก์แม่เหล็ก



รูปที่ 4.14 ลักษณะของแผ่นฮาร์ดดิสก์ตัวอย่างที่ทดสอบในชุดวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

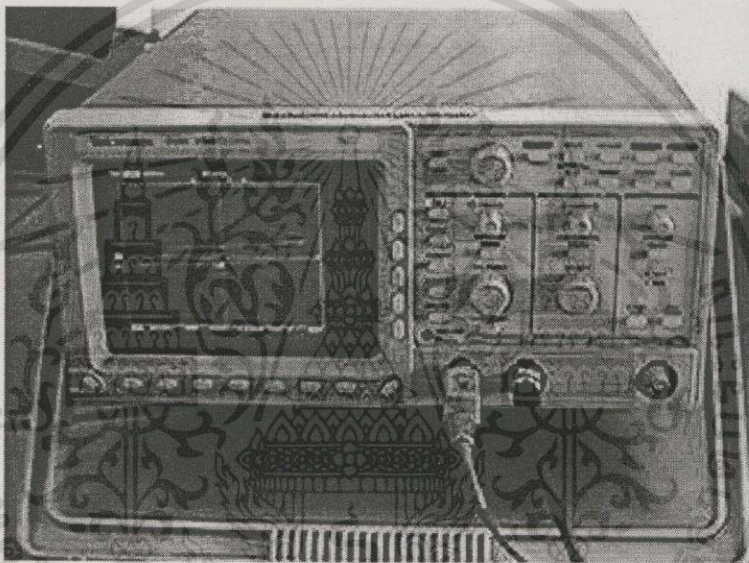
ในการทดสอบตรวจวัด นำตัวอย่างที่ทดสอบไปวางในสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก ในตำแหน่งที่ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ที่ทำให้เกิดการแมกนีโตของแผ่นฮาร์ดดิสก์ในแนวระนาบของแผ่น แทนวางแผ่นฮาร์ดดิสก์ในการตรวจสอบ ได้ออกแบบให้มีความสะดวก และง่าย ในการเปลี่ยนแผ่นทดสอบสำหรับการตรวจสอบแต่ละแผ่น โดยแทนวางแผ่นฮาร์ดดิสก์วางอยู่ในตำแหน่งที่บริเวณที่ต้องการตรวจสอบถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดแม่เหล็ก ในกรณีต้องการตรวจวัดหลาย ๆ ตัวอย่างสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว แสดงลักษณะแทนวางตัวอย่างขณะตรวจสอบในสนามแม่เหล็กและตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



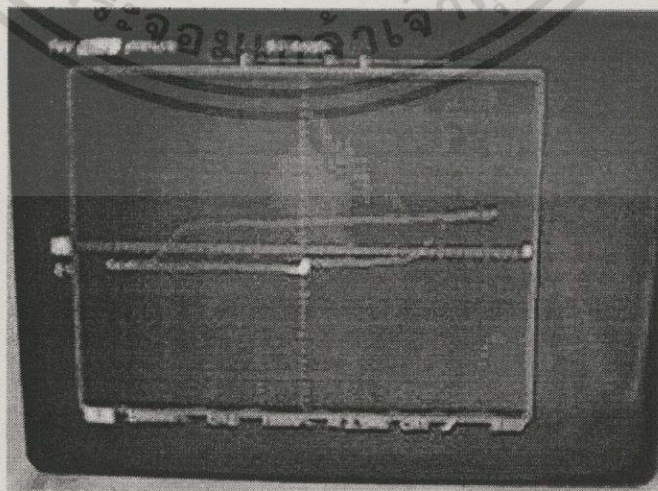
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการวางฮาร์ดดิสก์ในสนามแม่เหล็กขณะตรวจวัดตัวอย่าง

4.4. ภาคแสดงผล

ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางด้วยปรากฏการณ์แมกนีโต-ออปติกของเคอร์รับ ส่วนของการแสดงผลเป็นกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูป ส่วนของการรับข้อมูลจากโฟโตดีเทคเตอร์ และสัญญาณจากสนามแม่เหล็กทำการเฉลี่ยแล้วแสดงผลในรูปของกราฟ ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป 2 ช่องสัญญาณแบบดิจิทัลของบริษัท Textroniz รุ่น TDS 350 โดยใช้โหมดเฉลี่ย แสดงดังรูป 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



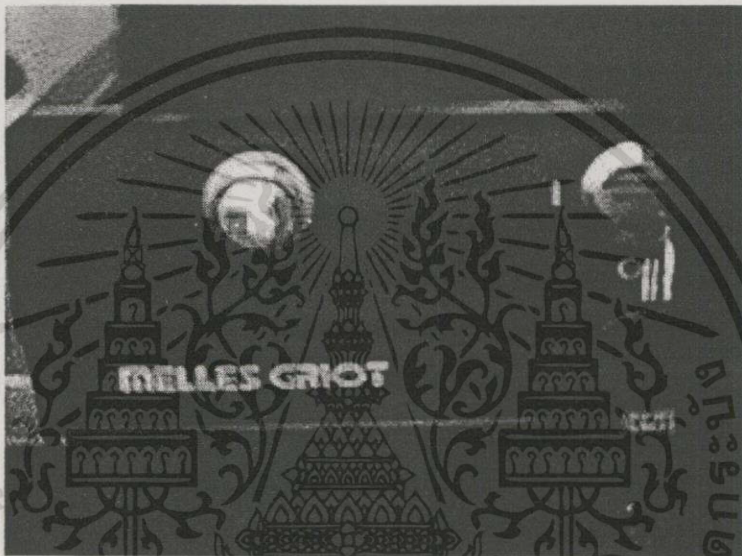
รูปที่ 4.16 เครื่องออสซิลโลสโคป 2 ช่องสัญญาณแบบดิจิทัล Textroniz รุ่น TDS 350



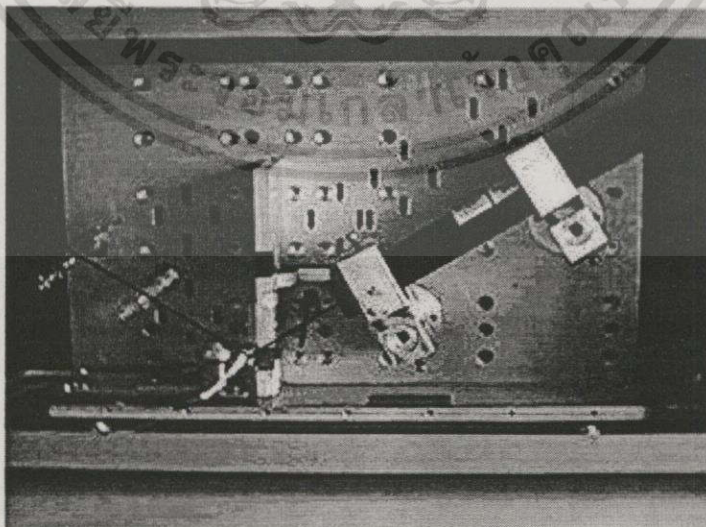
รูปที่ 4.17 ลักษณะของกราฟฮีสเตอร์รีซิสจากการวัด จากเครื่องออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
4.5 แหล่งกำเนิดแสง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสงในงานวิจัยชุดแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รับเป็นแสงฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ ชนิดโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น พร้อมด้วยแหล่งจ่ายกำลัง รุ่น 05LHP121 เป็นลำแสงสีแดง ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ขนาดกำลัง 2 mW เป็นเลเซอร์ที่มีเวลาในการใช้งานนาน และมีความเสถียรสูง ลักษณะและทิศทางการเดินของแสงเลเซอร์ ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 แหล่งจ่ายกำลังของเครื่องฮีเลียม-นีออนเลเซอร์



รูปที่ 4.19 ลักษณะทางเดินแสงของฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ในชุดวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิส ของฟิล์มแม่เหล็กบาง ในรูปของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ จากบริษัทซีเกทเทคโนโลยี(ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ แผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ตรวจวัดมีโครงสร้างของชั้นแม่เหล็กเป็นสารประกอบของสาร โคบอลต์(Co) และโครเมียม(Cr) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยในการตรวจสอบแผ่นตัวอย่างที่นำมาจากบริษัทซีเกท ไม่มีการดัดแปลงหรือ ตัดแบ่ง ในการนำไปตรวจวัดกับชุดศึกษาวิจัยฟิล์มแม่เหล็กบางที่พัฒนาขึ้น สามารถทำการตรวจสอบได้เลย เนื่องจากชุดวิจัยที่พัฒนาขึ้นเป็นชุดการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย ตำแหน่งในการตรวจวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิสของแผ่นตัวอย่าง แต่ละตำแหน่งที่ตรวจวัดอยู่ในแนวรัศมี 1.8 นิ้ว จากจุดศูนย์กลางของแผ่นฮาร์ดดิสก์ ในการตรวจวัดแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่นำตรวจวัดเพื่อการวิจัย แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ด้วยกันตามค่าสนามโคเออร์ซิวิตี H_c ของตัวอย่าง คือ ค่าสนาม $H_c = 2000$ Oe $H_c = 2500$ Oe และ $H_c = 2700$ Oe โดยแต่ละแผ่นได้ทำการสุ่มทดสอบ 10 ตำแหน่งด้วยกัน แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อแสดงค่า H_c S^* และ S ของแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ทดสอบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าที่ทดสอบได้จากชุดวิจัยฟิล์มแม่เหล็กบาง โดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่เปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดชนิด TRDM ที่ใช้งานจริงของบริษัท ซีเกท

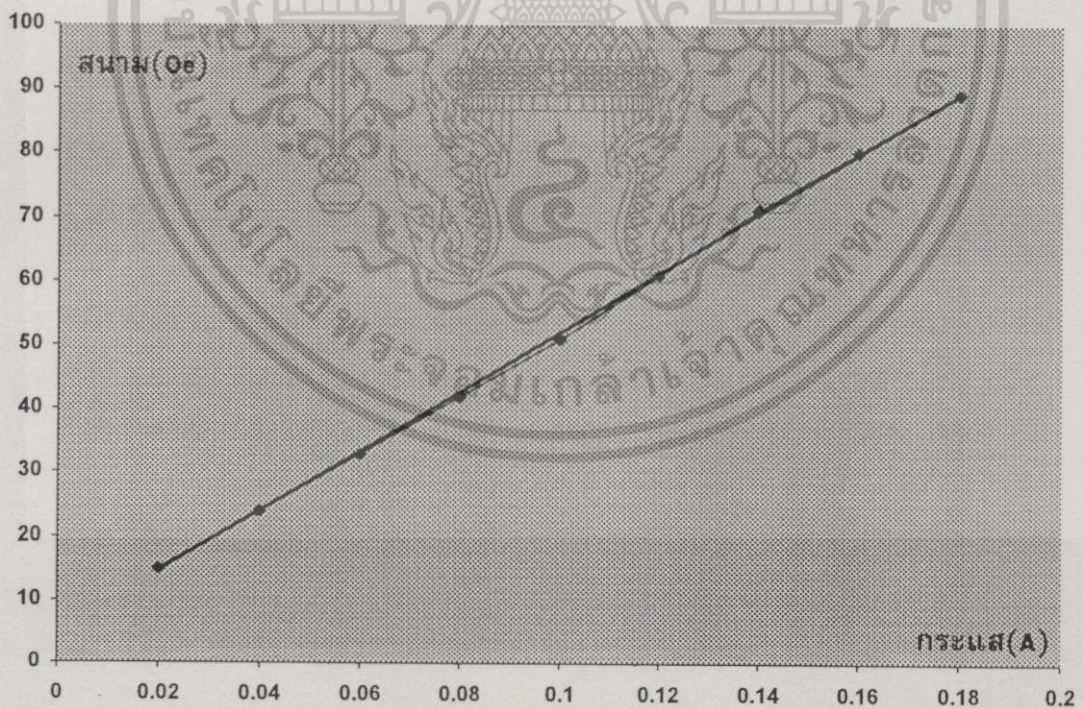
5.1 การทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนาม

เมื่อสร้างหัวกำเนิดสนามตามแบบ ในการติดตั้งหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กกับระบบการตรวจวัดของชุดวิจัย ได้ทำการตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก เพื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ในทางทฤษฎีแล้วกระแสไฟฟ้าในขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กของหัวกำเนิดสนาม ได้ทำการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กตรงบริเวณที่ใช้ในการตรวจวัดแผ่นตัวอย่าง เพื่อหาขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กขนาดที่มีการตรวจวัดตัวอย่าง โดยให้กระแสที่ค่ามีค่า 0.02-0.2 แอมแปร์กับขดลวด และวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยใช้เกาส์มิเตอร์ รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของเกาส์มิเตอร์ที่ใช้วัดความเข้มสนามแม่เหล็กในชุดวิจัย ทำการหาค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่ต้องนำไปใช้งาน เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในขดลวด และความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากข้อมูลที่ได้จากการวัดนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 เกาส์มิเตอร์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กในชุดวิจัย



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าในขดลวด และสนามแม่เหล็กจากการวัด

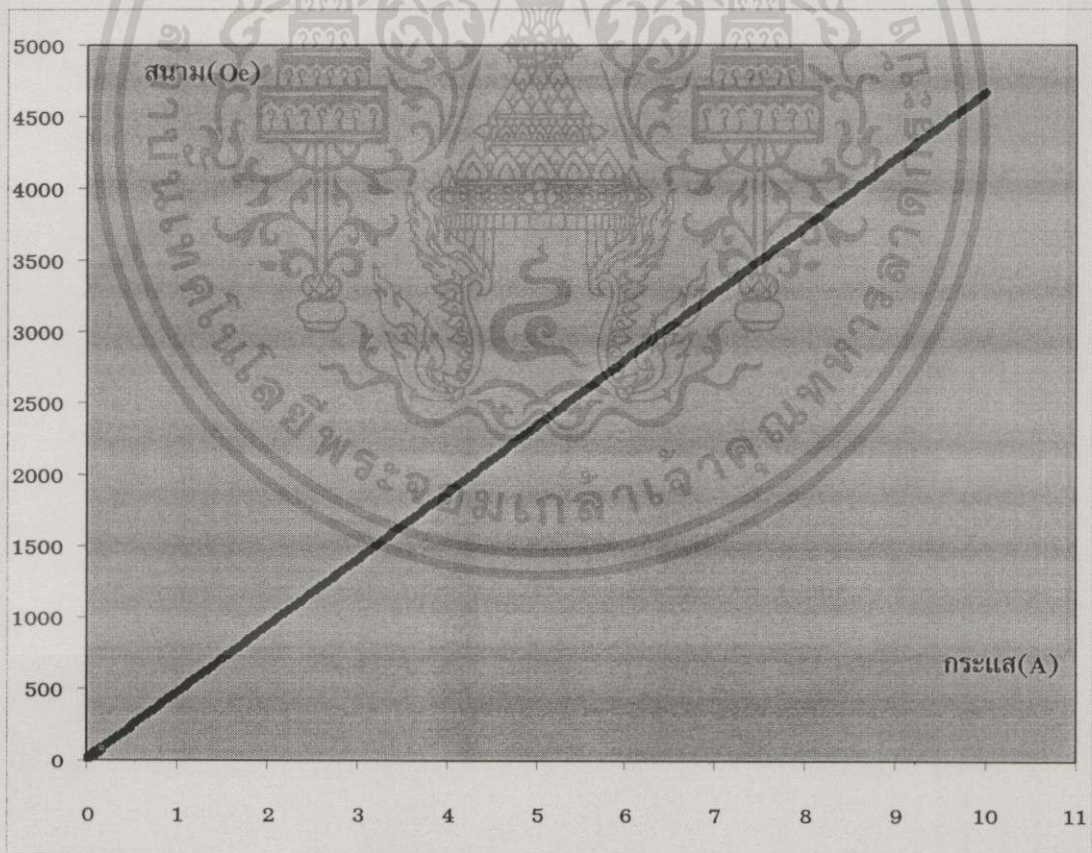
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 จากกราฟหาความสัมพันธ์ได้โดยลากเส้นแสดงความสัมพันธ์เป็นความชันของกราฟ เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของกระแสและสนามแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น ความสัมพันธ์นี้เปรียบเสมือนตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กที่สามารถใช้แทนข้อมูลที่กระแสมีค่ามากขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อมีการป้อนกระแสให้กับขดลวดค่าต่าง ๆ ค่าสนามที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสมาก สมการซึ่งเป็นตัวแทนความสัมพันธ์ แสดงได้ดังสมการ (5.1)

$$H = 466.34I + 5.1271 \quad (5.1)$$

โดยที่ H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Oe) I คือ กระแสในขดลวด (A)

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการใช้ในชุดวิจัยศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์ต้องการความเข้มของสนามประมาณ 5 kOe รูปที่ 5.3 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระแสในขดลวดตั้งแต่ 0.02-10 แอมแปร์เพื่อเป็นตารางแสดงค่าสนามที่กระแสต่าง ๆ ของชุดวิจัย



รูปที่ 5.3 สนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าในขดลวดจากความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์

5.2 การทดสอบวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูปของแผ่นฮาร์ดดิสก์

การทดสอบวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูปของตัวอย่างในงานวิจัย โครงสร้างของเครื่องมือแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 เมื่อเซตเครื่องมือตั้งรูปเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นฮาร์ดดิสก์วางบนแท่นวาง จัดตำแหน่งที่ต้องการทดสอบให้อยู่ในสนามแม่เหล็ก จากหัวกำเนิดสนาม เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1 ตัวอย่าง ประมาณ 10 วินาที ความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบจากตัวกำเนิดสัญญาณ 4000 เฮิร์ต เนื่องจากความถี่ที่ใช้ทดสอบเป็นความถี่สูง และข้อจำกัดของขดลวด เกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวกำเนิดสนามขณะที่ทดสอบ ดังนั้นจะให้กระแสไฟฟ้า AC เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการทดสอบ เพื่อป้องกันความร้อนที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับหัวกำเนิดสนาม โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.1 วางแผ่นตัวอย่างบนแท่นวาง จัดบริเวณที่ต้องการทดสอบให้อยู่ในสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนาม
2. เปิดสวิตช์เพื่อเปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยเซตให้มีความถี่ 4000 เฮิร์ต แอมพลิจูด $V_{pp} = 1.10$ โวลต์
3. เปิดเครื่องออสซิลโลสโคป เซตให้การแสดงผลเป็น Y-T โหมดแบบ โหมดตัวอย่าง (Sample mode)
4. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับโฟโตดีเทคเตอร์ โดยเซตค่าโวลต์ อยู่ระหว่าง 6-9 โวลต์
5. เปิดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์
6. เปิดเครื่องขยายกำลัง เพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า AC ไปยังขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก
7. เปลี่ยนการแสดงผลของออสซิลโลสโคปจาก โหมดตัวอย่าง (sample mode) มาเป็น โหมดเฉลี่ย (average mode) ทำการตรวจวัดประมาณ 10 วินาที
8. กดปุ่ม STOP บนเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อหยุดทดสอบ ขณะที่ข้อมูลที่ทดสอบยังคงเก็บอยู่ในหน่วยความจำ
9. ปิดสวิตช์เครื่องขยายกำลัง แหล่งจ่ายไฟฟ้า DC
10. เปลี่ยนโหมดการแสดงผลของออสซิลโลสโคปจากโหมด Y-T มาเป็นโหมด X-Y ของ แสดงเป็นกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูป ของตัวอย่างที่ทดสอบ
11. พิมพ์กราฟทางเครื่องพิมพ์

5.2.1 การอ่านค่าสนามโคเออร์ซิวิตี้

จากไดอะแกรมการตรวจสอบของระบบแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ รูปกราฟฮีสเตอร์รีซิส ลูปบนหน้าจ้ออสซิลโลสโคป สัญญาณช่อง 1 (Ch 1) เป็นสัญญาณสนามแม่เหล็กในแนวแกน X เป็นสัญญาณโวลต์ที่วัดตกคร่อมบนตัวต้านทาน $0.1 \Omega / 10 \text{ W}$ จากสัญญาณที่วัดตกคร่อมตัวต้านทาน นำมาคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ พิจารณาจากรูป 5.3 สัญญาณทางแกน X เป็นสัญญาณ VAC 1 ช่องสเกล = 200 mV

จากรูปอ่านค่าโวลต์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ค่าสัญญาณ peak-peak มีค่า 1.66 โวลต์ คำนวณกระแส

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{1.66}{0.1} = 16.6 \quad \text{A}$$

$$\text{แอมป์ลิจูดของกระแส} = \frac{16.6}{2} = 8.3 \quad \text{A}$$

นั่นคือแอมป์ลิจูดของกระแสขนาด 8.3 แอมป์ นำไปตรวจสอบกับกราฟ I-H ที่กระแส 8.3 A อ่านค่าสนามแม่เหล็กที่กระแส 8.3 A มีขนาดความเข้ม 3838 Oe นั่นคือจะไดสนามแม่เหล็กสูงสุดในการทดสอบครั้งนี้ 3838 Oe

การอ่านค่า H_c

ในการอ่านค่าสนามโคเออร์ซิวิตี้ อ่านค่าโวลต์ peak-peak ณ ตำแหน่งจุดตัดแกน X จากตำแหน่ง $-X$ ไปถึง $+X$ ได้ค่าโวลต์ 0.96 โวลต์ กระแสที่คำนวณได้มีค่า 9.6 A จะได้ขนาดของแอมป์ลิจูด 4.8 A นำไปตรวจสอบกับกราฟ I-H ที่กระแส 4.8 A อ่านค่าสนามแม่เหล็กที่กระแส 4.8 A ได้ค่าสนามโคเออร์ซิวิตี้ 2243 Oe

5.2.2 การอ่านค่าโคเออร์ซิวิตี้ สแควร์เนส $S^* = \frac{H'}{H_c}$

อ่านค่าโวลต์ที่ตำแหน่ง H_c และที่ตำแหน่ง H' แล้วหากระแสที่ตำแหน่งดังกล่าวจากกราฟจะได้ค่า $H_c = 4.8 \text{ A}$ และ $H' = 4.4 \text{ A}$ จะได้

$$S^* = \frac{H'}{H_c} = \frac{4.4}{4.8} = 0.917$$

ค่าสนามโคเออร์ซิวิตี้ที่อ่านได้ มีค่า 0.917

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การอ่านค่าริมาแนนท์ สแควร์เนส $S = \frac{M_r}{M_s}$

จากไดอะแกรมการตรวจสอบของระบบแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ รูปกราฟฮิสเตอร์รีซิส ลูปบนหน้าจ้อออสซิลโลสโคป สัญญาณช่อง 2 (Ch 2) เป็นสัญญาณสนามแม่เหล็กในแนวแกน Y เป็นสัญญาณโวลต์โพโตตีแทคเตอร์ซึ่งแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง พิจารณาจากรูป 5.3 สัญญาณทางแกน Y เป็นสัญญาณ VAC 1 ช่อง สเกล = 10 mV อ่านค่าโวลต์ที่ตำแหน่ง M_r และที่ตำแหน่ง M_s หากกระแสที่ตำแหน่งดังกล่าวจากกราฟจะได้ค่า $M_r = 3.4$ mV และ $M_s = 5.1$ mV จะได้

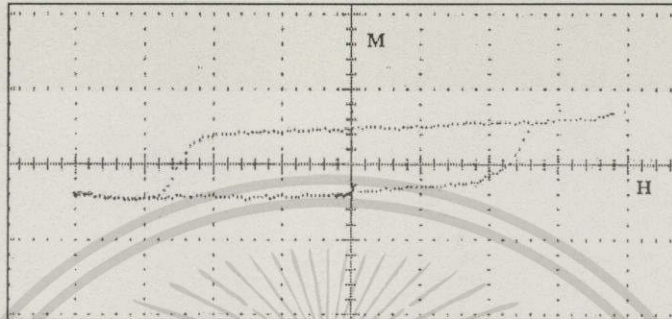
$$\frac{M_r}{M_s} = \frac{3.4}{5.1} = 0.677$$

ค่าที่ได้จากการวัด $S = 0.677$

กราฟการแมกนีโตเซชันที่วัดจากชุดปรากฏการณ์ของเคอร์รี่เป็นกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวรีจิดดิสก์ จำนวนทั้งหมด 27 แผ่น ได้ทำการวัดที่ความถี่ 4000 เฮิร์ต 1 ตัวอย่างทำการวัด 10 ครั้ง ผลการทดลอง ค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ซึ่งแสดงผลการตรวจวัดในหัวข้อต่อไป

5.3 ผลการตรวจวัดของชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์

5.3.1 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #1



รูปที่ 5.4 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #1

#1	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2243	2243	2243	2243	2290	2290	2290	2243	2243	2243	2257 ± 14
s'	0.917	0.971	0.875	0.971	0.898	0.919	0.878	0.917	0.875	0.917	0.908 ± 0.018
s	0.677	0.889	0.667	0.818	0.778	0.800	0.800	0.700	0.800	0.800	0.772 ± 0.045

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #1

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2243	2290	2257 ± 14	23	0.62
s'	0.875	0.971	0.908 ± 0.018	0.029	1.98
s	0.667	0.889	0.772 ± 0.045	0.072	5.82

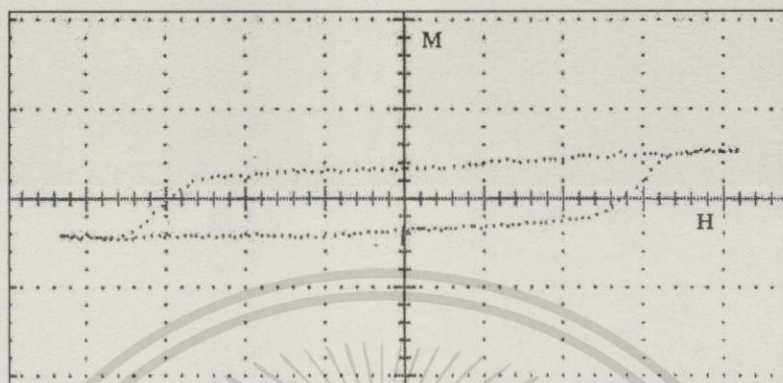
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2299$ Oe

จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2257 \pm 14$ Oe

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า } H_c = \frac{2299 - 2257}{2278} = 1.8\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #2



รูปที่ 5.5 กราฟการแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #2

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #2

#2	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2663	2663	2616	2710	2616	2710	2663	2616	2710	2710	2668 ± 26
S^*	0.860	0.860	0.875	0.862	0.893	0.897	0.860	0.857	0.862	0.862	0.867 ± 0.009
S	0.008	0.800	0.778	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.798 ± 0.004

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #2

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2616	2710	2668 ± 26	41	0.98
S^*	0.857	0.897	0.867 ± 0.009	0.007	1.04
S	0.788	0.800	0.798 ± 0.004	0.007	0.5

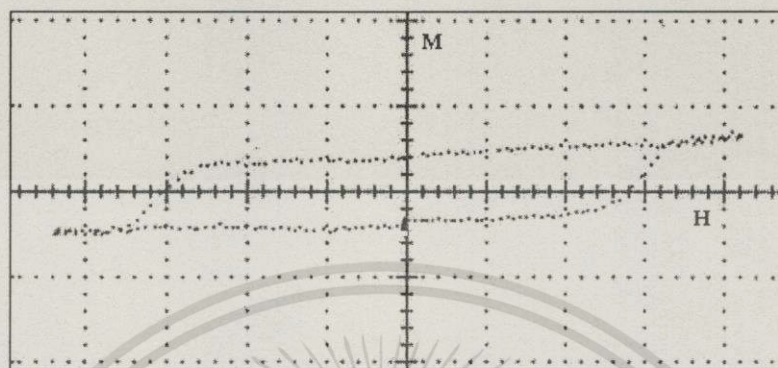
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2542$ Oe และค่า $S^* = 0.877$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีไท-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2668 \pm 26$ Oe และค่า $S^* = 0.867$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2542 - 2668}{2605} = -4.8\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า } S^* = \frac{0.877 - 0.867}{0.872} = 1.1\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #3



รูปที่ 5.6 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #3

ตารางที่ 5.5 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #3

#3	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2710	2710	2570	266	2710	2570	2710	2710	2710	2710	2667 ± 37
S^*	0.862	0.862	0.891	0.860	0.862	0.855	0.862	0.862	0.862	0.862	0.864 ± 0.006
S	0.800	0.800	0.800	0.727	0.727	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.785 ± 0.019

ตารางที่ 5.6 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #3

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2570	2710	2677 ± 37	58	1.39
S^*	0.855	0.891	0.864 ± 0.010	0.010	0.69
S	0.727	0.800	0.785 ± 0.019	0.031	2.42

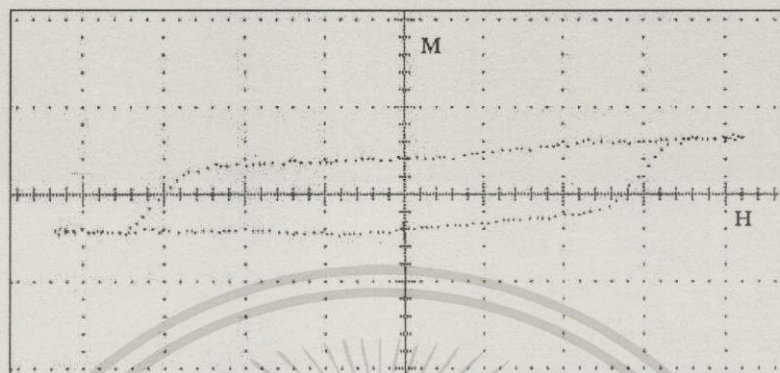
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2542$ Oe และค่า $S^* = 0.877$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2667 \pm 37$ Oe และค่า $S^* = 0.864$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2542 - 2667}{2605} = -4.8\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า } S^* = \frac{0.877 - 0.864}{0.871} = 1.5\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #4



รูปที่ 5.7 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #4

ตารางที่ 5.7 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #4

#4	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2663	2710	2663	2710	2710	2710	2663	2710	2710	2710	2696 ± 14
S^*	0.895	0.862	0.895	0.862	0.862	0.862	0.860	0.862	0.862	0.862	0.868 ± 0.009
S	0.727	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.727	0.800	0.800	0.800	0.785 ± 0.019

ตารางที่ 5.8 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #4

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2663	2710	2696 ± 14	23	0.52
S^*	0.860	0.895	0.868 ± 0.009	0.014	2.42
S	0.727	0.800	0.785 ± 0.019	0.031	2.42

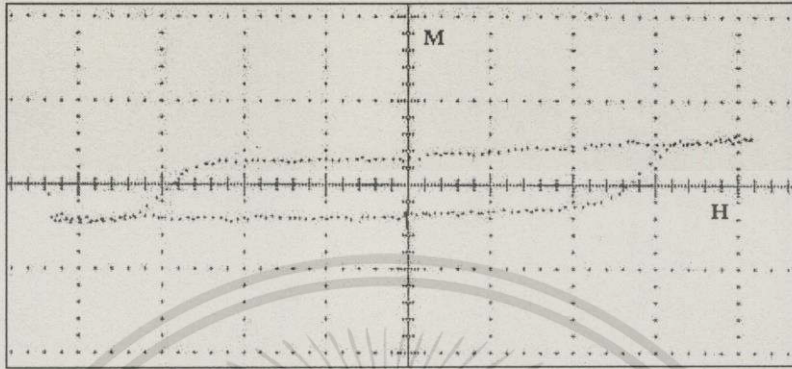
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2526$ Oe และค่า $S^* = 0.876$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2696 \pm 14$ Oe และค่า $S^* = 0.868$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2526 - 2696}{2612} = -6.6\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า } S^* = \frac{0.876 - 0.868}{0.872} = 0.9\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5. ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #5



รูปที่ 5.8 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #5

ตารางที่ 5.9 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #5

#5	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2710	2616	2616	2523	2616	2616	2663	2570	2570	2570	2602 ± 34
S^*	0.862	0.893	0.893	0.889	0.929	0.860	0.855	0.855	0.855	0.855	0.875 ± 0.016
S	0.778	0.800	0.800	0.778	0.778	0.778	0.800	0.800	0.800	0.800	0.791 ± 0.007

ตารางที่ 5.10 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #5

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2523	2710	2602 ± 34	54	1.30
S^*	0.855	0.929	0.875 ± 0.016	0.011	1.82
S	0.778	0.800	0.791 ± 0.007	0.025	0.88

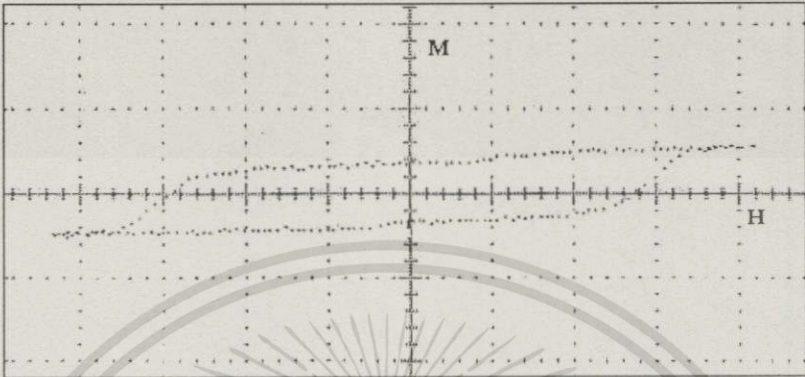
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2433$ Oe และค่า $S^* = 0.893$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2602\pm 34$ Oe และค่า $S^* = 0.875$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2433 - 2602}{2518} = -6.7\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า } S^* = \frac{0.893 - 0.875}{0.884} = 2.0\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษานับ 0.884 ญาติเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.6 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #6



รูปที่ 5.9 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #6

ตารางที่ 5.11 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #6

#6	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2663	2663	2663	2710	2710	2616	2616	2663	2710	2663	2668 ± 22
S^*	0.825	0.825	0.895	0.897	0.862	0.822	0.857	0.860	0.862	0.860	0.857 ± 0.017
S	0.800	0.800	0.727	0.750	0.800	0.727	0.800	0.800	0.800	0.727	0.773 ± 0.022

ตารางที่ 5.12 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #6

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2616	2710	2668 ± 22	35	0.82
S^*	0.822	0.897	0.857 ± 0.017	0.027	1.98
S	0.727	0.800	0.773 ± 0.022	0.035	2.85

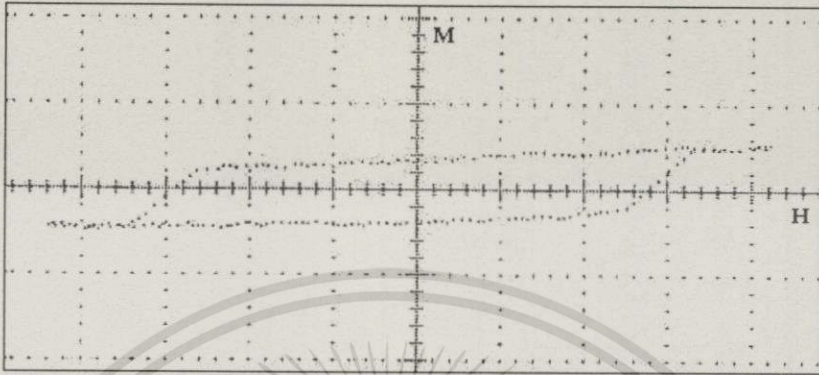
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2556$ Oe และค่า $S^* = 0.869$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออฟติกของเคอร์ $H_c = 2668 \pm 22$ Oe และค่า $S^* = 0.857$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $H_c = \frac{2556 - 2668}{2612} = -4.3\%$

เอกสารเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเครื่องทั้งสองมีค่า $S^* = \frac{0.869 - 0.857}{0.863} = 1.4\%$ ๕ ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #7



รูปที่ 5.10 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #7

ตารางที่ 5.13 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #7

#7	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2430	2663	2570	2523	2570	2570	2616	2663	2616	2570	2579 ± 43
S^*	0.846	0.895	0.855	0.852	0.891	0.891	0.857	0.860	0.857	0.891	0.870 ± 0.012
S	0.800	0.778	0.800	0.778	0.800	0.778	0.800	0.800	0.800	0.700	0.783 ± 0.020

ตารางที่ 5.14 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #7

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2430	2663	2579 ± 43	69	1.67
S^*	0.846	0.895	0.870 ± 0.012	0.020	1.38
S	0.700	0.800	0.783 ± 0.020	0.031	2.55

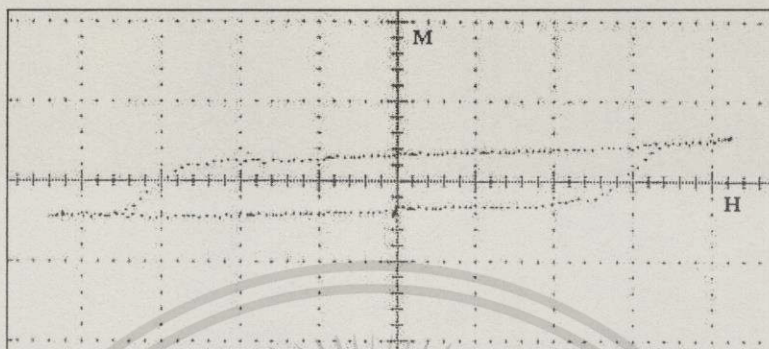
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2476$ Oe และค่า $S^* = 0.89$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2579 \pm 43$ Oe และค่า $S^* = 0.87$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2476 - 2579}{2528} = -4.0\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.89 - 0.87}{0.88} = 2.2\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.8 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #8



รูปที่ 5.11 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #8

ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #8

#8	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2570	2663	2663	2663	2616	2616	2710	2710	2710	2710	2668 ± 33
S^*	0.885	0.860	0.860	0.857	0.857	0.862	0.862	0.828	0.862	0.897	0.863 ± 0.011
S	0.800	0.800	0.800	0.700	0.727	0.727	0.800	0.818	0.778	0.818	0.777 ± 0.027

ตารางที่ 5.16 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #8

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2570	2710	2668 ± 33	52	1.24
S^*	0.828	0.897	0.863 ± 0.011	0.018	1.27
S	0.700	0.818	0.777 ± 0.027	0.043	3.47

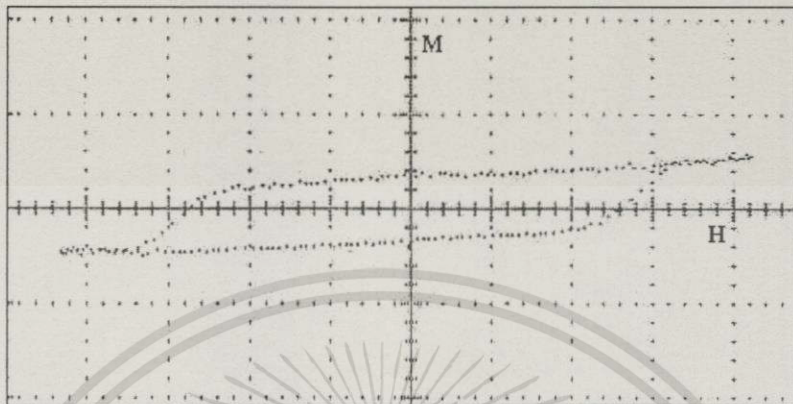
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2550$ Oe และค่า $S^* = 0.874$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2668 \pm 33$ Oe และค่า $S^* = 0.863$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2550 - 2668}{2609} = -4.5\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.874 - 0.863}{0.868} = 1.3\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.9 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #9



รูปที่ 5.13 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #9

ตารางที่ 5.17 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #9

#9	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
H_c (Oe)	2523	2663	2616	2523	2523	2523	2570	2663	2710	2570	2588 ± 44
S^*	0.852	0.860	0.857	0.852	0.852	0.815	0.891	0.895	0.862	0.819	0.856 ± 0.016
S	0.800	0.727	0.800	0.778	0.800	0.800	0.800	0.727	0.800	0.800	0.783 ± 0.019

ตารางที่ 5.18 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #9

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2523	2710	2588 ± 44	70	1.70
S^*	0.815	0.895	0.856 ± 0.016	0.026	1.87
S	0.727	0.800	0.783 ± 0.019	0.030	2.43

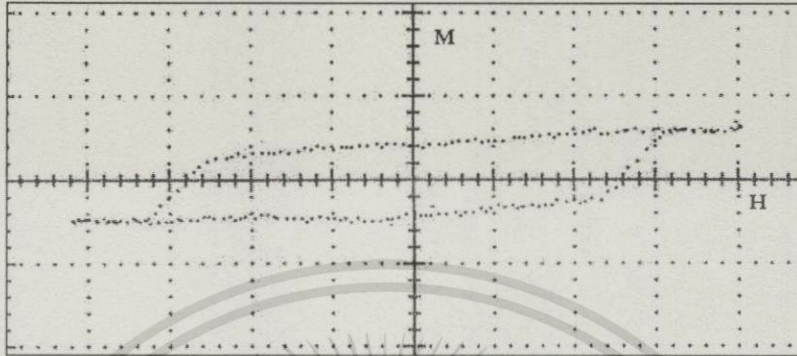
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2614$ Oe และค่า $S^* = 0.875$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2588 \pm 44$ Oe และค่า $S^* = 0.856$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2614 - 2588}{2601} = 0.9\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.875 - 0.856}{0.865} = 2.2\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.10 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #10



รูปที่ 5.13 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #10

ตารางที่ 5.19 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #10

#10	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2523	2523	2523	2523	2523	2523	2523	2477	2523	2477	2514 ± 12
S^*	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889	0.887	0.889	0.887	0.889 ± 0.001
s	0.778	0.750	0.778	0.778	0.778	0.778	0.778	0.700	0.818	0.800	0.774 ± 0.020

ตารางที่ 5.20 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #10

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2477	2523	2514 ± 12	19	0.48
S^*	0.887	0.889	0.889 ± 0.001	0.001	0.11
s	0.700	0.818	0.774 ± 0.020	0.031	2.58

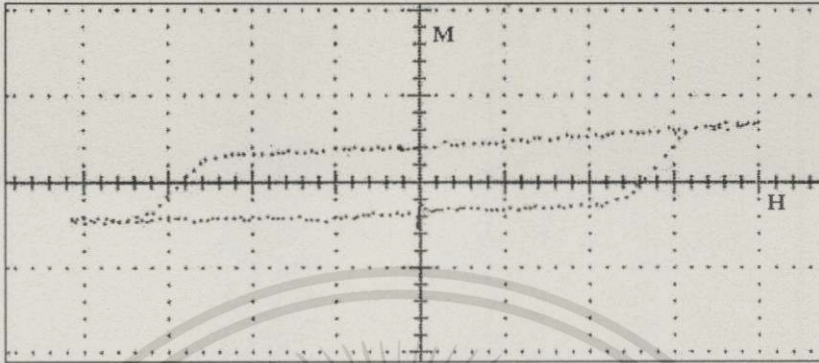
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2390$ Oe และค่า $S^* = 0.884$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2514 \pm 12$ Oe และค่า $S^* = 0.889$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2390 - 2514}{2452} = -5.0\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.884 - 0.889}{0.886} = 0.6\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.11 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #11



รูปที่ 5.14 กราฟการแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #11

ตารางที่ 5.21 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #11

#11	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2570	2523	2523	2523	2616	2616	2570	2616	2570	2616	2574 ± 26
S^*	0.891	0.889	0.926	0.852	0.893	0.893	0.891	0.857	0.891	0.857	0.884 ± 0.014
S	0.717	0.800	0.700	0.800	0.778	0.727	0.727	0.800	0.727	0.800	0.759 ± 0.025

ตารางที่ 5.22 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #11

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2523	2616	2574 ± 26	41	1.01
S^*	0.852	0.926	0.884 ± 0.014	0.023	1.58
S	0.700	0.800	0.759 ± 0.025	0.040	3.29

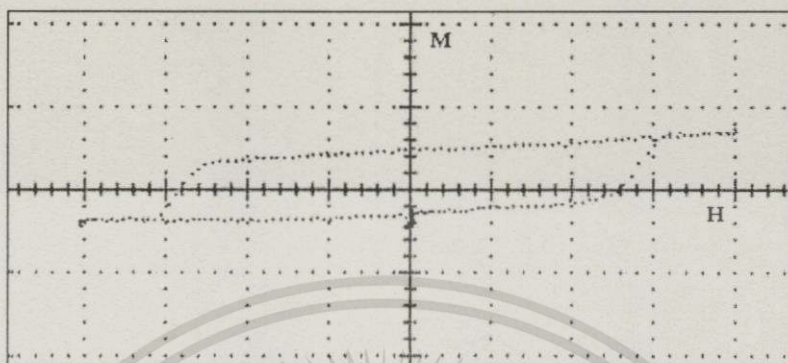
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2483$ Oe และค่า $S^* = 0.889$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2574 \pm 26$ Oe และค่า $S^* = 0.884$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2483 - 2574}{2528} = -3.5\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.889 - 0.884}{0.886} = 0.6\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.12 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #12



รูปที่ 5.15 กราฟการแมกนีไตเซชันของตัวอย่างที่ #12

ตารางที่ 5.23 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีไตเซชันของตัวอย่างที่ #12

#12	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2570	2570	2616	2570	2523	2523	2523	2523	2523	2570	2551 ± 21
s'	0.891	0.855	0.893	0.891	0.852	0.889	0.889	0.852	0.926	0.855	0.879 ± 0.016
s	0.700	0.700	0.818	0.700	0.800	0.800	0.667	0.667	0.800	0.583	0.724 ± 0.049

ตารางที่ 5.24 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #12

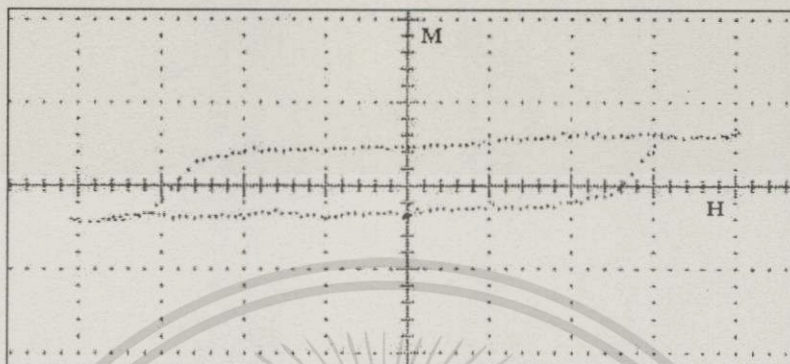
ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2523	2616	2551 ± 21	33	0.82
s'	0.852	0.926	0.879 ± 0.016	0.025	6.77
s	0.583	0.818	0.724 ± 0.049	0.078	1.87

จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2502$ Oe

จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2551 \pm 21$ Oe

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $H_c = \frac{2502 - 2551}{2526} = -1.9\%$

5.3.13 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #13



รูปที่ 5.16 กราฟการแมกเนไทเซชันของตัวอย่างที่ #13

ตารางที่ 5.25 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกเนไทเซชันของตัวอย่างที่ #13

#13	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2523	2570	2570	2523	2570	2616	2570	2616	2570	2570	2570 ± 20
s'	0.889	0.855	0.891	0.852	0.946	0.857	0.927	0.857	0.891	0.891	0.886 ± 0.020
s	0.778	0.778	0.800	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.800	0.600	0.726 ± 0.040

ตารางที่ 5.26 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #13

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2523	2616	2570 ± 20	31	0.78
s'	0.852	0.946	0.886 ± 0.020	0.032	2.25
s	0.600	0.800	0.726 ± 0.040	0.063	6.67

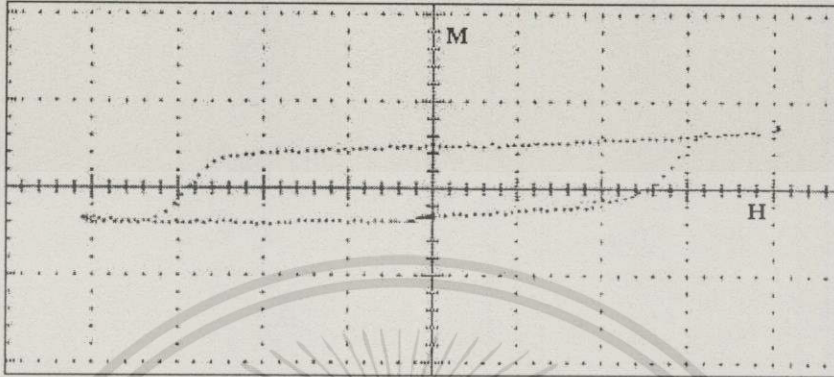
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2511$ Oe

จากเครื่องแมกเนไท-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2570 \pm 20$ Oe

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $H_c = \frac{2511 - 2570}{2540} = -2.3\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.14 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #14



รูปที่ 5.17 กราฟการแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #14

ตารางที่ 5.27 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีไทเซชันของตัวอย่างที่ #14

#14	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2663	2570	2663	2570	2616	2570	2570	2570	2523	2570	2589 ± 28
s'	0.930	0.855	0.930	0.855	0.893	0.855	0.927	0.819	0.889	0.887	0.834 ± 0.102
s	0.800	0.800	0.800	0.800	0.700	0.800	0.700	0.636	0.800	0.800	0.764 ± 0.039

ตารางที่ 5.28 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #14

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2523	2663	2589 ± 28	45	1.08
s'	0.387	0.930	0.834 ± 0.102	0.162	5.10
s	0.636	0.800	0.764 ± 0.039	0.061	-

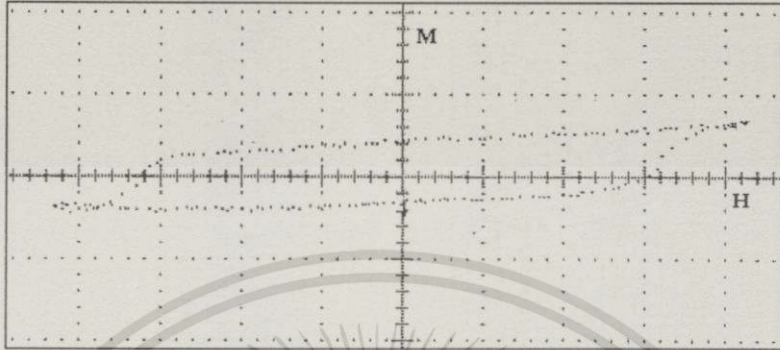
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2502 Oe$

จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2589 \pm 28 Oe$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2502 - 2589}{2546} = -3.4\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.15 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #15



รูปที่ 5.18 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #15

ตารางที่ 5.29 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #15

#15	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	3036	2980	3036	2989	2989	2989	2989	2989	3036	2896	2993 ± 26
s'	0.908	0.844	0.877	0.844	0.938	0.875	0.906	0.844	0.877	0.871	0.878 ± 0.020
s	0.700	0.727	0.800	0.800	0.700	0.800	0.700	0.667	0.667	0.700	0.726 ± 0.034

ตารางที่ 5.30 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #15

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2896	3036	2993 ± 26	41	0.87
s'	0.844	0.938	0.878 ± 0.020	0.031	2.30
s	0.667	0.800	0.726 ± 0.034	0.054	4.68

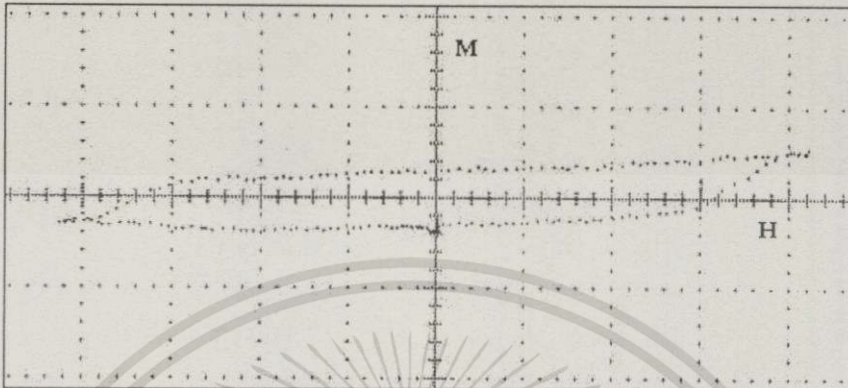
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2792$ Oe

จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2993 \pm 26$ Oe

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $H_c = \frac{2792 - 2993}{2892} = -7.0\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.16 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #16



รูปที่ 5.19 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #16

ตารางที่ 5.31 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #16

#16	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	3036	2989	2989	2989	2989	2989	2989	2989	3083	2989	2994 ± 29
S^*	0.908	0.906	0.875	0.844	0.906	0.844	0.906	0.871	0.879	0.906	0.885 ± 0.016
S	0.600	0.625	0.667	0.875	0.545	0.778	0.750	0.600	0.667	0.750	0.686 ± 0.064

ตารางที่ 5.32 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #16

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2896	3083	2994 ± 29	47	0.97
S^*	0.844	0.908	0.885 ± 0.016	0.026	1.80
S	0.545	0.875	0.686 ± 0.064	0.101	9.33

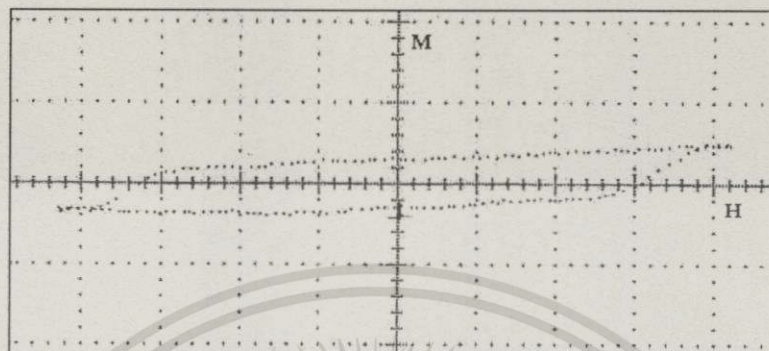
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2787$ Oe และค่า $S^* = 0.853$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2994 \pm 29$ Oe และค่า $S^* = 0.885$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2787 - 2994}{2891} = -7.2\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.853 - 0.885}{0.869} = -3.6\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.17 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #17



รูปที่ 5.20 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #17

ตารางที่ 5.33 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #17

#17	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2943	2989	2896	2943	2989	2943	2943	2943	2943	2943	2948 ± 17
S^*	0.873	0.906	0.871	0.905	0.875	0.873	0.905	0.905	0.873	0.905	0.889 ± 0.011
s	0.667	0.750	0.750	0.600	0.750	0.750	0.667	0.750	0.750	0.700	0.713 ± 0.034

ตารางที่ 5.34 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #17

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2896	2989	2948 ± 17	26	0.58
S^*	0.871	0.906	0.889 ± 0.011	0.017	1.24
s	0.600	0.750	0.713 ± 0.034	0.053	4.77

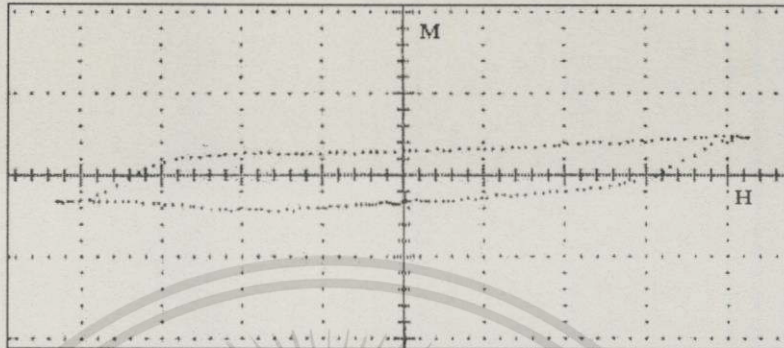
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2758$ Oe และค่า $S^* = 0.864$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2948 \pm 17$ Oe และค่า $S^* = 0.889$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2758 - 2948}{2871} = -6.6\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.864 - 0.889}{0.876} = -2.8\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.18 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #18



รูปที่ 5.21 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #18

ตารางที่ 5.35 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #18

#18	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2989	2989	2989	3083	3083	2989	2989	3036	2989	3036	3017 ± 25
S^*	0.875	0.875	0.844	0.849	0.879	0.875	0.875	0.846	0.875	0.923	0.872 ± 0.014
S	0.700	0.600	0.667	0.750	0.667	0.600	0.750	0.667	0.750	0.714	0.687 ± 0.036

ตารางที่ 5.36 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #18

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2989	3083	3017 ± 25	40	0.83
S^*	0.844	0.923	0.872 ± 0.014	0.057	1.60
S	0.600	0.750	0.687 ± 0.036	0.023	5.24

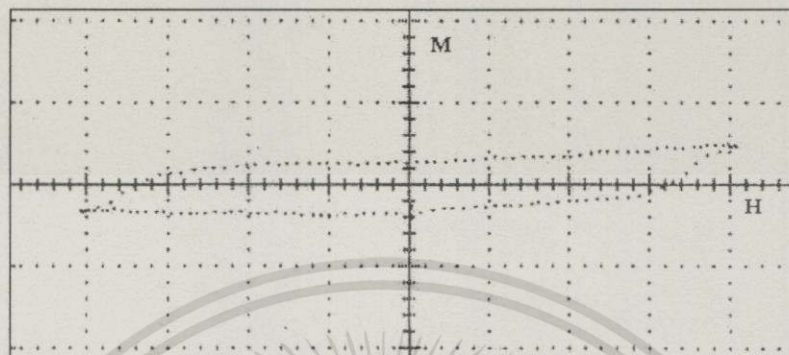
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2789$ Oe และค่า $S^* = 0.853$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 3017 \pm 25$ Oe และค่า $S^* = 0.872$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2789 - 3017}{2903} = -7.8\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.853 - 0.872}{0.862} = -2.2\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.19 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #19



รูปที่ 5.22 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #19

ตารางที่ 5.37 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #19

#19	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2850	2896	2943	2989	2896	3038	3038	3038	3038	2989	2990 ± 57
S^*	0.902	0.903	0.873	0.875	0.871	0.879	0.909	0.879	0.879	0.906	0.888 ± 0.010
S	0.750	0.667	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.667	0.714	0.733 ± 0.022

ตารางที่ 5.38 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #19

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2850	3083	2990 ± 57	91	1.90
S^*	0.871	0.909	0.888 ± 0.010	0.015	1.13
S	0.667	0.750	0.733 ± 0.022	0.035	3.00

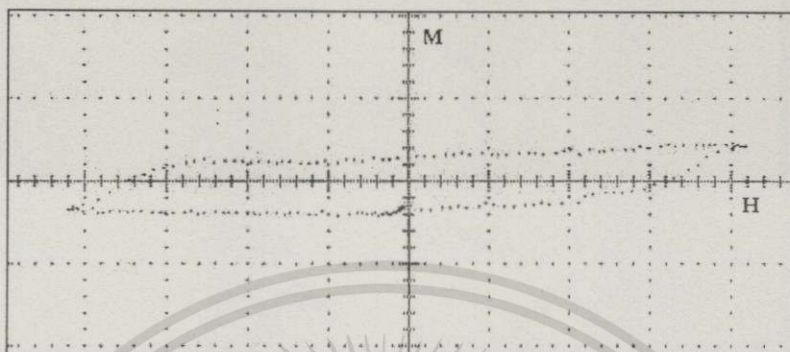
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2714$ Oe และค่า $S^* = 0.876$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2990 \pm 57$ Oe และค่า $S^* = 0.888$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2714 - 2990}{2852} = -9.6\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.876 - 0.888}{0.882} = -1.3\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.20 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #20



รูปที่ 5.23 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #20

ตารางที่ 5.39 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #20

#20	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2803	3083	3036	3036	3083	3036	3083	3129	2896	3083	3027 ± 63
S^*	0.900	0.879	0.908	0.877	0.879	0.877	0.909	0.851	0.936	0.879	0.890 ± 0.015
s	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750 ± 0.000

ตารางที่ 5.40 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #20

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2803	3129	3027 ± 63	100	2.08
S^*	0.851	0.936	0.890 ± 0.015	0.024	1.68
s	0.750	0.750	0.750 ± 0.000	0.000	0.00

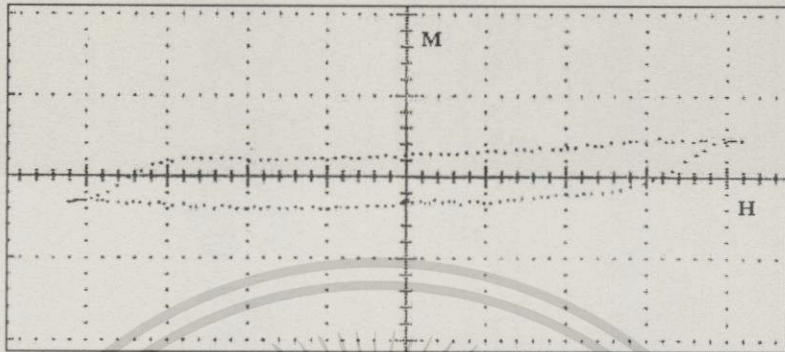
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2807$ Oe และค่า $S^* = 0.856$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 3027 \pm 63$ Oe และค่า $S^* = 0.890$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2807 - 3027}{2917} = -7.5\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.856 - 0.890}{0.873} = -3.8\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.21 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #21



รูปที่ 5.24 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #21

ตารางที่ 5.41 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #21

#21	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	3036	3036	2989	3036	3989	2989	3083	3083	2989	2989	3022 ± 24
S^*	0.877	0.877	0.906	0.908	0.906	0.906	0.879	0.879	0.906	0.906	0.895 ± 0.009
S	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.600	0.750	0.600	0.750	0.667	0.712 ± 0.041

ตารางที่ 5.42 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #21

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2989	3083	3022 ± 24	39	0.79
S^*	0.877	0.908	0.895 ± 0.009	0.015	1.00
S	0.600	0.750	0.712 ± 0.041	0.064	5.76

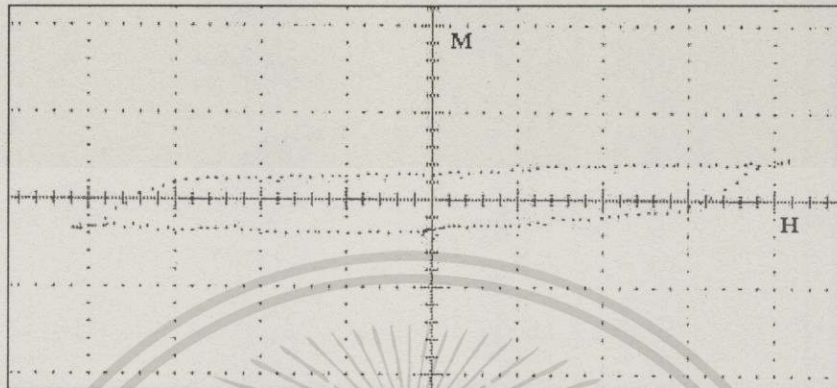
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2717$ Oe และค่า $S^* = 0.874$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 3022 \pm 24$ Oe และค่า $S^* = 0.895$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2717 - 3022}{2870} = -10.6\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.874 - 0.895}{0.884} = -2.4\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.22 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #22



รูปที่ 5.25 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #22

ตารางที่ 5.43 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #22

#22	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	3129	3129	2943	3036	2943	3036	3038	3038	3036	2989	3032 ± 40
S^*	0.881	0.881	0.905	0.908	0.905	0.877	0.879	0.879	0.877	0.906	0.890 ± 0.009
s	0.750	0.750	0.750	0.667	0.667	0.750	0.750	0.667	0.667	0.778	0.720 ± 0.029

ตารางที่ 5.44 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #22

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c (Oe)$	2943	3129	3032 ± 40	64	1.32
S^*	0.877.	0.908	0.890 ± 0.009	0.014	1.00
s	0.667	0.778	0.720 ± 0.029	0.046	4.03

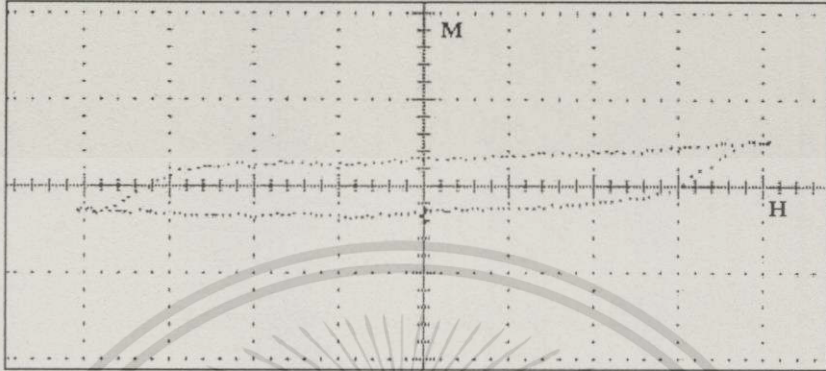
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2769$ Oe และค่า $S^* = 0.860$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 3032 \pm 40$ Oe และค่า $S^* = 0.890$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2769 - 3032}{2900} = -9.1\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.860 - 0.890}{0.875} = -3.4\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.23 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #23



รูปที่ 5.26 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #23

ตารางที่ 5.45 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #23

#23	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
H_c (Oe)	2896	2943	2943	2989	3129	3129	2943	2989	2989	2943	2989 ± 50
S^*	0.903	0.905	0.905	0.875	0.881	0.881	0.873	0.875	0.875	0.905	0.888 ± 0.009
s	0.750	0.667	0.750	0.750	0.750	0.667	0.750	0.750	0.757	0.750	0.733 ± 0.022

ตารางที่ 5.46 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #23

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2896	3129	2989 ± 50	79	1.67
S^*	0.873	0.905	0.888 ± 0.009	0.015	1.00
s	0.667	0.750	0.733 ± 0.022	0.035	3.00

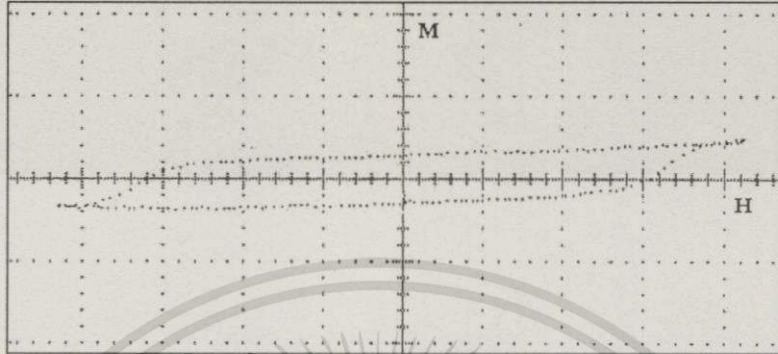
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2854$ Oe และค่า $S^* = 0.871$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2989 \pm 50$ Oe และค่า $S^* = 0.888$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $H_c = \frac{2854 - 2989}{2922} = -4.6\%$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $S^* = \frac{0.871 - 0.888}{0.879} = -1.9\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการแข่งขันเพื่อหาผู้ชนะเลิศเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.24 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #24



รูปที่ 5.27 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #24

ตารางที่ 5.47 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #24

#24	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_c(Oe)$	2896	2896	2896	2850	2896	2896	2896	2943	2896	2896	2896 ± 14
S^*	0.903	0.871	0.871	0.869	0.871	0.871	0.871	0.873	0.871	0.871	0.874 ± 0.006
S	0.600	0.750	0.778	0.667	0.750	0.667	0.750	0.750	0.667	0.667	0.705 ± 0.037

ตารางที่ 5.48 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #24

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
$H_c (Oe)$	2850	2943	2896 ± 14	22	0.48
S^*	0.869	0.903	0.874 ± 0.006	0.010	0.69
S	0.600	0.778	0.705 ± 0.037	0.058	5.25

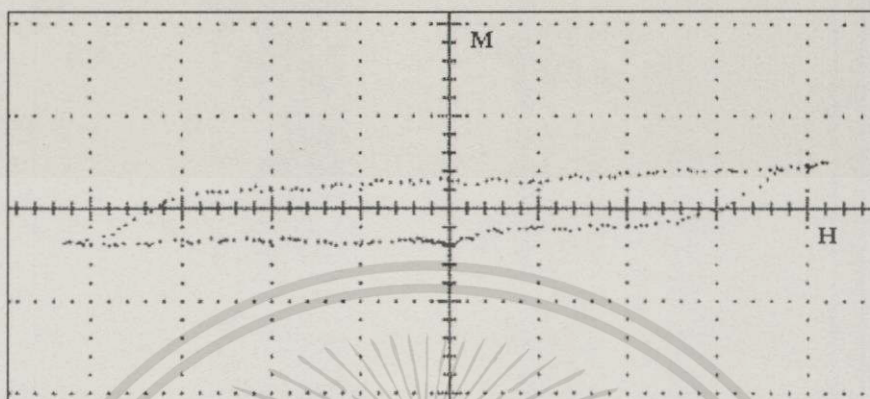
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2764$ Oe และค่า $S^* = 0.858$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2896 \pm 14$ Oe และค่า $S^* = 0.874$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2764 - 2896}{2830} = -4.6\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.858 - 0.874}{0.866} = 1.8\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.25 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #25



รูปที่ 5.28 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #25

ตารางที่ 5.49 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #25

#25	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2896	2943	2943	2943	2943	2943	3036	3036	2943	2943	2957 ± 28
S^*	0.871	0.905	0.873	0.905	0.873	0.873	0.877	0.908	0.905	0.905	0.890 ± 0.011
s	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750 ± 0.000

ตารางที่ 5.50 รายละเอียดของข้อมูลที่ไดจากการวัดตัวอย่าง #25

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2896	3036	2957 ± 28	44	0.95
S^*	0.871	0.908	0.890 ± 0.011	0.017	1.23
s	0.750	0.750	0.750 ± 0.000	0.000	0.00

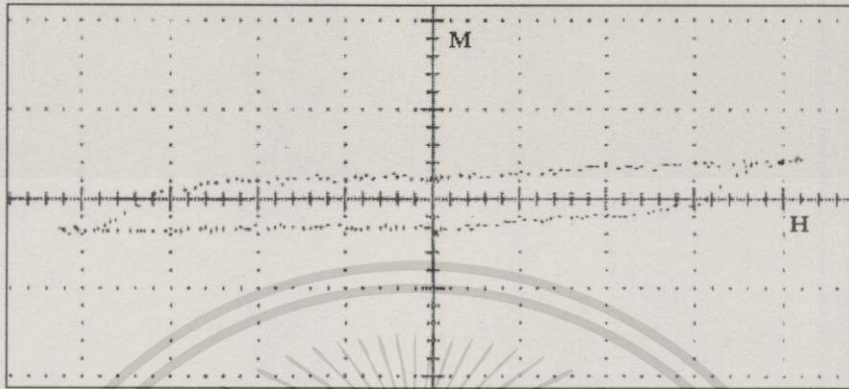
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2867$ Oe และค่า $S^* = 0.869$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์ $H_c = 2957 \pm 28$ Oe และค่า $S^* = 0.890$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2867 - 2957}{2912} = -3.1\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.869 - 0.890}{0.879} = -2.4\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.26 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #26



รูปที่ 5.29 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #26

ตารางที่ 5.51 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #26

#26	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
	ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$H_c(Oe)$	2989	2989	2989	2896	2943	2989	2943	3036	2943	2989	2971 ± 25
S^*	0.906	0.875	0.875	0.903	0.605	0.875	0.905	0.846	0.842	0.906	0.884 ± 0.016
s	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750 ± 0.000

ตารางที่ 5.52 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #26

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
$H_c(Oe)$	2896	3036	2971 ± 25	39	0.84
S^*	0.842	0.906	0.884 ± 0.016	0.025	1.80
s	0.750	0.750	0.750 ± 0.000	0.000	0.00

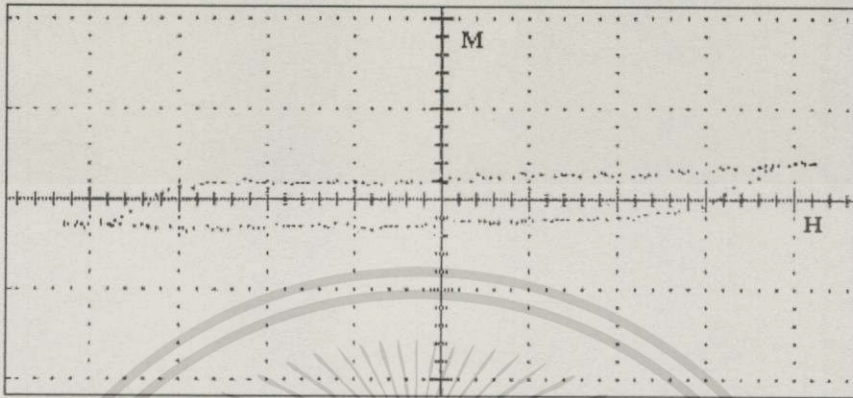
จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2872$ Oe และค่า $S^* = 0.867$ เทียบกับค่าที่
จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 2971 \pm 25$ Oe และค่า $S^* = 0.884$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2872 - 2971}{2922} = -3.3\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.867 - 0.884}{0.875} = -1.9\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.27 ผลการทดลองของตัวอย่างที่ #27



รูปที่ 5.30 กราฟการแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #27

ตารางที่ 5.53 พารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟแมกนีโตเซชันของตัวอย่างที่ #27

#27	ครั้งที่										ค่าเฉลี่ย
ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
H_c (Oe)	2989	3036	3083	3083	3176	3036	3223	3176	3176	3223	3120 ± 54
S^*	0.906	0.908	0.909	0.909	0.853	0.877	0.855	0.883	0.853	0.855	0.881 ± 0.016
S	0.667	0.750	0.667	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.712	0.714	0.726 ± 0.022

ตารางที่ 5.54 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดตัวอย่าง #27

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
H_c (Oe)	2989	3223	3120 ± 54	85	1.78
S^*	0.853	0.909	0.881 ± 0.016	0.026	1.82
S	0.667	0.750	0.726 ± 0.022	0.034	3.03

จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM ค่า $H_c = 2848$ Oe และค่า $S^* = 0.866$ เทียบกับค่าที่จากเครื่องแมกนีโต-ออปติกของเคอร์รี่ $H_c = 3120 \pm 54$ Oe และค่า $S^* = 0.881$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } H_c = \frac{2848 - 3120}{2984} = -9.1\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า } S^* = \frac{0.866 - 0.881}{0.874} = -1.7\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ของแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูล ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์แผ่นตัวอย่างจากบริษัท ซีเกท(ประเทศไทย) จำกัด โดยแบ่งตัวอย่างที่ตรวจสอบ เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ คือ ชนิดที่มีค่าสนาม $H_c = 2000$ Oe =ชนิด Keyston มีค่าสนาม $H_c = 2500$ Oe และชนิด Cuda ที่มีสนาม $H_c = 2750$ Oe ได้แบ่งทดสอบตัวอย่างที่มีค่า $H_c = 2000$ Oe จำนวน 1 แผ่น ตัวอย่างที่มีค่า $H_c = 2500$ Oe จำนวน 13 แผ่น และตัวอย่างที่มีค่าสนาม $H_c = 2750$ Oe จำนวน 13 แผ่นด้วยกัน รวมทั้งหมดตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิส ทั้งหมด 27 แผ่นด้วยกัน ในการตรวจสอบของตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง ได้ทำการตรวจวัด 10 ตำแหน่งหรือ 10 ครั้ง

จากผลการตรวจวัดกราฟฮีสเตอร์รีซิสด้วยชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์ร(MOKE) ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างที่ตรวจวัด ได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากเครื่องมือชนิด TRDM (Turbo Rotating Disc Magnetometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ของ บริษัทซีเกท ข้อมูลที่ได้จากการวัดของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิดของตัวอย่างที่ตรวจวัดทั้ง 27 ตัวอย่าง แสดงได้ดังตารางที่ 6.1

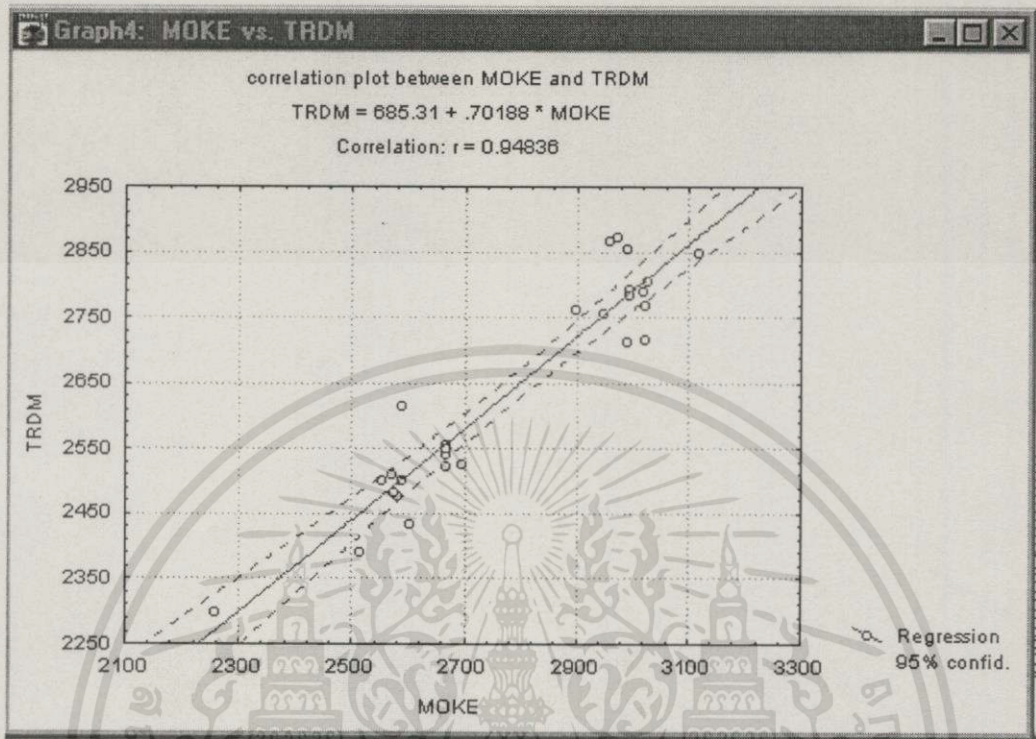
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลทั้งหมดที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง TRDM และ MOKE

ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM และ MOKE				
No	TRDM		MOKE	
	H_c	S	H_c	S
1	2299	-	2257	0.908
2	2542	0.877	2668	0.867
3	2542	0.881	2667	0.864
4	2526	0.876	2696	0.868
5	2433	0.893	2602	0.875
6	2556	0.869	2668	0.857
7	2476	0.890	2579	0.870
8	2550	0.874	2668	0.863
9	2614	0.875	2588	0.856
10	2390	0.884	2514	0.889
11	2483	0.889	2574	0.884
12	2502	-	2551	0.879

ตารางที่ 6.1(ต่อ)

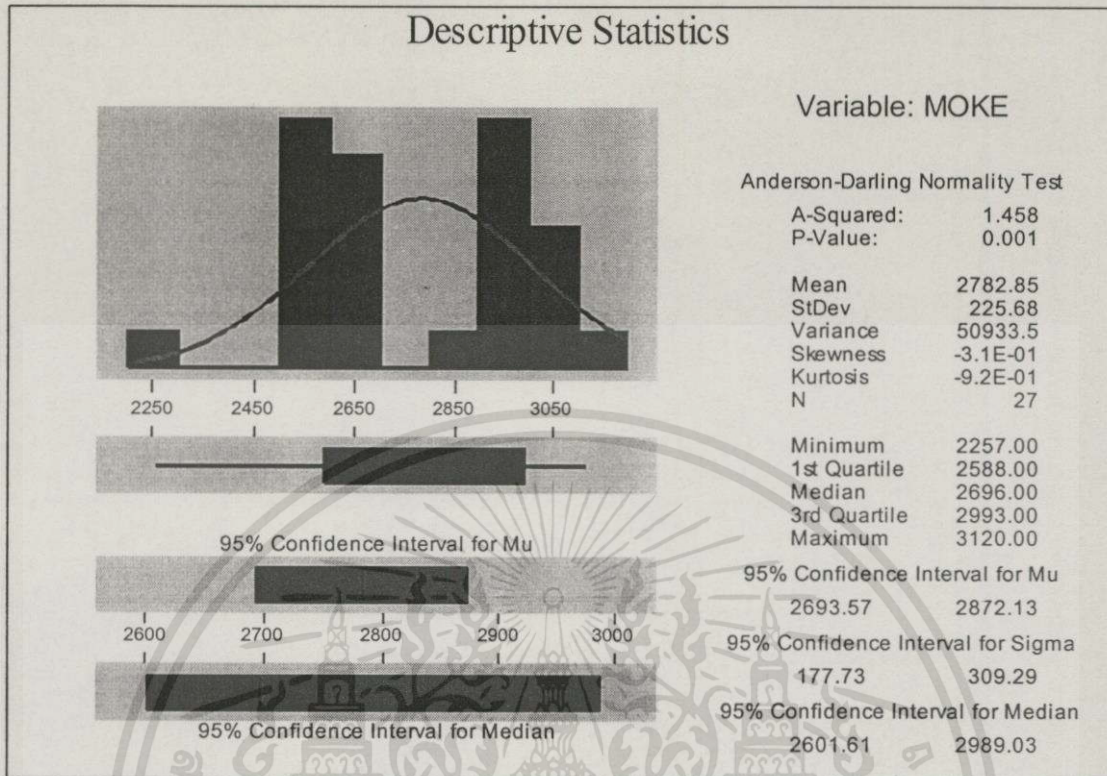
ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง TRDM และ MOKE				
No	TRDM		MOKE	
	H_c	S'	H_c	S'
13	2511	-	2570	0.886
14	2502	-	2589	0.884
15	2796	-	2993	0.878
16	2787	0.853	2994	0.885
17	2758	0.864	2948	0.889
18	2789	0.853	3017	0.872
19	2714	0.876	2990	0.888
20	2807	0.856	3027	0.890
21	2717	0.874	3022	0.895
22	2769	0.860	3032	0.890
23	2854	0.871	2989	0.888
24	2764	0.858	2896	0.874
25	2867	0.869	2957	0.890
26	2872	0.867	2971	0.884
27	2848	0.866	3120	0.881

เมื่อนำค่า H_c ของข้อมูลทั้งสองชุด นำมาพลอตกราฟเพื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง TRDM และ ชุด MOKE แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยแกน X แทนข้อมูลของค่าสนาม H_c ของตัวอย่างที่ตรวจวัดด้วยชุด MOKE และ แกน Y แทนข้อมูลของค่าสนาม H_c ของตัวอย่างที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดชนิด TRDM จากรูป 6.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างข้อมูลที่ตรวจวัดจากเครื่องมือวัดชนิด TRDM และชุด MOKE เนื่องจากตัวอย่างแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ตรวจวัดมีค่าสนามโคเออร์ซิวิตีที่มีค่าระหว่าง 2,000-2,750 Oe จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดชนิด TRDM และ ชุด MOKE มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น นั่นคือข้อมูลที่วัดด้วยชุด MOKE เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเครื่องมือวัดชนิด TRDM ในทิศทางเดียวกัน ด้วยค่าสหสัมพันธ์(Correlation) 0.94836 แสดงว่า ชุด MOKE และ เครื่องมือวัดชนิด TRDM มีความสัมพันธ์กันอย่างไม่สมบูรณ์ ในทิศทางเดียวกัน ด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

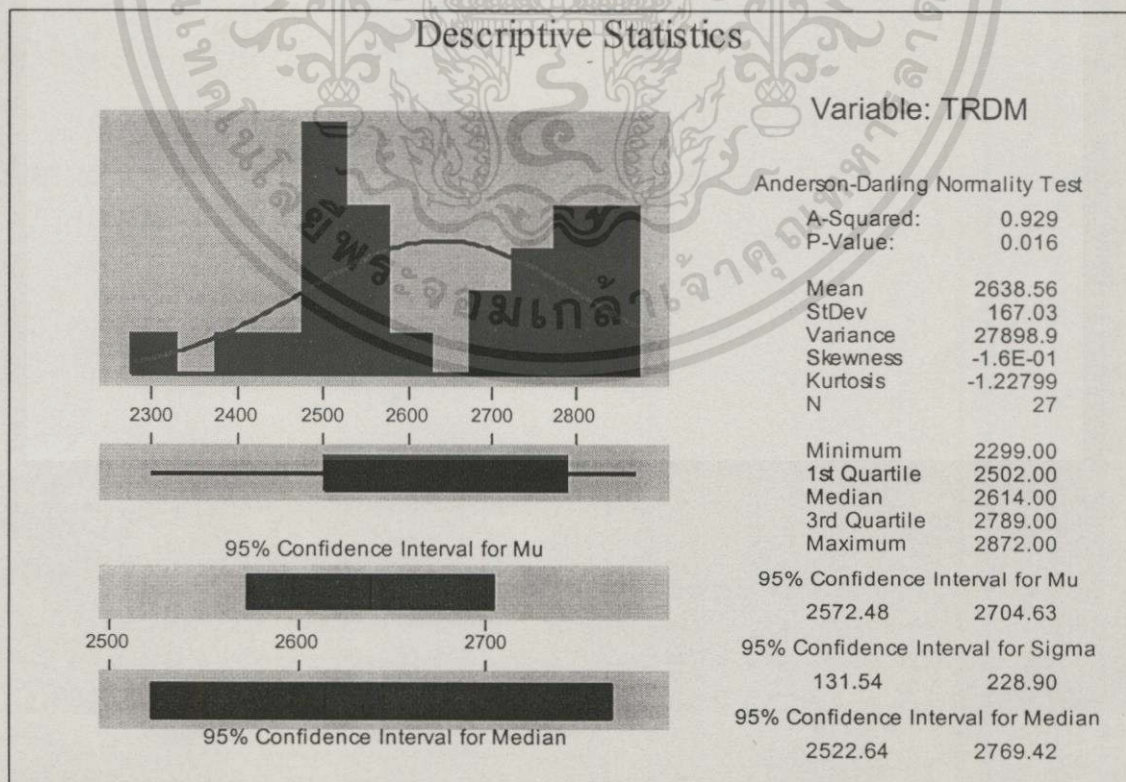


รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวัดจากเครื่อง TRDM และชุด MOKE

จากข้อมูลทั้งสองชุดที่วัดได้จากเครื่องมือ TRDM และ ชุด MOKE โดยพิจารณาถึงลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดด้วยชุด MOKE และเครื่องมือวัด TRDM ลักษณะการกระจายของข้อมูลทั้งสองชุด แสดงดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ จากรูปลักษณะการกระจายของข้อมูลจากการวัดทั้งสองชุดมีการกระจายแบบปกติ ข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยชุด MOKE และเครื่องมือชนิด TRDM มีค่าเฉลี่ย 2782.85 Oe และ 2638.50 Oe ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE สูงกว่าเครื่องมือวัดชนิด TRDM อยู่ 144.35 Oe ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่วัดด้วยชุด MOKE มีค่า 225.68 Oe เครื่องมือวัดชนิด TRDM มีค่า 167.03 Oe แสดงว่าลักษณะการกระจายของชุด MOKE มีการกระจายของข้อมูลกว้างกว่า เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดของชุด MOKE น้อยกว่า เครื่องมือวัดชนิด TRDM



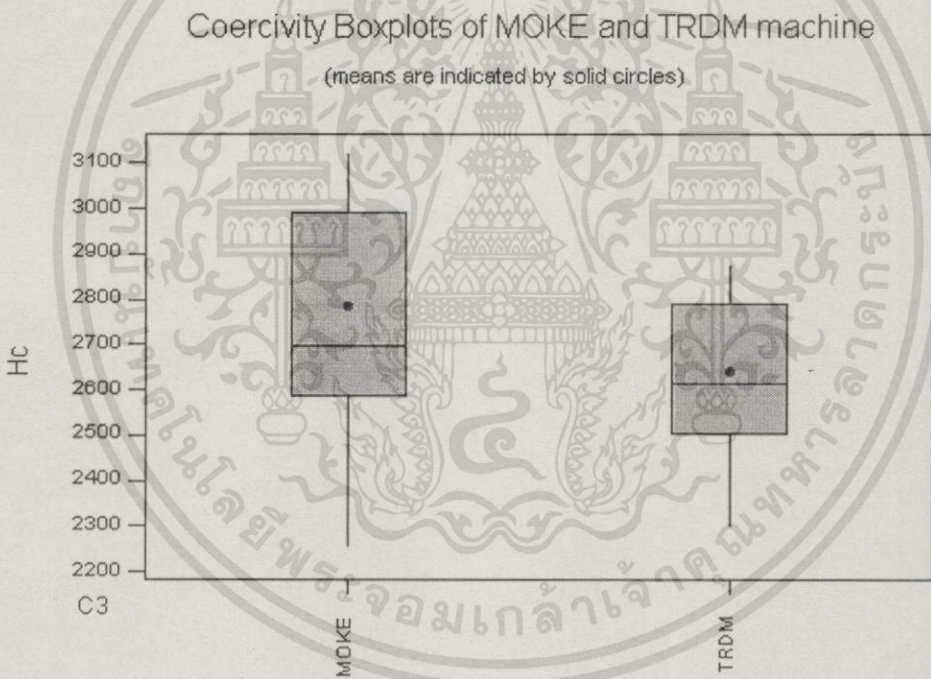
รูปที่ 6.2 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE



รูปที่ 6.3 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากเครื่องมือวัดชนิด TEDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่ภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารจะถือว่าผิดกฎหมาย

พิจารณาลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยชุด MOKE และ ชุด TRDM โดยแสดงในรูปแท่งแทนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องแต่ละชนิด แสดงลักษณะข้อมูลที่วัดได้ในรูปแบบแท่งดังรูปที่ 6.4 ในรูป 6.4 ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของข้อมูลทั้งสองชุด โดยจุดแทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุด เส้นขวางแทนค่ากลางของข้อมูล จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าที่วัดได้จากเครื่อง TRDM ข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE มีการกระจายของข้อมูลอยู่ในช่วง 2,250-3,100 Oe ในขณะที่ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง TRDM มีการกระจายอยู่ในช่วง 2,350-2,850 Oe ค่าที่วัดด้วยชุด MOKE จะมีค่าการกระจายกว้างกว่า TRDM จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลที่ต่ำกว่าค่ากลางของข้อมูลทั้งสองชุดมีช่วงของการกระจายเท่ากัน ในขณะที่ข้อมูลที่มีค่าสูงกว่าค่ากลาง กระจายของข้อมูลที่วัดด้วยชุด MOKE มีการกระจายกว้างกว่าการกระจายด้วยเครื่องมือชนิด TRDM

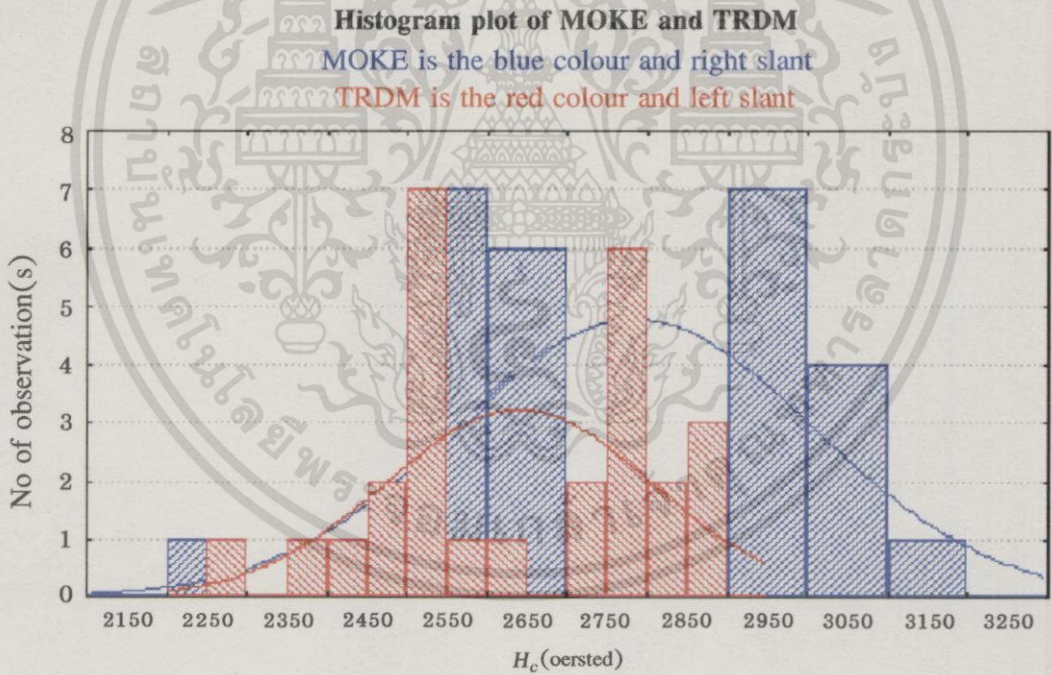


รูปที่ 6.4 ลักษณะข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE เครื่องวัดชนิด TRDM

รูปที่ 6.5 เป็นฮิสโตแกรมเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัด แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของลักษณะการกระจายของข้อมูลทั้งสองชุด จากกราฟข้อมูลที่วัดด้วยชุด MOKE ด้วยเส้นขวางซ้าย และข้อมูลที่วัดด้วยเครื่องมือชนิด TRDM เป็นเส้นขวางขวา จากกราฟจะเห็นว่าลักษณะการกระจายของข้อมูลทั้งสองชุดมีการกระจายเป็นแบบปกติ ข้อมูลที่วัดจากชุด MOKE สามารถวัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดชนิด TRDM ในช่วงของตัวอย่างที่มีค่าสนามโคเออร์ซิวิตี $2,000\text{ Oe} - 2,500\text{ Oe}$ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองค่าที่ได้จากการทดลองสามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ตัวอย่างที่มีค่าสนาม H_c มีค่า 2000 Oe ตัวอย่างที่มีค่าสนาม $H_c = 2500$ Oe และตัวอย่างที่มีสนาม $H_c = 2700$ Oe จากผลการทดลองวัดกราฟของตัวอย่างทั้ง 3 ช่วงจะเห็นได้จากตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า H_c กับค่า S^* จากเครื่อง TRDM เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดโดยชุดปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ ตัวอย่างที่มีค่าสนาม $H_c = 2000$ Oe ค่าความแตกต่างจะมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อย และจะเพิ่มมากขึ้นในตัวอย่างที่มีค่า $H_c = 2500$ Oe ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง อยู่ในช่วง 1-5 % และค่าที่ได้จากการวัดตัวอย่าง ที่มีสนาม $H_c = 2700$ Oe จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากที่สุดอยู่ในช่วง 5- 10 %

จากรูปกราฟแสดงลักษณะการกระจายของข้อมูล จะเห็นได้ว่าการกระจายของข้อมูลทั้งสองชุดเป็นแบบเดียวกัน แนวโน้มเดียวกันค่าพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะเห็นว่าค่าที่วัดได้จากเครื่อง TRDM จะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากเครื่อง MOKE สำหรับค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากเครื่อง TRDM จะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าจากเครื่อง MOKE อยู่ประมาณ 150 Oe ดังนั้นข้อที่ได้จากเครื่อง MOKE เป็นข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลของเครื่อง TRDM



รูปที่ 6.5 ลักษณะการกระจายของข้อมูลที่วัดจากชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี่ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดชนิด TRDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

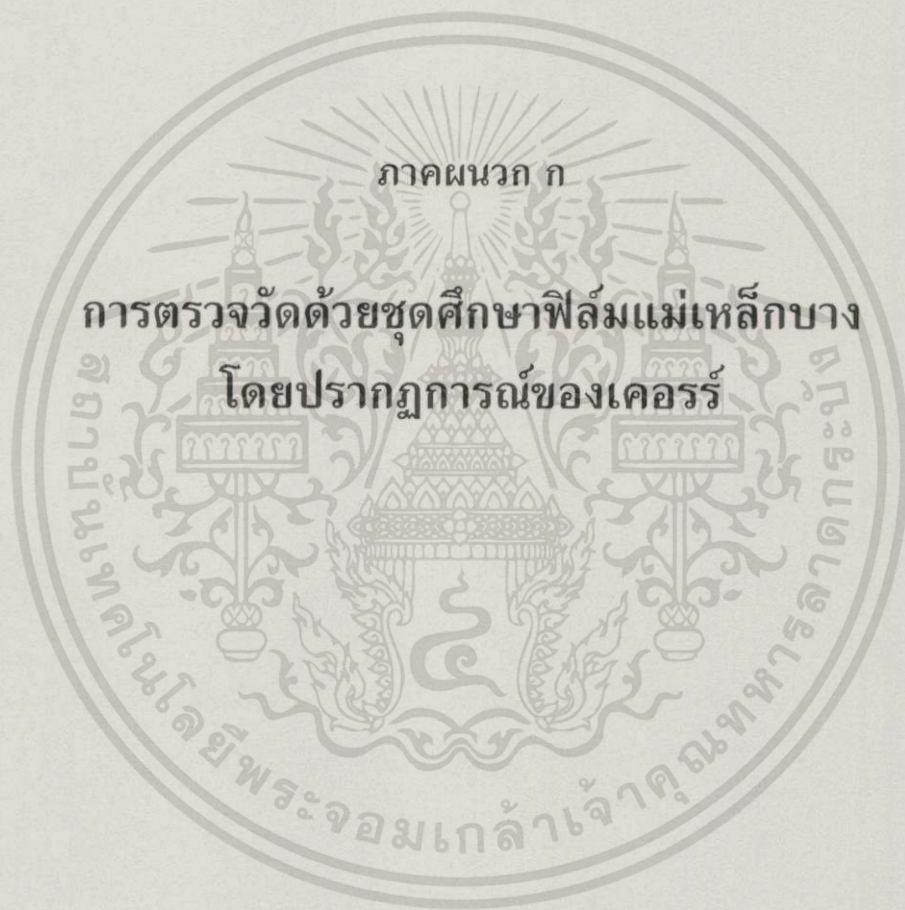
จากผลของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าสนาม H_c สูงขึ้นต้อง ใช้กระแสเพื่อทำให้หัวกำเนิดสนามแม่เหล็กมีความแรงของสนามเพิ่มมากขึ้น เมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนขึ้นกับขดลวดค่าสนามเหนี่ยวนำและผลของการวัดจึงมีค่าความแตกต่างมากขึ้น อาจมีปัจจัยมาจากความร้อน ในกรณีที่ทำการวัดด้วยโหมต Ac ปัญหาหนึ่งที่สำคัญก็คือ ความร้อน และสนามสูงสุดที่สร้างได้โดยทั่ว ๆ จะไม่เกิน 5 kOe ในการพัฒนาขั้นต่อไปควรจะมีการพัฒนาพร้อมกับแก้ไขปัญหเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นได้กับหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก และความแรงจากสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นเพื่อจะทำการตรวจสอบสารแม่เหล็กในช่วง H_c ที่กว้างขึ้น รวมไปถึงความร้อนบนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ อันจะเกิดเนื่องจากความร้อนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีขนาดกำลังสูงมากเกินไปอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตคุณสมบัติของสารแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ในชุดของเคอร์รลิกเสี่ยงปัญหาอันนี้โดยการให้แสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนวัตถุเฉพาะช่วงที่มีการตรวจสอบ และในการทดลองแต่ละครั้งอุณหภูมิของหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

โดยสรุปชุด MOKE เป็นระบบตรวจวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญของกราฟฮีสเตอร์รีซิส ของฟิล์มบางในรูปแบบของฮาร์ดดิสก์บันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ มีความสมบูรณ์ในระดับพื้นฐาน และมีความแม่นยำในการวัดสูงสุดอยู่ในช่วงสนามโคเออร์ซิวิตีในช่วง 2,000-2,500 Oe มีความสะดวก และรวดเร็วในการวัด และสามารถวัดได้หลาย ๆ ตัวอย่างในช่วงเวลาไม่นาน เป็นเครื่องมือที่ราคาไม่สูงมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในห้องปฏิบัติการได้ แต่ในเชิงพาณิชย์ยังคงต้องพัฒนาเพิ่มเติมไปอีก สามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องมือการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ปัญหาที่มีผลต่อการทดลองของชุด MOKE จะมีปัจจัยเกี่ยวข้องมาจาก อุณหภูมิ ฝุ่นละออง และความเรียบของผิวของตัวอย่างที่ทดสอบโดยผิวที่ต้องการทดสอบต้องเป็นผิวเรียบ

ข้อเสนอแนะ ในการพัฒนาชุด MOKE ควรมีการพัฒนาเชื่อมต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อพัฒนาให้เป็นชุดเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้โดยอัตโนมัติ และพัฒนาสร้างหัวกำเนิดสนามแม่เหล็กให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้น

บรรณานุกรม

1. Cullity ,Introduction to Magnetic Materials , Addison-Wesley Publishing Company , Inc. , 1972
2. K Zvesdin and V.A Kotov , Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia , IOP Publishing Ltd. , 1997
3. J.E. Manson , Recording measurements , in Magnetic Recording Handbook ,Technology and Applications, C.D. Mee and E. daniel , Mc Graw-Hill , Inc.,1990 , pp 396-399
4. Kerr Effect Magnetometer System ,Model 660L-K ,Specification ,DIGITAL MEASUREMENT SYSTEMS ,INC ., 8 RAY VENUE ,BURLINGTON , MA01803,USA
5. D.N. Lambeth , E.M. Velue , G.H. Bellesis , L.L Lee and D.E. Laughlin , Media for 10 Gb/in² hard disk storage: Issues and Status ,J.Appl.Phys. 79,8 ,1996 ,4496-4501
6. C. Denis Mee , Eric D. Daniel “Magnetic recording handbook” , New York : Mc Graw-Hill , c1990 ,
7. David Jiles , “Introduction to magnetism and Magnetic Materials” , London : Chapman and Hall , c1991.
8. James D. Raneourt. “Optical thin films” , New York : Macmillan , 1987 .
9. Ruth W. Chabay , Bruce A. Sherwood “Electric and Magnetic Interactions” , Carnegie Mellon University , John Wiley & Sons Inc.
10. John C. Mellinson , “The Foundations of Magnetic Recording” , 2nd ,
11. Richard M. Bozorth, “Ferromagnetism” , IEEE PRESS , The Institute of Electrical and Electrics Engineer , Inc. New York .
12. Harry E. Burke , “The Handbook of Magnetic Phenomena” , New York : Van Nostrand Rein hold , c1995
13. E.W. Williams , “The CD-ROM and Optical Disc Recording Systems” , OXFORD NEW YORK TOKYO , OXFORD UNIVERSITY PRESS , c1994.
14. ALBRT S. HOAGLAND , JAMES E. MONSON , “DIGITAL MAGNETIC RECORDING” , 2nd , A wiley-Interscience Publication , JOHN WILEY & SONS, INC.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การติดตั้งชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี ซึ่งประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.1 หัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก เครื่องกำเนิดสัญญาณ เครื่องขยายกำลังขนาด 300 วัตต์ ตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม/10 วัตต์
- 1.2 ระบบแหล่งกำเนิดแสง ประกอบด้วย ซีเลียม-นีออนเลเซอร์ บีมสปีดเตอร์ เลนส์ โพลาริเซอร์ โพโตตีเทคเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับโพโตตีเทคเตอร์
- 1.3 ระบบแสดงผลประกอบด้วย ออสซิลโลสโคปดิจิทัลแบบ 2 ช่องสัญญาณ เชื่อมต่อกับเครื่องพิมพ์ เลเซอร์

ในการติดตั้งเริ่มจากการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน แสดงดังไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1 เพื่อเตรียมพร้อมในการใช้งานตรวจวัดฮิสเตอร์รีซิสของแผ่นฮาร์ดดิสก์

2. การใช้งานชุดศึกษาฟิล์มแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์รี

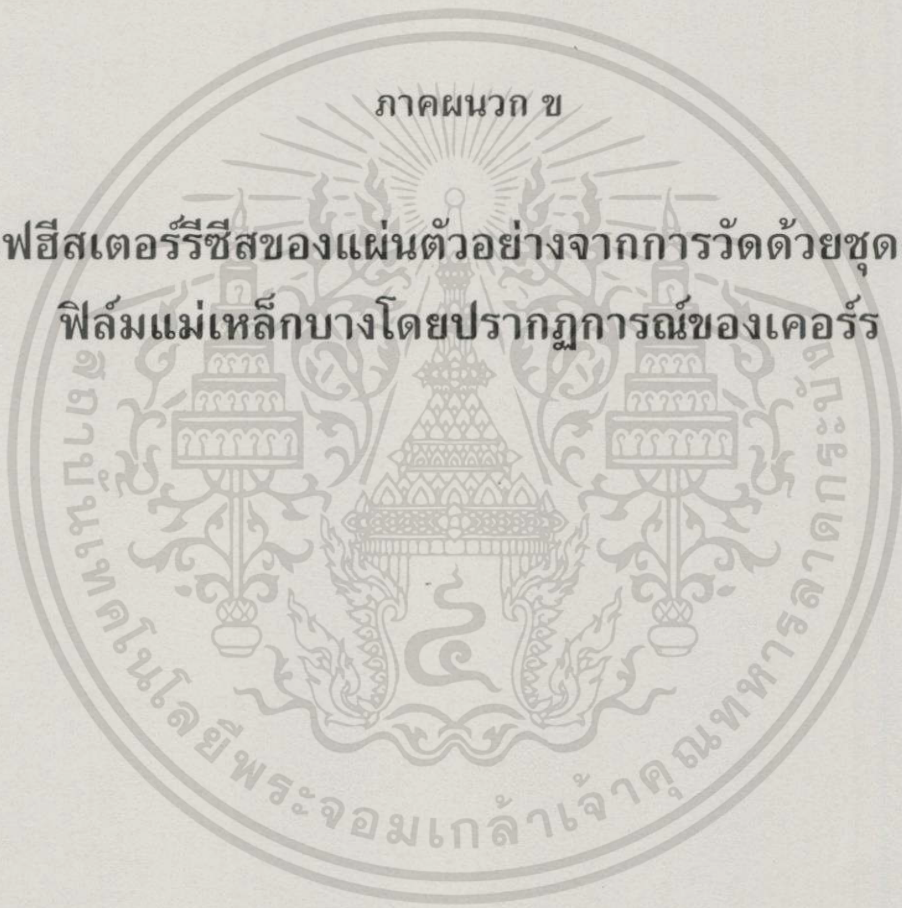
เมื่อต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากันเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนการใช้งานมีดังต่อไปนี้

1. นำแผ่นตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดวางบนแท่นวาง จัดบริเวณที่ต้องการทดสอบให้อยู่ในสนามแม่เหล็กจากหัวกำเนิดสนาม โดยตำแหน่งที่ตรวจวัดอยู่ในแนว 1.3 นี้วจากจุดศูนย์กลางของแผ่นฮาร์ดดิสก์
2. เปิดสวิตช์เพื่อเปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยเซตให้มีความถี่ 4000 เฮิร์ต แอมพลิจูด $V_{pp} = 1.10$ โวลต์
3. เปิดเครื่องออสซิลโลสโคป เซตให้การแสดงผลเป็น Y-T โหมดแบบ โหมดตัวอย่าง(Sample mode)
4. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับโพโตตีเทคเตอร์ โดยเซตค่าโวลต์ อยู่ระหว่าง 6-9 โวลต์
5. เปิดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์
6. เปิดเครื่องขยายกำลัง เพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า AC ไปยังขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก
7. เปลี่ยนการแสดงผลของออสซิลโลสโคปจาก โหมดตัวอย่าง(sample mode) มาเป็น โหมดเฉลี่ย(average mode) ทำการตรวจวัดประมาณ 10 วินาที
8. กดปุ่ม STOP บนเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อหยุดทดสอบ ขณะที่ข้อมูลที่ทดสอบยังคงเก็บอยู่ในหน่วยความจำ

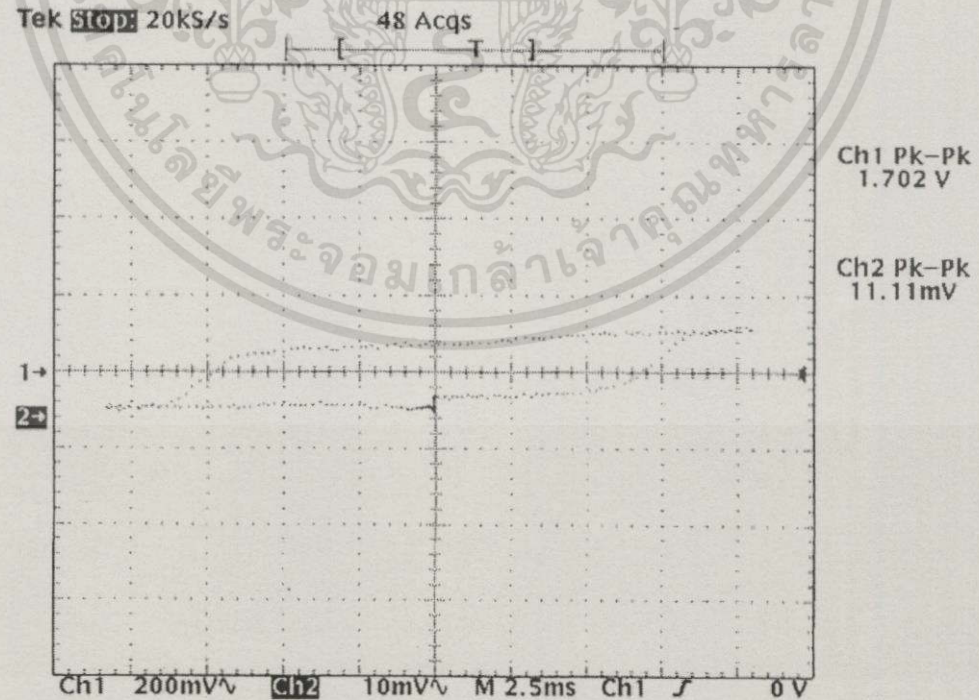
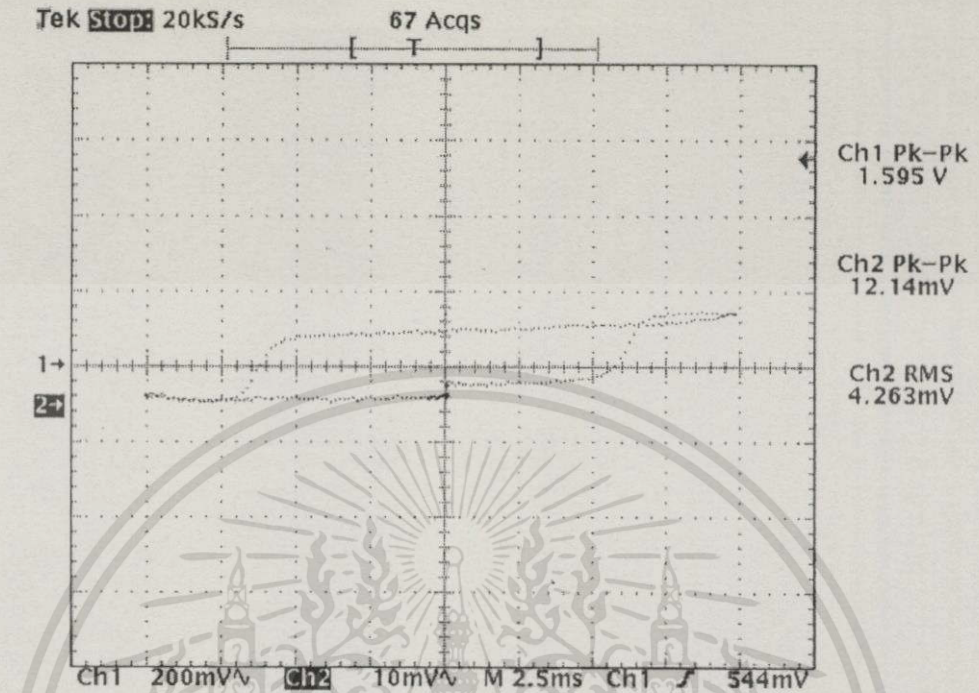
9. ปิดสวิตช์เครื่องขยายกำลัง แหล่งจ่ายไฟฟ้า DC
10. เปลี่ยนโหมดการแสดงผลของออสซิลโลสโคปจากโหมด Y-T มาเป็นโหมด X-Y ของ แสดงเป็นกราฟฮิสเตอร์รีซิส ลูป ของตัวอย่างที่ทดสอบ พิมพ์กราฟทางเครื่องพิมพ์
11. นำกราฟที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ H_c , S^* และ S ของตัวอย่าง



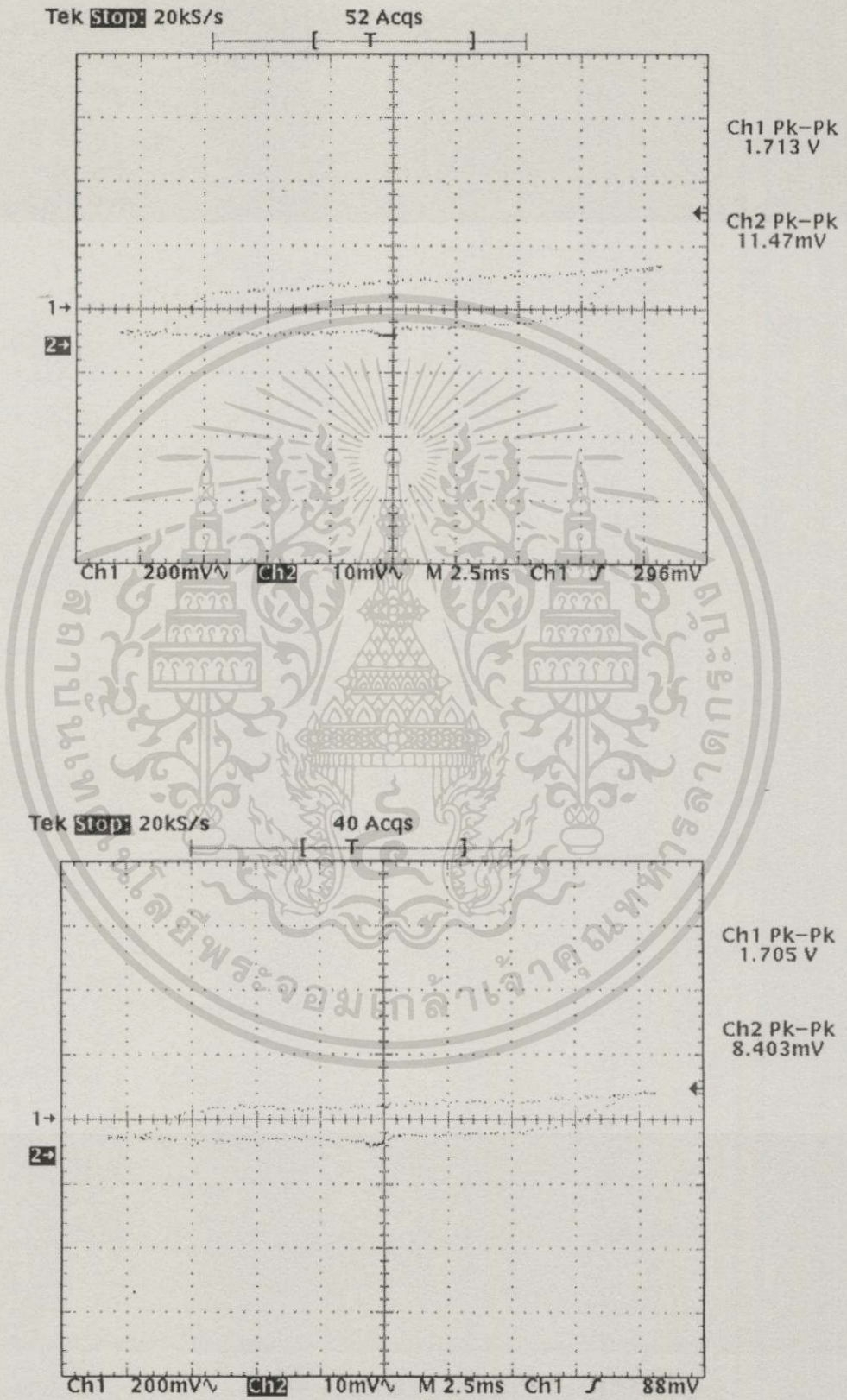
ภาคผนวก ข
 กราฟี่สเตอร์รีซีสของแผ่นตัวอย่างจากการวัดด้วยชุดศึกษา
 फिल्मแม่เหล็กบางโดยปรากฏการณ์ของเคอร์



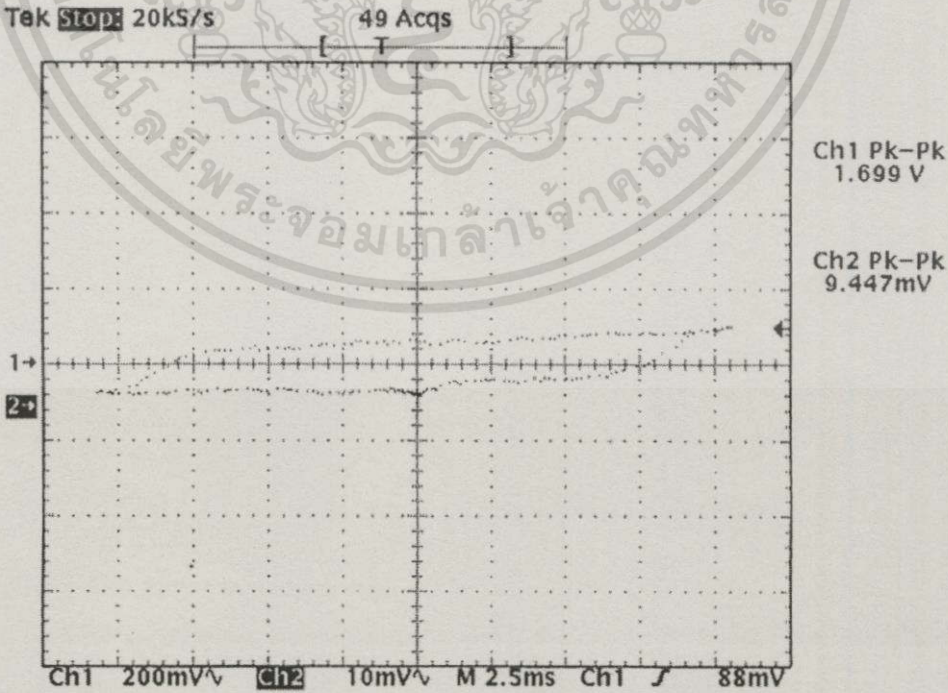
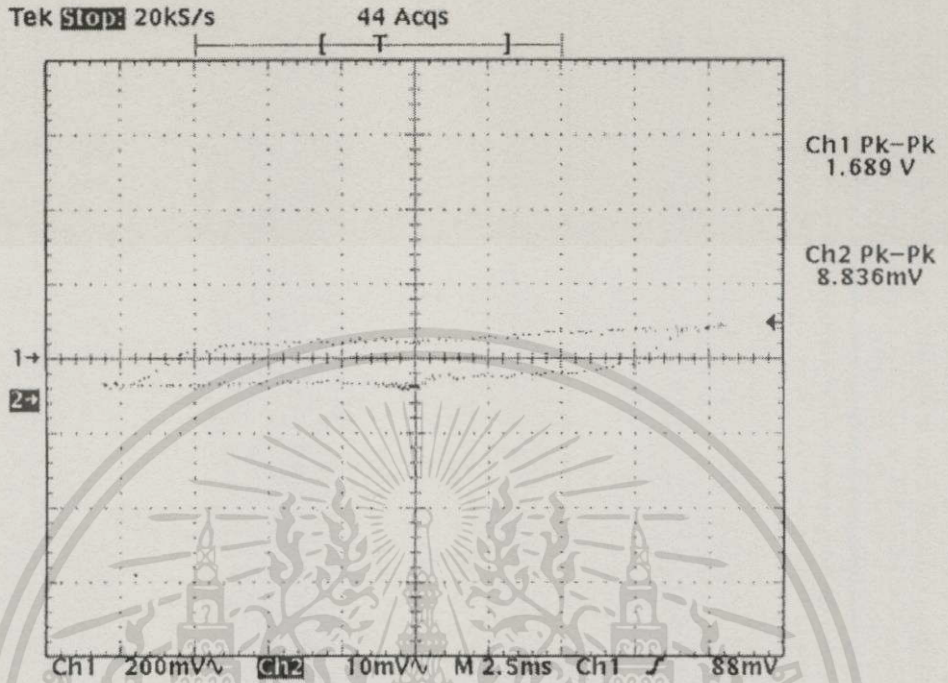
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



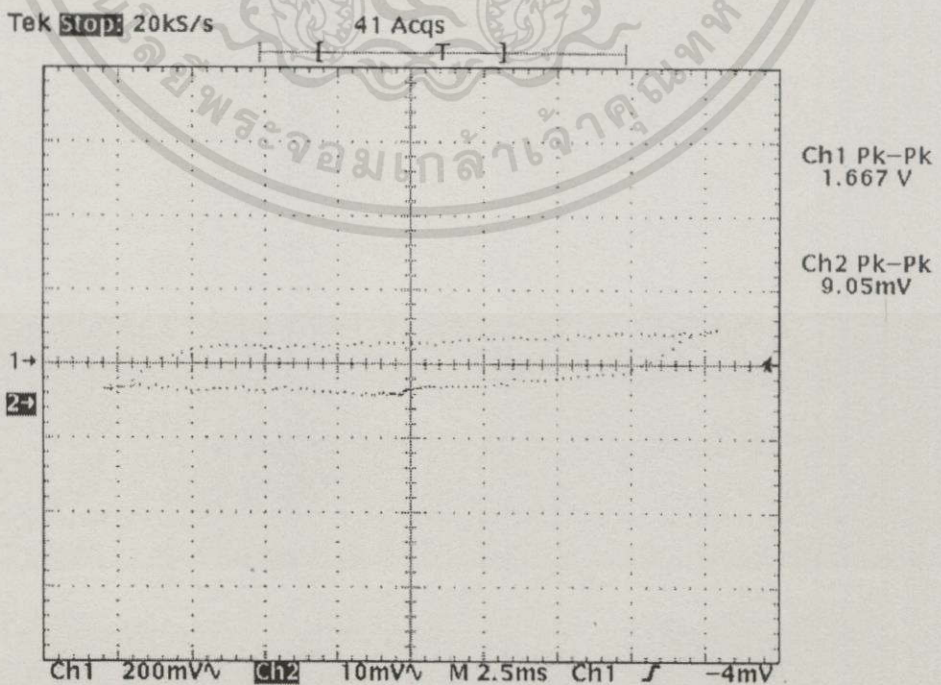
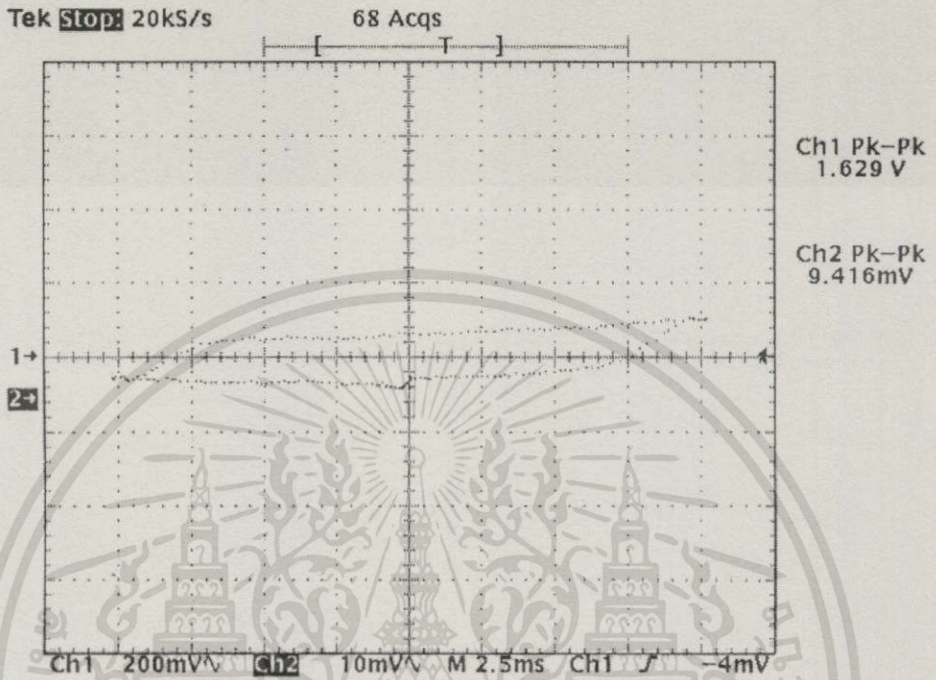
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



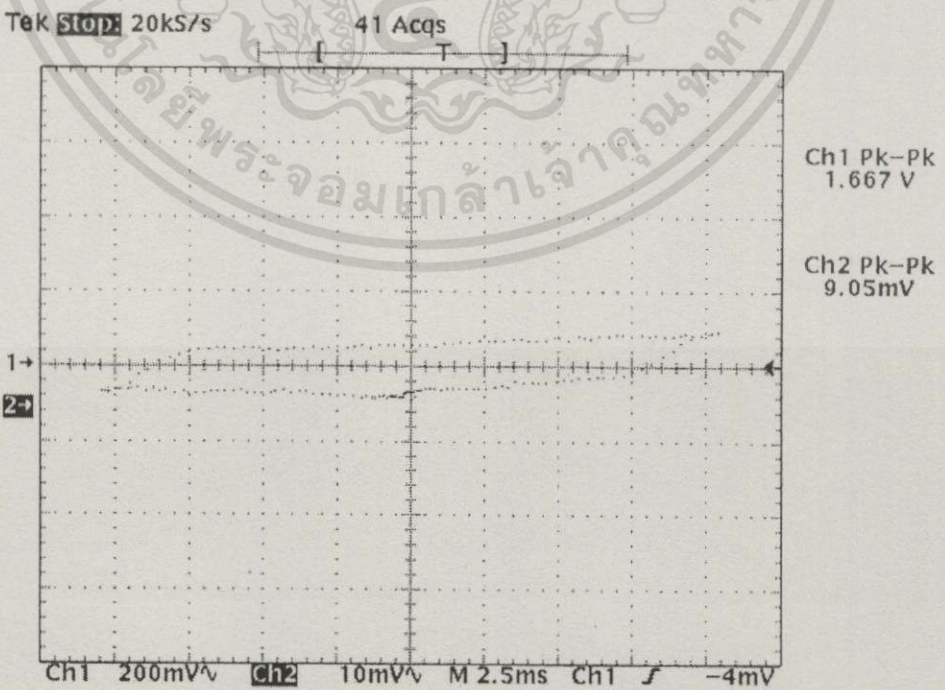
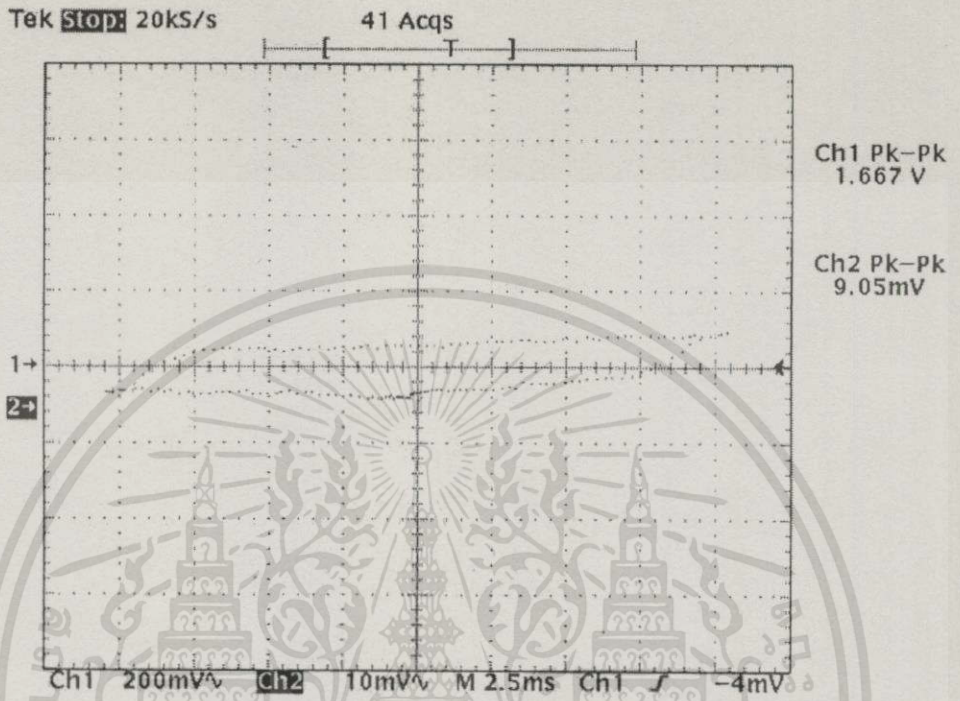
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



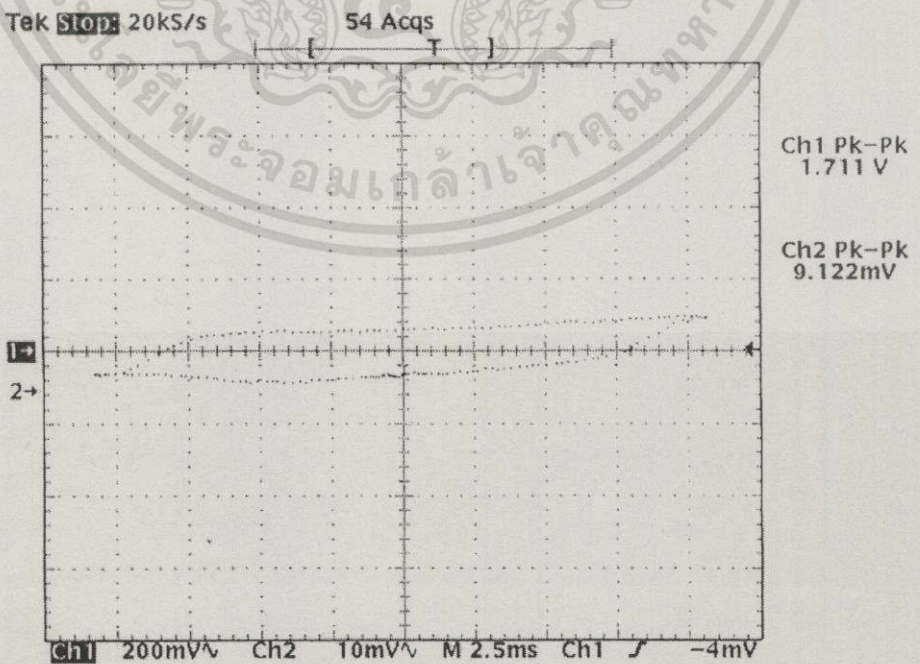
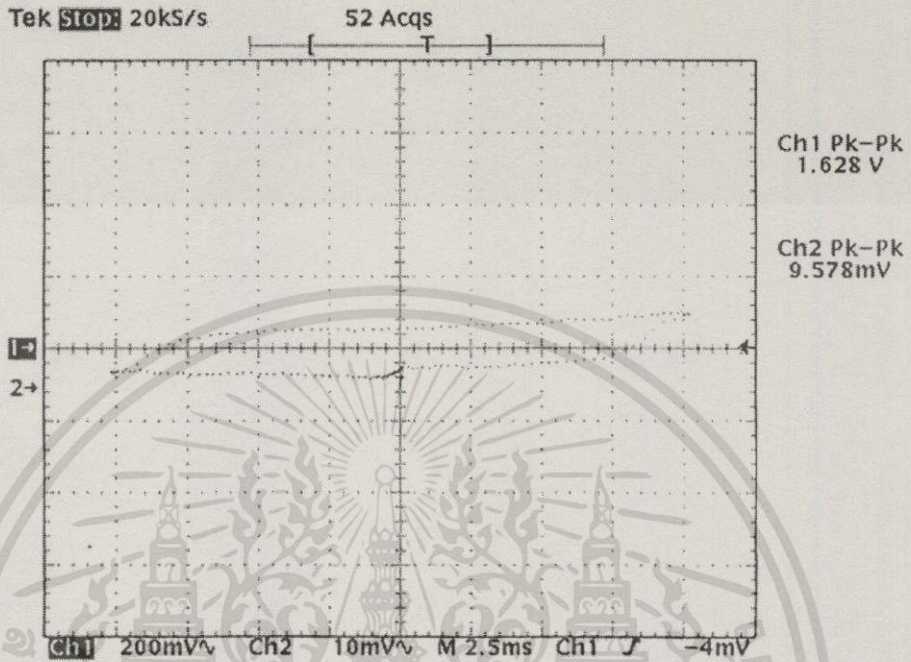
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



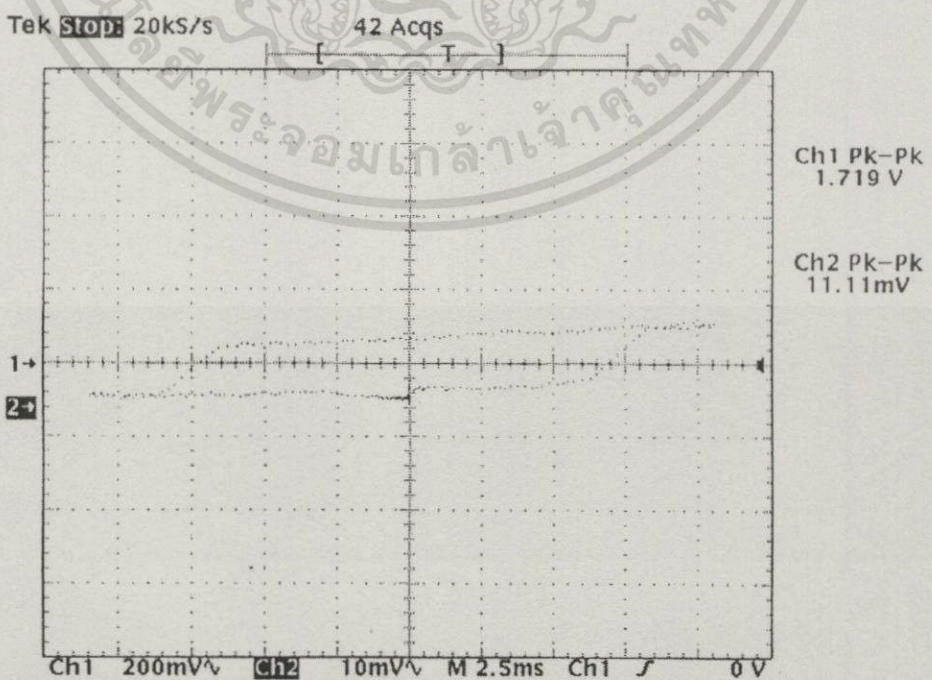
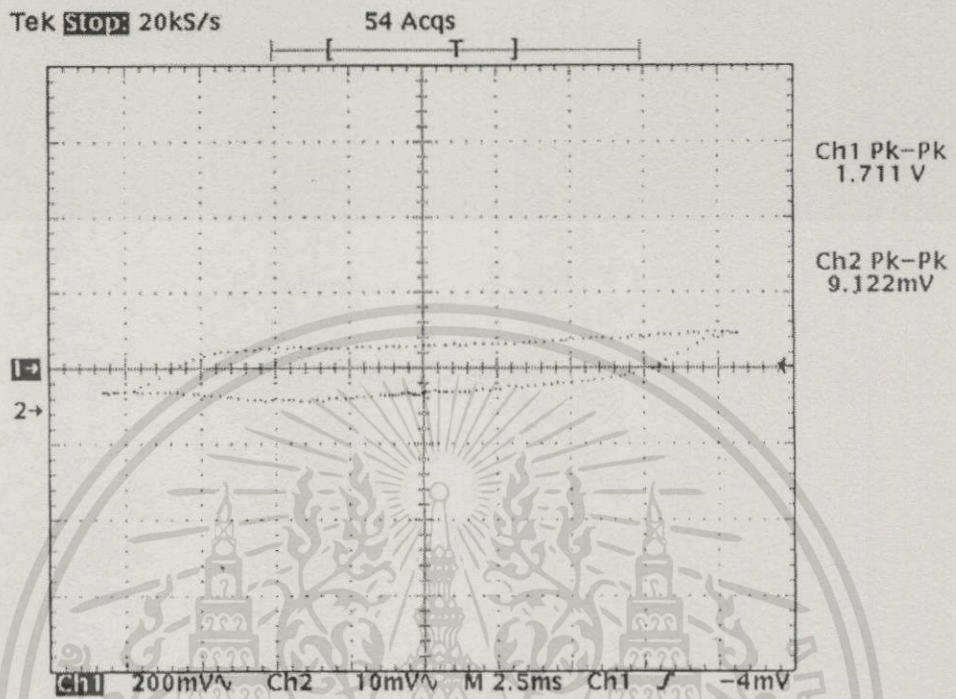
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



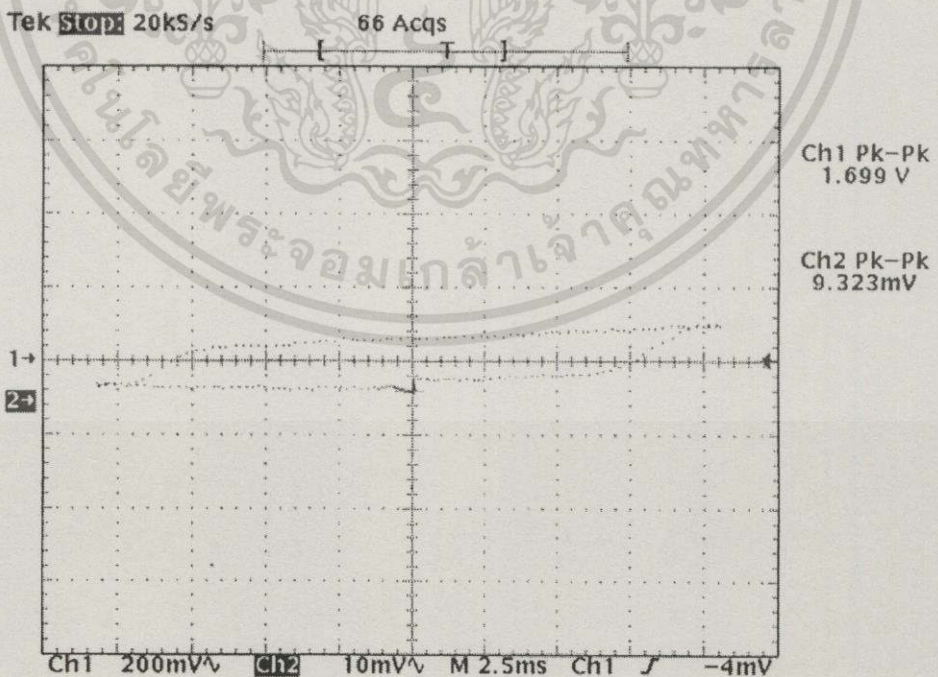
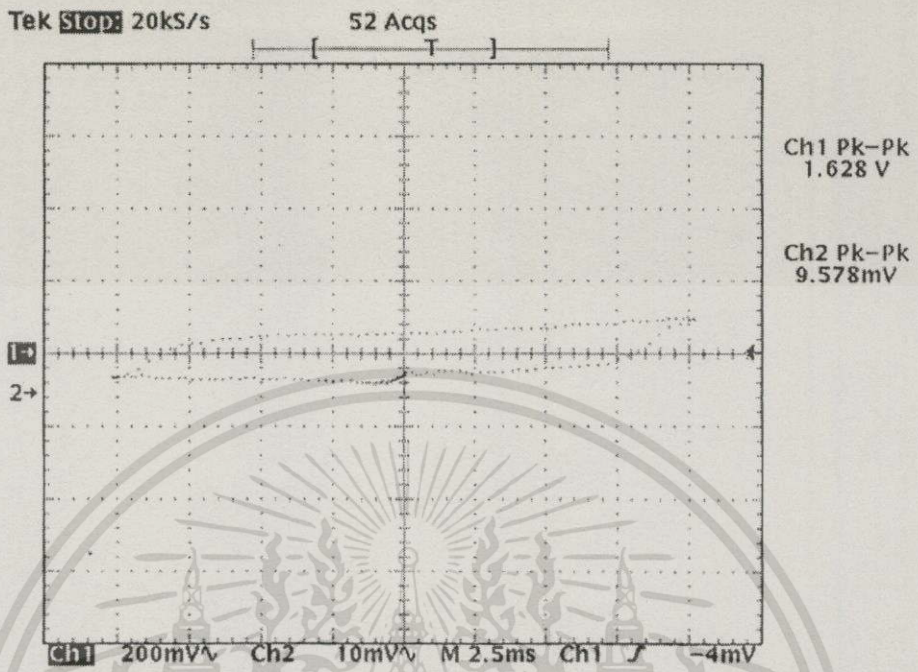
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



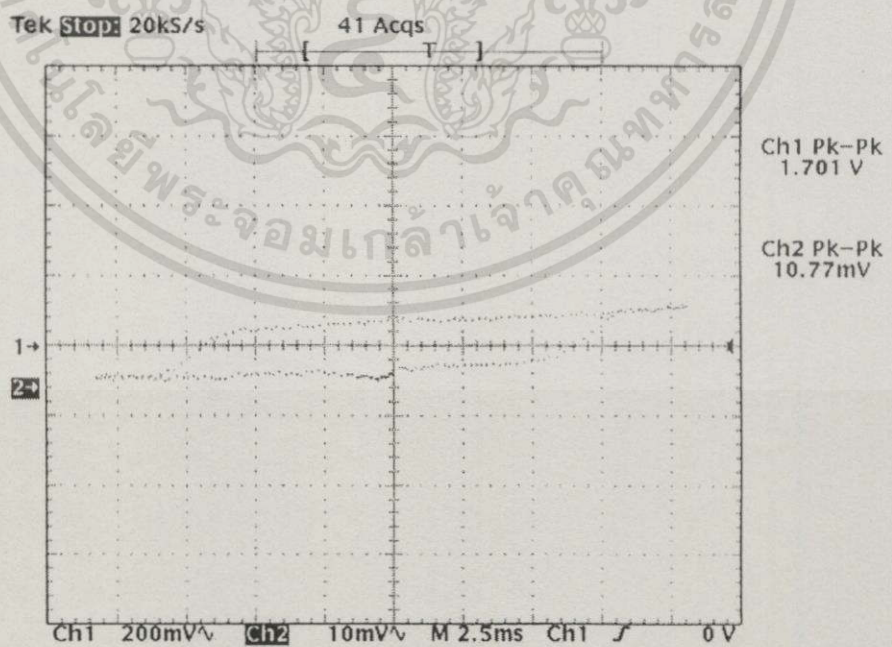
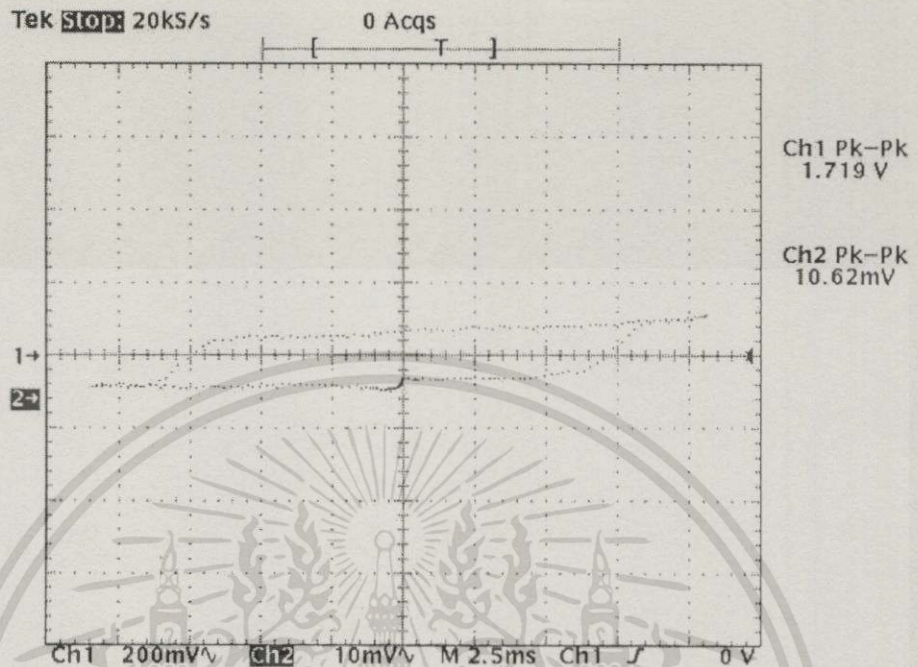
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



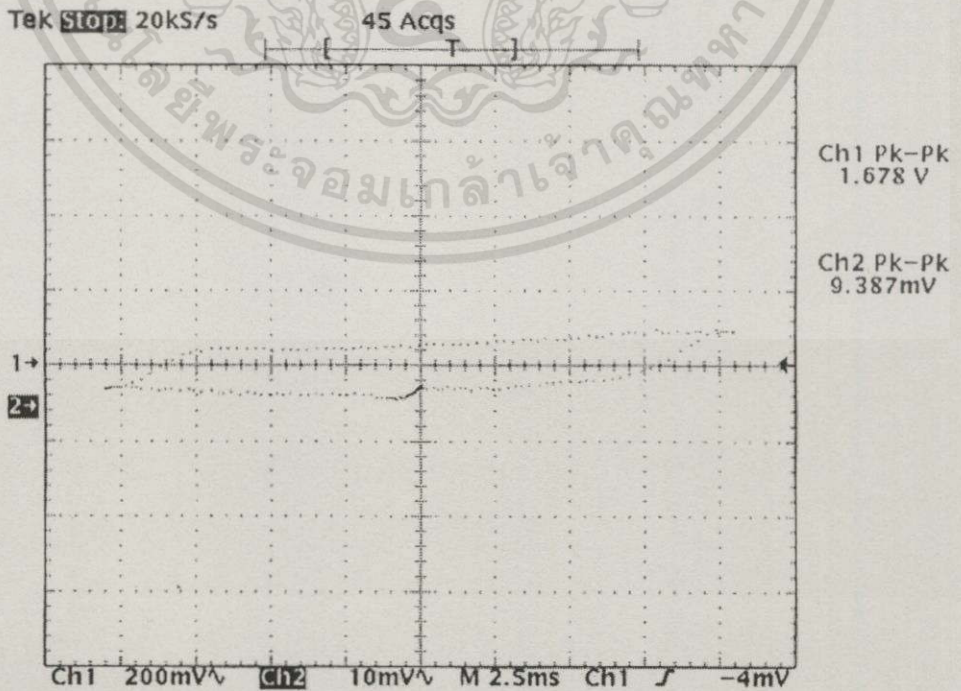
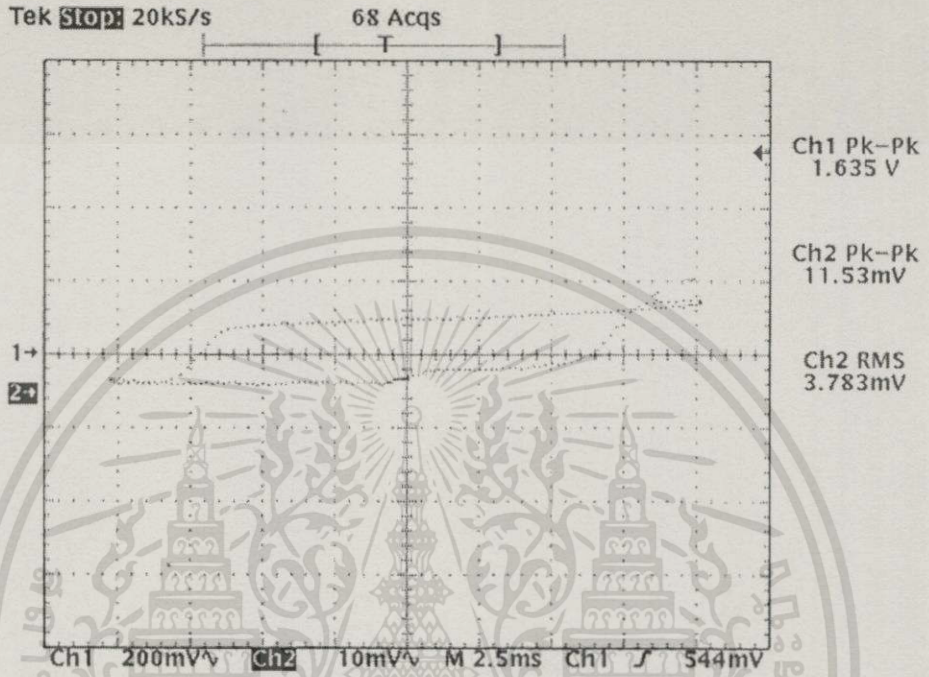
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



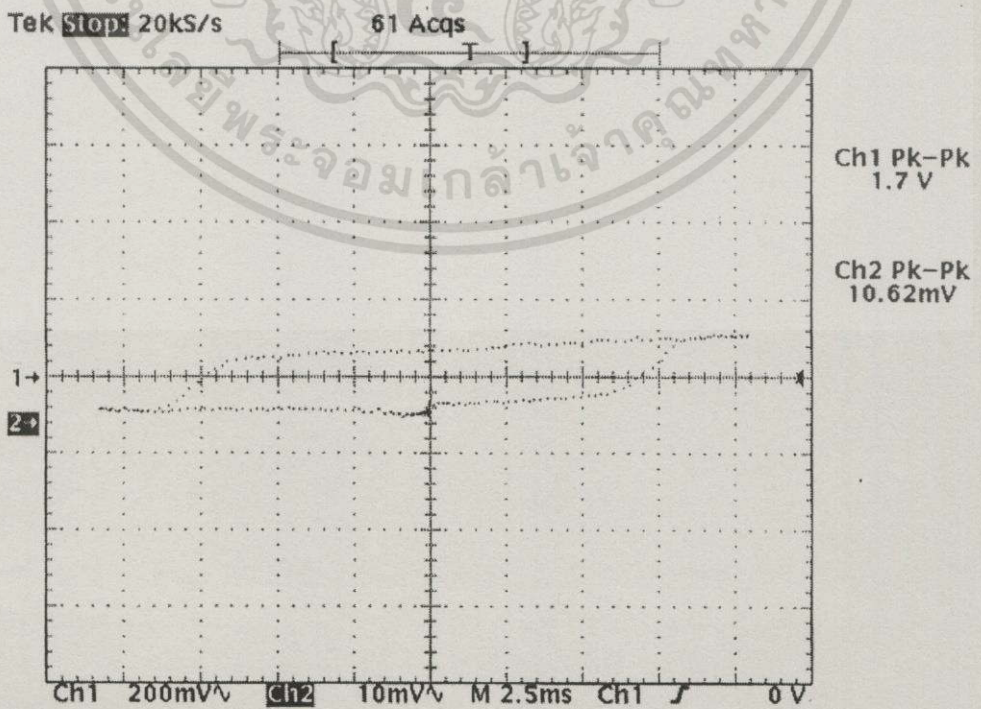
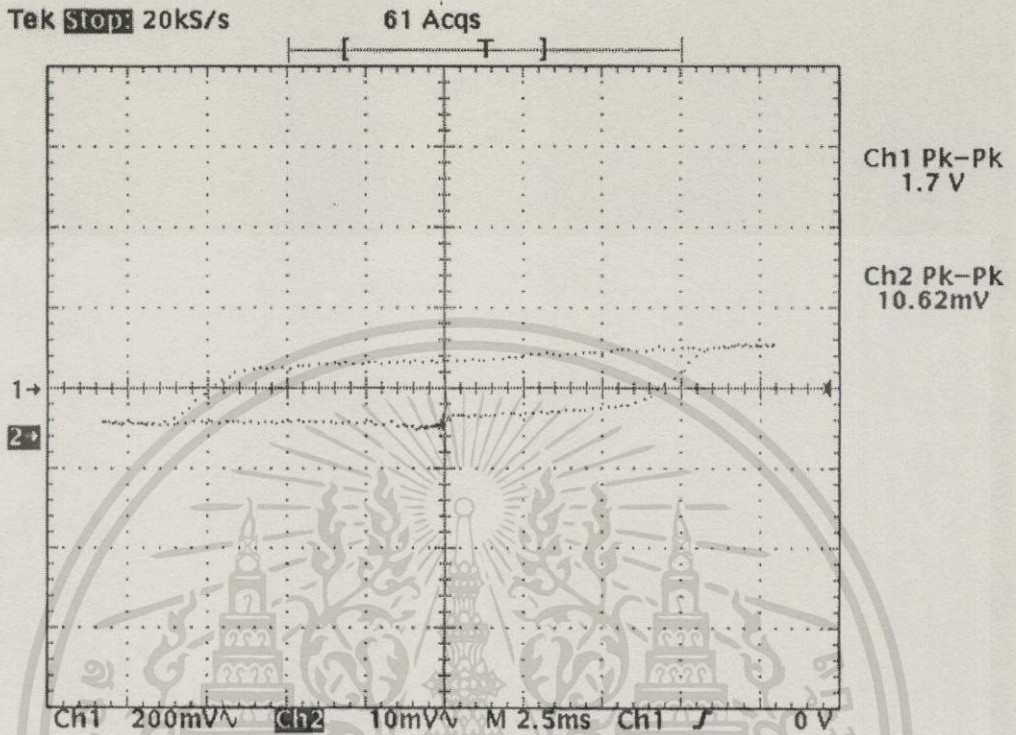
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



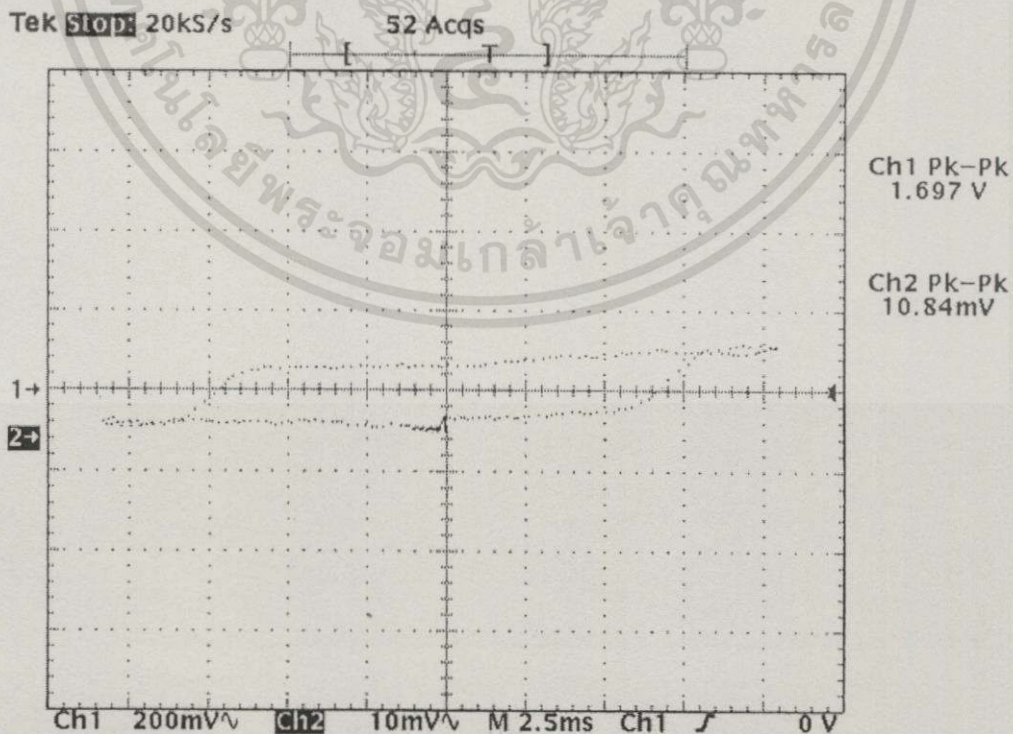
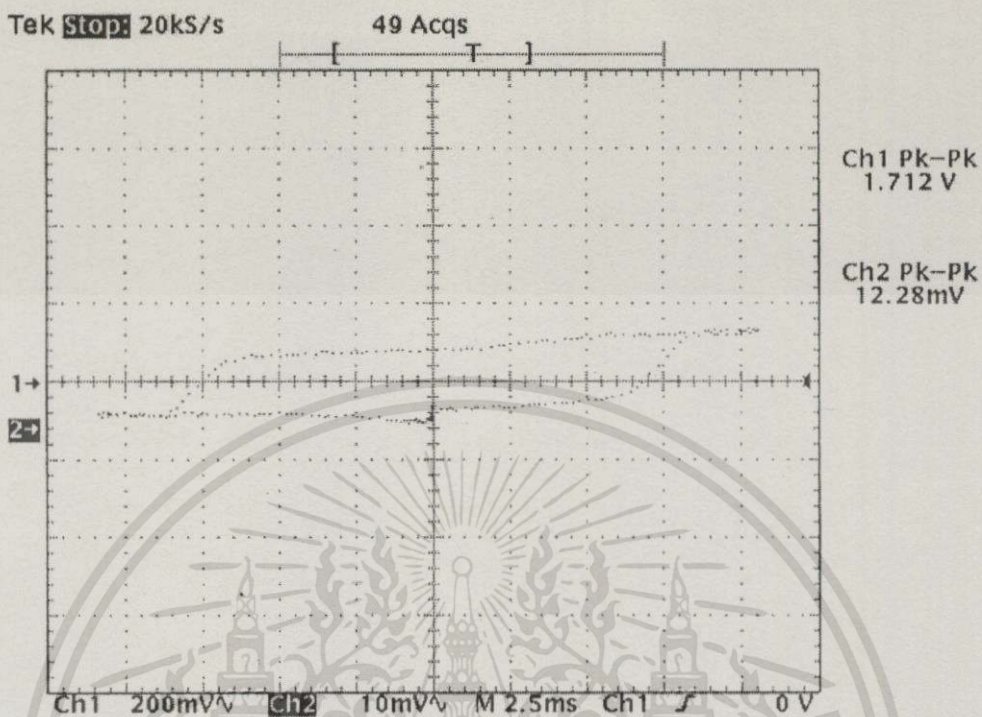
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



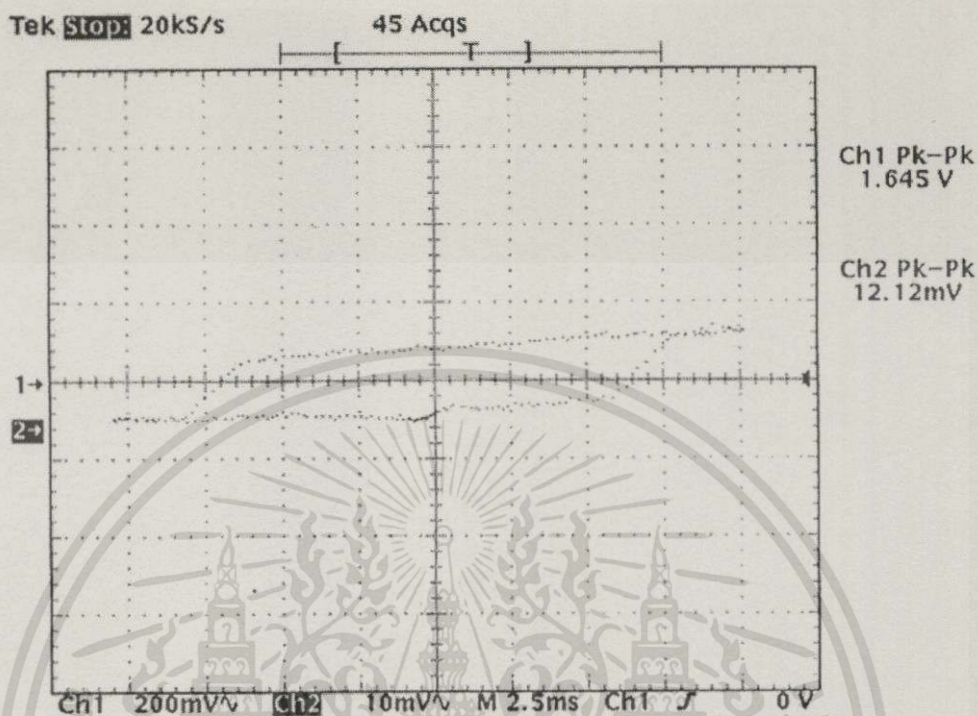
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



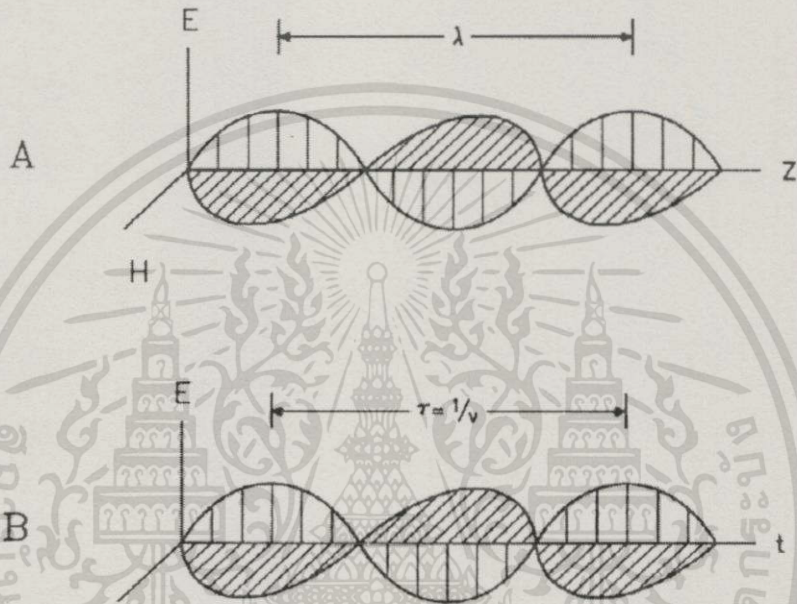
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตามรูปแบบการพิจารณาของ แมกซ์เวลล์ แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในรูปแบบโดยทั่วไปประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่มีการออสซิลเลตตั้งฉากซึ่งกันและกันด้วยความถี่เดียวกัน แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ตั้งฉากกัน

ค่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า ณ เวลา t ใด ๆ จากรูปที่ 1 สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E(z,t) = E_x^0 \sin \left[2\pi\nu t - \left(\frac{2\pi z}{\lambda} \right) + \phi_0 \right] \tag{1}$$

จากสมการ (1) แสดงกรณีที่สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามแกน z และมีระนาบโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นในแนวแกน x (สนามไฟฟ้าออสซิลเลตด้วยแอมพลิจูดที่มีความถี่ ν ตามแนวแกน $\pm x$) โดยที่

- ν = ความถี่
- λ = ความยาวคลื่นแสง
- E_x^0 = แอมพลิจูดสูงสุด
- ϕ_0 = ค่าเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่เชิงมุม $= 2\pi\nu$ และ ความยาวคลื่นกับเลขคลื่น มีความสัมพันธ์คือ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ดังนั้นสมการ (1)

$$E(z,t) = E_x^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2)$$

สนามแม่เหล็กของแสงจะออสซิลเลตด้วยเฟสเดียวกับสนามไฟฟ้า แต่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจะหมุนตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า นั่นคือสนามแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y และมีค่าตามสมการ

$$H(z,t) = H_y^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (3)$$

โดยที่ความเข้มของพลังงานแสงในสุญญากาศมีค่าตามสมการ

$$U = \frac{1}{8\pi} (|E|^2 + |H|^2) \quad (4)$$

ในคลื่นแสง $|E| = |H|$ ดังนั้น ความเข้มของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีค่าดังสมการ

$$U(z,t) = \frac{1}{4\pi} |E(z,t)|^2 \quad (5)$$

ความเข้มแสงเฉลี่ยของพลังงานที่ผ่านจุดที่กำหนด และ ดังนั้นฟลักซ์ของพลังงานจะผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าสมการที่ (2) ในสมการที่ (5) อินทิเกรตตลอดพื้นที่จะได้ความเข้มแสง

$$I = \frac{[E_x^0]^2}{8\pi} \lambda\nu \quad (6)$$

แสงโพลาไรซ์

ในตอนนี้อาจพิจารณาแนวความคิดพื้นฐานเกี่ยวกับธรรมชาติของแสง ซึ่งเป็นรูปแบบต่างๆ ของการโพลาไรซ์ของแสง โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม และแสงโพลาไรซ์แบบวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linearly Polarized Light)

คลื่นแสงสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แต่จะพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสง เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าต่ออนุภาค มีค่ามากกว่าผลจากสนามแม่เหล็ก ในกรณีที่เป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น สำหรับแสงที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z และแสงโพลาไรซ์ในแนวแกน x แสดงตามสมการ

$$\vec{E}_x = E_x^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \quad (7)$$

โดยที่ E_x^0 คือแอมพลิจูด และ \hat{i} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน x เช่นเดียวกับแสงโพลาไรซ์ตามแนวแกน y เขียนได้ดังนี้

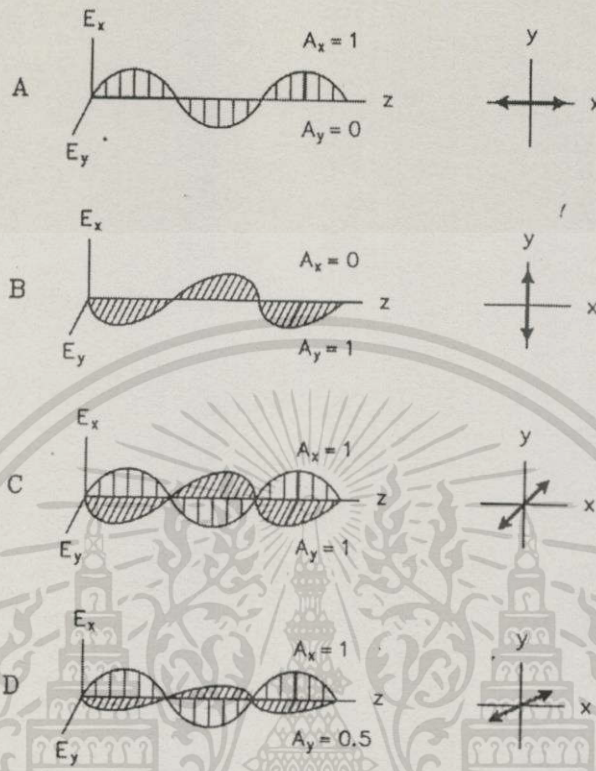
$$\vec{E}_y = E_y^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \quad (8)$$

โดยที่ \hat{j} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน y สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นจะหมุนในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวทางการเคลื่อนที่ซึ่งอธิบายในรูปของผลรวมของเวกเตอร์ \vec{E}_x และ \vec{E}_y

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ &= \{E_x^0 \hat{i} + E_y^0 \hat{j}\} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \end{aligned} \quad (9)$$

นั่นคือ แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แกนการโพลาไรซ์จะอยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งในระนาบ xy สามารถคิดได้ว่าประกอบด้วยส่วนประกอบในแกน x และแกน y ขนาดของทั้งสององค์ประกอบหาได้จากการโพลาไรซ์ โดยที่ส่วนประกอบทั้งสองมีความถี่เดียวกันและมีมุมเฟสเท่ากันหรือ มีเฟสต่างกันเท่ากับ π แสดงการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นตามรูปที่ 2

wave representation linear representation



รูปที่ 2 ลักษณะของแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

2. แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circularly Polarized Light)

ในการอธิบายแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแสงอาจจะมีแอมพลิจูดต่างกัน แต่ต้องมีเฟสเดียวกัน ในตอนนี้มาพิจารณากรณีที่สององค์ประกอบมีขนาดเท่ากัน แต่มีเฟสต่างกันเป็น $\frac{\pi}{2}$ หรือ $-\frac{\pi}{2}$ เวกเตอร์ลัพธ์สำหรับกรณีนี้สามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}_{rcp} &= E^0 \left\{ \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} + \sin\left[\omega t - kz + \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right] \hat{j} \right\} \\ &= E^0 \left\{ \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} + \cos[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \right\} \end{aligned} \tag{10.1}$$

หรือ

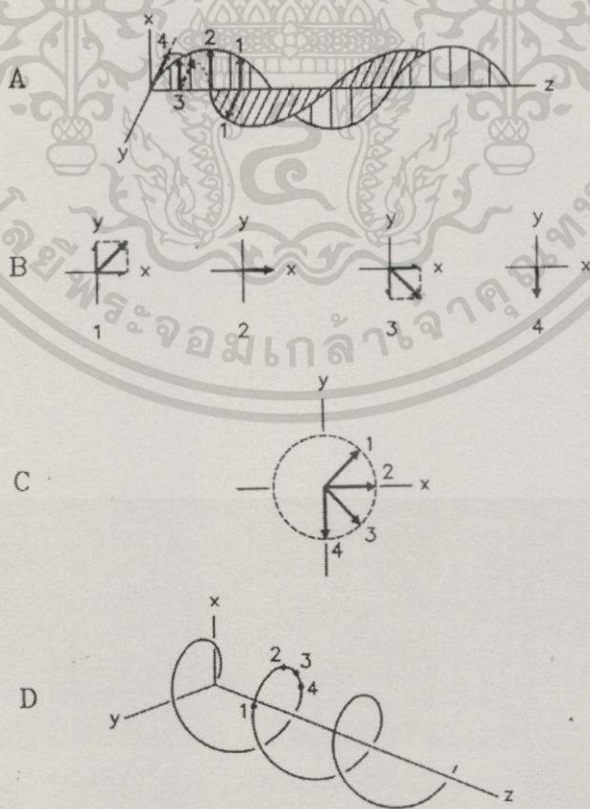
$$\begin{aligned} \vec{E}_{lcp} &= E^0 \left\{ \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} + \sin\left[\omega t - kz + \phi_0 - \frac{\pi}{2}\right] \hat{j} \right\} \\ &= E^0 \left\{ \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} - \cos[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \right\} \end{aligned} \tag{10.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้เป็นกรณีที่น่าสนใจมาก แสดงได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งมองในแนวแกน z เวกเตอร์แทนสนามแม่ไฟฟ้าของแสงที่มีขนาดคงที่แต่ทิศทางเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นส่วนปลายของเวกเตอร์จึงมีลักษณะเป็นวงกลมตลอดเวลา

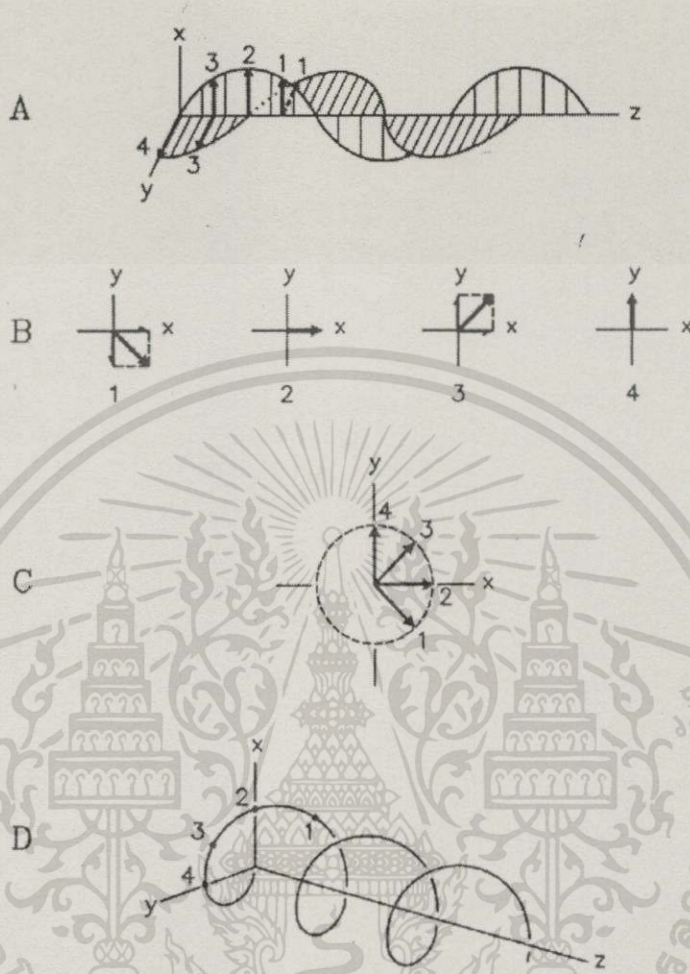
ในกรณีที่แทนด้วยสมการที่ (10.1) เวกเตอร์ที่จุด $z=0$ จะมีแอมพลิจูด E^0 ณ เวลานั้น โดยที่ $\omega t = -\phi_0$ และเป็นจุดตามแนวแกน $+y$ ในเวลาต่อมาถ้าองค์ประกอบในแนวแกน y มีการเลื่อนไปเล็กน้อย และองค์ประกอบในแนวแกน x มีการเลื่อนไปมากกว่า ดังนั้นเวกเตอร์จะมีขนาดแอมพลิจูดที่หมุนเท่ากันโดยจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เช่น เมื่อ $\omega t = 90^\circ - \phi_0$ เวกเตอร์ของจุดตามแนวแกน x เวกเตอร์เมื่อ $z=0$ ระบายจะดูเป็นวงกลมในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเมื่อมองจาก $+z$ ส่งไปยังแหล่งกำเนิด

ตามรูปที่ 3 จะปรากฏเป็นสกรูหมุนขวา แสงที่มีลักษณะแบบนี้เรียกว่า แสงโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา (Right Circularly Polarized) ในลักษณะตรงกันข้ามเมื่อมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (10.2) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงมีลักษณะทางเดินหมุนทวนเข็มนาฬิกา ปรากฏเป็นสกรูหมุนทางซ้ายมือเมื่อมองจากระนาบ xy แสงในกรณีนี้เรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนซ้าย (Left Circularly Polarized) แสดงได้ตามรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะของแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ของเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ลักษณะของแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนซ้าย

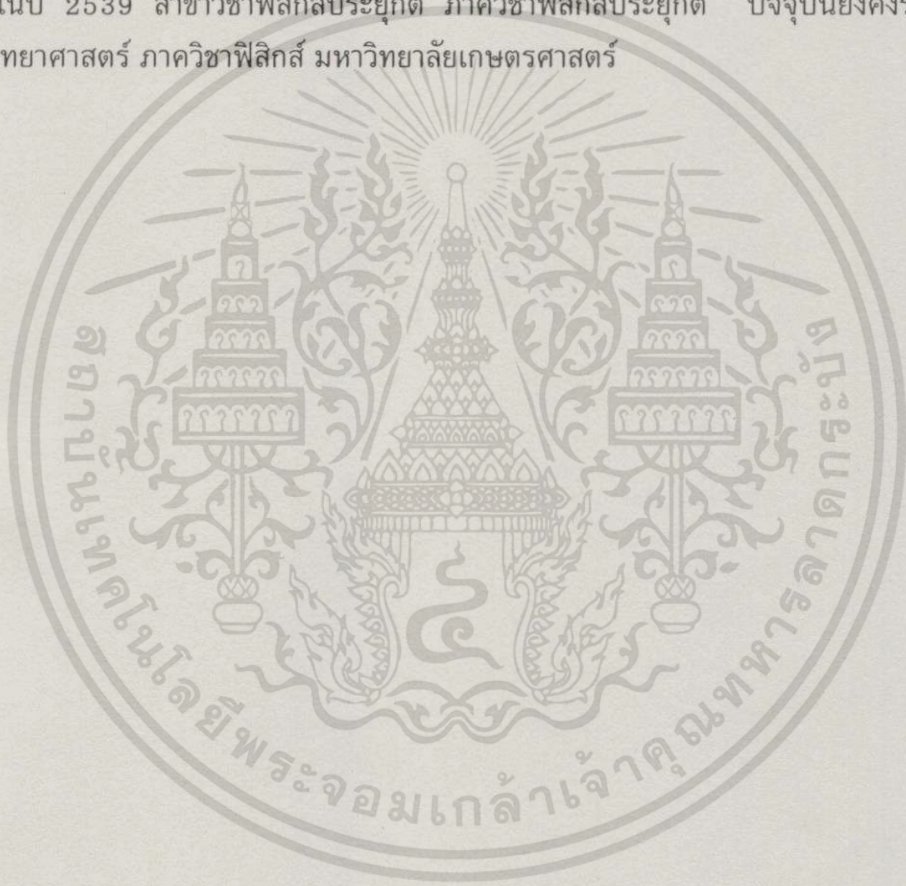
กล่าวคือแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมสามารถเกิดขึ้นได้จากแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นที่มีเฟสต่างกันที่เป็นองค์ประกอบ โดยที่แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นจะมีค่าเท่ากับองค์ประกอบของแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้าย เมื่อรวมสององค์ประกอบเข้าด้วยกันในกรณีที่มีเฟสเดียวกันจะเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_x = \frac{\vec{E}_{rcp} + \vec{E}_{lcp}}{2} = E^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \tag{11.1}$$

$$\vec{E}_y = \frac{\vec{E}_{rcp} - \vec{E}_{lcp}}{2} = E^0 \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \tag{11.2}$$

ประวัติผู้เขียน

นางสาววัชรีย์ รัตนสกุลทอง เกิดวันศุกร์ที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2515 ที่ จ. สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษามัธยม ปี 2533 จ.สุราษฎร์ธานี สำเร็จปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ(ฟิสิกส์) ที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2537 รับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี 2538 ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2539 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ปัจจุบันยังคงรับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้