

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ชนิด MR Head



นางสาวนิรมล เลิศปิยะนันท์
นางสาวสิริลักษณ์ เกษมสวัสดิ์

รท.
พ. ๒๕๓
๒๕๓๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี.....

6/2550115

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Magnetic Property of MR Head Test Set



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวอ่าน

ฮาร์ดดิสก์แบบ MR Head

โดย

นางสาวนิรมล เลิศปิยะนันท์

นางสาวสิริลักษณ์ เกษมสวัสดิ์

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต ศรีโชติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(รองศาสตราจารย์สุรพล รักรวิชัย)

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต ศรีโชติ)

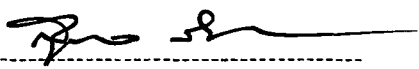
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย)

กรรมการ

(ดร. ชูตินัย แก้วแดง)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์สุรพล รักรวิชัย)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ชนิดMR-Head
โดย	นางสาวนิรมล เลิศปิยะนันท์ นางสาวสิริลักษณ์ เกษมสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการพัฒนาเครื่องมือวัดคุณสมบัติ magnetoresistive ของ หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ชนิด MR-Head ซึ่งหัวอ่านนี้มีการใช้เทคโนโลยีใหม่ในการเพิ่มความสามารถในการอ่านข้อมูลให้มีมากขึ้น โดยจะสามารถอ่านข้อมูลที่มีความจุมากถึง 10 GBits/Sq.in. ได้ โดยที่ความต้านทานของ MR-Head จะขึ้นกับค่าของสนามแม่เหล็ก และจากหลักการดังกล่าวนี้ ทำให้สามารถสร้างเครื่องมือวัดได้ โดยวงจรหลักที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย 1) วงจรจ่ายกระแส 2) แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก 3) sweep generator 4) Differential Hall Generator เพื่อจะทำการวัดค่าความต้านทานของสารตัวอย่าง จะมีการป้อนไฟกระแสตรงที่มีค่าคงที่ให้กับ MR-Head ที่วางไว้ระหว่างช่องว่างของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ส่วน sweep generator จะให้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น เพื่อจะใช้เป็นตัวควบคุมแหล่งกำเนิดกระแสที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก คือจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กจากค่า -200 ถึง +200 เฮอร์สเต็ด ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่าง จะสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ซึ่งจะนำเข้าไปพล็อตในแกน Y ใน X-Y Recorder ส่วนค่าสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปสามารถวัดได้โดยใช้ differential Hall generator แล้วจะนำเข้าไปแกน X ของ X-Y Recorder เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของผลที่ได้จาก recorder จะสามารถใช้พิจารณาถึง ค่าความเป็นเชิงเส้น และ การสมมาตร ของ MR ได้

Special Project Title	Magnetic Properties of MR Head Test Set
Name	MissNiramol Lertpiyanuntagoon MissSirilak Kasemsawat
Special Project Advisor	Assistant ProfessorWichit Sirichote Assistant Professor Dr.Aree Wichienchai
Department	Applied Physics
Academic Year	1995

Abstract

An apparatus for measuring magnetoresistive characteristic of a MR-Head has been developed. The head is used in a new mass storage technology. By using this new reading head in a hard disk , the memory capacity may increase up to 10GBits/Sq.in. Since the resistance of the MR-head depends on the applied magnetic field, we then used this principle to build the instrument. The main circuit consists of 1) Sensing current generator , 2) Electromagnet 3) Sweep generator and 4) Differential Hall sensor. To measure the resistance of the specimen , we applied constant DC current to the MR-head and place in the gap of electromagnet. The sweep generator provides linearly triangular signal to control the current source applied to the electromagnet which in turn generates magnetic field ranging from -200 Oersted to +200 Oersted. The voltage developed on the sample is then proportional to the resistance and is put to Y-axis on the X-Y recorder. The applied magnetic filed is measured by a differential Hall sensor, put to X-axis. From the trace recorded on the recorder, we then can determine the head characteristics such as linearity and symmetry, etc.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย

พ่อแม่	ผู้ให้กำเนิด และเลี้ยงดูเป็นอย่างดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย	ผู้ให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือในด้านการเงิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต ศิริโชคิ	ผู้ให้คำแนะนำ
Dr. P. Nabokin	ผู้ให้สารตัวอย่าง และความรู้ของ magnetoresistor
คุณสันติ หาญกล้า	ผู้ให้ความช่วยเหลือด้านวงจร และอุปกรณ์
คุณสฤษฎ์ มานะพิทักษ์พงศ์	ผู้ให้ความช่วยเหลือด้านการต่อวงจร และอุปกรณ์
คุณศศิธร วัชรพฤกษ์	ผู้เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์ในการพิมพ์รายงานและคำแนะนำที่ดี
คุณเอกมล นิลอาษา	ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และคำแนะนำที่ดี
คุณพรศรี ตั้งพัฒนากิจเจริญ	ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และคอมพิวเตอร์ในการพิมพ์รายงาน
คุณสุศธิดา ลวางกูร	ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์
คุณพรทิพย์ เตรียมประทีป	ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์
คุณสุนทรินทร์ หอมบัวใหญ่	ผู้ช่วยแต่งเติมความเรียบร้อยของรูปภาพ
น้องหน่ง รุ่น 13	ผู้ช่วยทำกล่อง
ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์	ผู้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ทำโครงการ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ผู้ให้สิ่งที่ดี

รวมทั้งเพื่อน ๆ และพี่น้องทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจต่าง ๆ

นิรมล และศิริลักษณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 วิธีการดำเนินการ	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สภาวะเฟอร์โรแมกเนติก	3
2.1.1 สนามโมเลกุล	5
2.2 Anisotropy ทางแม่เหล็ก	12
2.2.1 Anisotropy ในผลึกลูกบาศก์	12
2.2.2 ผลของ anisotropy ในฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติก	16
2.3 โครงสร้างของผนังเขต	18
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงของผนังเขต	18
2.3.2 การเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กในสนามที่มีค่าต่ำ ๆ	19
2.3.3 การเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กในสนามที่มีค่าสูงสุด	21
2.3.4 การต้านต่อการเคลื่อนที่ของผนังเขต	21
2.4 สารผสมอัลลอยด์ชนิดพิเศษ	24
2.4.1 สารเฟอร์โรแมกเนติกอัลลอยด์	25
2.5 Magnetoresistance	28
2.5.1 Magnetoresistivity	28
2.6 Magnetoresistive Head [MR-Head]	32
2.6.1 ลักษณะ โครงสร้างภายในของ MR-Head	32
2.6.2 การตอบสนองของ MR ถึงลักษณะการเป็นเชิงเส้น	33
บทที่ 3 หลักการทำงาน และ หลักการวัด	35
3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือ MR Head Test Set	35
3.1.1 พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วงจรจ่ายกระแส	41
3.1.3 Sweep Generator	44
3.1.4 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก	46
3.1.5 Differential Hall Sensor	46
3.1.6 X-Y Recorder	47
3.2 หลักการวัดของเครื่องมือ MR Head Test Set	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พลังงาน anisotropy ของผลึก สำหรับผลึกรูปลูกบาศก์ในทิศทางต่าง ๆ กัน	16
ตารางที่ 2.2 ทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างง่าย,ปานกลาง,และยากในผลึกรูปลูกบาศก์	16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กของ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลที่อุณหภูมิห้อง	3
รูปที่ 2.2 ขบวนการของสภาพความเป็นแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.3 สภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง โดยสนามโมเลกุล	5
รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง โดยเส้นโค้งที่ 1 เป็นฟังก์ชันแลงวิน	6
รูปที่ 2.5 สภาพความเป็นแม่เหล็กของ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลเป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิ	8
รูปที่ 2.6 อุณหภูมิคูรี (T) อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (R) และการเปลี่ยนแปลงเฟสใน เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล (โครงสร้างแบบ BCC,FCC,HCP) โดยนิกเกิลเป็น FCC ในทุกอุณหภูมิ	8
รูปที่ 2.7 สภาพความเป็นแม่เหล็กอ้อมตัวสัมพัทธ์ของ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยจุดเป็นผลจากการทดลอง และเส้นโค้งเป็น ผลที่ได้จากการคำนวณ	9
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิ และการป้อนสนามที่มีผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็ก โดยเส้นโค้งที่ 1 เป็นฟังก์ชันบริลลูแวน สำหรับ $J = 1/2$	11
รูปที่ 2.9 เส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็ก และสภาพรับไว้ได้ที่ต่ำกว่า และสูงกว่า อุณหภูมิคูรี ส่วนภาพเล็ก ๆ ที่ส่วนบนชี้ให้เห็นถึงการแจกแจงทิศทางของ สปินแบบดั้งเดิมในการป้อนสนามค่าศูนย์ภายในเขตเดี่ยว(ต่ำกว่า T_c) และในกลุ่มของอะตอม(เหนือกว่า T_c)	12
รูปที่ 2.10 ลักษณะผลึกเดี่ยวที่ขนานกับระนาบ {110} โดยมีทิศทาง $\langle 100 \rangle$ $\langle 110 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ โดยมีทิศทาง $\langle 111 \rangle$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง	12
รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กของผลึกเดี่ยวของ (a) เหล็ก (b) นิกเกิล	13
รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเขตผลึกของเหล็ก โดยมี H อยู่ในทิศ [010]	14
รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเขตผลึกของเหล็ก โดยมี H อยู่ในทิศ [110]	15
รูปที่ 2.14 พัลส์ magnetoresistance แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส J กับ สภาพความเป็นแม่เหล็ก M	17
รูปที่ 2.15 แสดงผนังเขตที่วางตัวทำมุมกัน 180 องศา	18
รูปที่ 2.16 แสดงปรากฏการณ์ Barkhausen	19
รูปที่ 2.17 แสดงเส้นกราฟการเกิด hysteresis loop ในขอบเขตของเรย์เลย์ โดยเส้นประ	

จะเป็นความชันซึ่งเป็นค่าของ μ_0

20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของผนังทั้งแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้	22
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่รีเลย์ μ_0 และ V กับค่า ε	23
รูปที่ 2.20 กราฟแสดงอัลลอยด์ของเหล็กกับนิกเกิล เป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของนิกเกิล กับค่า M_s และ T_c	24
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงอัลลอยด์ของเหล็กกับนิกเกิล เป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของนิกเกิล กับค่า magnetostriction	24
รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพของสารอัลลอยด์ A-B	26
รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพสถานะของอัลลอยด์ระหว่างเหล็กกับโคบอลต์รวมถึงค่า μ_s	27
รูปที่ 2.24 สภาพความเป็นแม่เหล็กของฟิล์ม เนื่องจากการป้อนสนาม H	29
รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะฟิล์ม magnetoresistor ต่อสนามที่ป้อน	30
รูปที่ 2.26 ภาพจากออสซิลโลสโคปแสดงความต้านทานสำหรับสาร magnetoresistive	31
รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของ MR-Head	32
รูปที่ 2.28 แสดงผลตอบสนองระหว่างค่า ΔV กับ H ที่ bias ที่ 0° และ 45°	34
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head	35
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงบล็อกโคอะแกรมของเครื่องมือ MR Head Test Set	36
รูปที่ 3.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีการป้อนกลับแบบบวก	37
รูปที่ 3.4 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบพื้นฐาน ซึ่งให้สัญญาณแรมปีเดียว	38
รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม	39
รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของวงจรรายคลาสบี	40
รูปที่ 3.7 วงจรคลาสบี พูซ-พูล	41
รูปที่ 3.8 วงจรกำหนดแรงดัน	42
รูปที่ 3.9 วงจร voltage to current source	43
รูปที่ 3.10 balance generator	43
รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม	44
รูปที่ 3.12 ตัวยก offset	45
รูปที่ 3.13 วงจร voltage to current source	45
รูปที่ 3.14 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก	46
รูปที่ 3.15 วงจร Differential Hall sensor	47
รูปที่ 3.16 ภาพแสดง X-Y Recorder	48
รูปที่ 3.17 วงจรจ่ายกระแสให้กับ MRE	49
รูปที่ 3.18 วงจร Sweep current generator สำหรับ electromagnet	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 H || Plane of MR , $\theta = 0^\circ$	54
รูปที่ 4.2 H || Plane of MR , $\theta = 30^\circ$	55
รูปที่ 4.3 H || Plane of MR , $\theta = 45^\circ$	56
รูปที่ 4.4 H || Plane of MR , $\theta = 60^\circ$	57
รูปที่ 4.5 H || Plane of MR , $\theta = 90^\circ$	58
รูปที่ 4.6 H \perp Plane of MR , $\theta = 0^\circ$	59
รูปที่ 4.7 H \perp Plane of MR , $\theta = 45^\circ$	60
รูปที่ 4.8 H \perp Plane of MR , $\theta = 90^\circ$	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

คอมพิวเตอร์ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขนาดเล็กลง เพื่อให้สะดวก และเหมาะแก่การใช้งาน ดังนั้นอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในคอมพิวเตอร์จึงต้องมีขนาดเล็กลงไปด้วยเช่นเดียวกับฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดเล็กลง แต่มีความสามารถในการจุข้อมูลได้มากขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาขนาดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ให้มีขนาดเล็กลง เมื่อขนาดของหัวอ่านเล็กลงแล้วจะทำให้เนื้อที่ในการบันทึกเล็กลง จึงเปรียบเหมือนว่ามีจำนวน track ในฮาร์ดดิสก์มีปริมาณมากขึ้น โดยเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบันนี้จะเป็นหัวอ่านแบบ Inductive Head หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Thin Film Head ซึ่ง Inductive Head จะมีขดลวด Inductive (Inductive coil) ที่สามารถใช้ในการเขียน และการอ่านข้อมูลได้โดยใช้ขดลวดเดียวกัน จากการที่ Inductive Head ที่มีขนาดเล็กลง จะทำให้ประสิทธิภาพในการเขียนข้อมูลบนฮาร์ดดิสก์ได้มากขึ้นแต่มีข้อเสียที่การอ่านข้อมูลจะเกิดการ off-track เกิดขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ขึ้นมา คือเป็นหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head ที่ใช้แก้ไขข้อเสียของหัวอ่านแบบ Inductive Head นั่นคือ Magnetoresistive Head จะมีการแยกการเขียน และการอ่านข้อมูลแยกออกจากกัน โดยการเขียนยังคงใช้ลักษณะการเขียนแบบเดียวกับ Inductive Head แต่ในการอ่านจะใช้ MRE sensor (magneto resistive element) แทน เนื่องจาก MRE sensor จะมีประสิทธิภาพในการอ่านดีกว่า

จากการที่ได้มีการนำเอาหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head มาใช้ จึงต้องมีการสร้างเครื่องมือวัดหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head เพื่อศึกษาคุณลักษณะของหัวอ่านแต่ละตัวว่ามีความเหมาะสมในการใช้งานได้หรือไม่ ซึ่งเครื่องมือนี้คือ MR Head Test Set

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องมือ MR Head Test Set
2. เพื่อสร้าง MR Head Test Set โดยอาศัยหลักทางฟิสิกส์
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติ และประสิทธิภาพของหัวอ่าน Magnetoresistive Head แต่ละตัว โดยศึกษาถึงการเป็นเชิงเส้น และการสมมาตรของหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไป

1.2 วิธีดำเนินการ

เป็นการสร้างเครื่องมือ MR Head Test Set ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรจ่ายกระแส
2. Sweep Generator
3. แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก
4. Differential Hall Generator

และทำการวัดผลจาก MR Head และวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับทฤษฎี

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงทฤษฎี และหลักการเกี่ยวกับ magnetoresistive
2. ศึกษาถึงหลักการทำงานของวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และอุปกรณ์แต่ละส่วนที่นำมาใช้ในการสร้าง MR Head Test Set
3. ทราบถึงเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในด้านที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลในรูปแบบของงานทางด้านแม่เหล็ก เช่น งานทางด้านฮาร์ดดิสก์ รวมไปถึงหัวอ่านฮาร์ดดิสก์อีกด้วย

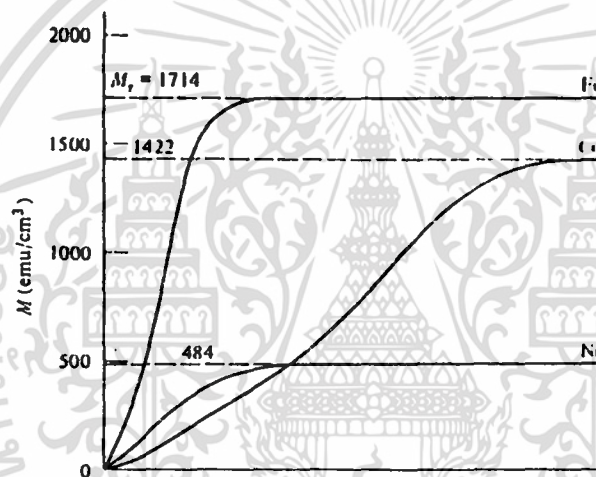


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาวะเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetism)

เส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของสารเฟอร์โรแมกเนติก คือเหล็ก, โคบอลต์, และนิกเกิล แสดงดังรูป 2.1 ซึ่งเส้นโค้งเหล่านี้เป็นสมมติฐานบางส่วน โดยแสดงค่าจากการทดลองของสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว M_s ของโลหะแต่ละชนิด แต่ไม่ได้แสดงค่าสนามไว้ จากกราฟทำให้ทราบรูปร่างของเส้นโค้งจาก $M=0$ ถึง $M=M_s$ และการอิ่มตัวที่ได้รับจากความแรงของสนามเป็นคุณสมบัติความไวของโครงสร้าง (structure-sensitive property) แต่ขนาดของ M_s ไม่เปลี่ยนแปลง



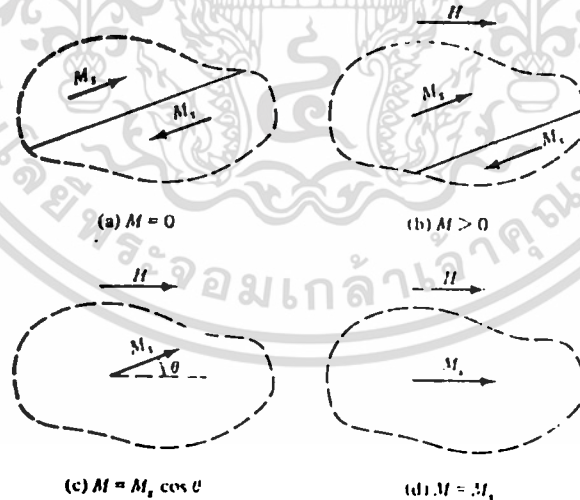
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กของเหล็ก, โคบอลต์ และนิกเกิลที่อุณหภูมิห้อง

ผลึกเดี่ยวของเหล็กบริสุทธิ์ (เรียงตัวอย่างเหมาะสม) สามารถไปสู่การอิ่มตัวด้วยพลังงานประมาณ 50 Oe โดยแต่ละลูกบาศก์เซนติเมตรมีโมเมนต์แม่เหล็กประมาณ 1700 emu ที่สนามค่าเดียวกันสารพาราแมกเนติกต่าง ๆ มีสภาพความเป็นแม่เหล็กประมาณ 10 emu/cm³

ภาวะเฟอร์โรแมกเนติกสามารถเข้าใจได้ด้วยสมมติฐานของสนามโมเลกุล (molecular field) ของเพียร์รี ไวสส์ (Pierre Weiss) (จะกล่าวต่อไปภายหลัง) โดยสมมติฐานนี้นำไปสู่กฎของกูรี-ไวสส์, $\chi = C/(T - \theta)$, ซึ่งเป็นที่ยอมรับของสารพาราแมกเนติกมากมาย จะเห็นว่า θ มีความสัมพันธ์กับสนามโมเลกุล H_m เพราะ $\theta = \gamma C$ และ $H_m = \gamma M$ ซึ่ง γ ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของสนามโมเลกุล ถ้า θ เป็นบวก นั่นคือ γ หมายถึง H_m และ M อยู่ในทิศเดียวกัน หรือสนามโมเลกุลช่วยป้อนสนามในการทำให้เป็นแม่เหล็กของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนืออุณหภูมิ T_c สารเฟอร์โรแมกเนติกจะกลายเป็นสารพาราแมกเนติก และค่าสภาพรับไว้ได้ (susceptibility) ของสารเป็นไปตามกฎของคูรี-ไวสส์ โดยมีค่า θ ประมาณเท่ากับ T_c ค่าของ θ มีขนาดใหญ่ และมีค่าเป็นบวก (มากกว่า 1000°K สำหรับเหล็ก) และเป็นสัมประสิทธิ์ของสนามโมเลกุล ไวสส์ได้สันนิษฐานว่า (1) สนามโมเลกุลกระทำในสารเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของสาร และที่อุณหภูมินี้เป็นค่าที่แรงพอที่ทำให้สารสามารถเป็นแม่เหล็กไปสู่อ้อมตัว เมื่อไม่มีการป้อนสนาม นั่นคือสารจะอ้อมตัวด้วยตัวเอง หรือทำให้เป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง (2) สารเฟอร์โรแมกเนติกในสภาวะทำลายสภาพแม่เหล็ก (demagnetize state) ถูกแบ่งออกเป็นจำนวนของพื้นที่เล็ก ๆ เรียกว่า เขต (domain) โดยแต่ละเขตถูกทำให้เป็นแม่เหล็กด้วยตัวเองไปทีละอ้อมตัว M_s แต่ทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กของเขตต่าง ๆ เป็นสารที่ทั้งหมดไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสุทธิ ขบวนการของสภาพความเป็นแม่เหล็กเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างหนึ่งของสารจากสภาวะหลายเขต (multi-domain state) เป็นเขตเดี่ยวที่ทำให้เป็นแม่เหล็กในทิศเดียวกับการป้อนสนาม ขบวนการนี้แสดงดังรูป 2.2 เส้นประใน (a) ปิดส่วนหนึ่งของผลึกซึ่งมี 2 เขต; ขอบเขตที่แยกเขต เรียกว่า ผนังเขต (domain wall) โดยเขตทั้งสองถูกทำให้เป็นแม่เหล็กด้วยตัวเองในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นสภาพความเป็นแม่เหล็กของส่วนนี้ของผลึกมีค่าเป็นศูนย์ ใน (b) มีการป้อนสนาม H เข้าไป เป็นสาเหตุให้เขตส่วนบนมีขนาดใหญ่กว่าเขตส่วนล่าง เนื่องจากการเคลื่อนที่ลงต่ำของผนังเขตจนกระทั่ง ใน (c) เขตแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ที่พิจารณา จนในที่สุด (ยังคงป้อนสนามค่าสูงขึ้น) สภาพความเป็นแม่เหล็กจะหมุนในทิศขนานกับสนามที่ป้อนเข้าไป และสารจะอ้อมตัว คือใน (d) ระหว่างขบวนการนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสภาพความเป็นแม่เหล็กของพื้นที่



รูปที่ 2.2 ขบวนการของสภาพความเป็นแม่เหล็ก

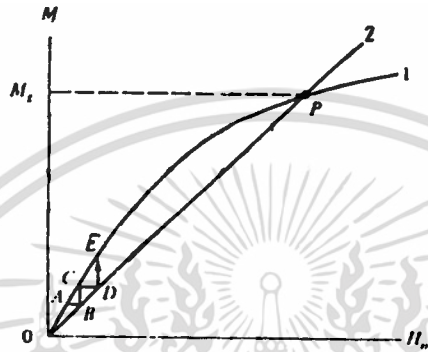
ทฤษฎีของไวสส์นำสมมติฐานทั้งสองมาบรรจุด้วยคือ (1) สภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง (2) การแบ่งเขต ซึ่งมีการทดสอบสมมติฐานทั้งสองแล้วว่าเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 สนามโมเลกุล

พิจารณาสารซึ่งแต่ละอะตอมมีโมเมนต์สุทธิ สมมติสภาพความเป็นแม่เหล็กของสารเพิ่มขึ้นด้วยสนาม (ที่อุณหภูมิคงที่) สอดคล้องกับเส้นโค้งเส้นที่ 1 ของรูป 2.3 ซึ่งเหมือนกับสารเป็นสารพาราแมกเนติก และสมมติว่าสนามที่กระทำบนวัตถุเป็นสนามโมเลกุล H_m แปรผันกับสภาพความเป็นแม่เหล็ก

$$H_m = \gamma M \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 สภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเองโดยสนามโมเลกุล

กราฟเส้นที่ 2 ในรูป 2.3 คือกราฟของสมการนี้ และมีความชัน คือ $1/\gamma$ สภาพความเป็นแม่เหล็กซึ่งสนามโมเลกุลจะผลิตในวัตถุที่กำหนด โดยจุดตัดของเส้นโค้งเส้นที่ 2 เส้น ซึ่งมีจุดตัด 2 จุด คือ จุดหนึ่งที่จุดเริ่มต้น และอีกจุดหนึ่งที่จุด P อย่างไรก็ตามที่จุดเริ่มต้นจะเป็นสภาวะไม่เสถียรภาพ เช่นถ้า M เป็นศูนย์ และสนามที่ป้อนเบาบางมาก (สนามของโลก) จะกระทำสม่ำเสมอชั่วขณะหนึ่งบนวัตถุ ซึ่งถูกทำให้เป็นแม่เหล็กที่จุด A แต่ถ้า $M = A$ เส้นที่ 2 ได้ H_m คือ B แต่ความแรงของสนามนี้จะผลิตสภาพความเป็นแม่เหล็กของ C ดังนั้น M จะผ่านค่า 0, A, C, E, จนถึง P ซึ่ง P คือจุดของความไม่เสถียรภาพ เพราะเมื่อสภาพความเป็นแม่เหล็กมากกว่าจุด P มันจะสามารถกลับสู่จุด P ด้วยตัวเอง โดยไม่มีการป้อนสนาม นั่นคือสารจะเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเองไปยังระดับ P ซึ่งเป็นค่าของ M_s สำหรับอุณหภูมิหนึ่ง ๆ

จากการพล็อตกราฟรูป 2.3 อีกครั้งหนึ่ง โดยให้ค่า a เปลี่ยนแปลงตาม H_m ซึ่ง $a = \mu H / kT$ เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในทฤษฎีของสภาวะพาราแมกเนติก (paramagnetism) ทำให้ทราบความประพฤติที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พิจารณาจากไวส์สลับสนุนว่าความสัมพันธ์ทางสภาพความเป็นแม่เหล็กถูกกำหนดโดยฟังก์ชันแลงวิน (Langevin function)

$$M / M_0 = L(a) = \coth(a) - (1/a) \quad (2.2)$$

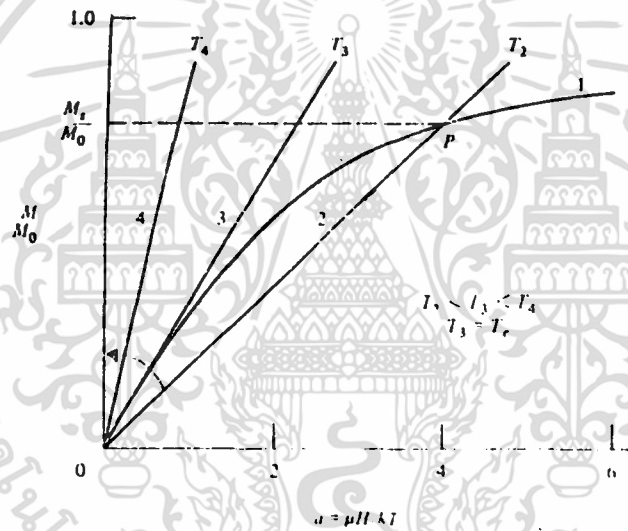
(ต่อมาจะแทนที่สิ่งนี้ด้วยความสัมพันธ์ทาง quantum-mechanical กล่าวคือฟังก์ชันบริลลูวาน (Brillouin function)) เมื่อสนามที่ป้อน คือศูนย์ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \frac{\mu H_m}{kT} = \frac{\mu \gamma M}{kT} = \frac{\mu \gamma M M_0}{k T M_0} \quad (2.3)$$

$$\frac{M}{M_0} = \left(\frac{kT}{\mu \gamma M_0} \right) a \quad (2.4)$$

M/M_0 คือฟังก์ชันเชิงเส้นของ a ด้วยความชันที่แปรผันกับค่าสมบรูณ์ของอุณหภูมิจนในรูป 2.4 เส้นโค้งเส้นที่ 1 คือฟังก์ชันแลงวิน และเส้นที่ 2 คือกราฟของสมการ (2.4) สำหรับอุณหภูมิ T_2 จุดตัดของเส้นโค้งทั้งสองที่จุด P ให้ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้นเอง M_s/M_0 ใ้รับที่อุณหภูมิ T_2 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนโดยมีค่ามากกว่า T_2 มีผลของการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของเส้นที่ 2 รอบจุดเริ่มต้น สาเหตุการหมุน คือ P และสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ตรงกันเคลื่อนที่ต่ำกว่าเส้นโค้งแลงวิน สภาพความเป็นแม่เหล็กจะหมดไปที่อุณหภูมิ T_3 เมื่อเส้นอยู่ในตำแหน่ง 3 ค่า tangent เข้าสู่เส้นโค้งแลงวินที่จุดเริ่มต้น T_3 มีค่าเท่ากับอุณหภูมิคูรี T_c ที่อุณหภูมิสูงขึ้น เช่น T_4 สารจะเป็นสารพาราแมกเนติก เพราะสารไม่สามารถเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง



รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิจนที่มีผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง โดยเส้นโค้งเส้นที่ 1 เป็นฟังก์ชันแลงวิน

อุณหภูมิกูรีสามารถหาค่าจากความชันของเส้นที่ 3 ซึ่งเหมือนกับเส้นโค้งแลงวิน ที่จุดเริ่มต้น คือ $1/3$ แทน T ด้วย T_c ได้

$$T_c = \frac{kT}{\mu \gamma M_0} = \frac{\mu \gamma M_0}{3k} \quad (2.5)$$

ดังนั้นความชันของเส้นตรงแสดงให้เห็นสนามโมเลกุล (ที่อุณหภูมิต่าง ๆ)

$$\frac{kT}{\mu \gamma M_0} = \frac{T}{3T_c} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ความชันของเส้นกำหนดจุดตัด P ด้วยเส้นโค้งแลงวิน นั่นคือค่า M_s/M_0 ดังนั้น M_s/M_0 ถูกกำหนดโดยอัตราส่วน T/T_c ซึ่งหมายความว่าสารเฟอร์โรแมกเนติกทั้งหมดซึ่งมี M_0 และ T_c แตกต่างกัน จะมีค่า M_s/M_0 เหมือนกันสำหรับค่าเฉพาะของ T/T_c เรียกว่ากฎของสภาพตรงกัน (corresponding state)

การกำหนดกฎนี้เข้าใกล้ความจริงมาก แต่ไม่ถูกต้องสมบูรณ์ คือพิจารณาจำนวน n ของอะตอมต่อหน่วยปริมาตร และตั้งค่า $n\mu = M_0$ แต่ n เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเพราะการกระจายของอุณหภูมิ ดังนั้นค่า M/M_0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ เพราะมีจำนวนของอะตอมต่างกัน เมื่อให้สภาพความเป็นแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ หน่วยที่เป็นกลางที่ต้องใช้มากกว่า คือสภาพความเป็นแม่เหล็กพิเศษ σ (เป็นโมเมนต์แม่เหล็กต่อกรัม) เพราะไม่จำเป็นต้องรู้ความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ถ้า n_g คือจำนวนของอะตอมต่อกรัม และ $\bar{\mu}$ คือส่วนประกอบเฉลี่ยของโมเมนต์แม่เหล็กในทิศทางของสนาม ดังนั้นสามารถเขียนเป็น

$$\frac{n_g \bar{\mu}}{n_g \bar{\mu}} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \coth a - \frac{1}{a} \quad (2.7)$$

ถ้ากำหนด (สำหรับสารเฟอร์โรแมกเนติก) σ_s และ σ_0 คือสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวที่ T K และ 0 K ตามลำดับ จากการอธิบายกฎของสภาพตรงกัน คือสารทั้งหมดมีค่า σ_s/σ_0 เหมือนกันสำหรับค่า T/T_c เหมือนกัน ความสัมพันธ์ระหว่าง σ และ M คือ

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_0} = \frac{M_s / \rho_s}{M_0 / \rho_0} = \frac{M_s \rho_0}{M_0 \rho_s} \quad (2.8)$$

เมื่อ ρ_s และ ρ_0 คือความหนาแน่นที่ T K และ 0 K ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงจาก M ไป σ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงในค่าคงที่สนามโมเลกุล γ

$$H_m = \gamma M = \gamma \rho (M / \rho) = (\gamma \rho) \sigma \quad (2.9)$$

ดังนั้น $(\gamma \rho)$ เป็นค่าคงที่สนามโมเลกุล และสมการ (2.5) และ (2.6) เป็น

$$T_c = \frac{\mu \gamma \rho \sigma_0}{3k} \quad (2.10)$$

และ

$$\frac{kT}{\mu \gamma \rho \sigma_0} = \frac{T}{3T_c} \quad (2.11)$$

ดังนั้นสมการ (2.4) เป็น

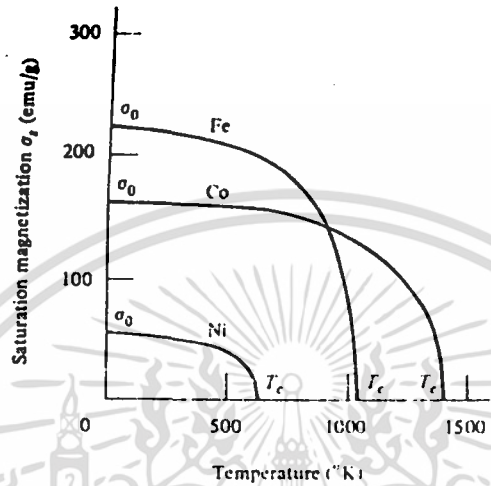
$$\frac{\sigma}{\sigma_0} \left(\frac{kT}{\mu \gamma \rho \sigma_0} \right) a = \left(\frac{T}{3T_c} \right) a \quad (2.12)$$

เมื่อสภาพความเป็นแม่เหล็กแสดงในเทอมของ σ

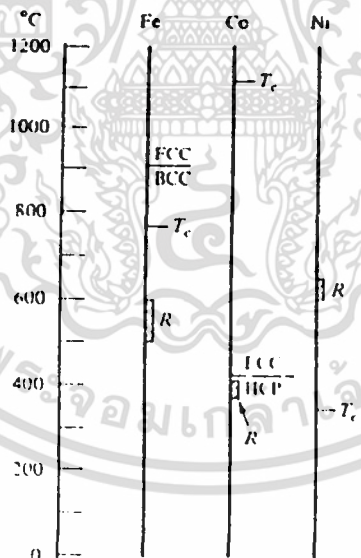
ข้อมูลจากการทดลองบนการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว ρ_s ของ Fe, Co, และ Ni ด้วยอุณหภูมิ แสดงดังรูป 2.5 (มาตราส่วนของอุณหภูมิ แสดงดังรูป 2.6 โดยให้อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิของเฟสที่เปลี่ยนแปลง และการตกผลึกใหม่ (recrystallization) สำหรับโลหะทั้งสาม อุณหภูมิของการตกผลึกใหม่เป็นอุณหภูมิที่ประมาณต่ำสุด ซึ่งสารจะตกผลึกใหม่ ดังนั้นเหล็ก และ โคบอลต์สามารถตกผลึกใหม่ได้ขณะยังเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก แต่นิกเกิลไม่สามารถ) เส้นโค้ง ทั้งสามของรูป 2.5 มีรูปร่างคล้ายคลึงกัน และเมื่อข้อมูลถูกพล็อตอีกครั้งในรูปแบบของ σ_s/σ_0 กับ T/T_c ดังรูป 2.7 ซึ่งจุดที่ได้เหมือนกับเส้นเดี่ยวที่ปิด



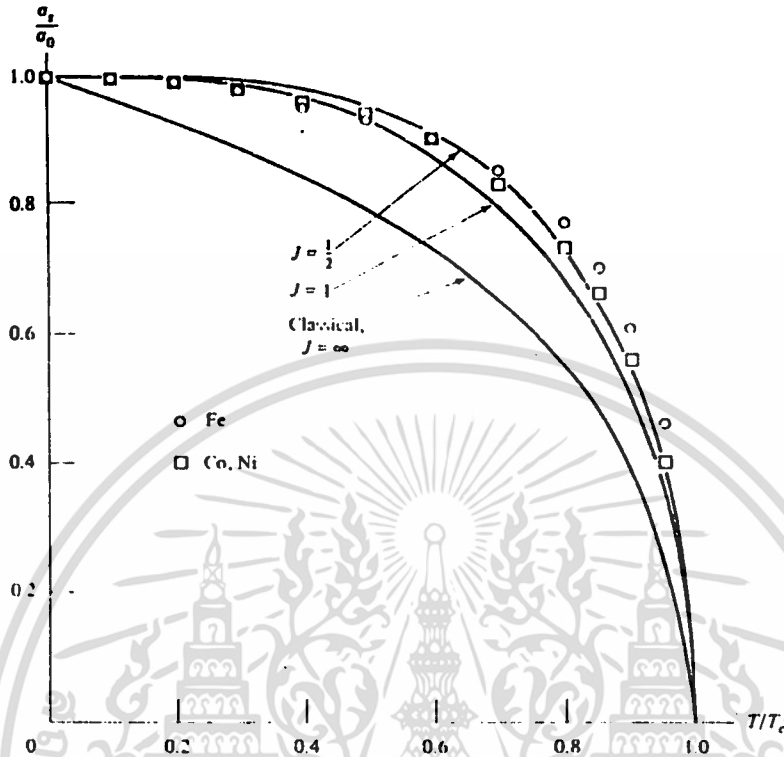
รูปที่ 2.5 สภาพความเป็นแม่เหล็กของ Fe, Co, และ Ni เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.6 อุณหภูมิ (T) อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (R) และการเปลี่ยนแปลงเฟสใน Fe, Co และ Ni (โครงสร้างผลึก : BCC, body-centered cubic : FCC, face-centered cubic : HCP, hexagonal close-packed) โดยนิกเกิลเป็น FCC ที่ทุกอุณหภูมิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของไวสส์สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบใหม่ โดยสมมติสนามโมเลกุลกระทำบนสารที่มีความสัมพันธ์ของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่กำหนดโดยฟังก์ชันทาง quantum-mechanical ของบริลล์วาน $B(J, a')$ ในเทอมของสภาพความเป็นแม่เหล็กพิเศษ ได้



รูปที่ 2.7 สภาพความเป็นแม่เหล็กอ้อมตัวสัมพันธ์ของ Fe, Co, และ Ni เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสัมพัทธ์ โดยจุดเป็นผลจากการทดลอง และเส้นโค้งเป็นผลจากการคำนวณ

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J} a'\right) - \frac{1}{2J} \coth\frac{a'}{2J} \tag{2.13}$$

เมื่อ $a' = \mu_H H / kT$ ดังนั้นเส้นตรงที่แสดงสนามโมเลกุลกำหนดโดย

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{kT}{\mu_H \gamma \rho \sigma_0}\right) a' \tag{2.14}$$

ความชันของฟังก์ชันบริลล์วาน ที่จุดเริ่มต้น คือ $(J+1) / 3J$ ดังนั้นอุณหภูมิคูรี คือ

$$T_c = \left(\frac{\mu_H \gamma \rho \sigma_0}{k}\right) \left(\frac{J+1}{3J}\right) \tag{2.15}$$

$$= \frac{g(J+1) \mu_H \gamma \rho \sigma_0}{3k} \tag{2.16}$$

สมการของเส้นสนามโมเลกุลสามารถเขียนเป็น

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{J+1}{3J}\right) \left(\frac{T}{T_c}\right) a' \tag{2.17}$$

ค่าของความสัมพันธ์สภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเอง σ_s / σ_0 ที่เป็นฟังก์ชันของ T/T_c สามารถพบจากการตัดกันของเส้นโค้งของสมการ (2.13) และเส้นตรงของสมการ (2.17) สำหรับแต่ละค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ J จะพบความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน โดยค่าเฉพาะ $J = 1/2$ เป็นค่าที่สนใจเป็นพิเศษ ดังนั้นสมการ (2.13) และ (2.17) เป็น

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \tanh a' \quad (2.18)$$

และ

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{T}{T_c} a' \quad (2.19)$$

สามารถประกอบกันโดยให้

$$\left| \frac{\sigma_s}{\sigma_0} = \tanh \frac{(\sigma_s / \sigma_0)}{T / T_c} \right| \quad (2.20)$$

ซึ่งสามารถแก้ปัญหาสำหรับ σ_s / σ_0 ที่เป็นฟังก์ชัน T / T_c โดยหมายถึงตารางของ hyperbolic tangent ซึ่งเป็นรูปแบบ $y = \tanh (y/x)$ เส้นโค้งตามทฤษฎีสำหรับ $J = 1/2$ และ $J = 1$ ถูกพล็อตดังรูป 2.7 และจากการทดลองก็สามารถได้ผลตรงกับทฤษฎีพอสมควร

จากที่กล่าวมาเป็นการป้อนสนามเท่ากับศูนย์ และพิจารณาผลของสนามโมเลกุลเท่านั้น ถ้ามีการป้อนสนาม H เข้าไป สนามทั้งหมดที่กระทำบนสาร คือ $(H+H_m)$ เมื่อ H หมายถึงสนามที่ป้อนเข้าไปจริง ได้

$$a' = \frac{\mu_H (H + H_m)}{kT} = \frac{\mu_m (H + \gamma \rho \sigma)}{kT} \quad (2.21)$$

สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{kT}{\mu_H \gamma \rho \sigma_0} \right) a' - \frac{H}{\gamma \rho \sigma_0} \quad (2.22)$$

เส้นตรงที่ได้จะขนานกับเส้นที่ได้จากสมการ (4.14) แต่เคลื่อนที่ต่ำลง โดยเส้นตรงที่ 4 แสดงสนามโมเลกุลอย่างเฉิว ขณะเส้นปะ 2' และ 4' แสดงสนามโมเลกุล และสนามที่ป้อนเข้าไป ยกตัวอย่างเหนือจุดคูรี ที่ $T = 1.2T_c$ ผลของการป้อนสนาม คือการเคลื่อนจุดตัดของเส้นสนาม และเส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กจากจุดเริ่มต้นไปที่จุด B และจากการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็กนี้ ค่าสภาพรับไว้ได้สามารถคำนวณได้ ด้วยเหตุที่พิจารณาในขอบเขตใกล้จุดเริ่มต้นเท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันบริลลวานสามารถประมาณเป็นเส้นตรง

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{J+1}{3J} \right) a' \quad (2.23)$$

ถ้าจัดค่า a' จากสมการ (2.22) และ (2.23) ได้

$$\chi = \frac{\sigma}{H} = \frac{\mu_H \sigma_0 (J+1) / 3kJ}{T - [\mu_H \gamma \rho \sigma_0 (J+1) / 3kJ]} \quad (2.24)$$

ซึ่งมีรูปแบบของกฎคูรี-ไวส์ $\chi = C / (T - \theta)$ ได้

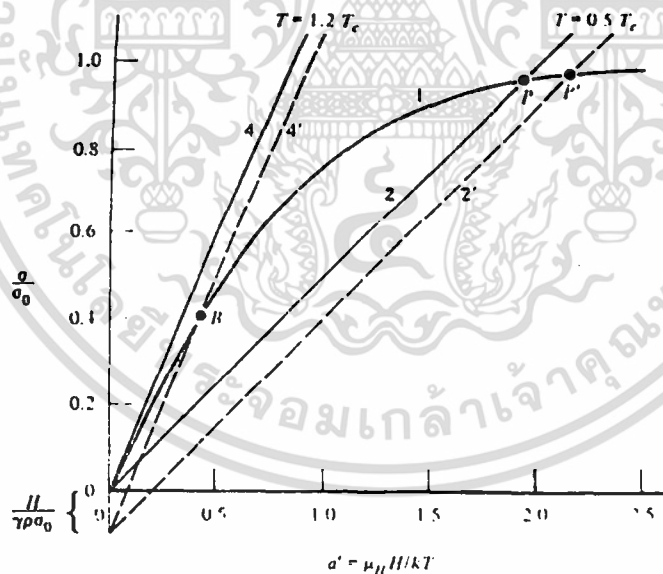
$$C = \frac{\mu_H \sigma_0 (J+1)}{3kJ} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta = \frac{\mu_H \gamma p \sigma_0 (J+1)}{3kT} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.15) และ (2.26) ซึ่งให้เห็นว่าจากทฤษฎีสถานโมเลกุล ที่ T_c เป็นอุณหภูมิซึ่งสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเองมีค่าเป็นศูนย์ และที่ θ เป็นอุณหภูมิที่สภาพรับไว้ได้มีค่านันต์

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกูรี เช่นที่อุณหภูมิต่ำ ในสารเฟอร์โรแมกเนติกส่วนมากจะมีการป้อนสนามค่ามาก ๆ แต่มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในสภาพรับไว้ได้ด้วยตัวเอง σ_s หรือ M_s ที่ได้จากสนามโมเลกุล ดังนั้นสำหรับ $T = 0.5T_c$ เส้นที่ 2 ในรูป 2.8 จะเลื่อนไปที่ตำแหน่ง 2' เมื่อมีการป้อนสนาม แต่การเพิ่มขึ้นของสภาพความเป็นแม่เหล็กจาก P ไป P' มีค่าน้อยมาก เพราะเส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีลักษณะราบในช่วงนี้ การเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติกจาก 0 ถึง σ_s หรือ M_s (ที่อุณหภูมิต่ำ) จะต้องป้อนสนามสองสามร้อยจนถึงสองสามพันเออร์สเต็ด (Oe) (ในส่วนนี้การป้อนสนาม หมายถึงสนามจริงที่กระทำในสาร ซึ่งแตกต่างระหว่างสนามที่ป้อนอย่างแท้จริง และสนามที่ทำลายสภาพแม่เหล็ก) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสารเหมือนกับแต่ละเซตอยู่ในสภาวะทำลายสภาพแม่เหล็ก และกล่าวได้ว่าสารอยู่ในสภาวะของการอิมิตัว ถ้าต้องการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กมากกว่าไปจากจุดนี้ต้องใช้สนาม 10^5 - 10^6 Oe หรือมากกว่า และการเพิ่มนี้เรียกว่าสภาพความแรงของแม่เหล็ก (forced magnetization) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กของเซตของตัวเอง



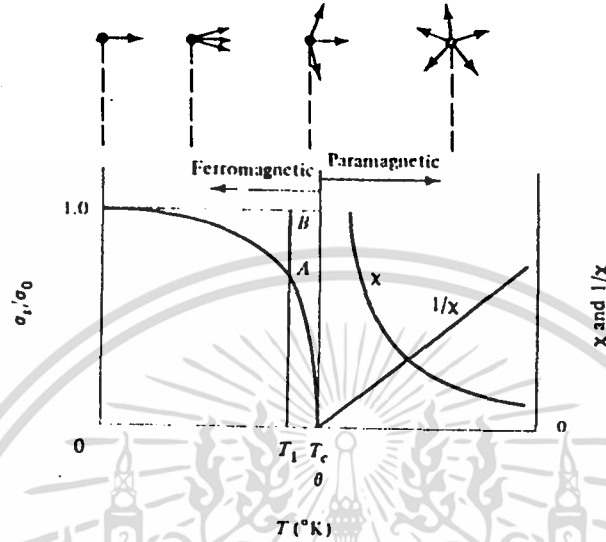
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิต่ำ และการป้อนสนามที่มีผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็ก โดยเส้นโค้งเส้นที่ 1 เป็นฟังก์ชันบริลล์วาน สำหรับ $J = 1/2$

สภาพความแรงของแม่เหล็กที่มากกว่าค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง เรียกว่าขบวนการพารา (para-process) ซึ่งแสดงให้เห็น (ที่อุณหภูมิต่ำ T_c) โดยจุดที่วางไปตามเส้น AB ของรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กที่มากกว่าค่า σ_s ได้จากการให้ค่าสนามมากขึ้นค่าปิด T_i คือ ไปถึงอุณหภูมิคูรี

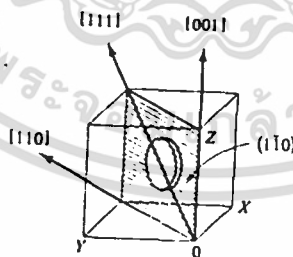
รูป 2.9 สรุปถึงผลของอุณหภูมิสนามโมเลกุล และอุณหภูมิ θ ที่สภาพรับไว้ได้ χ มีค่า อนันต์ และ $1/\chi$ มีค่าเป็นศูนย์ คืออุณหภูมิ T_c ที่ทำให้เกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยตัวเอง



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็ก และสภาพรับไว้ได้ที่ต่ำกว่า และสูงกว่าอุณหภูมิคูรี ส่วนภาพเล็ก ๆ ที่ ส่วนบนชี้ให้เห็นถึงการแจกแจงทิศทางของสปิน (spin) แบบดั้งเดิมในการเปลี่ยนสนามค่าศูนย์ภายในเขตเดียว (ต่ำกว่า T_c) และในกลุ่มของอะตอม (เหนือกว่า T_c)

2.2 Anisotropy ทางแม่เหล็ก

2.2.1 Anisotropy ในผลึกลูกบาศก์

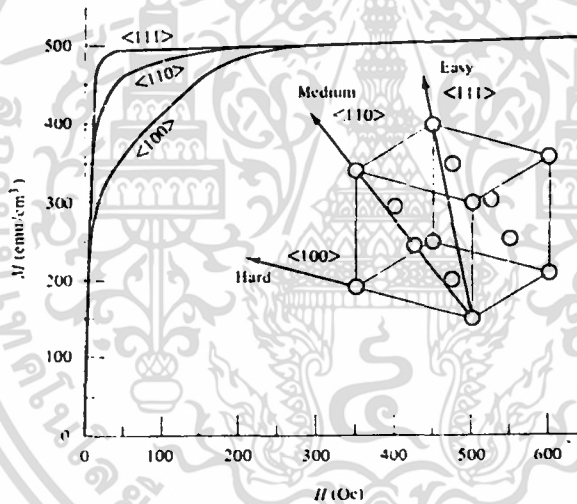
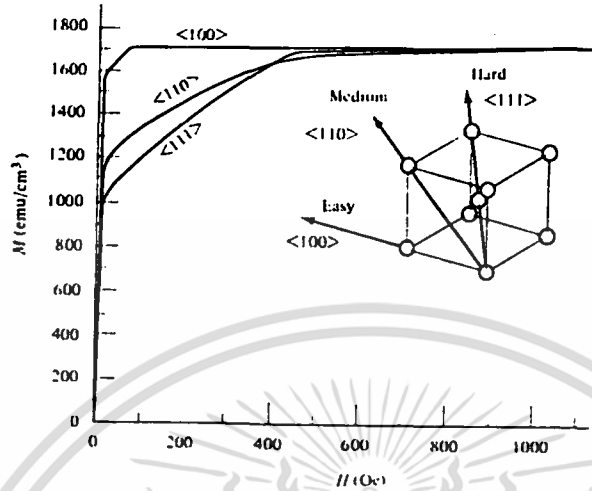


รูปที่ 2.10

สมมติให้ผลึกเดี่ยวถูกตัดให้เป็นรูปแบบของจาน (disk) ที่ขนานกับระนาบ {110} ซึ่งสารนี้มีทิศทาง $\langle 100 \rangle$ $\langle 110 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ โดยทิศทาง $\langle 111 \rangle$ เป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังแสดงดังรูปที่ 2.10 สำหรับระนาบ (110) การวัดเส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กไปตามเส้นผ่าศูนย์กลางนี้ (ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของงาน) ให้ความรู้ที่เกี่ยวข้อกับทิศทางที่เกี่ยวข้องกับรูปผลึก (crystallographic) ที่สำคัญ 3 ทิศทาง เช่น เหล็กที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีศูนย์กลางลูกบาศก์ (body-centered cubic) แสดงดังรูป 2.11 (a) และสำหรับนิกเกิลที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีศูนย์กลางผิวน้ำ (face-centered cubic) แสดงดังรูป 2.11 (b)

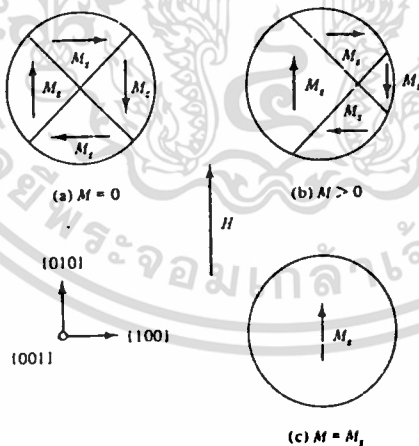


รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งสภาพความเป็นแม่เหล็กของผลึกเดี่ยวของ (a) เหล็ก และ (b) นิกเกิล

การวัดสภาพความเป็นแม่เหล็กสำหรับเหล็ก แสดงถึงสภาวะคงตัวที่ได้รับจากสนามค่าต่ำ ประมาณไม่กี่สิบลี Oersteds ในทิศทาง <100> ทั้งหมด เรียกว่าทิศทางอย่างง่าย (easy direction) ของสภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสิ่งนี้ออกถึงบางสิ่งที่เกี่ยวข้องกับเขตของเหล็กในสภาวะทำลาย สภาพแม่เหล็ก ต่อมาได้เป็นที่รู้จักว่าเป็นผนังเขตที่แยกออกเป็น 2 เขตในผลึกที่สามารถเคลื่อนที่ โดยการป้อนสนามค่าต่ำ ถ้าสมมติว่าเขตในเหล็กที่ทำลายสภาพแม่เหล็กถูกทำให้เป็นแม่เหล็ก ด้วยตัวเองไปสู่การอิมิตวในทิศทาง <100> ดังนั้นโครงสร้างเขตที่เป็นไปได้สำหรับผลึกรูปงานที่ทำลายสภาพแม่เหล็กตัดขนาน (001) แสดงดังรูป 2.12(a) โดยมีเขต 4 แบบ ซึ่งเขตจะทำให้เป็นแม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กขนานกับทิศทางอย่างง่ายทั้ง 4 ทิศทางของทิศทางอย่างง่าย 6 ทิศทาง นั่นคือ [010] , [100] , [010] และ [100] (ความเป็นจริงผลึกรูปงานของเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร จะมีเขตมากมาย ซึ่งมากกว่าเขต 4 แบบที่แสดงไว้ อย่างไรก็ตามเขตมากมายเหล่านี้จะเหมือนกับเขต 4 แบบนี้เท่านั้น กล่าวคือ เขตมากมายเหล่านี้ คือ เวกเตอร์ M_x ในทิศ [010] , [100] , [010] และ [100] โดยภาพคร่าว ๆ ของเขตเหมือนกับรูป 2.11 ซึ่งทำให้เข้าใจง่าย แต่ภาพนี้จะมีส่วนรายละเอียดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณา) ถ้าสนาม H ถูกป้อนในทิศทาง [010] ดังนั้นเขต [010] จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของการเคลื่อนที่ของผนังเขต ดังแสดงดังรูป 2.12 (b) ที่เป็นเช่นนี้เพราะพลังงานศักย์ของแม่เหล็กของผลึกมีค่าต่ำกว่า จากสมการ $E_p = -mH \cos \theta$ แสดงถึงพลังงานของเขต [010] คือ $-M_x H$ ต่อหน่วยปริมาตร , เขต [010] คือ $+M_x H$ และเขต [100] หรือ [100] เป็นศูนย์ เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กป้อนอย่างต่อเนื่อง เขตที่ได้รับและผลึกจะอึดตัว (รูป 2.12 (c)) ซึ่งการอึดตัวนี้ทำได้โดยการป้อนสนามค่าต่ำสำหรับการเคลื่อนที่ของผนังเขต ถ้าการทดลองมีการป้อนสนามค่าต่ำให้กับเหล็ก แล้วได้ผลึกที่อึดตัวในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ จะสรุปได้ว่าโครงสร้างเขตหลักถูกต้อง และยิ่งไปกว่านั้นจะได้ทิศของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างง่าย (easy magnetization) ของผลึกเป็นทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กเขต (domain magnetization) ที่เกิดขึ้นเองในสภาวะทำลายสภาพแม่เหล็ก สำหรับนิกเกิล ในรูป 2.11 (b) แสดงทิศของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างง่าย คือ $\langle 111 \rangle$ ซึ่งเป็นเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ของหน่วยเขต

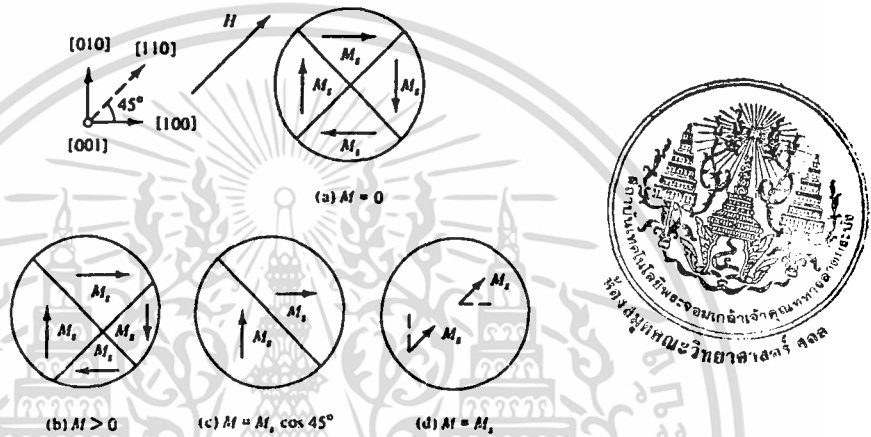


รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเขตของผลึกของเหล็ก โดยมี H อยู่ในทิศ [010]

รูป 2.11 (a) แสดงถึงการป้อนค่าสนามที่สูงพอสมควร (อันดับไม่กี่ร้อยเออร์สเต็ด) จะได้ว่า เหล็กในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ เกิดสภาวะที่อึดตัว ซึ่งการจัดเรียงตัวเมื่ออยู่ในสนามจะมีโครงสร้างเขตเปลี่ยนแปลง ดังรูป 2.13 การเคลื่อนที่ของผนังเขต (ในสนามค่าต่ำ) เกิดขึ้นจนกระทั่งมี 2 เขตหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นเท่านั้น (รูป 2.13 (c)) ซึ่งแต่ละส่วนมีพลังงานศักย์เหมือนกัน ดังนั้นการเพิ่มสภาพความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ด้วยการหมุนของเวกเตอร์ M_x และเขตแต่ละส่วน จนกระทั่งขนานกับสนามที่ป้อนเข้าไป ขบวนการนี้เรียกว่า การหมุนของเขต (domain rotation) (ปกติเขตซึ่งเป็นเป็นกลุ่มของอะตอมจะไม่หมุน จะมีก็แต่โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของอะตอมหมุน) การหมุนของเขตเกิดขึ้นในสนามที่มีค่าสูงพอเท่านั้น เพราะสนามจะต้านแรง anisotropy ของผลึก ซึ่งตามปกติเป็นค่าที่แรงพอสมควร Anisotropy ของผลึกถูกพิจารณาเป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่มีรูปแบบที่แน่นอนของผลึก เมื่อขบวนการหมุนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (รูป 2.13 (d)) เขตแม่เหล็กใน (c) จะไม่ปรากฏ และผลึกจะอิมิตัว



รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเขตของผลึกของเหล็ก โดยมี H อยู่ในทิศ [110]

เนื่องจากสนามที่ป้อนเข้าไปจะต้านแรง anisotropy เพื่อเปลี่ยนเวกเตอร์สภาพความเป็นแม่เหล็กออกจากทิศทางอย่างง่ายโดยมีค่าเท่ากับพลังงานสะสมในผลึก ซึ่งเป็นจุด M_s ในทิศทางไม่ง่าย (noneasy direction) สิ่งนี้เรียกว่าพลังงาน anisotropy ของผลึก E ซึ่ง E แสดงในเทอมของการกระจาย อนุกรมของทิศ โคไซน์ของความสัมพันธ์ M_x ไปสู่แกนผลึกในผลึกรูปลูกบาศก์ ให้ M_x กำหนดมุม a, b, c ตามแกนผลึก และให้ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ เป็นโคไซน์ของแต่ละมุม

$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) + \dots \quad (2.27)$$

เมื่อ K_1, K_2, K_3, \dots เป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับวัสดุแต่ละชนิด และถูกแสดงในหน่วย ergs/cm³ ค่าค่าตั้งที่สูงกว่ามักไม่ต้องการ และบางครั้ง K_2 มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้ เทอมแรก คือค่า K_0 จะไม่ขึ้นกับมุม และมักไม่สนใจ เพราะตามปกติจะสนใจถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงาน E เมื่อเวกเตอร์ M_x หมุนจากทิศทางหนึ่งไปอีกทิศทางหนึ่งเท่านั้น ตาราง 2.1 กำหนดค่า E เมื่อเวกเตอร์ M วางอยู่ในทิศทางเฉพาะ [u v w]

เมื่อ K_2 เป็นศูนย์ ทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างง่ายถูกกำหนดโดยเครื่องหมายของ K_1 ถ้า K_1 เป็นบวก ดังนั้น $E_{100} < E_{110} < E_{111}$ และ <100> เป็นทิศทางอย่างง่าย เพราะ E มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยสุด เมื่อ M_1 อยู่ในทิศทางนั้น ดังนั้นเหล็ก มีค่า K_1 เป็นบวก ถ้า K_1 เป็นลบ $E_{111} < E_{110} < E_{100}$ และ $\langle 111 \rangle$ เป็นทิศทางอย่างง่าย ดังนั้นนิกเกิล จะมีค่า K_1 เป็นลบ

เมื่อ K_2 ไม่เป็นศูนย์ ทิศทางอย่างง่ายถูกกำหนดด้วยค่า K_1 และ K_2 ซึ่งค่าที่ทั้งสองจะกำหนดทิศของสภาพควา เป็นแม่เหล็กอย่างง่าย, ปานกลาง, และยาก ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.1 พลังงาน anisotropy ของผลึก สำหรับผลึกรูปลูกบาศก์ในทิศทางต่างๆ กัน

[u v w]	a	b	c	α_1	α_2	α_3	E
[100]	0°	90°	90°	1	0	0	K_0
[110]	45°	45°	90°	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	0	$K_0 + K_1/4$
[111]	54.7°	54.7°	54.7°	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$K_0 + K_1/3 + K_2/27$

ตาราง 2.2 ทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างง่าย, ปานกลาง, และยากในผลึกรูปลูกบาศก์

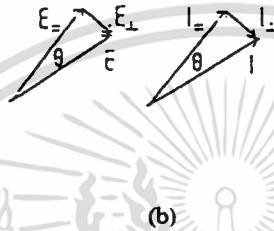
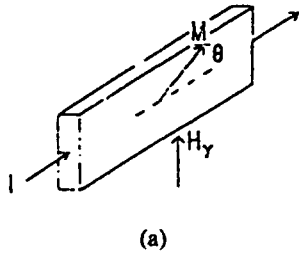
K_1	+	+	+	-	-	-
K_2	$+\infty$ ถึง	$-9K_1/4$	$-9K_1$	$-\infty$ ถึง	$9|K_1|/4$	$9|K_1|$
	$-9K_1/4$	ถึง $-9K_1$	ถึง $-\infty$	$9|K_1|/4$	ถึง $9|K_1|$	ถึง $+\infty$
ง่าย	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$
ปานกลาง	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 100 \rangle$
ยาก	$\langle 111 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$

2.1.2 ผลของ Anisotropic ในฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic films)

พิจารณา stripe ที่มีขนาดยาวถูกกัด (etch) ด้วยฟิล์มแม่เหล็ก (magnetic film) โดยมีสภาพความเป็นแม่เหล็ก M เหมือนกันในระนาบของฟิล์ม และกระแส J ที่ไหลเหมือนกัน (รูป 2.14 (a)) จากมุมมองของรูป แหล่งกำเนิดของกระแสไหลออกจากสนาม และมีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ไฟฟ้าสูง จนกระทั่ง J ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงแม่เหล็กไฟฟ้า (galvanomagnetic) เล็ก ๆ ในค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทาน แรงดัน $V = Ed$ เป็นการวัดค่าความต้านทานของ stripe และอาจพิจารณาถึง สัญญาณ magnetoresistive



รูปที่ 2.14 (a) ส่วนหนึ่งของ stripe ที่เป็นฟิล์ม magnetoresistance ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส J และ สภาพความเป็นแม่เหล็ก M ในระนาบฟิล์ม (b) ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า E และกระแส J ขนาน และตั้งฉากกับสภาพความเป็นแม่เหล็ก

ข้อสันนิษฐานในรูป 2.14 (a) คือ สนามแม่เหล็กภายนอกที่อ้อมตัวถูกป้อนเข้าไป และมีทิศทางในระนาบของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นมุม θ ของสภาพความเป็นแม่เหล็ก M เปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งสามารถแยก E และ J ออกได้ ดังรูป 2.14 (b) เมื่อเป็นส่วนประกอบที่ขนาน และตั้งฉากกับ M

$$E = E_{\parallel} \cos \theta + E_{\perp} \sin \theta$$

$$= \rho_{\parallel} J_{\parallel} \cos \theta + \rho_{\perp} J_{\perp} \sin \theta$$

ซึ่ง $J_{\parallel} = J \cos \theta$ และ $J_{\perp} = J \sin \theta$ ได้

$$E = J(\rho_{\parallel} \cos^2 \theta + \rho_{\perp} \sin^2 \theta) \quad (2.28)$$

สามารถเขียนใหม่เป็น

$$E = J\rho_{\perp} \left(1 + \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \right) \cos^2 \theta \quad (2.29)$$

พิจารณา $(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) / \rho_{\perp}$ สามารถเขียนเป็น $\Delta\rho / \rho_{\perp}$ จะได้

$$V = J\rho_{\perp} d \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cos^2 \theta \right) \quad (2.30)$$

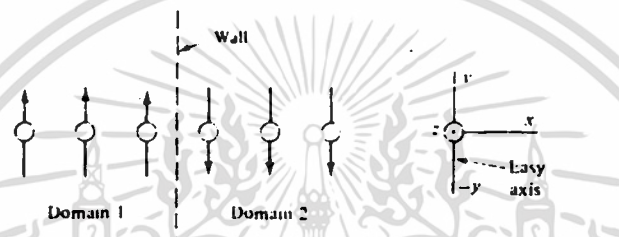
ค่า $\cos^2 \theta$ ขึ้นอยู่กับค่าความไวที่มีค่าต่ำ (low sensitivity) จนถึงทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อ M วางอยู่ในแนวแกน x และ y ค่าความไวที่ให้ผลดีที่สุดจะเข้าใกล้การจัดเรียงที่ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โครงสร้างของผนังเขต

ผนังเขตคือ จุดเชื่อมต่อระหว่างบริเวณที่มีการเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่มีทิศทางแตกต่างกัน และภายในผนังเขตทิศทางสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงไป

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของอะตอมเทียบกับอะตอมถัดไป จากรูป 2.15 ซึ่งทิศทางของอะตอมที่เห็นมีทิศทางขนานกับแกน x ในที่นี้ผนังเขต จะวางตัวทำมุม 180 องศา กับแกน yz และแกนอย่างง่ายคือแกน y พลังงานที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีค่าน้อยที่สุดในกรณีที่ สปินของอิเล็กตรอนที่อยู่ชิดกันมีทิศทางขนานกันไปในทางเดียวกัน ดังนั้น แสดงว่าผนังเขตในรูป 2.15 จะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอย่างมาก เพราะจากรูป ทิศทางของสปินมีทิศทางตรงข้ามกัน

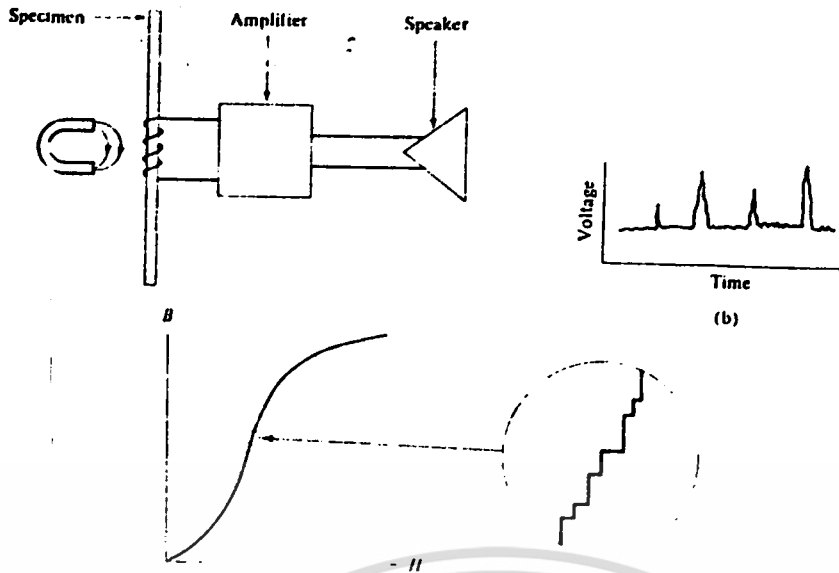


รูปที่ 2.15 แสดงผนังเขตที่วางตัวทำมุมกัน 180 องศา

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงของผนังเขต

พิจารณาถึงโครงสร้างของผนังเขตต่อสนามที่ป้อนให้ โดยการเปลี่ยนแปลงของผนังเขตจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องมากกว่าที่จะเป็นแบบเรียบ ๆ โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ Barkhausen ซึ่งค้นพบในปี ค.ศ.1919 โดยสามารถแสดงให้เห็นได้โดยใช้เครื่องมือดังรูป 2.16(a) โดยจะมีขดลวดพันกับสารตัวอย่างอยู่ แล้วต่อไปยังตัวขยายสัญญาณ และต่อไปยังลำโพงหรือที่หูฟังตามรูป จากนั้นจะให้เริ่มมีการเพิ่มสนามให้แก่สารตัวอย่างขึ้นเรื่อย ๆ โดยใช้การขยับแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ แต่ก็ไม่สามารถที่จะทำให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นเมื่อสัญญาณออกมาจากลำโพง ถ้าเปลี่ยนเป็นนำขดลวดพันกันกับออสซิลโลสโคป แทนลำโพง จะเกิดจุดสไปค์ขึ้น โดยดูได้จากกราฟระหว่างแรงดันกับเวลาดังรูป 2.16(b) ซึ่งจากการเกิดจุดสไปค์ของแรงดันนี้เองเรียกว่า สัญญาณรบกวนแบบ Barkhausen

ซึ่งปรากฏการณ์ Barkhausen นี้เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างทันทีทันใด ในทุก ๆ ส่วนของสารตัวอย่าง โดยหมายถึงการที่ ผนังเขตเกิดการกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง



รูปที่ 2.16 แสดงปรากฏการณ์ Barkhausen

2.3.2 การเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กในสนามที่มีค่าต่ำ ๆ

ลักษณะเส้นกราฟระหว่าง สภาพความเป็นแม่เหล็ก กับ hysteresis loop ของธาตุโดยทั่วไป จะมีรูปร่างที่แปรผันได้ จะมีเพียง 3 ลักษณะที่จะเกิดขึ้นได้ ดังนี้

1. กราฟแสดงลักษณะของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ค่าสนามสูง ๆ ของผลึกเดี่ยว
2. กราฟแสดงลักษณะของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ค่าสนามสูง ๆ ของสารที่มีโครงสร้างแบบผลึกอัญรูปของทั้งข้อ 1 และ 2 การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นแม่เหล็กจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังเขต
3. กราฟแสดงลักษณะของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ค่าสนามต่ำ ๆ

ค่าของสนามที่มีค่าต่ำ ๆ หมายถึงสนามที่มีค่าจาก 0 ถึง 1 เอร์สเตด (เนื่องจากสนามของโลกจะมีค่าถึง 2 ใน 10 ส่วน หรือ 3 ใน 10 ส่วนของ 1 เอร์สเตด ข้อที่ควรระวังก็คือ จะต้องให้แน่ใจว่าสนามของโลกนี้จะต้องไม่ไปรบกวนในการวัดค่าได้) ลักษณะของสภาพความเป็นแม่เหล็กถูกค้นพบครั้งแรกโดย ลอร์ดเรย์เลย์ ในปี ค.ศ.1887 และ ต่อมาก็รู้จักกันในนามของขอบเขตของเรย์เลย์ ภายในขอบเขตนี้เชื่อกันว่า สภาพความเป็นแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปทั้งหมด โดยการเคลื่อนที่ของผนังเขต ยกเว้นในพวกสารประกอบที่มีลักษณะของอนุภาคที่มีลักษณะของการจัดเรียงตัวของสปินของอิเล็กตรอนที่ไปในทางเดียวกัน

โดยการใช้เครื่องวัดค่าสนามแม่เหล็ก เรย์เลย์จะทำการวัดค่าและศึกษาพฤติกรรมของเหล็กและขดลวด ในโลหะที่มีค่าสนามต่ำ ๆ ในสนามที่มีค่าต่ำมาก ๆ ประมาณ $4 \cdot 10^{-5}$ ถึง $4 \cdot 10^{-2}$ เอร์สเตด พบว่าค่าสภาพซึมซาบได้ μ จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่า H ซึ่งหมายความว่า B (หรือ M) จะแปรผันเป็นเชิงเส้นและแปรผันได้กับค่า H ที่ค่าสนามที่มีค่าสูงกว่าคือในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.08-1.0 เออร์สเต็จะเกิด hysteresis และค่า μ จะไม่คงที่อีกต่อไป แต่จะเพิ่มแบบเชิงเส้นกับค่า H

$$\mu = \mu_0 + vH \quad (2.31)$$

ซึ่งค่า μ_0 เป็นค่า สภาพซึมซาบได้ เริ่มต้น และ v จะเรียกว่าค่าคงที่ของเรย์เลย์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า กฎของเรย์เลย์ (ในสนามที่มีค่าต่ำมาก ๆ เทอมของ vH จะน้อยมากจนสามารถจะไม่ต้องนำมาคิดได้ เมื่อเทียบกับค่า μ_0 ซึ่งจะอธิบายการค้นพบค่า μ ที่คงที่ ของเรย์เลย์ ในทางกลับกันอาจกล่าวได้ว่า การสังเกตการเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบเป็นเชิงเส้นหรือแบบวกกลับได้ จะขึ้นกับความไวต่อสัญญาณของเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ในขณะที่ทำการตรวจจับสัญญาณ ในเทอมของ vH หรือแม้แต่ในขณะที่ไม่มีการตรวจจับสัญญาณ และในวิธีการทดลองของเรย์เลย์จะมีความไวต่อการทดสอบมาก) สมการ 2.31 เป็นพื้นฐานของวิธีมาตรฐาน ในการหาค่า สภาพซึมซาบได้ นำค่า μ จากการทดลองมาทำการพลอตกราฟกับค่า H และสามารถทำนายได้ว่าที่ค่าสนามมีค่าเป็น 0 จะตรงกับค่า μ เท่าไร

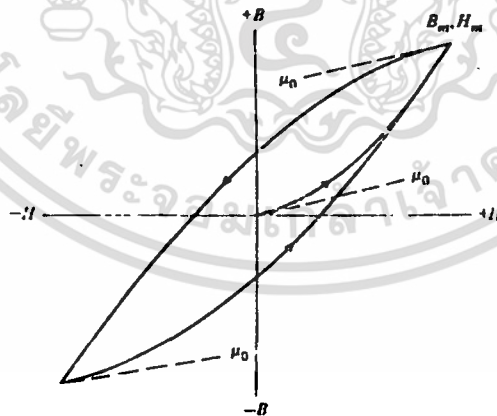
คุณสมบัติที่ 2.31 ด้วย H จะได้

$$B = \mu_0 H + vH^2 \quad (2.32)$$

ซึ่งเป็นสมการของกราฟที่มีการเหินย่นาโดยทั่วไปในขอบเขตของเรย์เลย์ เทอม $\mu_0 H$ จะแทนส่วนที่วกกลับได้ และ vH^2 แทนส่วนที่วกกลับไม่ได้ของการเหินย่นาทั้งหมด โดยเมื่อแทนที่ B ด้วย $(H + 4\pi M)$ เราจะได้ค่า M ออกมาได้ดังนี้

$$M = K_0 H + (v/4\pi) H^2 \quad (2.33)$$

โดยที่ค่า K_0 เป็นค่า สภาพรับไว้ได้ เริ่มต้น



รูปที่ 2.17 แสดงเส้นกราฟการเกิด hysteresis loop ในขอบเขตของเรย์เลย์ โดยเส้นประจะเป็นความชันซึ่งเป็นค่าของ μ_0

เรย์เลย์ยังได้แสดงให้เห็นอีกว่า hysteresis loop ประกอบด้วยกราฟที่เป็นรูปพาราโบลา 2 รูป

$$B = (\mu_0 + vH_m)H \pm (v/2)(H_m^2 - H^2) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ H_m เป็นค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ป้อน ตรงจุดนี้การที่ป้อนให้ค่าสนามมีค่าเป็น บวก และ ลบ จะทำให้ hysteresis loop ที่เกิดขึ้นมีลักษณะของเส้นกราฟลดลง และ เพิ่มขึ้น ตามลำดับที่ทำการป้อนค่าสนามให้ ในรูป 2.17 แสดงลักษณะของ loop ที่เกิดขึ้น ที่จุดปลายของแต่ละช่วงหักโค้งของกราฟทุกจุดจะเป็นค่าความชันเดียวกันกับความชันเริ่มต้นของกราฟที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ โดยทั่วไป เรียกว่าค่า μ_0

2.3.3 การเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กในสนามที่มีค่าสูงสุด

ระหว่างขอบเขตของเรย์เลย์ในสนามที่มีค่าต่ำ และในสนามที่มีค่าสูงใกล้จุดอิ่มตัวจะเกิดเป็นกราฟของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของสภาพความเป็นแม่เหล็กระหว่างจุด 0 และจุดอิ่มตัว กระบวนการหลัก ๆ ที่ปรากฏขึ้นตรงนี้จะเรียกว่า " Barkhausen jump " ขนาดใหญ่เกิดขึ้น และตรงบริเวณนี้จากกราฟของสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะมีการแปรผันเป็นช่วงกว้างจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง

ในทางกลับกัน ในบริเวณที่สนามมีค่าสูง ๆ จะมีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของผนังเขตมากที่สุด และปรากฏการณ์นี้จะนำไปตามกฎง่าย ๆ ความสัมพันธ์ระหว่าง M กับ H ในบริเวณนี้เรียกว่า " กฎแห่งการเข้าใกล้ " จุดอิ่มตัวโดยแสดงสมการโดยทั่วไปจะเขียนดังนี้

$$M = M_s \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) + KH \quad (2.35)$$

เทอม KH จะแทนการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามในการเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดได้เองของผนังเขตหรือการเกิดแรงกระทำต่อสภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งเทอมนี้จะมีค่าน้อยมากที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดคูรี และสามารถตัดค่านี้ออกได้ ทำให้เหลือเทอมของ a/H และ b/H^2 ในทางทฤษฎี ค่าคงที่ a และ b อาจกล่าวได้ว่า a เกิดจากการต่อต้านต่อความเค้นที่มากระทำ ส่วน b เกิดจากการไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก ในสนามที่มีค่ามากกว่า 2-3 พัน เอร์สเต็ด เทอม a/H จะยังคงมีอยู่ ดังนั้นสมการข้างต้นจะได้ดังนี้

$$M = M \left(1 - \frac{a}{H} \right) \quad (2.36)$$

แต่การวัดค่า M ในสนามที่มีค่าสูง สามารถนำมาพลอตกราฟระหว่าง $1/H$ ได้ และลากไปตัดกับจุดที่มีค่าเท่ากับ 0 จะสามารถหาค่า M_s ได้

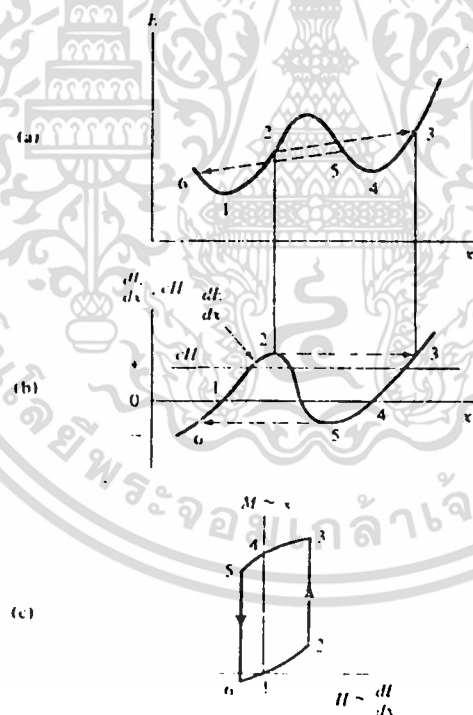
2.3.4 การต้านต่อการเคลื่อนที่ของผนังเขต

ในการป้อนค่าสนามที่มีค่าเป็นศูนย์ ผนังเขตจะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าพลังงานของระบบน้อยที่สุด ในที่นี้ระบบหมายถึงขอบเขตของตัวเอง และขอบเขตที่อยู่ติดกัน ดังนั้นถ้าผนังเขตทำมุม

ระหว่างกันเป็น 180 องศา จะมีแนวโน้มที่จะแบ่งการกีดกันต่อกันของขอบเขตเป็น 2 ส่วน และจะอยู่ในตำแหน่งตรงจุดที่มีค่าความเค้นที่จุดต่ำที่สุดคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของผนังเขตเลย

ถ้ามีการป้อนสนามค่าน้อย ๆ ขอบเขตแม่เหล็กจะมีการเคลื่อนที่ แต่จะเคลื่อนที่ ตรงข้ามกับแรงที่สะสมในตำแหน่งเดิมของผนังเขต แรงที่สะสมไว้นี้ถ้ามีสาเหตุมาจากการกีดกันต่อกัน ส่วนใหญ่จะเกิดจากการเพิ่มพลังงานของผนังเขต และ พลังงาน magnetostatic ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังเขต แต่ถ้ามีสาเหตุมาจากแรงเค้นที่สะสมไว้นี้จะเกิดจากการเพิ่มของพลังงานของผนังเขตและพลังงาน magnetoelastic

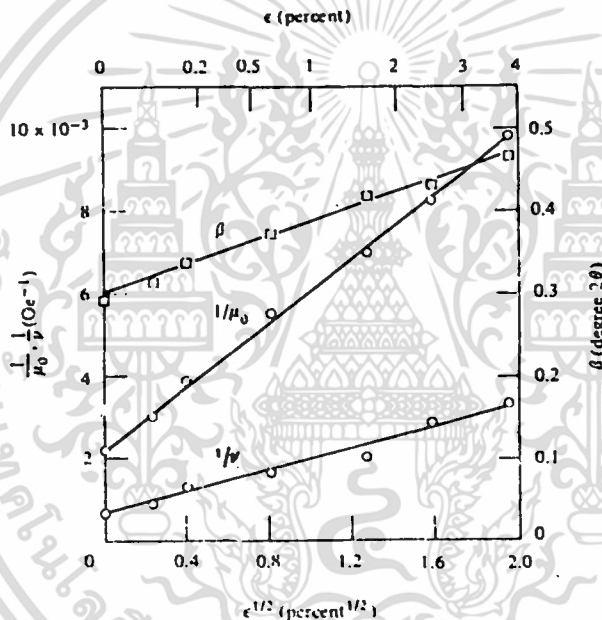
ถ้าสนามลดลงถึง 0 ผนังเขตจะย้อนกลับแต่ไม่ได้ไปที่จุด 1 แต่จะไปอยู่ที่ 4 แทนซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของพลังงานที่ใกล้ที่สุด ดังที่ได้แสดงปรากฏการณ์ hysteresis และ remanence reverse field จะผลึกแบบวกกลับได้ให้ผนังเขต จาก 4 ไป 5 และ โดยเกิดการกระโดดแบบ Barkhausen อีกครั้ง จาก 5 ไป 6 ถ้าไออะแกรมในรูป (b) หมุนไป 90 องศา จะทำให้เกิด hysteresis loop ดังแสดงในรูป (c) เพราะว่าการเคลื่อนที่ของผนังเขต x มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงในสภาพความเป็นแม่เหล็ก M และ dE/dx เป็นสัดส่วนกับ H



รูปที่ 2.18 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของผนังทั้งแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้

การเคลื่อนที่ของผนังเขตที่ถูกดำเนินนี้จะได้กล่าวในเทอมของพลังงาน E แปรผันกับตำแหน่งผนังเขต x โดยที่ E จะแทนพลังงานต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นบางตัวหรือทั้งหมด และอาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวได้ว่า E แปรผันกับ x ดังแสดงในรูป 2.18 (a) แกรเดียนของพลังงานแสดงในรูป (b) โดยมีเส้น cH แสดงความดันของสนามบนผนังเขต (ค่าคงที่ c ขึ้นกับชนิดของผนังเขต และ ค่าคงที่ c ขึ้นกับชนิดของผนังเขตและจุดกำเนิดของสนาม สำหรับในกรณีที่แสดงในรูป 2.19 $c=2m$) ที่ $H=0$ ผนังเขตจะอยู่ที่ตำแหน่ง 1 ในจุดต่ำสุดของพลังงาน ขณะที่ H ถูกเพิ่มขึ้นจาก 0 ผนังเขตจะเคลื่อนที่แบบวกกลับได้ไปยัง 2 ถ้าสนามถูกย้ายเข้ามาในช่วงนี้ ผนังเขตจะตกกลับไปยัง 1 แต่จุด 2 เป็นจุดของแกรเดียนของพลังงานสูงสุด (แรงสะสมสูงสุด) ถ้าสนามมีค่าเพียงพอที่จะเคลื่อนผนังเขตไปยัง 2 ได้ก็จะเพียงพอที่จะทำให้มันเกิดการกระโดดแบบวกกลับไม่ได้ไปยัง 3 ซึ่งเป็นเพียงจุดเดียวที่อยู่เบื้องหน้าผนังเขตที่มีแรงสะสมปริมาณมากซึ่งการกระโดดนี้เป็น การกระโดดแบบ Barkhausen แบบหนึ่ง



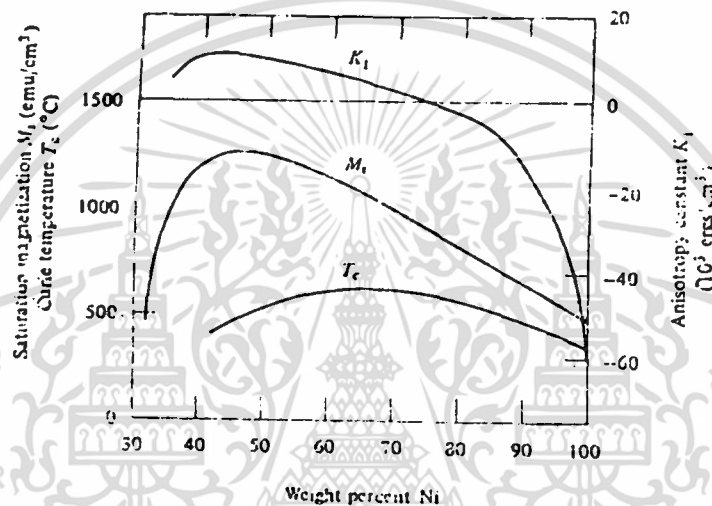
รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เรย์เลย์ μ_0 และ v กับค่า E

hysteresis loop นี้จะหมายถึงเพียงบริเวณเล็ก ๆ บริเวณหนึ่งของสารตัวหนึ่ง และ หมายถึงช่วงจำกัดช่วงหนึ่งของ H hysteresis loop ของสารตัวหนึ่ง คือ ผลรวมจำนวนมหาศาลของ loop เหล่านี้มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันตลอดทั้งปริมาตรของสารทั้งหมด ถึงแม้ว่าเราจะไม่สนใจรูปแบบที่แท้จริงของกราฟ E, x แผนภาพที่เหมือนกับรูป 2.18 นี้ สามารถใช้ช่วยในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนเช่นเดียวกับที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนัง

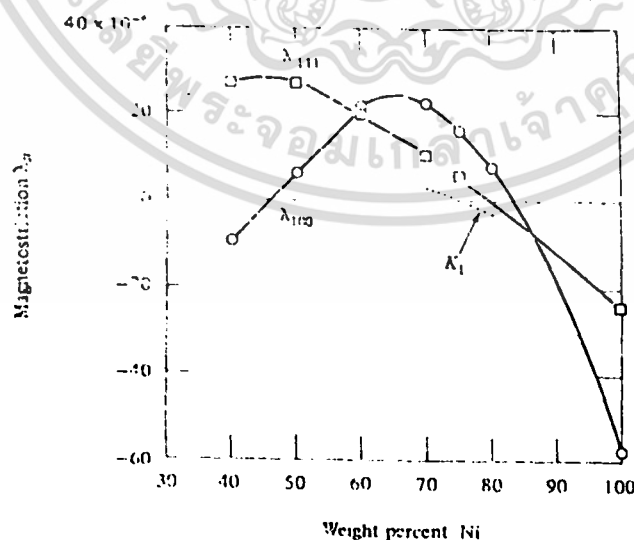
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สารผสมอัลลอยด์ชนิดพิเศษ

สารผสมอัลลอยด์ชนิดพิเศษจะมีส่วนประกอบของ เหล็ก และ นิกเกิล โดยอัตราส่วนของ นิกเกิลจะอยู่ระหว่าง 50-80 % ชื่อที่ใช้เรียกอัลลอยด์ชนิดพิเศษนี้คือ เพอร์มอลลอยด์ (permalloy) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ แม้ที่ค่าสนามต่ำ ๆ แต่จะมีค่า สภาพซึมซาบได้ สูง ผู้ที่ทำการพัฒนาและนำ เพอร์มอลลอยด์มาใช้งานคือ เอลเมน (Elmen) และคณะ ในระหว่างประ ค.ศ.1913-1921 โดยทั่วไปเพอร์มอลลอยด์จะมีการบอกปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ของนิกเกิล ในปริมาณของนิกเกิล 50-80 % และโครงสร้างภายในของเพอร์มอลลอยด์จะเป็นแบบ face-center-cubic



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงอัลลอยด์ของเหล็กกับนิกเกิล เป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของนิกเกิลกับค่า M_s และ T_c



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงอัลลอยด์ของเหล็กกับนิกเกิลเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของนิกเกิลกับ magnetostriction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.20 แสดงถึงการอึดตัวของ การเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็ก และ อุณหภูมิคูรี โดยจะมีค่าเปลี่ยนไปตามปริมาณของนิกเกิล นอกจากนั้นจากรูปยังแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่า anisotropy ของผลึก ส่วนจากรูป 2.21 แสดงถึงค่าคงที่แมกเนโตสทริกชัน ในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นที่อธิบายได้ว่า " normal furnace cool " ซึ่งสัมพันธ์กับ " การเข้าใกล้สถานะที่ไม่เป็นระเบียบ " ส่วนที่เส้นประอธิบายได้ว่าอัลลอยด์จะถูกทำให้มีอุณหภูมิลดลง 1.2 องศาเซลเซียสต่อสัปดาห์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเป็นระเบียบของโครงสร้างมากขึ้น จะสังเกตได้ว่า magnetostriction จะเข้าใกล้การเป็น isotropic มากขึ้น ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของนิกเกิลมีค่า 60 ถึง 80 %

2.4.1 สารเฟอร์โรแมกเนติกอัลลอยด์

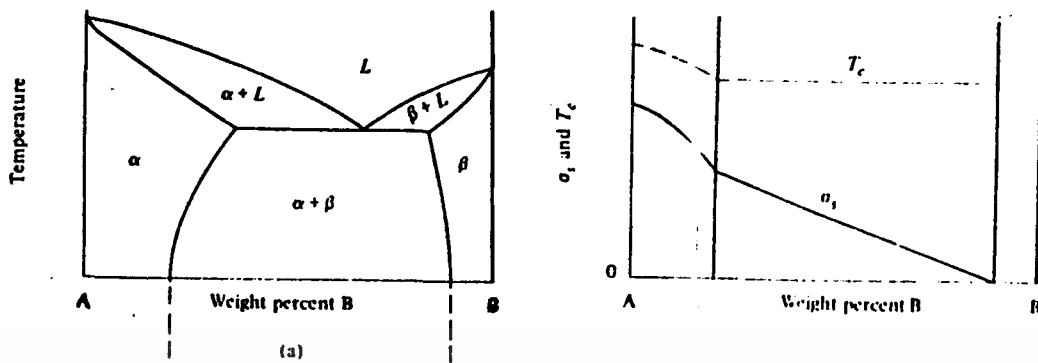
โดยทั่วไปสารเฟอร์โรแมกเนติกจะพบได้ในสารผสมของ เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล เกิดจากการผสมกันของสารอัลลอยด์ของ เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล กับสารชนิดอื่นที่ไม่มีส่วนประกอบของสารเฟอร์โรแมกเนติก เพราะฉะนั้นสารเฟอร์โรแมกเนติกอัลลอยด์จึงมีได้มากมายหลายชนิด แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะชนิดที่สำคัญมาก ๆ

ในสารผสมอัลลอยด์โดยทั่วไปจะเป็นดังนี้

1. เมื่อสารผสมระหว่างสารอัลลอยด์ทั้ง 2 ชนิด กลายเป็นส่วนผสมเดียวกัน การอึดตัวของ สภาพความเป็นแม่เหล็ก ρ_s และ อุณหภูมิคูรี T_c ไม่สามารถจะทำการทำนายได้ว่ามีค่าเท่าใด ถึงแม้ว่าจะรู้ถึงอัตราส่วนของสารทั้ง 2 ก็ตาม
2. เมื่อสารผสมอัลลอยด์ประกอบไปด้วย 2 สถานะ การเปลี่ยนแปลงไปของส่วนประกอบ ทั้ง 2 จะเป็นปริมาณที่สัมพันธ์กัน แต่ส่วนประกอบของแต่ละสถานะจะยังคงมีค่าเท่าเดิม เพราะฉะนั้นถ้าสารเฟอร์โรแมกเนติกที่สถานะหนึ่งค่า ρ_s ของสารผสมอัลลอยด์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่าง เป็นเชิงเส้น ต่อ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เพิ่มเข้าไปของอัลลอยด์อีกชนิดหนึ่ง และ ค่า อุณหภูมิคูรี T_c จะมีค่าคงที่

โดยลักษณะต่าง ๆ ของทั้ง 2 ข้อที่กล่าวมา แสดงไว้ดังรูป 2.22 สมมติว่าสาร A เป็น สารเฟอร์โรแมกเนติก และ สาร B เป็น ชนิด B-rich solid solution β สมมติว่าเป็นสารพาราแมกเนติก เมื่อผสมสาร B เข้ากับสาร A เพื่อจะให้ได้ α solid solution จะสามารถคาดเดาได้ว่าทั้งค่า ρ_s และ T_c จะมีค่าลดลง แต่ลักษณะเส้นโค้งของ ρ_s (หรือ T_c) กับ ส่วนประกอบต่าง ๆ ไม่สามารถจะทำนายได้ว่าจะมีลักษณะเป็นอย่างไร ในทั้ง 2 ส่วนของทั้ง 2 สถานะ คือ $\alpha + \beta$ ในสถานะ α จะมีลักษณะที่อึดตัวและส่วนประกอบต่าง ๆ ของสถานะนี้จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง และ ปริมาณของ α จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มสาร B เข้าไป เพราะฉะนั้น ρ_s จะลดลงเป็นเชิงเส้นจนมีค่าเป็นศูนย์ ที่ขอบของสนามระหว่าง 2 สถานะ และค่า T_c จะยังคงมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพของสารอัลลอยด์ A-B โดย

(a) แสดงแผนภาพสถานะของสาร

(b) แสดงค่าที่ส่วนประกอบระหว่าง A กับ B กับค่า σ_c และ T_c

ในสารผสมอัลลอยด์ระหว่าง 2 สาร อัตราการลดลงของสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีค่าต่าง ๆ กันไป ขึ้นกับปริมาณอะตอมที่มีค่าไม่เท่ากันของสารแต่ละตัว ยกตัวอย่างเช่น

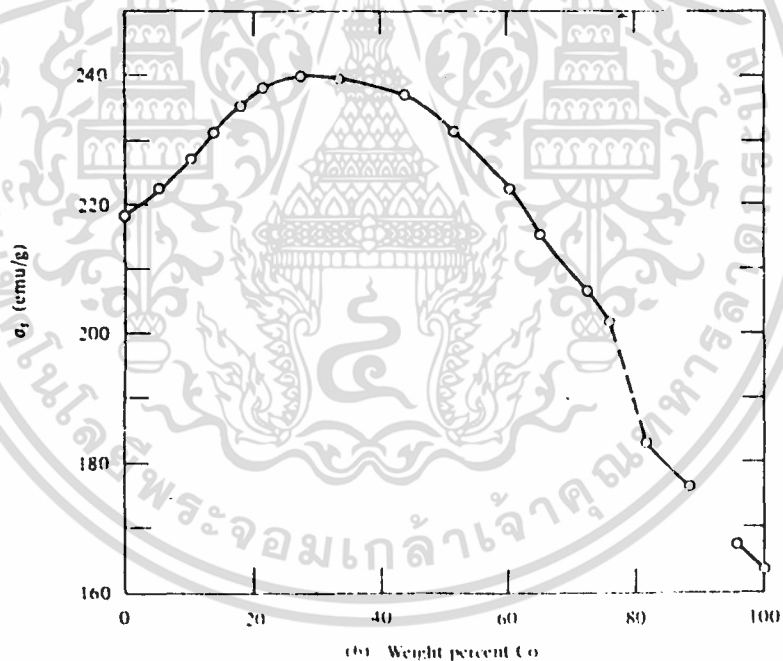
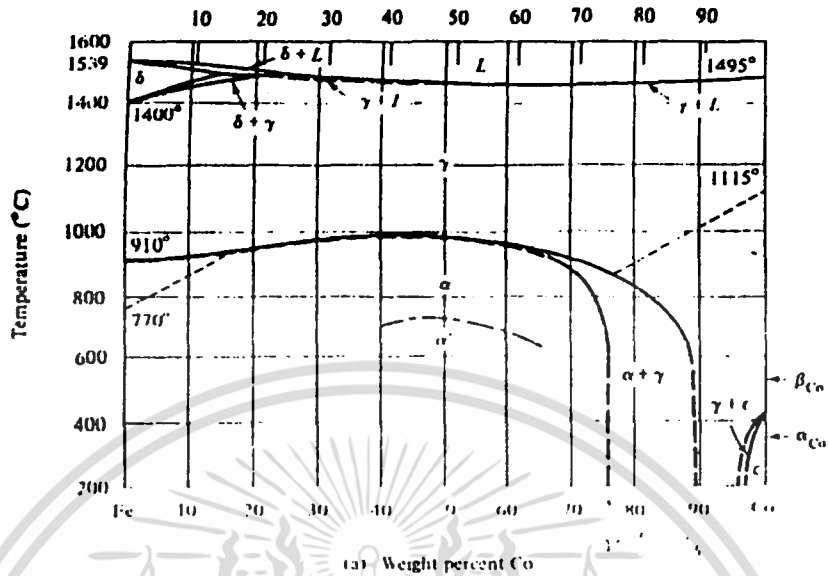
1. ใช้ निकเกิดเป็นสารอัลลอยด์พื้นฐาน ในกรณีนี้ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีค่าลดลงสอดคล้องกับอัตราของเวเลนซ์ของสารอัลลอยด์อีกชนิดหนึ่ง เช่น ทองแดง เวเลนซ์อิเล็กตรอน 1 60 เปอร์เซ็นต์ของอะตอมค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีค่าลดลงถึงศูนย์ ในขณะที่ สังกะสี เวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ใช้เพียง 30 เปอร์เซ็นต์ของอะตอม สารอัลลอยด์จะผสมเข้าไปจะเป็น 3d สำหรับแถบพลังงานของสารอัลลอยด์ โดยเฉพาะถ้าค่าของเวเลนซ์มีค่ามากขึ้น การเติมของแถบพลังงานจะมีค่าเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่า สภาพความเป็นแม่เหล็กมีค่าลดลงเร็วขึ้น ลักษณะเช่นนี้มีลักษณะสอดคล้องกับทฤษฎีแถบพลังงานเป็นอย่างมาก

2. สารผสมอัลลอยด์ระหว่าง เหล็ก กับ โคบอลต์ ซึ่งปริมาณของ โคบอลต์ที่มีมากกว่า อัตราการลดลงของสภาพความเป็นแม่เหล็กในตอนเริ่มต้น อย่างน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับอะตอมที่ผสมเข้าไป ซึ่งสารอัลลอยด์ที่ผสมเข้าไปนี้เปรียบเสมือนว่ามีปริมาณที่เจือจางกว่าสารตั้งต้น หมายความว่า การลดลงของสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะขึ้นกับอะตอมของเหล็ก ยกตัวอย่างเช่นที่ค่า 2.22 μ_B ถูกแทนที่โดยอะตอมที่มีค่าเป็นศูนย์ ลักษณะเช่นนี้ไม่สามารถจะอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ตามทฤษฎีของแถบพลังงาน

ที่อุณหภูมิค่า ๆ เป็นเรื่องแปลกที่สามารถจะให้ได้สารผสมอัลลอยด์ ที่เกิดจาก เหล็ก โคบอลต์ที่ หรือ นิกเกิด โดยใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รวมกับสารจำพวก แพลทตินัม

ในสารผสมอัลลอยด์ระหว่าง เหล็ก กับ โคบอลต์ที่ โดยส่วนประกอบที่ใกล้เคียงสารผสม FeCo ในขณะที่ทำ เรผสมสารอัลลอยด์ จะต้องทำที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งมีค่าประมาณ 730 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูป 2.23 (a) ในสถานะ α ที่มีลักษณะอะตอมจัดเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาไปไซบระเยชชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 a แสดงแผนภาพสถานะของสารอัลลอยด์ระหว่างเหล็กกับโคบอลต์

b แสดงค่า χ ที่ส่วนประกอบของสารอัลลอยด์แต่ละค่าต่าง ๆ กัน ที่อุณหภูมิห้อง

ตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวอย่างอิสระกระจายอยู่ทั่วไปตามมุม และที่จุดศูนย์กลางของเซลล์รูปลูกบาศก์ ส่วนสถานะ α' ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นระเบียบ โดยอะตอมของเหล็กจะเข้าไปแทรกอยู่ตามมุมของโครงสร้าง ส่วนอะตอมของโคบอลต์ จะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กมีค่าค่อนข้างต่ำ เพิ่มขึ้นซึ่งปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้จะพบได้ในสารผสมอัลลอยด์ของ FeNi₃ ซึ่งในกรณีนี้สถานะที่มีการจัดเรียงอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ จะเป็นแบบ face-center-cubic ในขณะที่อะตอมที่มีโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบจะมีอะตอมของเหล็กเข้าไปแทรกเฉพาะบริเวณมุมของลูกบาศก์ และอะตอมของนิกเกิลจะอยู่เฉพาะตรงกึ่งกลางของบริเวณผิวหน้าของรูปลูกบาศก์ทั้ง 6 ด้าน

สารผสมอัลลอยด์ระหว่างสารอัลลอยด์ 2 ชนิด โดยทั่วไป จะเป็นสารพวกโลหะทรานสิชันกับ rare earth ซึ่งจะเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกทั้งหมด

สารประกอบอ็อกไซด์ จะมีคุณสมบัติของการเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกน้อยมาก และสมบัติการเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกจะยังมีค่าน้อยลงอย่างมากในสารจำพวกออกไซด์

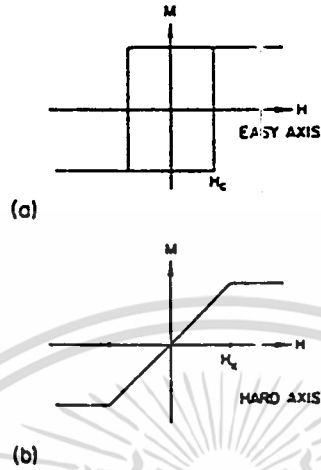
2.5 Magnetoresistance

Magnetoresistance คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสารเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ค่า $\Delta R/R$ สำหรับในสารทั่ว ๆ ไป จะมีค่าน้อยมากถึงแม้ว่าจะอยู่ในสนามที่มีค่าสูง ๆ แต่สำหรับในสารที่มีความเป็นแม่เหล็กสูง ค่า magnetoresistance จะมีค่ามาก และในขณะที่สารชนิดนี้ผ่านจากช่วงที่สภาพความเป็นแม่เหล็กถึงช่วงอิมิตัว ค่าความต้านทานของนิกเกิลจะมีค่าเพิ่มขึ้น 2 % และค่าความต้านทานของเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.3 % และแมกเนโทริซีสแตนซ์มีความคล้ายคลึงกับ magnetostriction เป็นอย่างมาก ดังนั้นการวัดค่าของ Magnetoresistance จึงเหมือนกับการวัดค่าของ magnetostriction ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของผนังเขตในสถานะสภาพถูกทำลายสภาพความเป็นแม่เหล็ก

2.5.1 Magnetoresistivity

ในวัสดุทางแม่เหล็ก ค่า magnetoresistance เป็น anisotropic ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของ M จุดเริ่มต้นของ anisotropy นี้วางตัวในการกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน และความต้านทานขึ้นกับสนามที่ป้อน เพื่อความเข้าใจความประพฤติในอุปกรณ์ฟิล์มแม่เหล็ก (เช่น ฟิล์ม magnetoresistor) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึง M ที่ขึ้นอยู่กับสนามที่ป้อนเข้าไป H โดยพิจารณาคุณลักษณะที่กำหนดในรูปที่ 2.24 คือ 1) ทิศทางแกนง่าย (easy axis) ในระนาบของฟิล์มด้วยเส้นโค้ง M-H รูปสี่เหลี่ยม และ coercivity H_c 2) แกนยาก (hard axis) ตามขวาง (ในระนาบของฟิล์ม) ซึ่งเส้นโค้ง M-H เป็นเชิงเส้น จนถึงสภาวะอิมิตัว ด้วยความสัมพันธ์ของค่าซึมผ่านได้ (permeability) $\mu_r = M_s / H_k$ ได้แสดงถึงเวกเตอร์ทั้งหมดอย่างไม่เด่นชัด คือ $|M| = (M_x^2 + M_y^2)^{1/2}$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ (ภายในเขต

แม่เหล็ก (magnetic domain) และมีสภาวะแม่เหล็กที่เสถียรภาพ (stable magnetic) ที่เป็นไปได้เพียง 1 และ 2 สภาวะเท่านั้น สำหรับการกำหนดขนาด และทิศทางของสนามที่ป้อนเข้าไป



รูปที่ 2.24 สภาพความเป็นแม่เหล็กของฟิล์ม เนื่องจากการป้อนสนาม H

- (a) ด้วย H มีทิศทางแกนง่าย และ
 (b) ด้วย H ตั้งฉากกับแกนง่าย ซึ่งคือแกนยากของฟิล์ม

ตัวร่วม (factor) เพิ่มเติมที่ต้องพิจารณา คือ สนามที่ทำให้ลายสภาพแม่เหล็กของอุปกรณ์ โดยคุณสมบัติของวัตถุของฟิล์ม (เช่นรูปที่ 2.24) สัมพันธ์กับสนามรวม H ซึ่งเป็นผลรวมของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้ามาจากแหล่งกำเนิดภายนอก และสนามที่ทำให้ลายสภาพแม่เหล็ก H_D ที่เพิ่มขึ้นจาก M ที่ไม่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่องเดียวกัน (เช่นที่ขอบของฟิล์ม) สนามที่ทำให้ลายสภาพแม่เหล็กจะไม่เหมือนกันในช่องว่าง ยกเว้นสำหรับค่าทางเรขาคณิตพิเศษบางค่า แต่ค่าหนึ่งที่สามารถบอกได้ คือขนาด โดยพิจารณาสถาปัตยกรรมที่จุดศูนย์กลางของ strip ที่เป็นแม่เหล็กด้วยความกว้าง w และความหนา t

$$H_D = \frac{-2 M_s t}{\pi \mu_0 w} \quad (2.37)$$

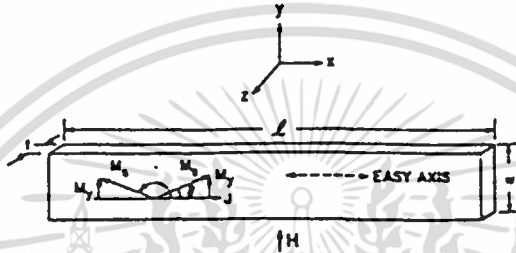
พิจารณา magnetoresistor ของรูปที่ 2.25 ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวยาวกว่าความกว้างมาก และแกนง่ายขนานกับทิศของกระแสไหล เมื่อไม่มีการป้อนสนาม ฟิล์มจะมีการเรียงตัวของเขตในทิศทางตามแกนง่าย เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกป้อนเข้าไปตามทิศทางแกนยาก ผลในระนาบของฟิล์ม สภาพความเป็นแม่เหล็กของเขตจะหมุนสอดคล้องกับรูป 2.24 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_y = M_s \frac{H_y}{H_K}, \quad \text{สำหรับ} \quad -H_K \leq H_y \leq H_K \quad (2.38)$$

ขณะที่สนามที่ทำลายสภาพแม่เหล็ก ถูกสมมติว่ามีค่าน้อยมาก ซึ่งจะพิจารณาต่อมาจากหลัง ภายในแต่ละเขต เวกเตอร์ M ยังคงเมื่ออยู่ด้วยขนาด M_s และ

$$\frac{M_y}{M_s} = \frac{H_y}{H_K} = \sin \theta, \quad \text{สำหรับ} \quad -H_K \leq H_y \leq H_K \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.25 ฟิล์ม Magnetoresistor ที่มีความยาว l มีค่ามากกว่าความกว้าง w มาก และมีกระแสและแกนง่ายไปตามความยาวของฟิล์ม โดยสนามที่ป้อนอยู่ตามทิศทางขาก

การจำกัดทางเรขาคณิตที่ $l \gg w$ (ยกเว้นบริเวณใกล้จุดสัมผัสทางไฟฟ้าของจุดปลาย) r ต้องขนานกับขอบของ stripe และแกนง่าย ดังนั้น E ต้องหันเหเป็นมุม θ แดกต่างกับ จากสมการ (2.29) จะได้ว่าค่าความต้านทานของอุปกรณ์ คือ

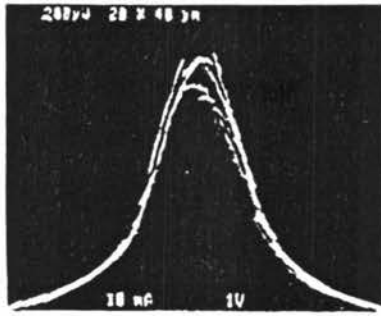
$$r = \frac{\rho_{\perp} l}{wt} \left(1 + \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \cos^2 \theta \right) = \frac{\rho_{\perp} l}{wt} \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_{\perp}} \cos^2 \theta \right) \quad (2.40)$$

แต่ $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta = 1 - (H_y / H_K)^2$, ดังนั้น

$$r = r_0 \left[1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_{\perp}} - \frac{\Delta \rho}{\rho_{\perp}} \left(H_y / H_K \right)^2 \right], \quad \text{สำหรับ} \quad -H_K \leq H_y \leq H_K \quad (2.41)$$

และสนามขึ้นอยู่กับการ magnetoresistance ตามทิศทางขาก เป็นรูปพาราโบลา จนถึงสภาวะคงตัว รูปที่ 2.26 แสดงค่าความต้านทานที่แท้จริงของฟิล์ม permalloy ที่เป็นฟังก์ชันกับสนาม ในขอบเขตสนามค่าต่ำ เส้นโค้งมีรูปพาราโบลาที่สามารถทำนายได้ ขณะที่สนามค่าสูงจะเกิดเส้นโค้งที่แยกออก เนื่องจากผลของการทำลายสภาพความเป็นแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีการกระโดดภายในเส้นโค้ง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับผนังเขต และกล่าวได้ว่าเป็นการกระโดดของ Barkhausen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ภาพออสซิลอโคปที่แสดงความต้านทาน สำหรับสาร magnetoresistive ที่เป็นลักษณะแผ่นของ pemaally ที่มีความหนา 400 °Å ขณะที่ป้อน H มีทิศตามแกนยาวในระนาบของฟิล์ม กระแสถูกป้อนตามทิศ แกนง่าย ซึ่งแรงดัน และชั่วกระแสเป็นลักษณะแท่งที่ขาว และบาง ตั้งฉากกับกระแสที่ไหล โดยแกนตั้ง คือ $\Delta R/R$ และแกนนอน คือ H

ไม่เหมือนกรณี magnetoresistor ที่ฟิล์มแม่เหล็กมี E ขนานกับ J ทั้งกรณีป้อนสนามค่า ศูนย์ และสนามค่ามากที่สุด (สภาวะอิ่มตัว) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสัญญาณมากที่สุด คือ $r_c(\Delta\rho/\rho_\perp)$ ซึ่งไม่ขึ้นกับอัตราส่วนของรูปร่างของ magnetoresistor อย่างไรก็ตามจะมีความแตกต่างเล็กน้อยในความประพฤติระหว่างสารขนาดยาว และขนาดสั้น เมื่อ $\theta = 45^\circ$ โดยได้พิจารณาที่ $l \gg w$ ไปแล้ว เมื่อ $w \gg l$ แรงที่ชั่ว equipotential E ทำให้ทั้งที่ และ J มีทิศเปลี่ยนแปลง ดังนั้น

$$r = \frac{\rho_\perp l}{wt} \left(\frac{1}{1 + [(\rho_\perp - \rho_\parallel) / \rho_\perp] \cos^2 \theta} \right) \quad (2.42)$$

ซึ่งได้ค่าเหมือนกันกับสมการ () สำหรับ $\theta = 0$ และ $\theta = 90^\circ$ แต่แตกต่างที่ $\theta = 45^\circ$ ด้วยจำนวนเล็กน้อย

$$\left(1 + \frac{\rho_\perp - \rho_\parallel}{2\rho_\perp} \right) - \left(\frac{1}{1 + [(\rho_\perp - \rho_\parallel) / 2\rho_\perp]} \right) = \frac{(\rho_\perp - \rho_\parallel)^2}{2\rho_\perp(\rho_\perp + \rho_\parallel)} \quad (2.43)$$

$$\cong -\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^2 \quad (2.44)$$

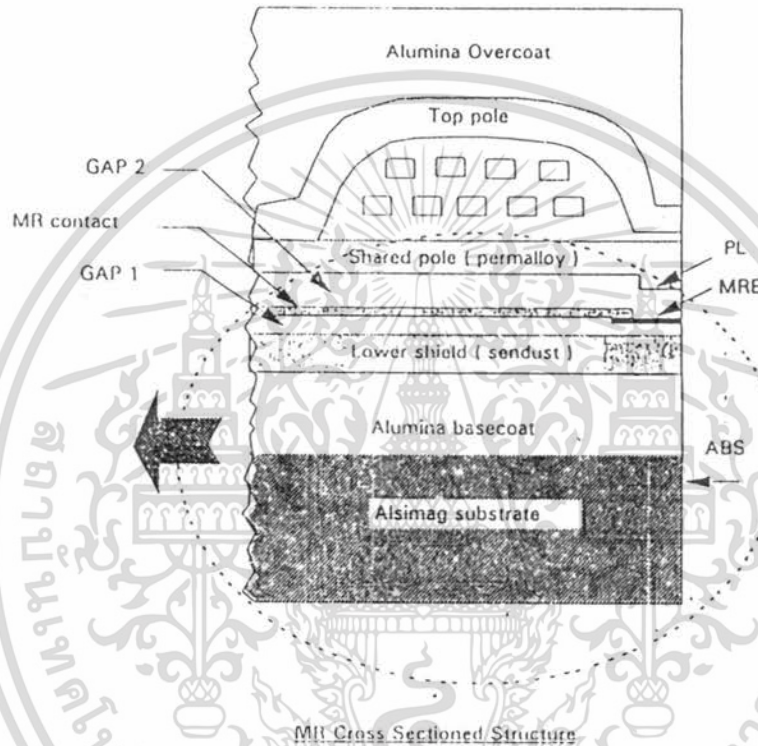
ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณ คือ $\frac{1}{2} \Delta\rho / \rho$ ดังนั้นความเบี่ยงเบนเล็กน้อยระหว่าง 2 กรณี ไม่เกิน 1% หรือ 2% ของสัญญาณมากที่สุดที่อุณหภูมิห้อง สำหรับเป้าหมายทางปฏิบัติผลของ magnetoresistive ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนรูปร่างของ magnetoresistor ที่เป็นฟิล์มแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Magnetoresistive Head [MR-Head]

MR-Head อยู่ที่ฮาร์ดดิสก์ และมีหน้าที่ในการเขียน และการอ่านข้อมูลที่แยกออกจากกัน โดยการเขียนใช้ตรงบริเวณ top pole และ share pole แต่ในการอ่านจะใช้ MRE sensor (magneto resistive element)

2.6.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของ MR-Head



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของ MR-Head

ลักษณะ โดยทั่วไปของโครงสร้างของ MR-Head มีรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. Alumina Overcoat จะเป็นชั้นที่เคลือบตัว MR-Head ทำจากสารพวกอลูมินา ซึ่งเป็นฉนวน
2. Top pole จะเป็นสารพวก permalloy คือ เป็นสารผสมระหว่างเหล็ก กับนิกเกิล ในอัตราส่วน 80 : 20 ตรงบริเวณ top pole จะมีการต่อขั้วสัมผัสออกไปด้วย เพื่อเป็นตัวรับกระแสจากแหล่งกำเนิดกระแส เมื่อทำการเขียนข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์ โดยใช้ร่วมกับขั้วสัมผัสที่ shared pole หรืออาจเรียกว่า top shield
3. Shared pole (permalloy) จะเป็นสารพวก permalloy เช่นเดียวกับบริเวณ top pole ส่วนการทำงานของส่วนนี้ได้กล่าวไว้แล้ว จากข้อ 2 คือใช้ในการเขียนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. MRE - Magnetoresistive element เป็นสารพวก magnetoresistive ซึ่งจะใช้ในการอ่านข้อมูลจากฮาร์ดดิสก์ โดยอาศัยหลักการดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5. Lower shield (sendust) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า bottom shield ซึ่งตรงส่วนนี้เป็นสารพวก permalloy เช่นเดียวกัน โดยส่วนนี้จะทำงานร่วมกับ top shield จุดประสงค์ คือใช้ในการอ่านข้อมูลจากฮาร์ดดิสก์ โดยสามารถอ่านข้อมูลได้โดยการที่ฮาร์ดดิสก์เป็นพวก magnetic media ซึ่งเมื่อทำการอ่านข้อมูลตรงส่วนของฮาร์ดดิสก์ จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดค่ากระแสไหลเข้าหัวอ่านได้จึงสามารถอ่านข้อมูลได้

6. Alumina basecoat จะเป็นการเคลือบฐานด้วยอลูมินาซึ่งเป็นฉนวน

7. Alsimag substrate ฐานรองของ MR-Head เป็นพวก Alsimag

2.6.2 การตอบสนองของ MR ถึงลักษณะการเป็นเชิงเส้น

จากรูป 2.12 เป็นภาพแสดงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็ก M และทิศทางของกระแส ในการทำมุมระหว่างกันที่ค่าต่าง ๆ เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป โดยแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

จากสมการ (2.30)

$$\begin{aligned} V &= J_1 d \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_1} \cos^2 \theta \right) \\ &= Jd\rho_1 + Jd\Delta\rho \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (2.45)$$

เมื่อมีการป้อนสนามภายนอกให้กับ MR ที่เวลาใด ๆ จะได้สมการ

$$V' = Jd\rho_1 + Jd\Delta\rho \cos^2(\theta \pm \phi) \quad (2.46)$$

สมการ (2.46) - สมการ (2.45) ได้

$$V' - V = \Delta V = Jd\Delta\rho \{ \cos^2(\theta \pm \phi) - \cos^2 \theta \} \quad (2.47)$$

เนื่องจากกระแสมีค่าคงที่ จะได้

$$\Delta V \propto \cos^2(\theta \pm \phi) - \cos^2 \theta \quad (2.48)$$

ที่ $\theta = 0^\circ$

$$\Delta V \propto \cos^2(\pm\phi) - 1 \quad (2.49)$$

กรณีที่ 1

ที่ $\phi = 0 \Rightarrow \Delta V = 0$

กรณีที่ 2

ที่ $\phi > 0 \Rightarrow \Delta V$ จะมีค่าเป็นลบ

กรณีที่ 3

ที่ $\phi < 0 \Rightarrow \Delta V$ จะมีค่าติดลบเช่นกันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีที่ 2

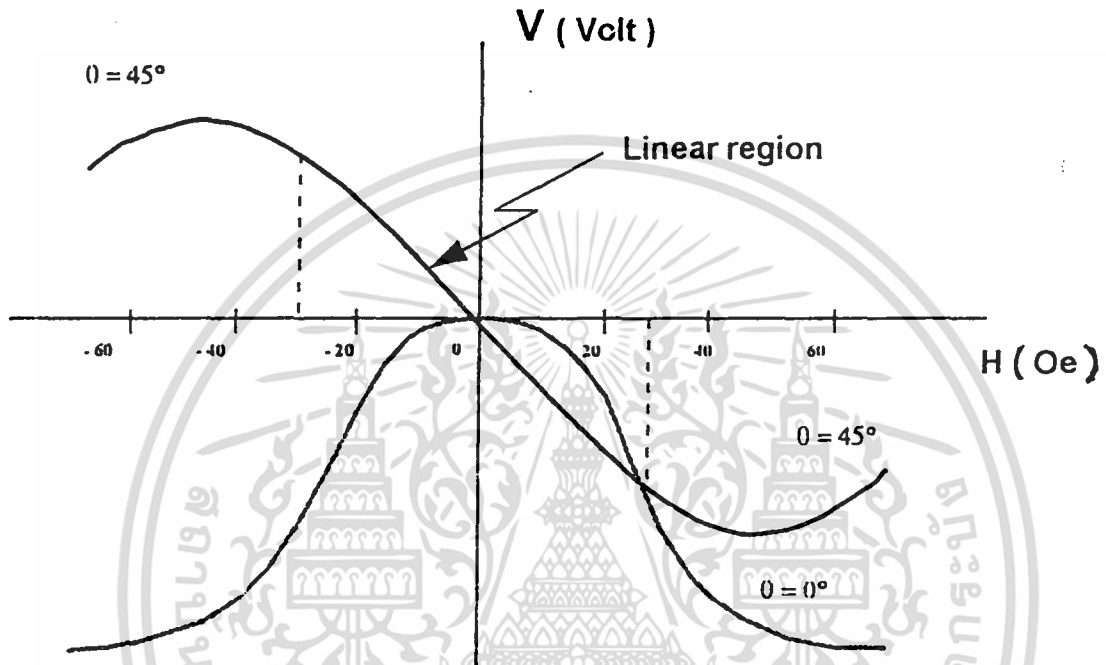
ที่ $\theta = 45^\circ$

$$\Delta V \propto \cos^2(\theta \pm \phi) - \cos^2 \theta$$

$$\propto \cos^2(45 \pm \phi) - \cos^2 45$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		$\alpha \cos^2(45 \pm \phi) - 0.5$
กรณีที่ 1	ที่ $\phi = 0$	$\Rightarrow \Delta V = 0$
กรณีที่ 2	ที่ $\phi = -45^\circ$	$\Rightarrow \Delta V = 0.5$
กรณีที่ 3	ที่ $\phi = 45^\circ$	$\Rightarrow \Delta V = -0.5$



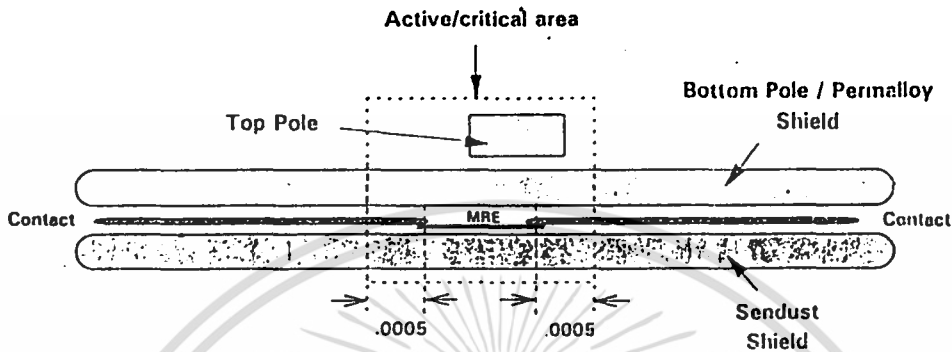
รูปที่ 2.28 แสดงผลตอบสนองระหว่างค่า ΔV กับ H โดยมีมุม bias ที่ 0° และ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการทํางาน และหลักการวัด

3.1 หลักการทํางานของเครื่องมือ MR Head Test Set



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของหัวอ่านแบบ Magnetostrictive Head

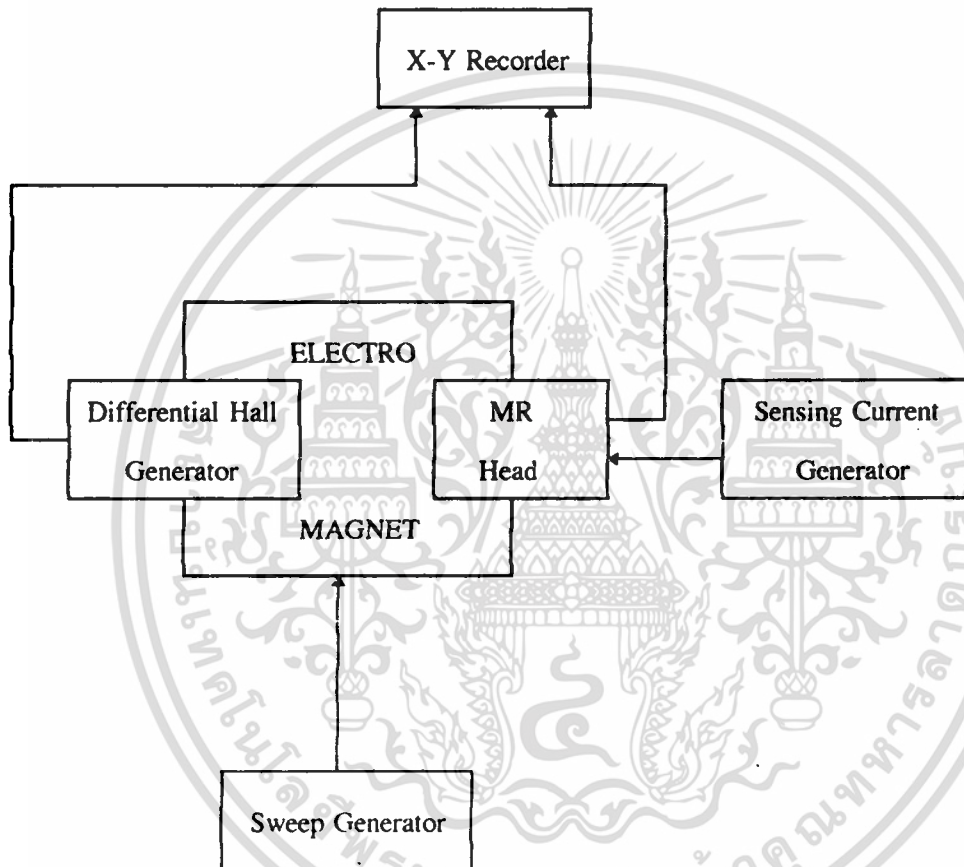
จากรูปที่ 3.1 หัวอ่านแบบ Magnetostrictive Head จะมีการแยกการเขียน และการอ่าน ข้อมูลออกจากกัน โดยการเขียนจะใช้ลักษณะเดียวกับหัวเขียนแบบ Inductive Head แต่การอ่านจะใช้ MRE sensor แทน ซึ่ง MRE sensor นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าตามสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไป ในขณะที่มีการผ่านกระแสที่มีค่าคงที่ไปยัง sensor จะได้อ่านค่าแรงดันคร่อม MRE ซึ่งค่าแรงดันนี้จะมีค่าอยู่ 2 ส่วนดังนี้

1. สัญญาณ dc เนื่องจากค่าความต้านทานของธาตุ
2. สัญญาณ ac เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ magnetostrictance เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไป

MRE จะมีเอาท์พุทที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก โดยจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นเมื่อแมกเนไทเซชันกับกระแสทำมุมกัน 45° เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปเป็นสาเหตุให้แมกเนไทเซชันใน MRE หมุนสัมพันธ์กับทิศทางของกระแสที่ไหล

หลักการทํางานของเครื่องมือ MR Head Test Set นี้สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีหลักการทํางาน คือ เครื่องมือ MR Head Test Set จะเป็นการวัดความต้านทานของหัวอ่านแบบ Magnetostrictive Head โดยการป้อนกระแสให้กับหัวอ่านแบบ Magnetostrictive Head ในขณะที่เดียวกันก็นำหัวอ่านแบบ Magnetostrictive Head ใส่นำไปที่ช่องว่างของแหล่ง

กำเนิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กนี้จะให้ค่าสนามแม่เหล็กโดยการป้อนกระแสที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณสามเหลี่ยมเชิงเส้น แล้วนำค่าที่ได้ไปเข้า X-Y Recorder โดยแกน X เป็นค่าสนามแม่เหล็ก และแกน Y เป็นค่าแรงดันที่เปลี่ยนไปของหัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head ซึ่งแกน Y นี้สามารถคำนวณเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปได้ เนื่องจากมีการป้อนกระแสคงที่ให้กับหัวอ่านแบบ Magneto-resistive Head ทำให้ทราบถึงลักษณะของหัวอ่าน เช่น ความเป็นเชิงเส้น และความสมมาตร



รูปที่ 8.2 แผนภาพแสดงบล็อกโคอะแกรมของเครื่องมือ MR Head Test Set

จากหลักการดังกล่าวข้างต้น สามารถออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำมาสร้างเครื่องมือ MR Head Test Set ได้ โดยแบ่งออกเป็นส่วนตัว่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรจ่ายกระแส
2. Sweep Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

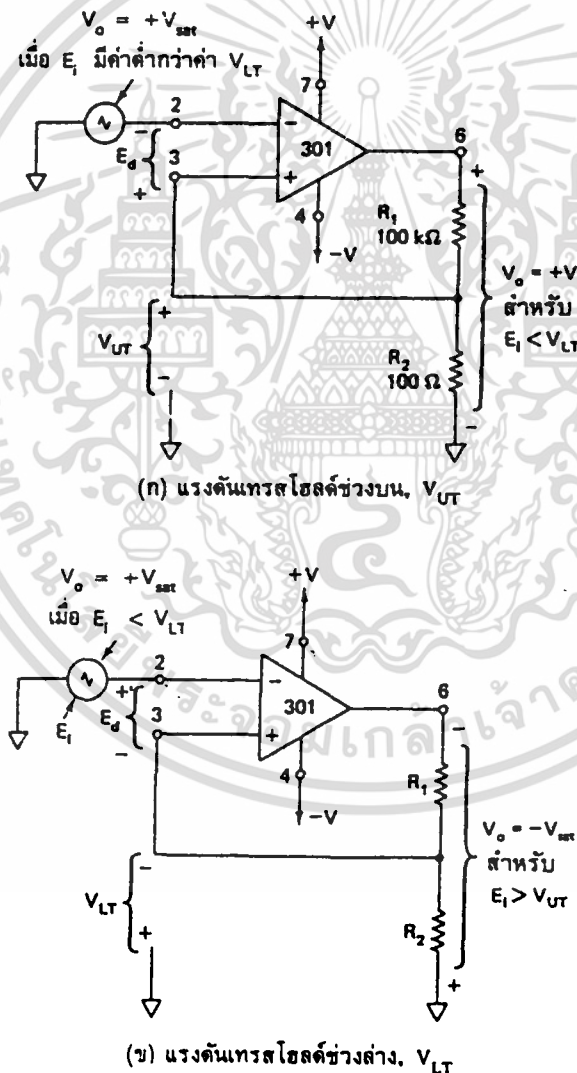
4. Differential Hall Sensor

5. X-Y Recorder : ส่วนนี้ไม่ได้ออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

3.1.1 พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์

ก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรถ่วงต่าง ๆ นั้น จะอธิบายถึงพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้

วงจรเปรียบเทียบที่มีการป้อนกลับ



รูปที่ 3.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีการป้อนกลับแบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.3 (ก) แรงดันเอาต์พุต V_o ประกอบด้วยแรงดันที่ตกคร่อม R_1 และ R_2 โดยส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับไปยังขาอินพุตบวก ถ้า V_o เท่ากับ V_{sat} แรงดันป้อนกลับนี้จะเรียกว่า แรงดันเทรชโฮลด์ช่วงบน (upper-threshold voltage หรือ V_{UT}) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.1

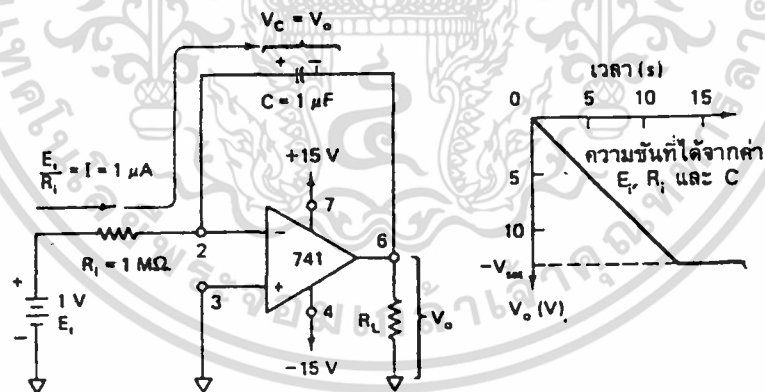
$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V_{sat}) \quad (3.1)$$

ถ้าเราป้อนแรงดัน E_i เข้าที่ขาของของอินพุตบวกให้มีค่าต่ำกว่า V_{UT} ซึ่งอยู่ที่ขาอินพุตบวก (แรงดันที่ขาบวกมีค่ามากกว่าขาลบ) จะทำให้ V_o มีค่าเป็น $+V_{sat}$ เมื่อค่อย ๆ เพิ่มค่าระดับแรงดัน E_i ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงกว่า V_{UT} ขั้วของ E_i จะตรงข้ามกับรูปที่ 3.3 (ก) (แรงดันที่ขาบวกมีค่าน้อยกว่าขาลบ) ทำให้ V_o มีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ V_o มีค่าน้อยลง แรงดันที่ป้อนที่ขาอินพุตบวกก็น้อยลงด้วย E_i มีค่าเพิ่มขึ้น V_o จะยิ่งลดค่าลงเร็วขึ้นจนในที่สุด V_o จะเท่ากับ $-V_{sat}$ สถานะของวงจรตอนนี้จะคงที่ (stable) สถานะนี้แสดงได้ดังรูป 3.3 (ข) ซึ่งเมื่อ V_o เท่ากับ $-V_{sat}$ แรงดันที่ป้อนกลับมาที่ขาบวกในตอนนี้จะเรียกว่า แรงดันเทรชโฮลด์ช่วงล่าง (lower-threshold voltage หรือ V_{LT}) ซึ่งมีค่าดังสมการที่ 3.2

$$V_{LT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) \quad (3.2)$$

วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรถ่ายสัญญาณ



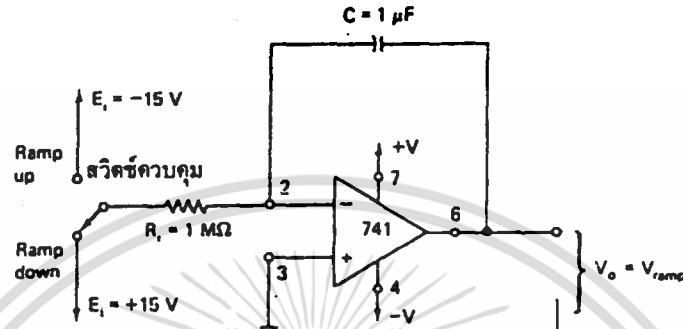
รูปที่ 3.4 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบพื้นฐาน ซึ่งให้สัญญาณแรมป์เดี่ยว

วงจรถ่ายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.4 กระแส I ถูกกำหนดโดยค่า E_i กับ R_1 โดย

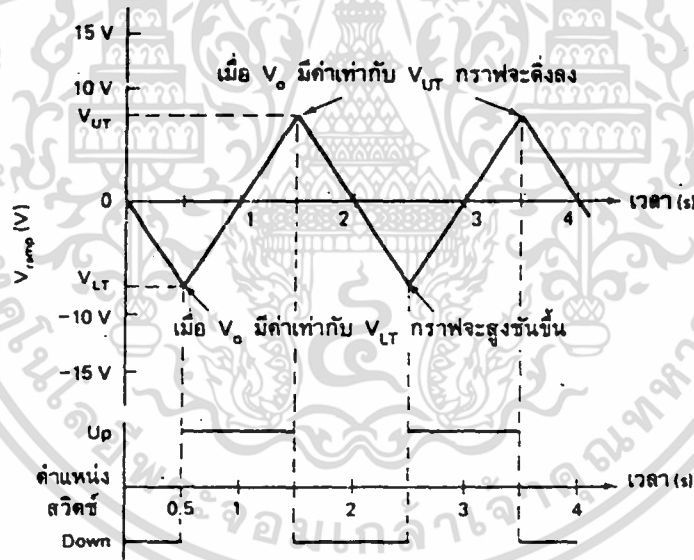
$I = E_i/R_i$ แทนค่า I ลงในสมการที่ 3.3 จะได้ V_o ในเทอมของ E_i กับ t ดังนี้

$$V = E_i * \frac{1}{R_i C} * t \tag{3.3}$$

เครื่องหมายลบของ V_o บ่งบอกให้รู้ว่าได้อิออน E_i ผ่าน R_i ไปที่ขาลบของออปแอมป์
วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยมโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์



(ก) วงจรกำเนิดสัญญาณแรมป์เดี่ยวที่ใช้สวิตช์โยกควบคุม



(ข) กราฟเวลาแสดงให้เห็นว่า V_o มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อมีการโยกสวิตช์

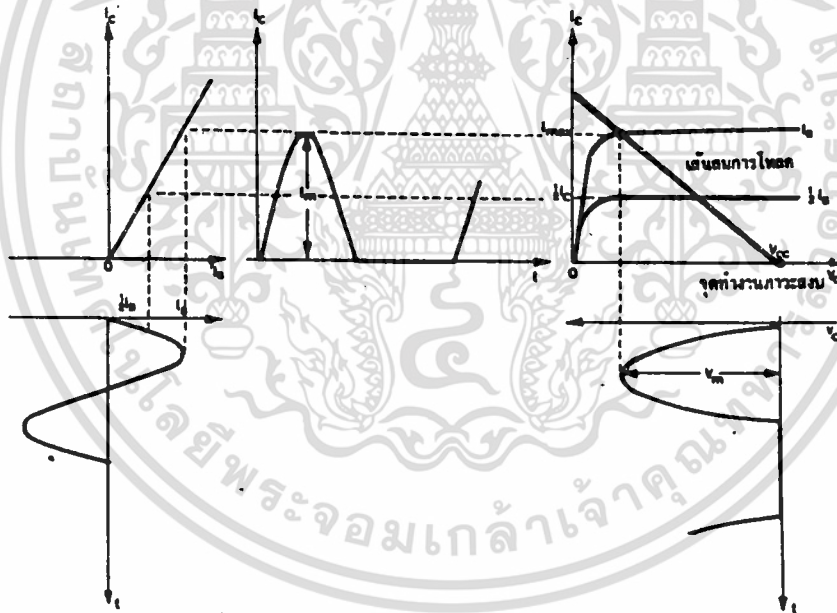
รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม

ในรูปที่ 3.5 (ก) ถ้าสับสวิตช์ไปที่ Ramp up ซึ่ง E_i มีค่าเท่ากับ -15 โวลต์ จะได้ V_o เป็น
แรมป์ในลักษณะเป็นค่าบวก ในทางตรงกันข้ามถ้าสับสวิตช์ไปที่ Ramp down ซึ่ง E_i มีค่าเท่ากับ

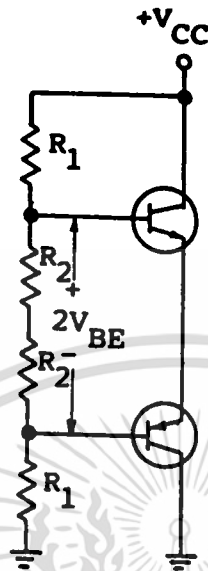
+15 โวลต์ จะได้ V_0 เป็นแรมป์ในลักษณะเป็นค่าลบ ดังรูปที่ 3.5 (ข) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือสโลปของ V_0 ต่อ t เท่ากับ $-E_s/(RC)$ หรือมีค่าเท่ากับ -15 โวลต์ต่อวินาที และ +15 โวลต์ต่อวินาที เมื่อ E_s เป็น 15 โวลต์ และ -15 โวลต์ ตามลำดับ

วงจรรขยายคลาสบี

วงจรรขยายคลาสบี เหมาะที่จะใช้สำหรับขยายสัญญาณที่กำลังสูง ๆ เพราะมีประสิทธิภาพของการขยายสูง เนื่องจากวงจรรขยายคลาสบี จะเป็นการไบอัสวงจรที่จุดคัทออฟ หรือไบอัสที่จุดที่ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เกือบมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา หรือกรณีที่สัญญาณอินพุตมีค่าเป็นลบ จะไม่มีกระแสคอลเลกเตอร์ในวงจร ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์สองตัวขยายสัญญาณตัวละครึ่งรูป ก็คือทางบวกตัวหนึ่ง และทางลบตัวหนึ่งสัญญาณรวมของวงจรจะเป็นสัญญาณเหมือนอินพุต ตัวอย่างของวงจรที่ต่อแบบนี้ เช่น วงจรรขยายพุช-พูล (push pull amplifier)



รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของวงจรรขยายคลาสบี



รูปที่ 3.7 วงจรคลาสบี พูช-พูล

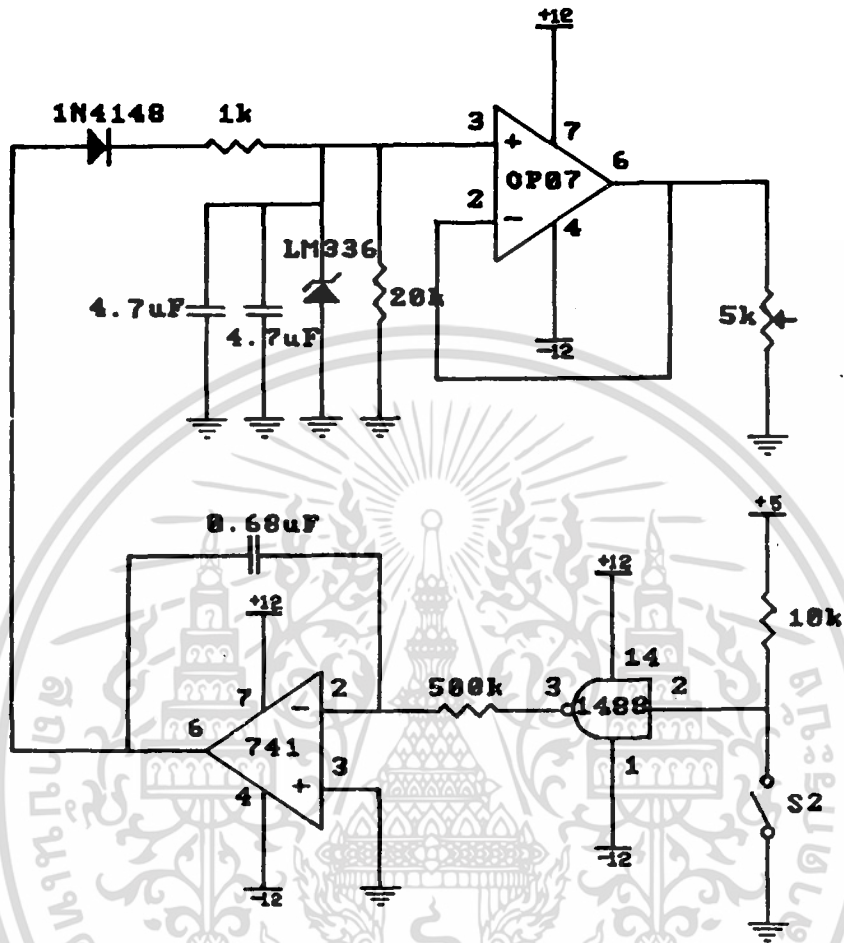
3.1.2 วงจรจ่ายกระแส

วงจรกำหนดแรงดัน

วงจรดังรูปที่ 3.8 จะให้เอาต์พุตมีค่า 0 V และประมาณ 2.5 V ซึ่ง

ถ้าเอาต์พุตมีค่า 0 V เนื่องจากไม่มีแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด นั่นคือไม่มีสัญญาณไหลผ่านไดโอดได้ (เมื่อสวิตช์ S2 เปิด)

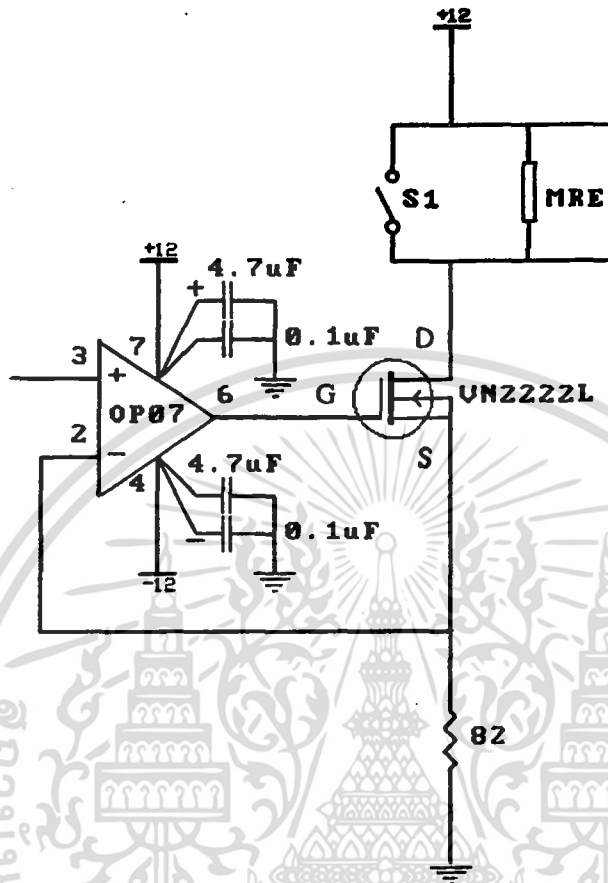
ถ้าเอาต์พุตมีค่าประมาณ 2.5 V เนื่องจากมีแรงดันผ่านไดโอด ทำให้มีแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด (ชนิด 2.5 V) เข้าสู่โพลแอมป์ที่ทำหน้าที่บัฟเฟอร์ (เมื่อสวิตช์ S2 ปิด)



รูปที่ 3.8 วงจรกำหนดแรงดัน

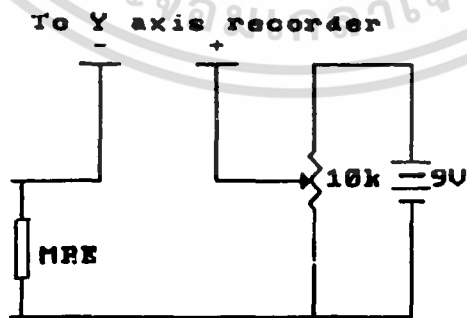
Voltage to Current Source

เนื่องจากต้องมีการป้อนกระแสให้กับ MRE ดังนั้นรูปที่ 3.9 นี้จึงเป็นวงจรที่แปลงแรงดันให้เป็นกระแส โดยเอาที่พุดที่ออกมาจากออปแอมป์จะไปทริกขา drain ของ MOSFET เพื่อให้ MOSFET ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่าน MRE เกิดขึ้น



รูปที่ 8.9 วงจร voltage to current source

Balance Generator



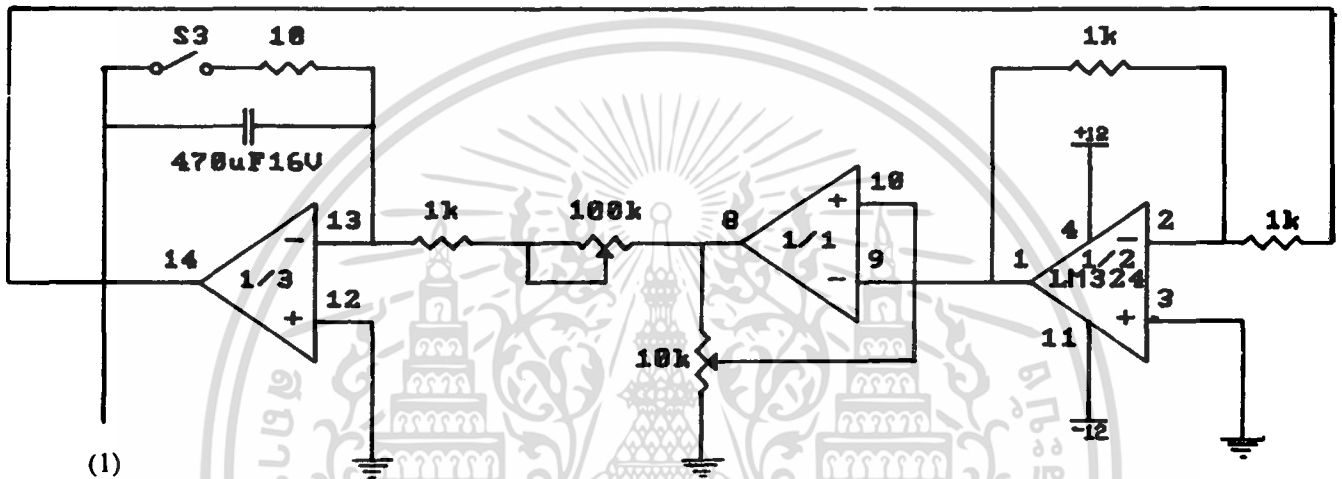
รูปที่ 8.10 balance generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อ 3.1 เมื่อมีกระแสไหลผ่าน MRE จะทำให้มีค่าแรงดัน dc ตกคร่อม MRE เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อนำไปเข้าแกน Y ของ X-Y Recorder จะทำให้เกิดการกระชากของแกน Y ขึ้น ทำให้ค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไม่เริ่มต้นจากศูนย์ จึงต้องมีวงจร balance เพื่อปรับให้ค่าแรงดันที่ออกมาเป็นศูนย์

3.1.3 Sweep Generator

วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม

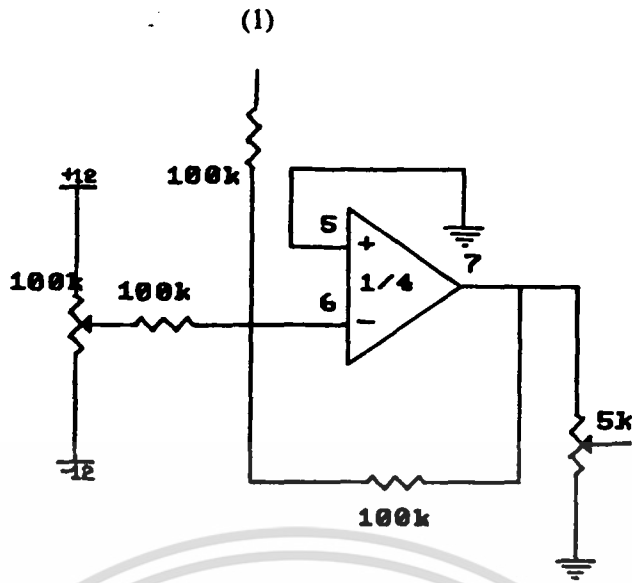


รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดคลื่นสามเหลี่ยม

หลักการของวงจรนี้เป็นการเปลี่ยนสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ออกจากคอมพิวเตอร์ ให้เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมโดยใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ และจากวงจรดังกล่าวนี้ต้องการสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีการสวิงอัตโนมัติ ดังนั้นจึงต้องมีการป้อนกลับของสัญญาณ

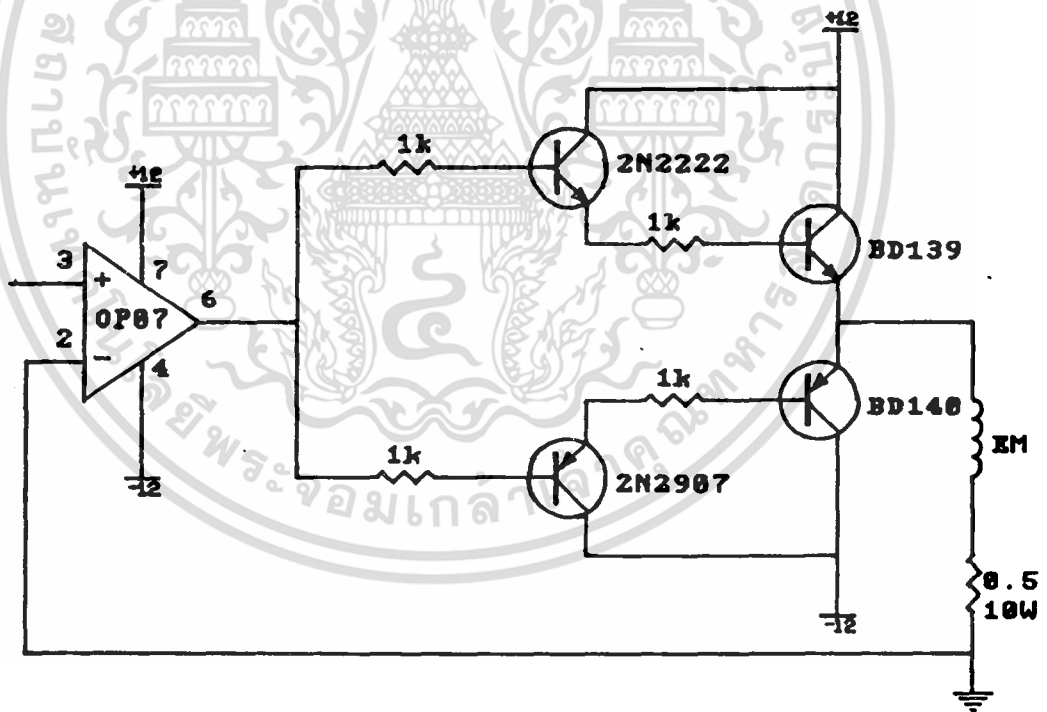
ตัวยก offset

จะเป็นการปรับ offset เพื่อให้ค่าแรงดันที่ออกมามีการสวิงทั้งซีกบวก และซีกลบเท่ากัน



รูปที่ 3.12 ด้วย offset

Voltage to Current Source



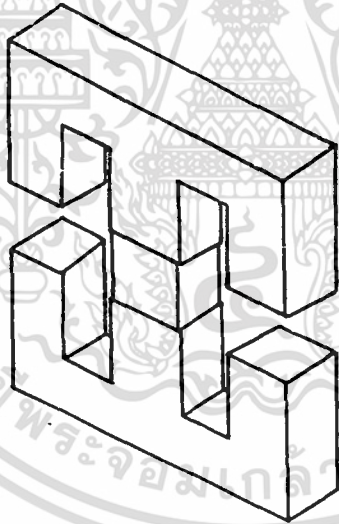
รูปที่ 3.13 วงจร voltage to current source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรนี้เป็นการแปลงค่าแรงดันให้เป็นค่ากระแสบวกและลบ โดยสัญญาณเอาต์พุตบวก และลบของอปแอมป์ (OP07) จะออกไปที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N2222 และ 2N2907 ให้ทำงาน เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสขึ้น โดยการต่อนี้เป็นวงจรขยายแบบคลาสบี พูซ-พูล เพื่อต้องการให้มีกำลังขยายสูง และมีการทำงานทั้งซีกบวก และซีกลบ เนื่องจากอินพุตที่ป้อนเข้ามามีการสวิงทั้งซีกบวก และซีกลบ

3.1.4 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยมีทิศทางของสนามขึ้นกับสนามกระแสที่ไหลเข้าไป ซึ่งแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กนี้ทำจากแท่งเฟอร์ไรท์รูป EE ปะกบกัน โดยส่วนกลางจะมีแท่งเฟอร์ไรท์หรือเหล็กอ่อนเชื่อมต่อ เพื่อให้เกิดช่องว่างสำหรับใส่หัวอ่านแบบ Magnetoresistive Head และ Differential Hall Generator ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะพันขดลวดทองแดงที่แกนกลางของเฟอร์ไรท์



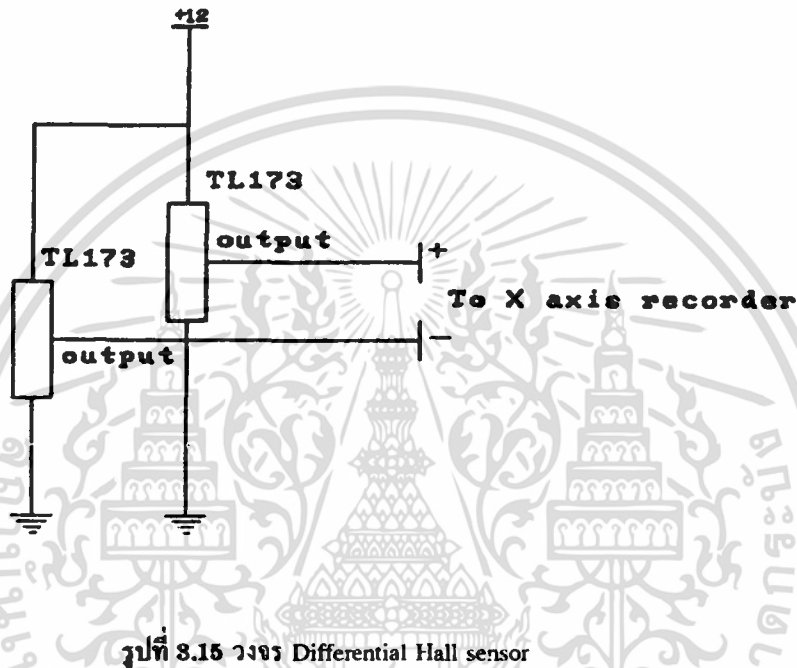
รูปที่ 3.14 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

3.1.5 Differential Hall Sensor

วงจร Differential Hall sensor ได้นำอุปกรณ์ TL173 มาใช้ซึ่ง TL173 นี้เป็นอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตามสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงใช้ TL173 วัดค่าสนามแม่เหล็ก โดยมีหลัก

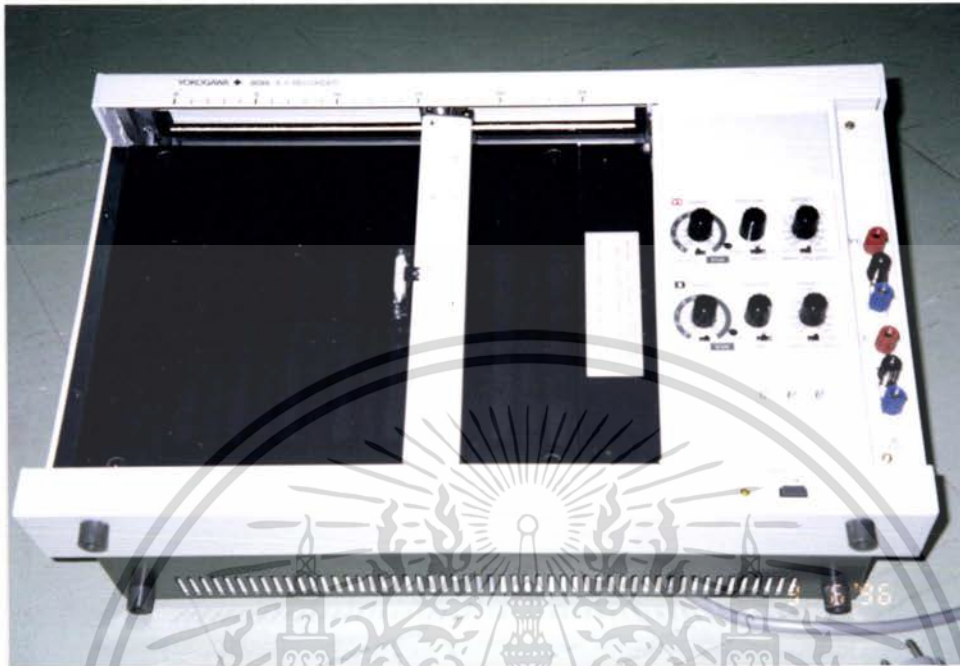
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ คือนำ TL173 2 ตัว (ปกติแรงดันตกคร่อม TL173 ประมาณ 6 V) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบแรงดัน โดย TL173 ตัวหนึ่งใส่ในสนามแม่เหล็กใส่ในแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก และ TL173 อีกตัวหนึ่งปล่อยเอาไว้ ซึ่ง TL173 ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีแรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็ก ส่วน TL173 อีกตัวจะมีแรงดันคงที่ คือ 6 V ทำให้ได้แรงดันที่ต่างกันของเอาต์พุตของ TL173 ทั้งสองเข้าแกน X ของ X-Y Recorder ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าสนามแม่เหล็กได้ ดังรูปที่ 3.15



3.1.6 X-Y Recorder

X-Y Recorder จะทำการพล็อตกราฟค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป หรือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็ก โดยแกน X จะเป็นแกนของสนามแม่เหล็ก และแกน Y เป็นแกนของแรงดันหรือความต้านทาน (โดยความต้านทานนี้จะคำนวณมาจากแรงดันนั่นเอง)

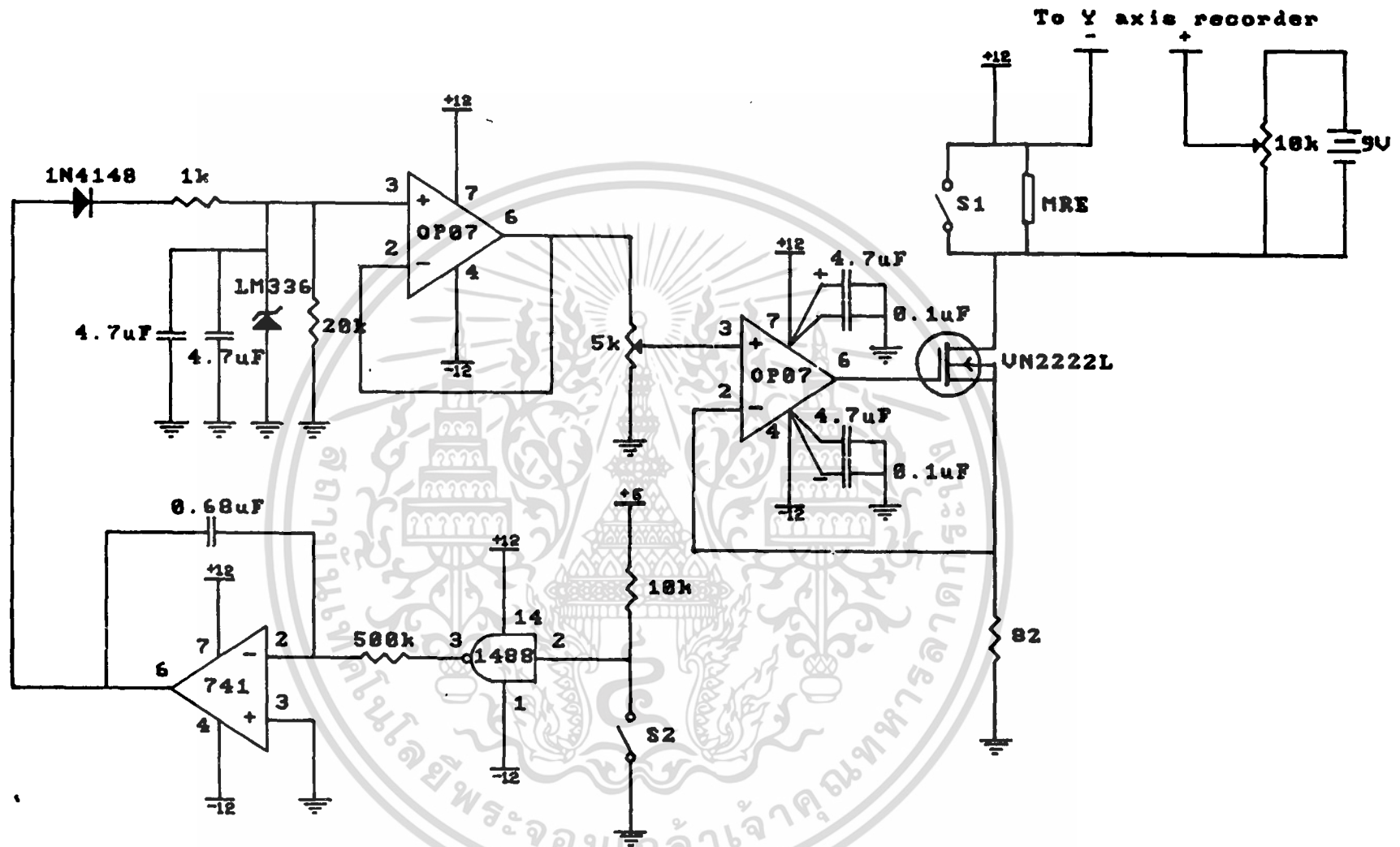


รูปที่ 3.16 ภาพแสดง X-Y recorder

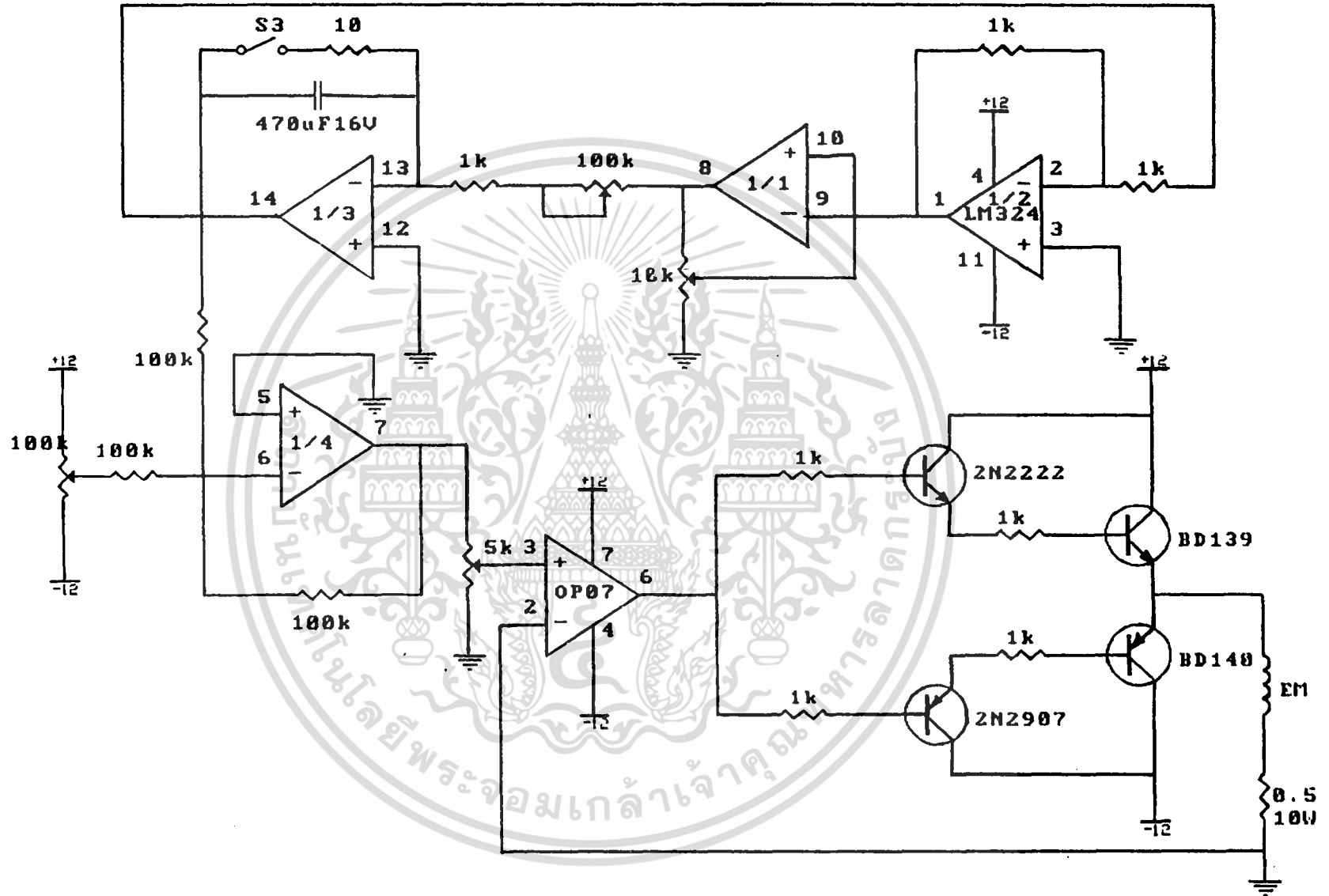
3.2 หลักการวัดของเครื่องมือ MR Head Test Set

1. ต่อ MR Head เข้ากับวงจรดังรูป 3.16
2. ทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากเกาส์มิเตอร์ โดยให้อยู่ในช่วง -200 Oersted ถึง 200 Oersted
3. วัดแรงดันของ MR Head จากนั้นปรับแรงดันของ balance generator ให้เท่ากับความต่างศักย์ของ MR Head เพื่อไม่ให้เกิดการกระชาก เนื่องจากแรงดัน dc ของ MR Head เมื่อเข้า X-Y recorder แกน Y และทำให้การวัดเกิดการสมดุล
4. นำอุปกรณ์ TL 173 ตัวหนึ่งของวงจร Differential Hall Sensor ไว้ที่ช่องว่างของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยจะนำเอาหัวทุกของ TL 173 ทั้งสองเข้า X-Y recorder แกน X
5. นำ MR Head ใส่วิวที่ช่องว่างของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอีกด้านหนึ่ง และในการใส MR head ควรจะให้สนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กสวิงมาที่ค่าศูนย์ก่อน
7. ทำการวัดความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับแรงดันจาก X-Y Recorder -

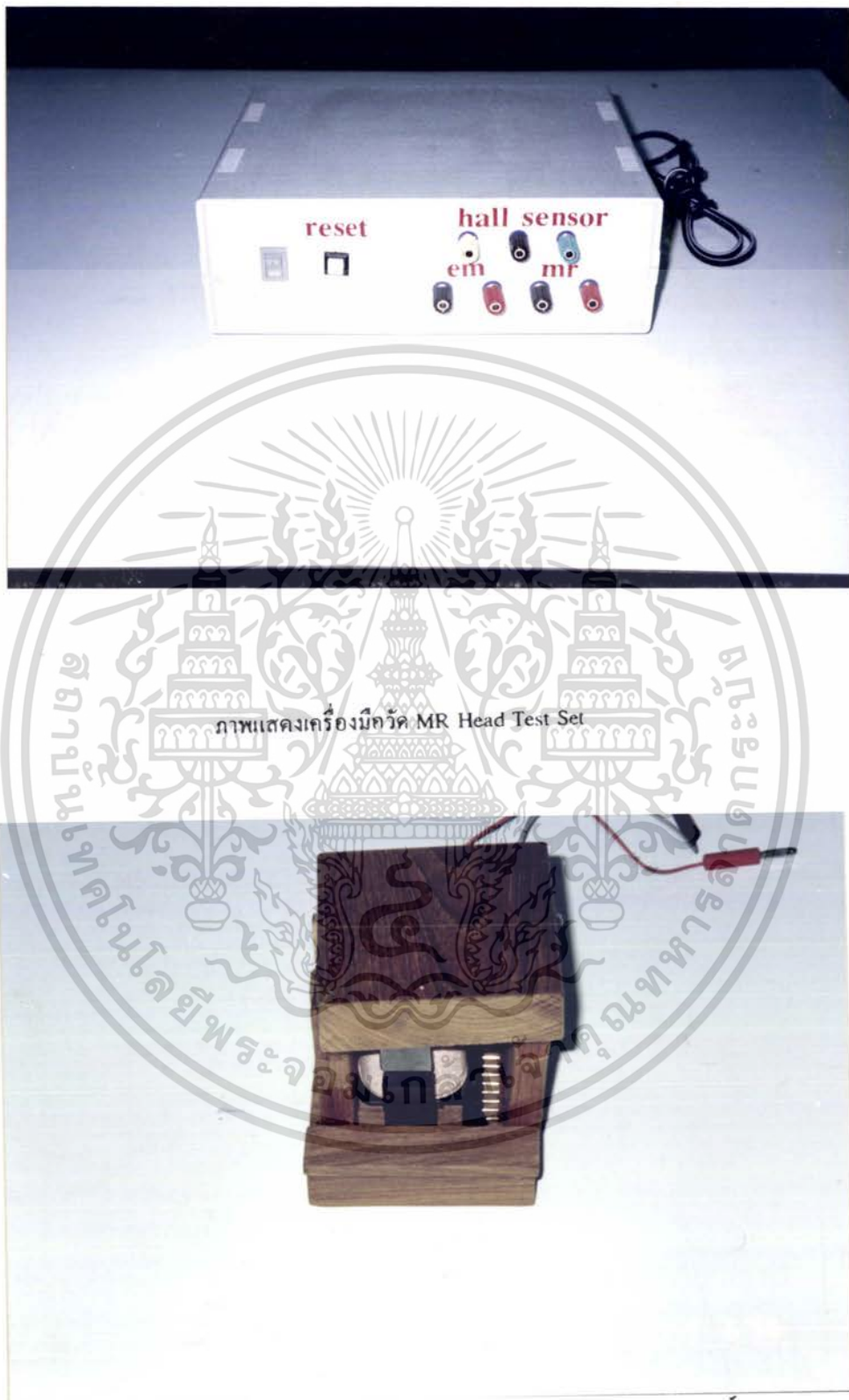
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.17 วงจรอ่านกระแสให้กับ MRE



รูปที่ 8.18 วงจร Sweep current generation สำหรับ electromagnet



ภาพแสดงแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Electromagnet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงสารตัวอย่าง Magnetoresistive Film



ภาพแสดงเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (Gaussmeter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองวัดความเปลี่ยนแปลงของ $\Delta R/R_0$ กับมุมต่าง ๆ บนสนามแม่เหล็กกระทำ โดยอ้างอิง
กับทิศทาง I

ตอนที่ 1 สนามแม่เหล็ก H ขนานกับระนาบของสารตัวอย่าง

$$R_0 = 2722$$

มุม (θ)	$\Delta R/R_0$	%
0°	8.27×10^{-3}	0.827
30°	9.74×10^{-3}	0.974
45°	9.18×10^{-3}	0.918
60°	1.13×10^{-2}	1.13
90°	1.56×10^{-2}	1.56

ตอนที่ 2 สนามแม่เหล็ก H ตั้งฉากกับระนาบของสารตัวอย่าง

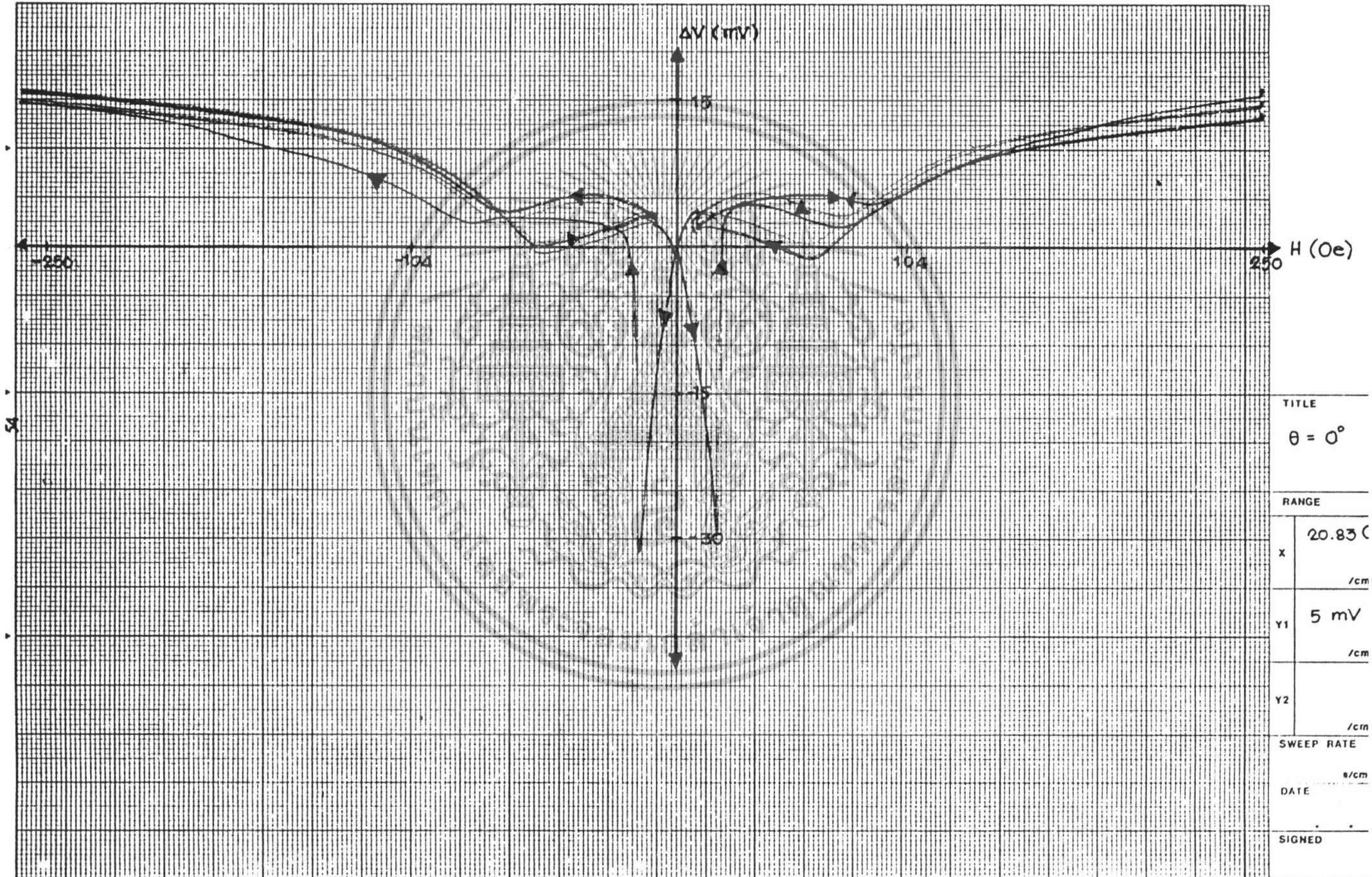
$$R_0 = 2722$$

มุม (θ)	$\Delta R/R_0$	%
0°	5.79×10^{-3}	0.579
45°	6.89×10^{-3}	0.689
90°	8.63×10^{-3}	0.863

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

YOKOGAWA ◆

รูปที่ 4.1 H || Plane of MR , $\theta = 0^\circ$, $\Delta V = 45 \text{ mV}$, $\Delta R = 22.5 \Omega$, $I = 2 \text{ mA}$, $R_0 = 2722 \Omega$, $\Delta R / R_0 = 8.27 \cdot 10^{-3}$



TITLE
 $\theta = 0^\circ$

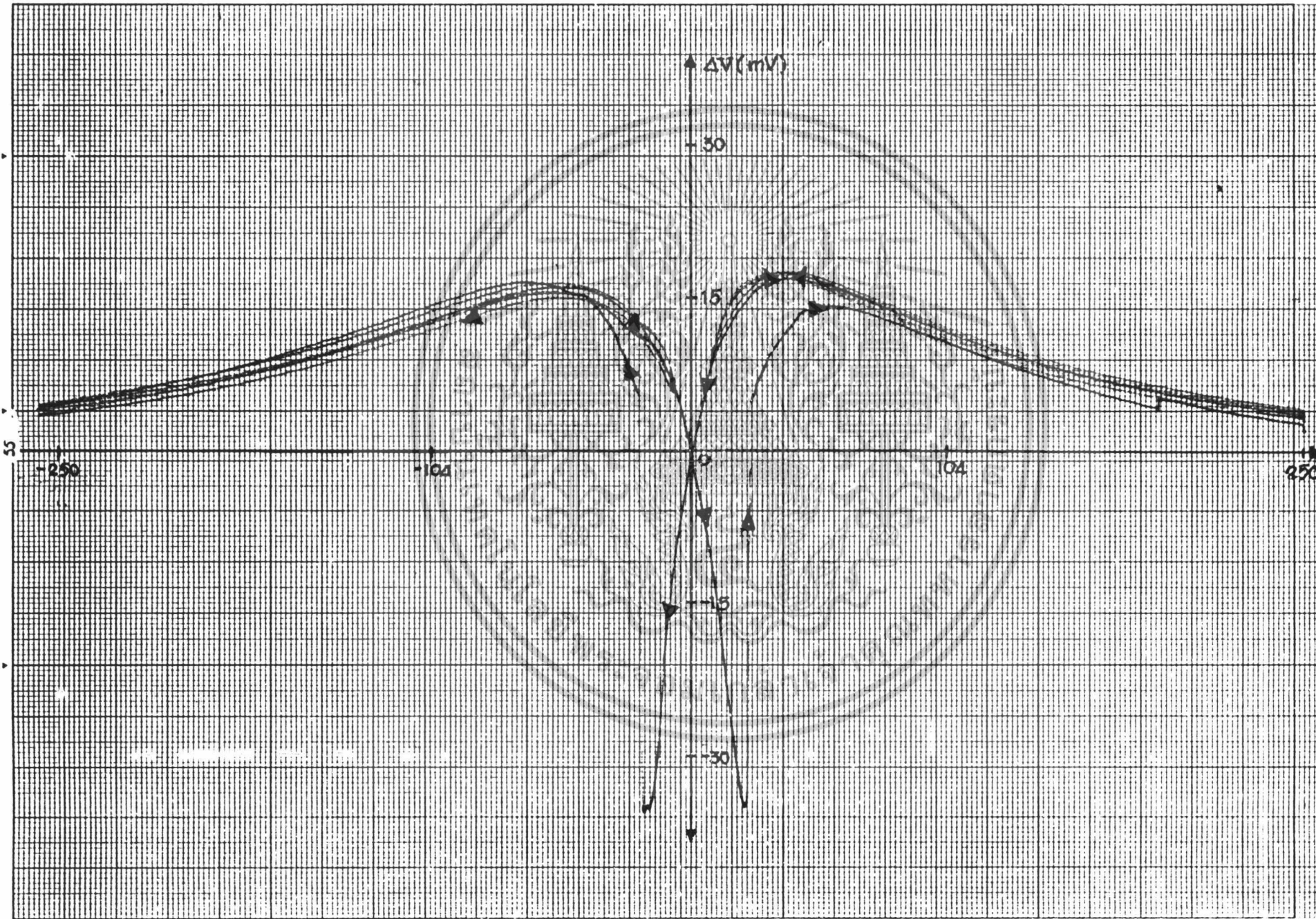
RANGE

X	20.83 (/cm
Y1	5 mV /cm
Y2	/cm

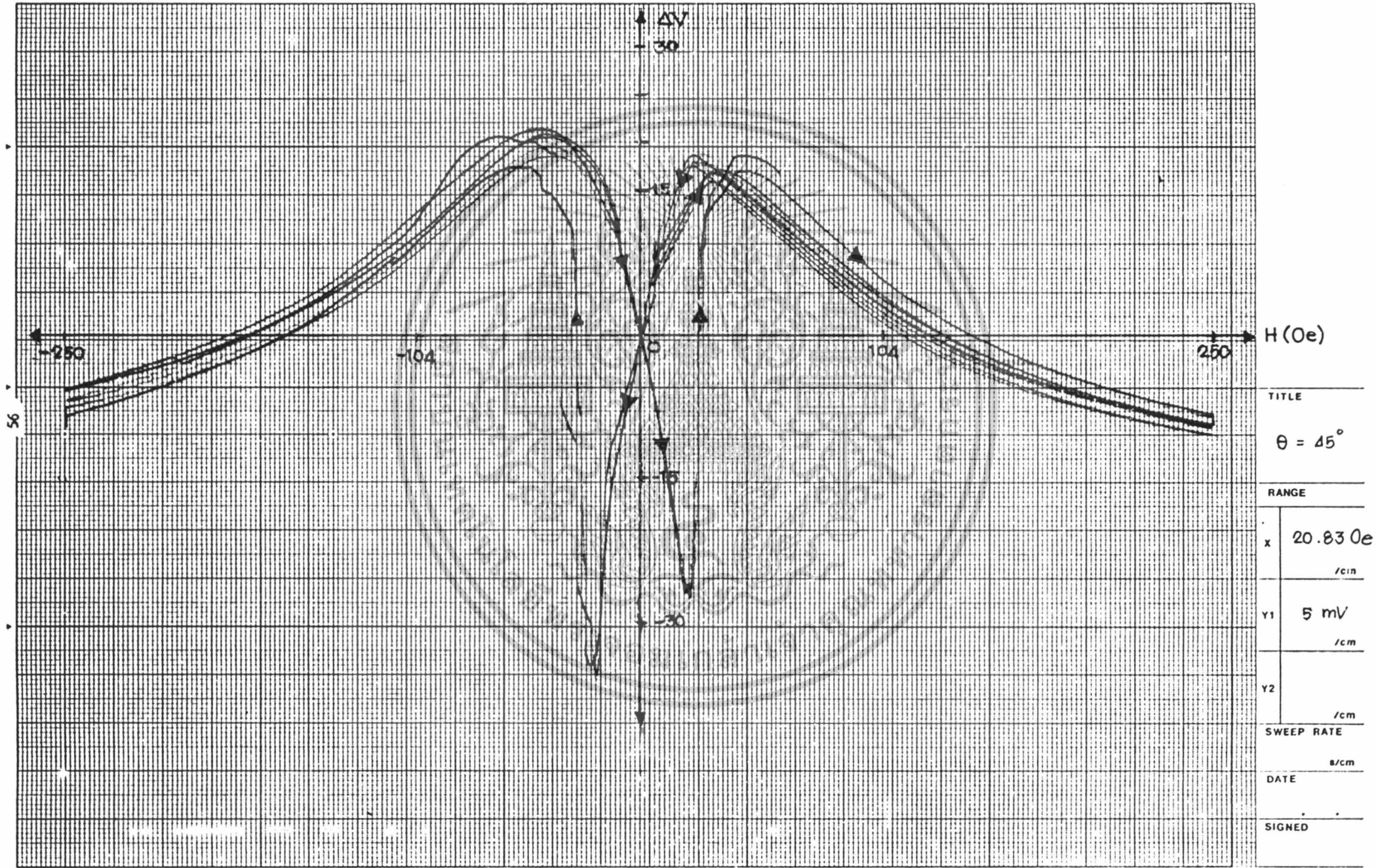
SWEEP RATE
/cm

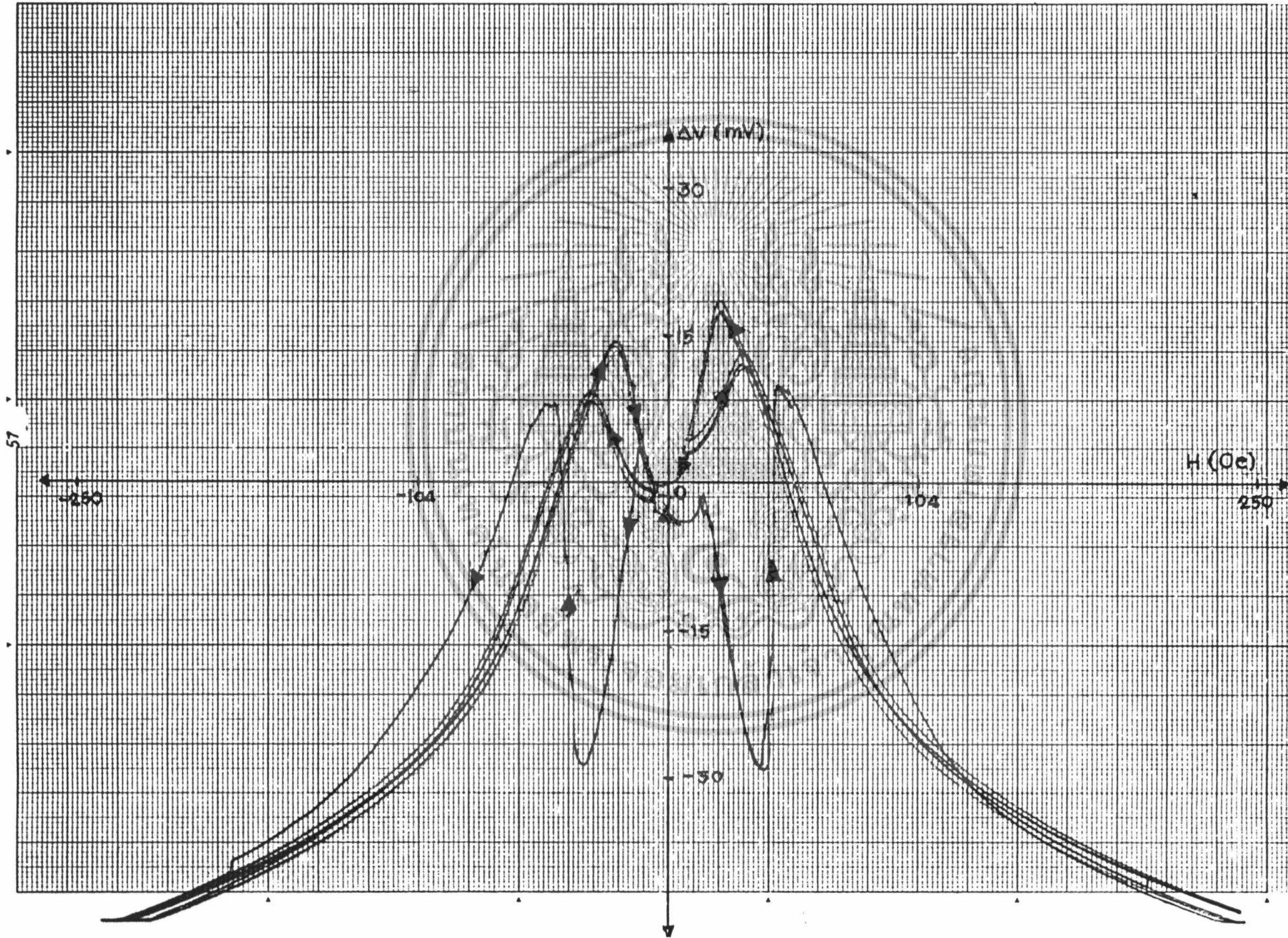
DATE

SIGNED



TITLE	
H (Oe) $\theta = 30^\circ$	
RANGE	
X	20.83 Oe /cm
Y1	5 mV /cm
Y2	/cm
SWEEP RATE	
/cm	
DATE	
SIGNED	

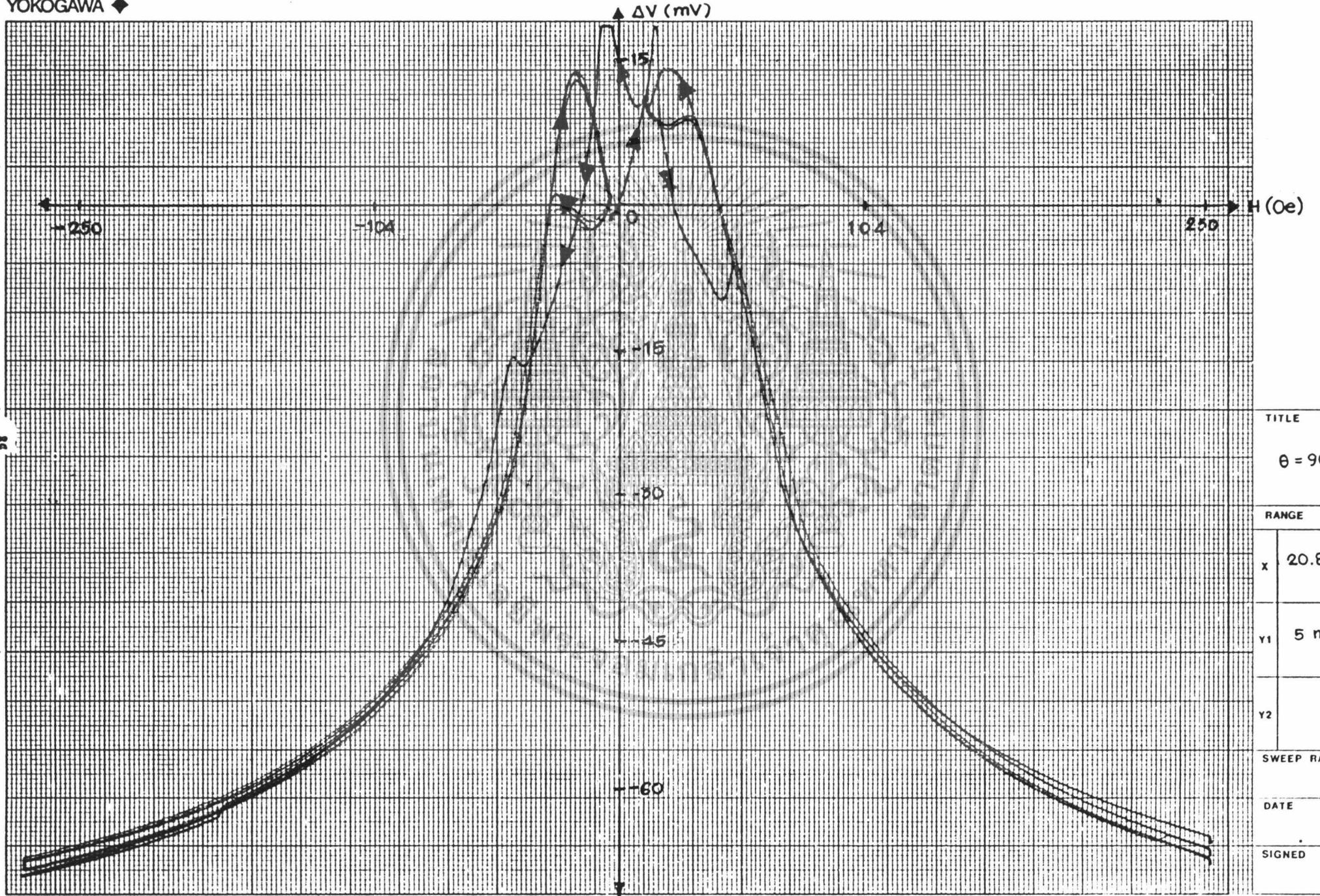




TITLE	
$\theta = 60^\circ$	
RANGE	
X	20.830e /cm
Y1	5 mV /cm
Y2	/cm
SWEEP RATE	
s/cm	
DATE	
SIGNED	

Figure 4.5 H || Plane of MR, $\theta = 90^\circ$, $\Delta V = 85 \text{ mV}$, $\Delta R = 42.5 \Omega$, $I = 2 \text{ mA}$, $R_0 = 2722 \Omega$, $\Delta R / R_0 = 1.56 \times 10^{-3}$

YOKOGAWA ◆



TITLE

$\theta = 90^\circ$

RANGE

x 20.83 Oe
/cm

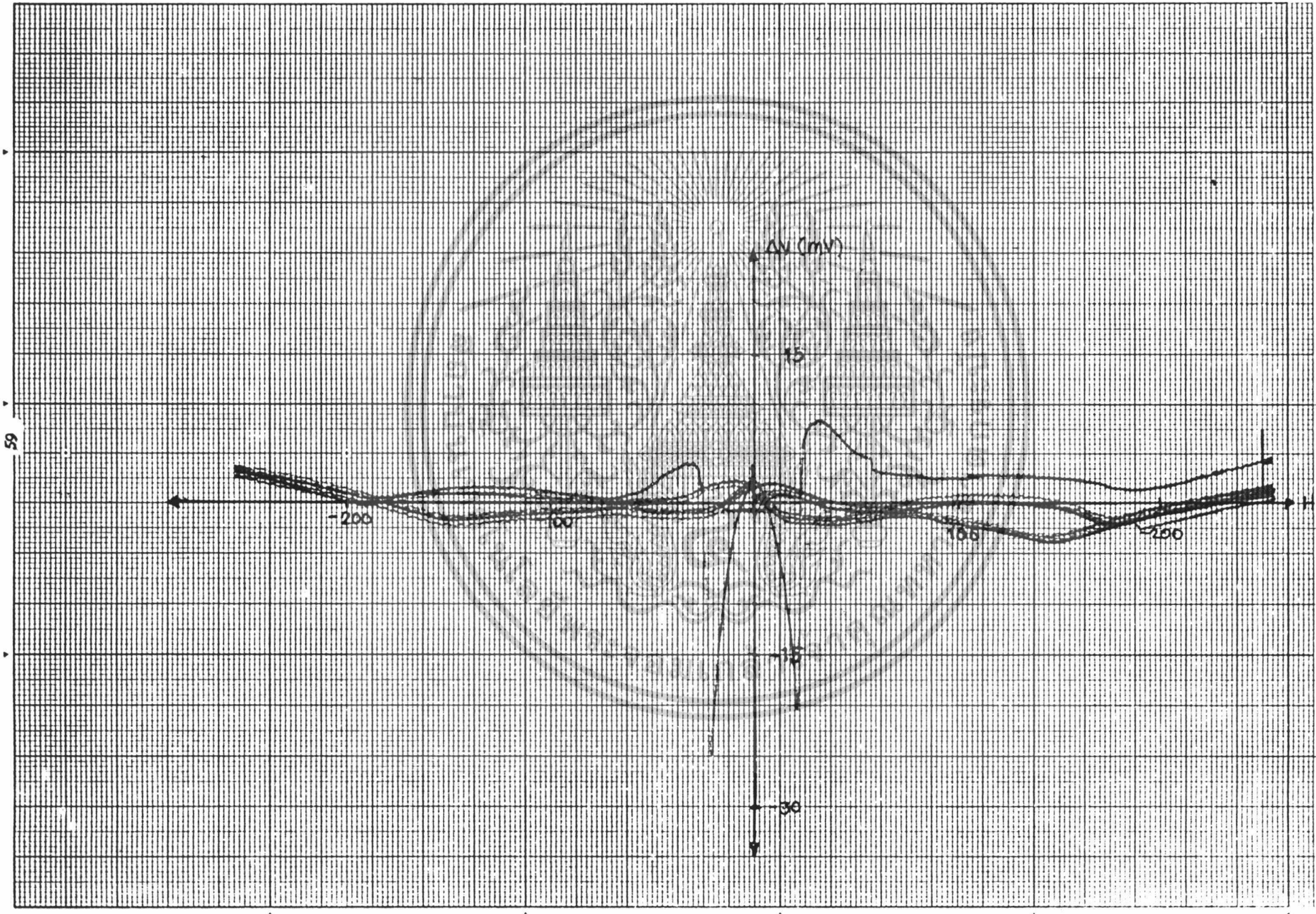
y1 5 mV
/cm

y2
/cm

SWEEP RATE
%/cm

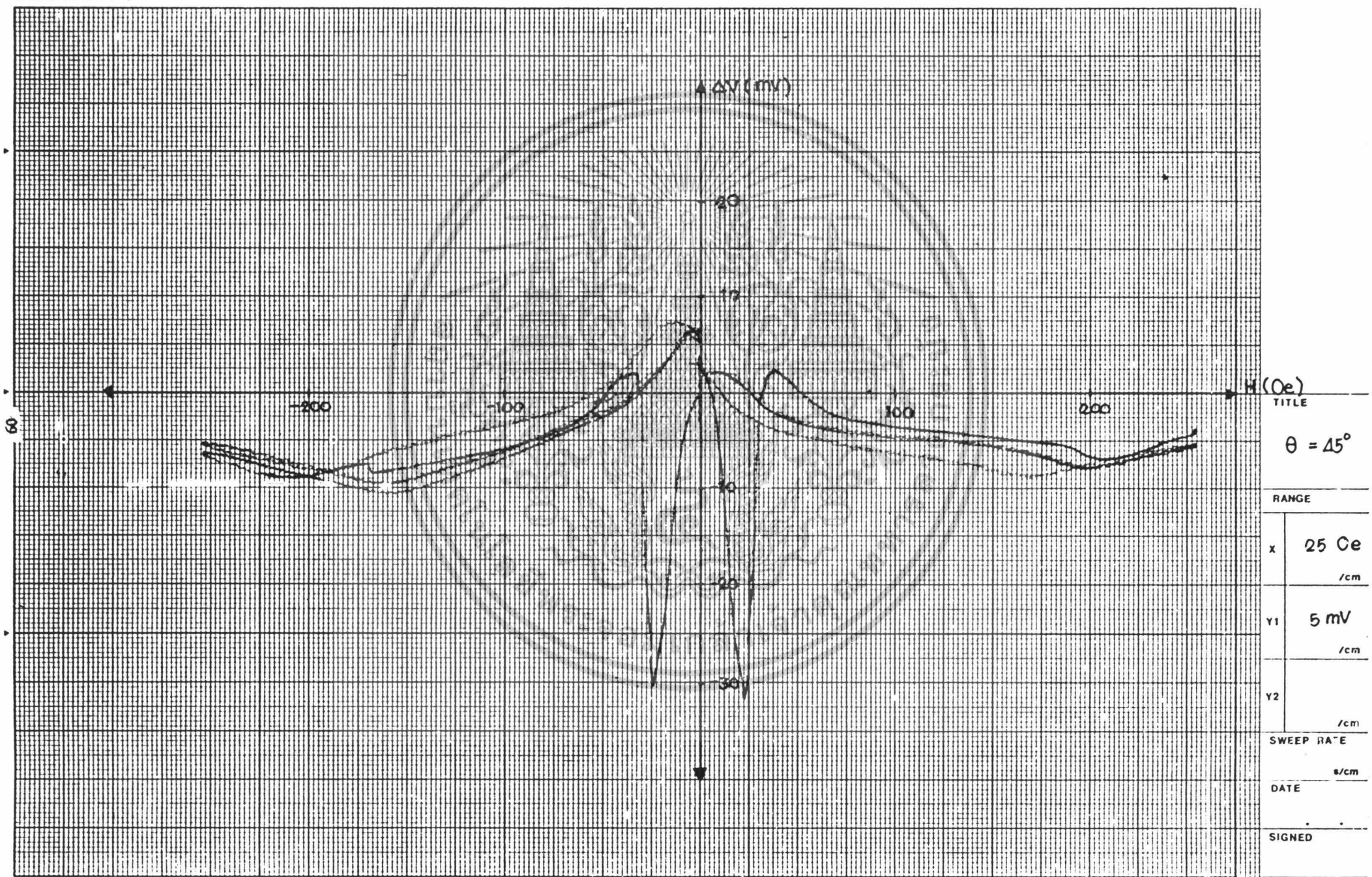
DATE

SIGNED



TITLE	$\theta = 0^\circ$
(Oe) RANGE	
x	25 Oe /cm
y1	5 mV /cm
y2	/cm
SWEEP RATE	s/cm
DATE	
SIGNED	

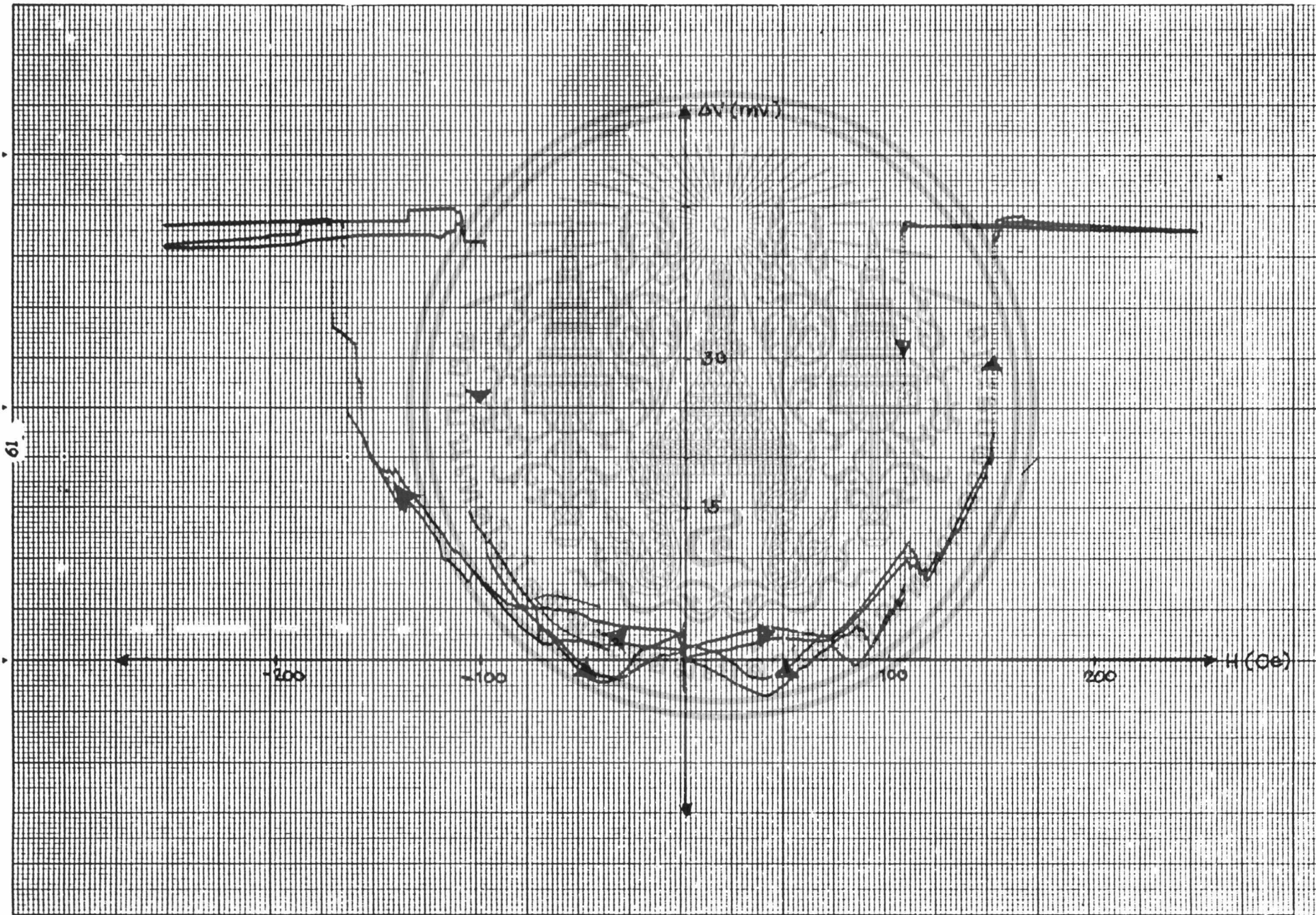
รูปที่ 4.7 H ⊥ Plane of MR , $\theta = 45^\circ$, $\Delta V = 37.5 \text{ mV}$, $\Delta R = 18.75 \Omega$, $I = 2 \text{ mA}$, $R_0 = 2722 \Omega$, $\Delta R / R_0 = 6.89 \times 10^{-3}$



TITLE	
$\theta = 45^\circ$	
RANGE	
X	25 Oe /cm
Y1	5 mV /cm
Y2	/cm
SWEEP RATE	
s/cm	
DATE	
SIGNED	

YO.KOGAWA ◆

รูปที่ 4.8 $H \perp$ Plane of MR , $\theta = 90^\circ$, $\Delta V = 47 \text{ mV}$, $\Delta R = 23.5 \Omega$, $I = 2 \text{ mA}$, $R_0 = 2722 \Omega$, $\Delta R / R_0 = 8.63 \times 10^{-3}$



TITLE	
$\theta = 90^\circ$	
RANGE	
X	25 Oe /cm
Y1	5 mV /cm
Y2	/cm
SWEEP RATE	
#/cm	
DATE	
SIGNED	

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการป้อนค่าสนามแม่เหล็กให้กับสารตัวอย่างในทั้ง 2 ระบาย คือ

1. ป้อนสนามแม่เหล็กให้ขนาดที่ระบายของสารตัวอย่าง ในกรณีนี้ สามารถสังเกตผลการทดลองที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ทำให้รู้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป ดังแสดงไว้ในกราฟทั้ง 5 กรณี โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้ว่า กราฟมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นเคียวกัน เนื่องจากผลของ hysteresis loop ซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในสารแม่เหล็ก และกรณีที่เส้นกราฟมีลักษณะที่ไม่เรียบ เนื่องมาจากปรากฏการณ์ Barkhausen jump ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกเนไทเซชัน อย่างทันทีทันใด

ที่ค่ามุมระหว่างแมกเนไทเซชัน กับ สนามแม่เหล็ก จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อ ค่ามุม θ มีค่าเพิ่มมากขึ้น peak ที่เกิดขึ้นมีค่า ออกห่างจากจุด origin เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องมาจากค่าแมกเนไทเซชันจะแปรตามสนามแม่เหล็ก ดังนั้นผนังเขตสุทธิตะพยายามปรับตัวไปตามทิศของสนามแม่เหล็ก คือ ถ้ามุม θ มีค่ามาก แมกเนไทเซชันก็จะปรับตัวมากตามไปด้วย และจากที่ค่าแมกเนไทเซชันแปรผันตามค่าความต้านทาน นั่นคือแมกเนไทเซชันมีค่ามาก ความต้านทานก็มีค่ามาก จากที่กล่าวมาแล้วว่าแมกเนไทเซชันแปรผันตามมุม θ แสดงว่าความต้านทานแปรผันตามมุม θ ด้วย ดังผลที่ได้จากการทดลอง

2. กรณีป้อนสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระบายของสารตัวอย่าง จะเห็นว่าได้ผลคล้ายกับกรณีที่ 1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้โดยตามความเป็นจริง ผลของทั้ง 2 กรณีจะไม่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากกรณีแรกต้องการสนามแม่เหล็กค่าต่ำ ๆ เท่านั้นก็สามารถทำให้แมกเนไทเซชันเปลี่ยนแปลงได้ ในขณะที่กรณีที่ 2 ต้องใช้สนามแม่เหล็กมีค่ามาก ๆ ถึงจะทำให้ค่าแมกเนไทเซชันเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งไม่ตรงกับผลการทดลองที่ได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า เราไม่สามารถรู้ถึงการจัดเรียงตัวของแมกเนไทเซชันที่แน่นอน เนื่องจากขนาดของสารมีขนาดเล็กมาก

จากที่กล่าวว่า เมื่อค่าแมกเนไทเซชันกับกระแสทำมุม 45° ได้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับสนามแม่เหล็กที่ป้อน มีความเป็นเชิงเส้น และสมมาตรกันนั้น เราไม่สามารถหาความสัมพันธ์นี้ได้ ดังเหตุผลที่กล่าวไว้

ข้อเสนอแนะ และแนวการพัฒนา

จากผลการทดลองที่กล่าวไว้เกี่ยวกับค่ามุมระหว่างแมกเนไทเซชัน กับกระแส ที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอน สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างแหล่งกำเนิดภายนอก (external source) มาควบคุม เพื่อให้ค่ามุมระหว่างแมกเนไทเซชัน กับกระแส มีความถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

TYPES TL1731, TL173C LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

D2526, MARCH 1979—REVISED NOVEMBER 1983

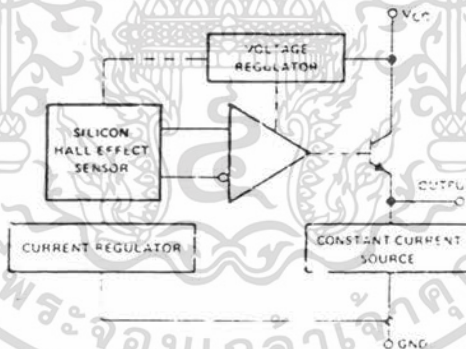
- Output Voltage Linear with Applied Magnetic Field
- Sensitivity Constant Over Wide Operating Temperature Range
- Solid-State Technology
- Three-Terminal Device
- Senses Static or Dynamic Magnetic Fields

description

The TL1731 and TL173C are low-cost magnetic field sensors designed to provide a linear output voltage proportional to the magnetic field they sense. These monolithic circuits incorporate a Hall element as the primary sensor along with a voltage reference and a precision amplifier. Temperature stabilization and internal trimming circuitry yield a device that features high overall sensitivity accuracy with less than 5% error over its operating temperature range.

The TL1731 is characterized for operation from -20°C to 85°C . The TL173C is characterized for operation from 0°C to 70°C .

functional block diagram

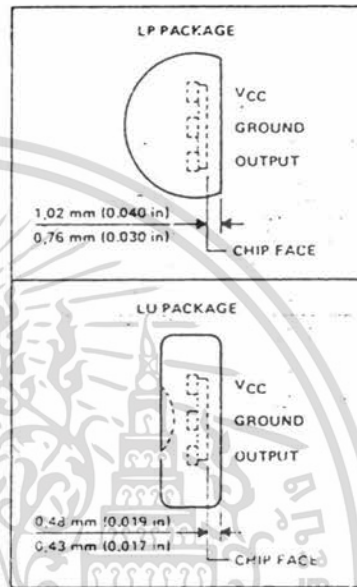


absolute maximum ratings (over operating free-air temperature range unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC}	Note 1)	25 V
Continuous total dissipation (at T_A or below 25°C free-air temperature (see Note 2))		175 mW
Operating free-air temperature range: TL1731		-20°C to 85°C
TL173C		0°C to 70°C
Storage temperature range		-65°C to 150°C
Lead temperature, 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		260°C
Magnetic flux density		50 mT (500 gauss)

- NOTES: 1. Voltage with respect to network ground terminal.
2. For operation at 25°C free-air temperature, derate linearly with temperature.

TOP VIEWS



Special Functions

5

TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 225212 • DALLAS, TEXAS 75265

5-69

TYPES TL173I, TL173C LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

recommended operating conditions

	TL173I			TL173C			UNIT	
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX		
Supply voltage, V_{CC}	10.8	12	13.2	10.8	12	13.2	V	
Magnetic flux density, B	± 50			± 50			mT	
Output current, I_O	Sink	0.5			0.5			mV
	Source	-2			-2			
Operating free-air temperature, T_A	-20	85			0	70		°C

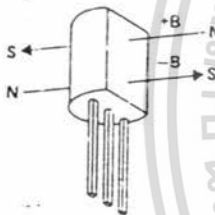
electrical characteristics over full range of recommended operating conditions (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP ²	MAX	UNIT
V_O Output voltage	$I_O = -2 \text{ mA to } 0.5 \text{ mA}$	5.8	6	6.2	V
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_O / \Delta V_{CC}$)	$B = 0 \text{ mT}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	18			mV/V
S Magnetic sensitivity ($\Delta V_O / \Delta B$)	$B = -50 \text{ to } 50 \text{ mT}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	13.5	15	18	V/T
ΔS Magnetic sensitivity change with temperature	$\Delta T_A = 25^\circ\text{C}$ to MIN or MAX	± 5			%
I_{CC} Supply current	$B = 0 \text{ mT}$, $I_O = 0$	8	12		mA
f_{max} Maximum operating frequency		100			kHz

¹For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

²Typical values are at $V_{CC} = 12 \text{ V}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$.

³The unit of magnetic flux density in the International System of Units (SI) is the tesla (T). The tesla is equal to one weber per square meter. Values expressed in milliteslas may be converted to gauss by multiplying by ten, e.g., 50 millitesla = 500 gauss.



The north pole of a magnet is the pole that is attracted by the geographical north pole. The north pole of a magnet repels the north-seeking pole of a compass. By accepted magnetic convention, lines of flux emanate from the north pole of a magnet and enter the south pole.

FIGURE 1—DEFINITION OF MAGNETIC FLUX POLARITY

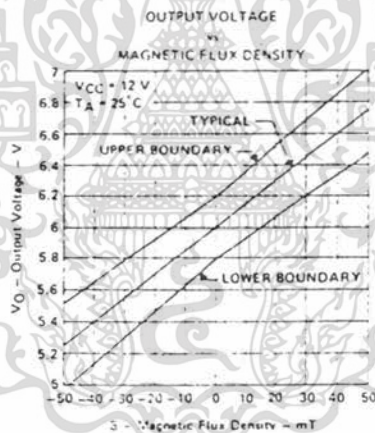


FIGURE 2

$1T = 10000 \text{ Gauss}$
 $1mT = 10000 \times 10^{-3}$
 $1mT = 10 \text{ Gauss}$

The circuit in Figure 3 may be used to adjust the sensitivity to exactly -1:

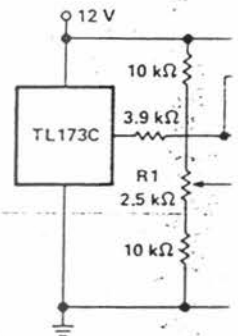


FIGURE 3—COM

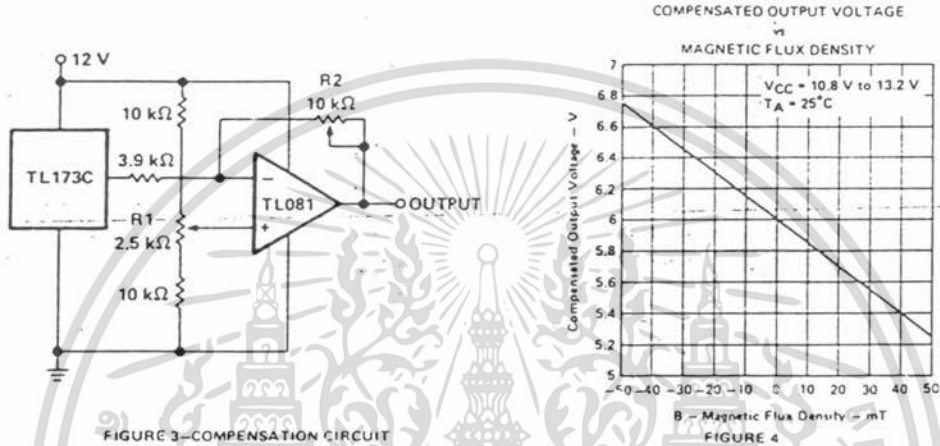
TEXAS
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 225012 • DALLAS, TEXAS 75225

TYPES TL173I, TL173C LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

TYPICAL APPLICATION DATA

The circuit in Figure 3 may be used to set the output voltage at zero field strength to exactly 6 V (using R1), and to set the sensitivity to exactly -15 V/T (using R2), as depicted in Figure 4.



UNIT
V
mT
mV
°C

UNIT
V
mV/V
V/T
mA
kHz

Special Functions

5

LM124, LM224,
LM324, LM324A
LM2902

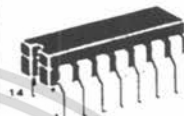
QUAD DIFFERENTIAL
INPUT
OPERATIONAL AMPLIFIERS

SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUIT

QUAD LOW POWER OPERATIONAL AMPLIFIERS

The LM124 Series are low-cost, quad operational amplifiers with true differential inputs. These have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. The quad amplifier can operate at supply voltages as low as 3.0 Volts or as high as 32 Volts with quiescent currents about one fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

- Short Circuited Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 to 32 Volts
- Low Input Bias Currents: 100 nA Max (LM324A)
- Four Amplifiers Per Package
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Industry Standard Pinouts



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 632



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646
(LM224, LM324,
LM2902 Only)



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751A
(SO-14)

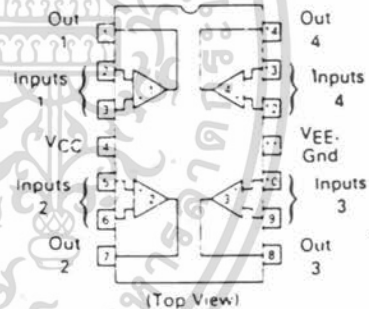
MAXIMUM RATINGS (T_A = -25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	LM124	LM224	Unit
		LM324A	LM2902	
Power Supply Voltages				V _{dc}
Single Supply	V _{CC}	32	26	
Split Supplies	V _{CC} , V _{EE}	-16	-13	
Input Differential Voltage Range (1)	V _{IDR}	-32	-26	V _{dc}
Input Common Mode Voltage Range	V _{ICR}	-0.3 to 32	-0.3 to 26	V _{dc}
Input Forward Current (2) (V _I < -0.3 V)	I _{IF}	50	—	mA
Output Short Circuit Duration	t _S	Continuous		
Junction Temperature	T _J			°C
Ceramic Package		175		
Plastic Packages		150		
Storage Temperature Range	T _{stg}			°C
Ceramic Package		-65 to -150		
Plastic Packages		-55 to -125		
Operating Ambient Temperature Range	T _A			°C
LM124		-55 to -125	—	
LM224		-25 to +85	—	
LM324		0 to +70	—	
LM324A		0 to +70	—	
LM2902		—	-40 to -105	

NOTES:

- (1) Split Power Supplies.
- (2) This input current will only exist when the voltage is negative at any of the input leads. Normal output states will reestablish when the input voltage returns to a voltage greater than -0.3 V.

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
LM124J	55 to -125°C	Ceramic DIP
LM2902D	-40 to -105	SO-14
LM2902N		Plastic DIP
LM2902J	40 to -85°C	Ceramic DIP
LM224D	25 to -85°C	SO-14
LM224J		Ceramic DIP
LM224N		Plastic DIP
LM324AD	0 to +70°C	SO-14
LM324AN		Plastic DIP
LM324D		SO-14
LM324J		Ceramic DIP
LM324N		Plastic DIP

LM124, LM224, LM324,A, LM2902

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 5.0 V, V_{EE} = Gnd, T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LM124/LM224		LM324A		LM324		LM2902		Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ		Max
Input Offset Voltage V _{CC} = 5.0 V to 30 V (26 V for LM2902), V _{ICR} = 0 V to V _{CC} , 1.7 V, V _O = 1.4 V, R _S = 0 Ω T _A = 25°C T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	V _{IO}	—	2.0	5.0	—	2.0	3.0	—	2.0	7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	ΔV _{IO} /ΔT	—	7.0	—	—	7.0	30	—	7.0	—	μV/°C
Input Offset Current T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	I _{IO}	—	3.0	30	—	5.0	30	—	5.0	50	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	ΔI _{IO} /ΔT	—	10	—	—	10	300	—	10	—	pA/°C
Input Bias Current T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	I _B	—	90	150	—	45	100	—	90	250	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 2) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), T _A = T _{high} to T _{low}	V _{ICR}	0	—	28.3	0	—	28.3	0	—	28.3	V
Differential Input Voltage Range	V _{IDR}	—	—	V _{CC}	—	—	V _{CC}	—	—	V _{CC}	V
Large Signal Open-Loop Voltage Gain R _L = 2.0 kΩ, V _{CC} = 15 V, For Large V _O Swing T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	AV _{OL}	50	100	—	25	100	—	25	100	—	V/mV
Channel Separation 1.0 kHz, f = 20 kHz, Input Referenced R _S = 10 kΩ	CMRR	70	85	—	65	70	—	65	70	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	65	100	—	65	100	—	65	100	—	dB
Output Voltage Range R _L = 2.0 kΩ, R _I = 10 kΩ for LM2902	V _{OR}	0	—	3.3	0	—	3.3	0	—	3.3	V
Output Voltage — High Limit (T _A = T _{high} to T _{low}) (Note 1) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), R _L = 2.0 kΩ V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), R _L = 10 kΩ	V _{O(H)}	26	—	—	26	—	—	26	—	22	V
Output Voltage — Low Limit V _{CC} = 5.0 V, R _L = 10 kΩ, T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	V _{O(L)}	—	—	5.0	—	5.0	20	—	5.0	20	mV
Output Source Current (V _{ID} = 1.0 V, V _{CC} = 15 V) T _A = 25°C T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	I _O	20	40	—	20	40	—	20	40	—	mA
Output Sink Current V _{ID} = 1.0 V, V _{CC} = 15 V T _A = 25°C T _A = T _{high} to T _{low} (Note 1)	I _O	10	20	—	10	20	—	10	20	—	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 3) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), V _O = 0 V, R _L = 10 kΩ V _{CC} = 5.0 V, V _O = 0 V, R _L = 10 kΩ	I _{OS}	—	40	60	—	40	60	—	40	60	mA
Power Supply Current (T _A = T _{high} to T _{low}) (Note 1) V _{CC} = 30 V (26 V for LM2902), V _O = 0 V, R _L = 10 kΩ V _{CC} = 5.0 V, V _O = 0 V, R _L = 10 kΩ	I _{CC}	—	—	3.0	—	1.4	3.0	—	—	3.0	mA

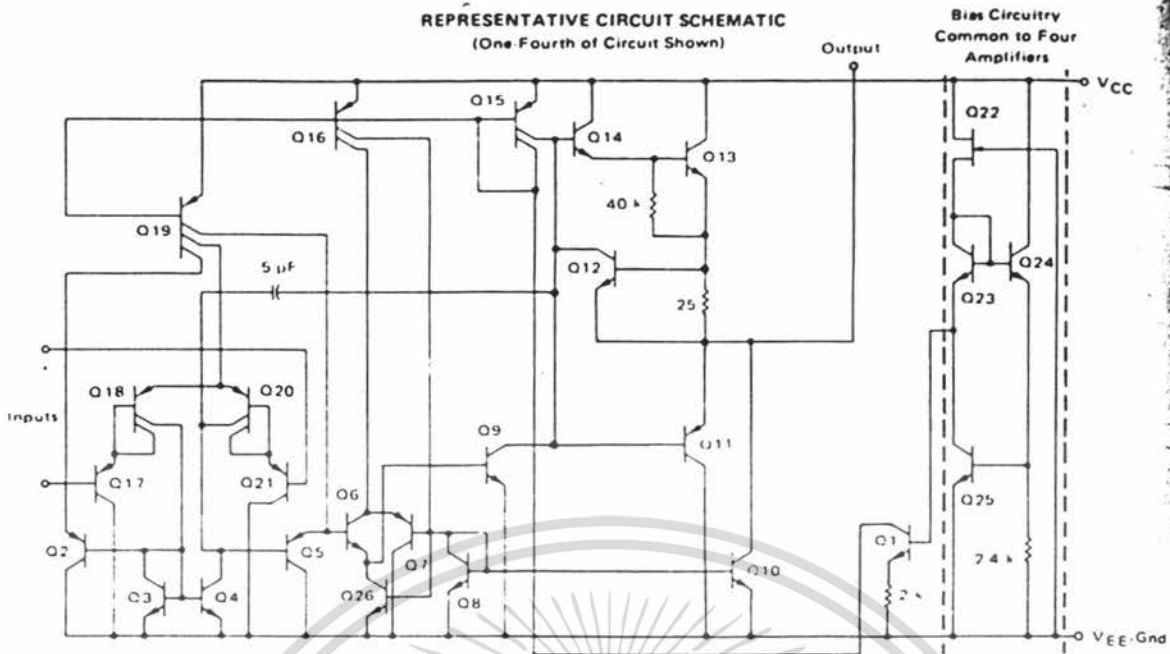
NOTES
 (1) T_{low} = 55°C for LM124, 40°C for LM2902, 25°C for LM224, 0°C for LM324.A
 T_{high} = 125°C for LM124, 85°C for LM224, 70°C for LM324.A, 105°C for LM2902

- 2: The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common-mode voltage range is V_{CC} - 1.7 V.
- 3: Short circuits from the output to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

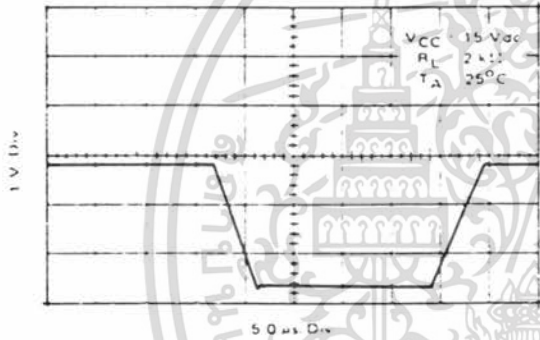
MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2



LARGE SIGNAL VOLTAGE FOLLOWER RESPONSE

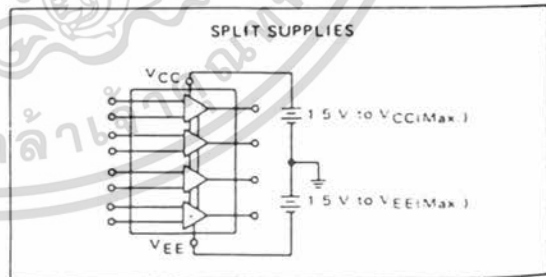
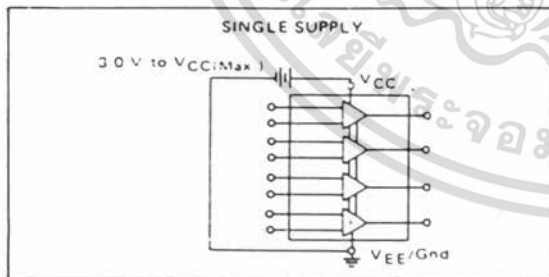


CIRCUIT DESCRIPTION

The LM124 Series is made using four internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage

of each consists of differential input devices Q20 and Q18 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance a smaller compensation capacitor (only 5 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common-mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

Each amplifier is biased from an internal voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.



LM124, LM224, LM324, A, LM2902

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

FIGURE 1 - INPUT VOLTAGE RANGE

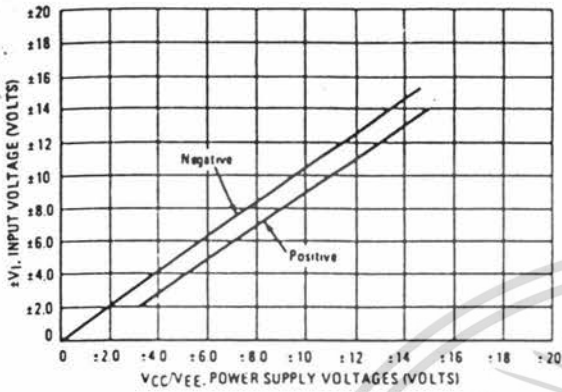
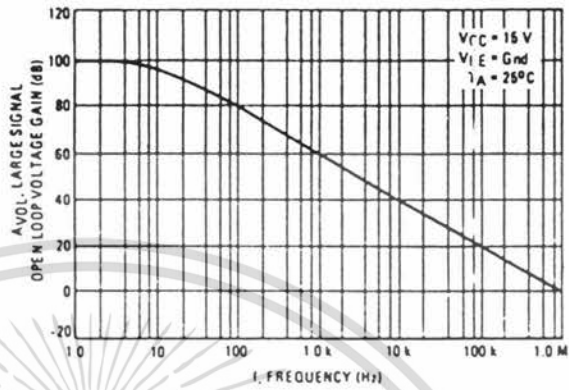


FIGURE 2 - OPEN LOOP FREQUENCY



2

FIGURE 3 - LARGE-SIGNAL FREQUENCY RESPONSE

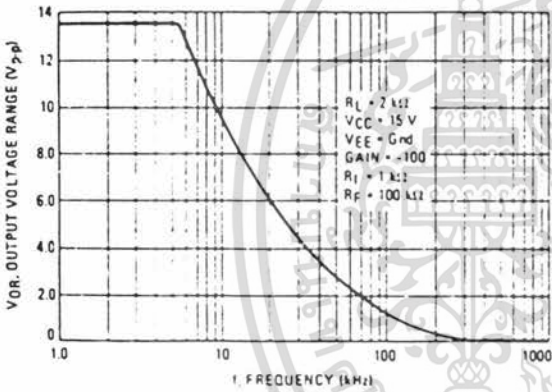


FIGURE 4 - SMALL-SIGNAL VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (Non-Inverting)

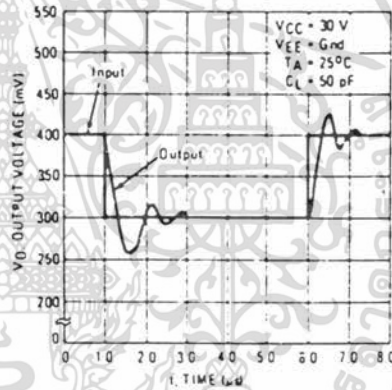


FIGURE 5 - POWER SUPPLY CURRENT versus POWER SUPPLY VOLTAGE

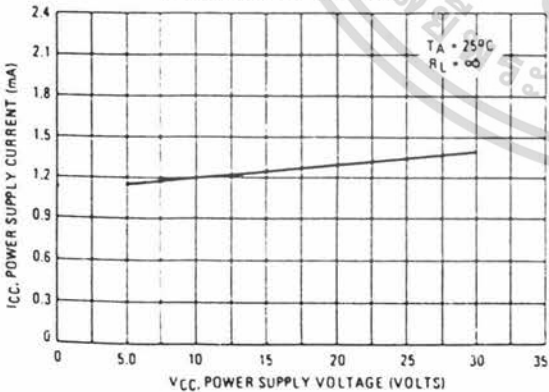
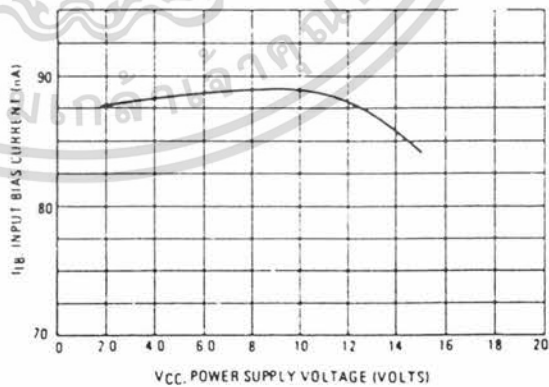


FIGURE 6 - INPUT BIAS CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 7 - VOLTAGE REFERENCE

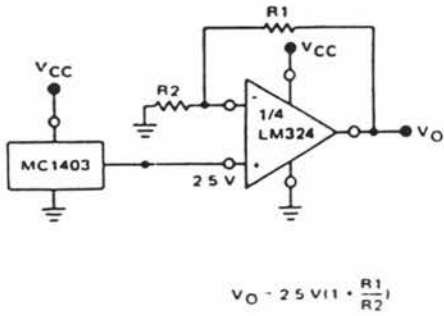


FIGURE 8 - WIEN BRIDGE OSCILLATOR

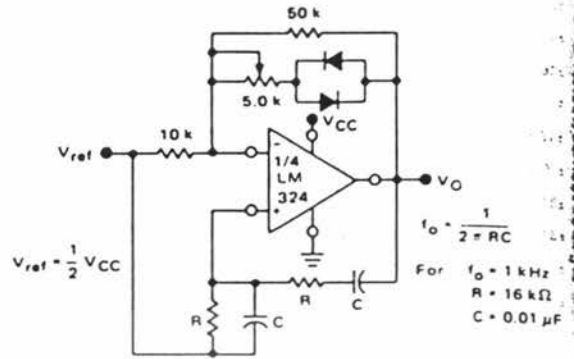


FIGURE 9 - HIGH IMPEDANCE DIFFERENTIAL AMPLIFIER

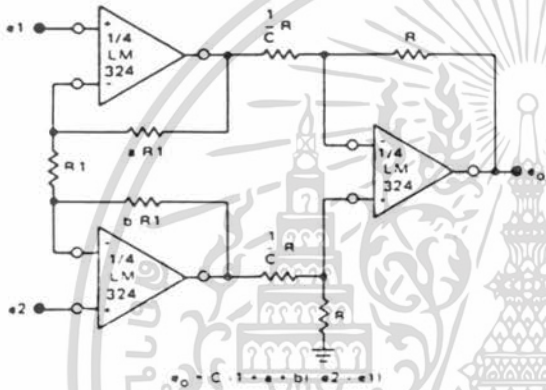


FIGURE 10 - COMPARATOR WITH HYSTERESIS

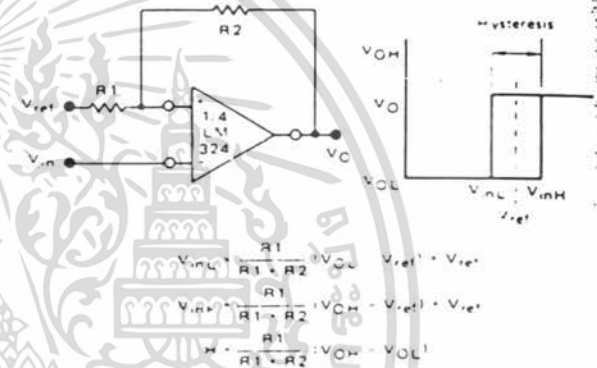
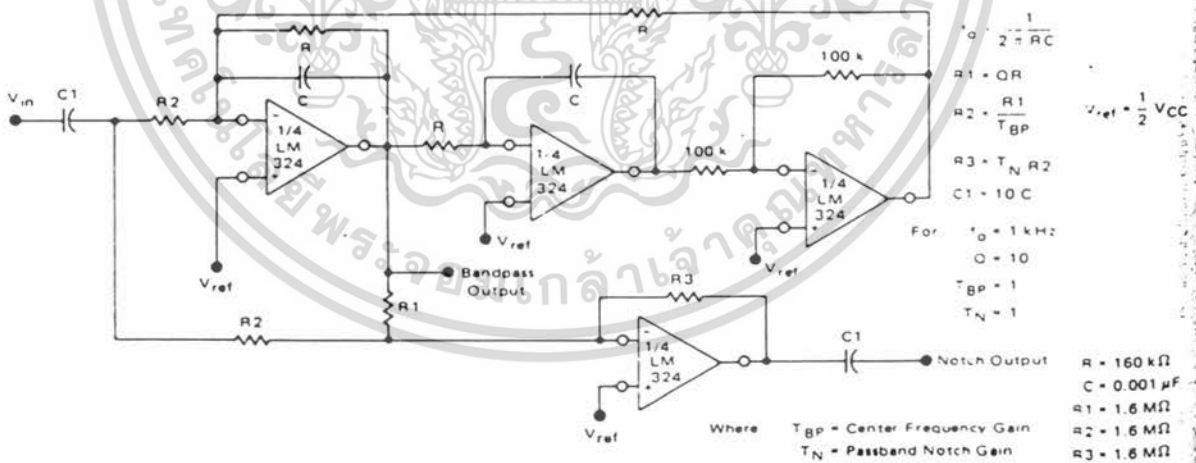


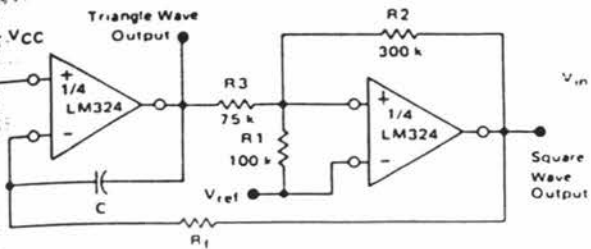
FIGURE 11 - BI-QUAD FILTER



LM124, LM224, LM324, A, LM2902

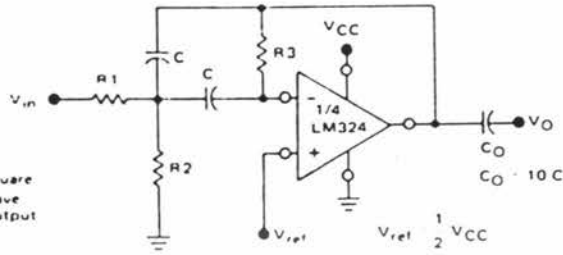
APPLICATIONS INFORMATION (continued)

FIGURE 12 - FUNCTION GENERATOR



$$f = \frac{R1 \cdot RC}{4 \cdot CH1 \cdot R1} \quad \text{if } R3 = \frac{R2 \cdot R1}{R2 + R1}$$

FIGURE 13 - MULTIPLE FEEDBACK BANDPASS FILTER



Given: f_0 - Center Frequency
 $A(f_0)$ - Gain at Center Frequency

Choose Value $f_0 \cdot C$
 Then

$$R3 = \frac{C}{f_0 \cdot C}$$

$$R1 = \frac{R3}{2 \cdot A(f_0)}$$

$$R2 = \frac{R1 \cdot R3}{4 \cdot Q^2 \cdot R1 \cdot R3}$$

For less than 10% error from operational amplifier

$$Q \geq 10 \quad \text{Where } f_0 \text{ and BW are expressed in Hz}$$

If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters.

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2-65
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μA741

FREQUENCY-COMPENSATED OPERATIONAL AMPLIFIER

FAIRCHILD LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

GENERAL DESCRIPTION — The μA741 is a high performance monolithic Operational Amplifier constructed using the Fairchild Planar* epitaxial process. It is intended for a wide range of analog applications. High common mode voltage range and absence of latch-up tendencies make the μA741 ideal for use as a voltage follower. The high gain and wide range of operating voltage provides superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications. Electrical characteristics of the μA741A and E are identical to MIL-M-38510/10101.

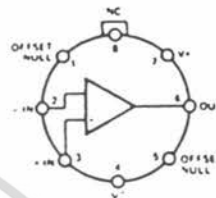
- NO FREQUENCY COMPENSATION REQUIRED
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OFFSET VOLTAGE NULL CAPABILITY
- LARGE COMMON MODE AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGES
- LOW POWER CONSUMPTION
- NO LATCH-UP

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage		
μA741A, μA741, μA741E		-22 V
μA741C		-18 V
Internal Power Dissipation (Note 1)		
Metal Can		500 mW
Molded and Hermetic DIP		670 mW
Mini DIP		310 mW
Flatpak		570 mW
Differential Input Voltage		+30 V
Input Voltage (Note 2)		+15 V
Storage Temperature Range		
Metal Can, Hermetic DIP, and Flatpak		-65°C to +150°C
Mini DIP, Molded DIP		-55°C to +75°C
Operating Temperature Range		
Military (μA741A, μA741)		-55°C to +75°C
Commercial (μA741E, μA741C)		0°C to +70°C
Lead Temperature (Soldering)		
Metal Can, Hermetic DIPs, and Flatpak (60 s)		300°C
Molded DIPs (10 s)		260°C
Output Short Circuit Duration (Note 3)		indefinite

CONNECTION DIAGRAMS

8-LEAD METAL CAN (TOP VIEW)
PACKAGE OUTLINE 58

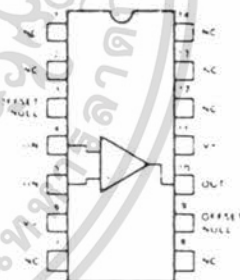


Note: Pin 4 connected to case

ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741AHM
μA741	μA741HM
μA741E	μA741EHC
μA741C	μA741HC

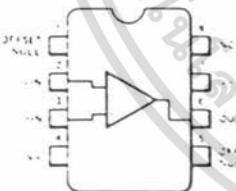
14-LEAD DIP (TOP VIEW)
PACKAGE OUTLINE 6A, 9A



ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741ADM
μA741	μA741DM
μA741E	μA741EDC
μA741C	μA741DC
μA741C	μA741PC

8-LEAD MINIDIP (TOP VIEW)
PACKAGE OUTLINES 6T, 6R
PACKAGE CODES T, R



ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
μA741C	μA741TC
μA741C	μA741RC

10-LEAD FLATPAK (TOP VIEW)
PACKAGE OUTLINE 3F



ORDER INFORMATION

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741AFM
μA741	μA741FM

Notes on following pages.

*Planar is a patented Fairchild process.

FAIRCHILD LINEAR INTEGRATED CIRCUITS • $\mu A741$

$\mu A741A$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$ unless otherwise specified)

PARAMETERS (see definitions)	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Offset Voltage	$R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0	mV
Average Input Offset Voltage Drift				15	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current			3.0	30	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5	$nA/^\circ C$
Input Bias Current			30	80	nA
Power Supply Rejection Ratio	$V_S = +10, -20, V_S = +20, -10V, R_S = 50\Omega$		15	50	$\mu V/V$
Output Short Circuit Current		10	75	35	mA
Power Dissipation	$V_S = \pm 20V$		80	150	mW
Input Impedance	$V_S = \pm 20V$	1.0	6.0		M Ω
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 20V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 15V$		50		V/mV
Transient Response (Unity Gain)	Rise Time		0.25	0.8	μs
	Overshoot		6.0	20	%
Bandwidth (Note 4)		437	1.5		MHz
Slew Rate (Unity Gain)	$V_{IN} = \pm 10V$	0.3	0.7		V/ μs
The following specifications apply for $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$					
Input Offset Voltage				4.0	mV
Input Offset Current				70	nA
Input Bias Current				210	nA
Common Mode Rejection Ratio	$V_S = \pm 20V, V_{IN} = \pm 15V, R_S = 50\Omega$	80	95		dB
Adjustment For Input Offset Voltage	$V_S = \pm 20V$		10		mV
Output Short Circuit Current		10		40	mA
Power Dissipation	$V_S = \pm 20V$	$-55^\circ C$		165	mW
		$+125^\circ C$		135	mW
Input Impedance	$V_S = \pm 20V$	0.5			M Ω
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$	$R_L = 10k\Omega$		-16	V
		$R_L = 2k\Omega$		-15	V
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 20V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 15V$		32		V/mV
		$V_S = \pm 5V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 2V$	10		V/mV

NOTES

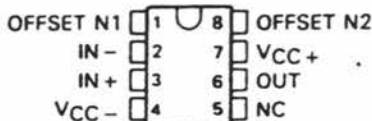
1. Rating applies to ambient temperatures up to $70^\circ C$. Above $70^\circ C$ ambient derate linearly at $6.3mW/^\circ C$ for the metal can, $8.3mW/^\circ C$ for the DIP and $7.1mW/^\circ C$ for the Flatpak.
2. For supply voltages less than $\pm 15V$, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
3. Short circuit may be to ground or either supply. Rating applies to $+125^\circ C$ case temperature or $75^\circ C$ ambient temperature.
4. Calculated value from $BW[MHz] = \frac{0.25}{\text{Rise Time } [\mu s]}$

OP-07C, OP-07D, OP-07E ULTRA-LOW-OFFSET-VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

D2757, OCTOBER 1983—REVISED JUNE 1988

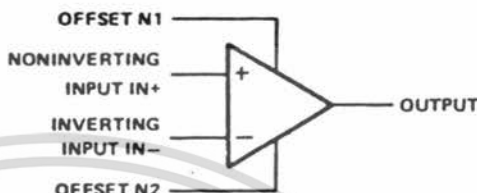
- Ultra-Low Offset Voltage . . . 30 μV Typ (OP-07E)
- Ultra-Low Offset Voltage Temperature Coefficient . . . 0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Typ (OP-07E)
- Ultra-Low Noise
- No External Components Required
- Replaces Chopper Amplifiers at a Lower Cost
- Single-Chip Monolithic Fabrication
- Wide Input Voltage Range
0 to ± 14 V Typ
- Wide Supply Voltage Range
 ± 3 V to ± 18 V
- Essentially Equivalent to Fairchild $\mu\text{A}714$ Operational Amplifiers
- Direct Replacement for PMI OP-07C, OP-07D, OP-07E

D, JG, OR P PACKAGE
(TOP VIEW)



NC—No internal connection

symbol



description

These devices represent a breakthrough in operational amplifier performance. Low offset and long-term stability are achieved by means of a low-noise, chopperless, bipolar-input-transistor amplifier circuit. For most applications, external components are required for offset nulling and frequency compensation. The true differential input, with a wide input voltage range and outstanding common-mode rejection, provides maximum flexibility and performance in high-noise environments and in noninverting applications. Low bias currents and extremely high input impedances are maintained over the entire temperature range. The OP-07 is unsurpassed for low-noise, high-accuracy amplification of very-low-level signals.

These devices are characterized for operation from 0°C to 70°C .

AVAILABLE OPTIONS

T _A	V _{IO} MAX at 25°C	PACKAGE		
		SMALL OUTLINE (D)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (P)
0°C	150 μV	OP-07CD	OP-07CJG	OP-07CP
to		OP-07DD	OP-07DJG	OP-07DP
70°C	75 μV	OP-07ED	OP-07EJG	OP-07EP

The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type when ordering. (e.g., OP-07CDR)

2

Operational Amplifiers

PRODUCTION DATA documents contain information current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1983, Texas Instruments Incorporated

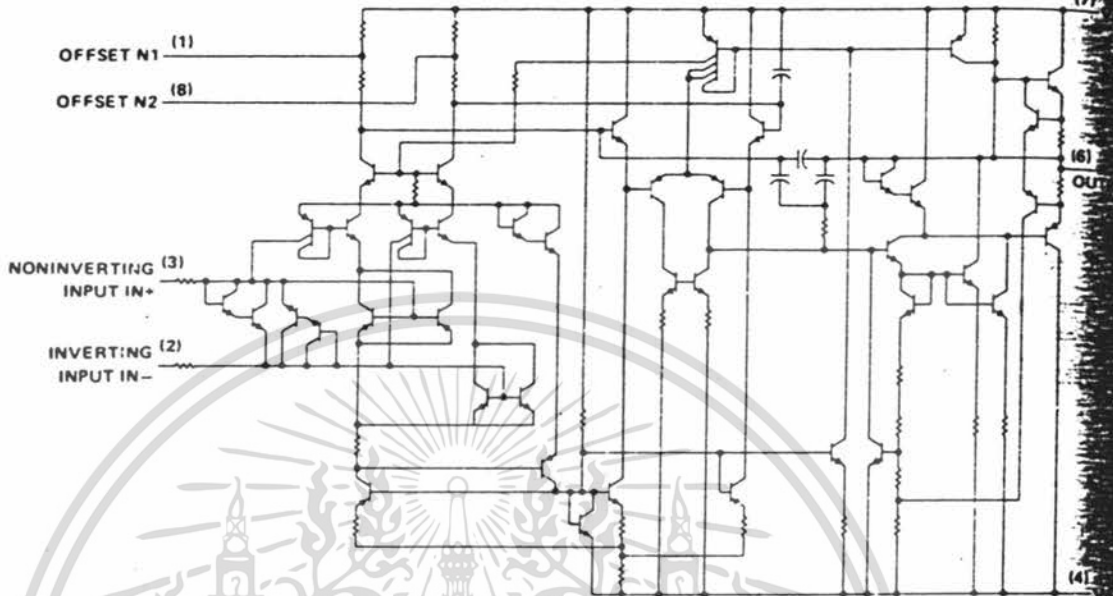
**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75265

2-147

OP-07C, OP-07D, OP-07E
ULTRA-LOW-OFFSET VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

schematic



2
Operational Amplifiers

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage V_{CC+} (see Note 1)	.....
Supply voltage V_{CC-}	.....
Differential input voltage (see Note 2)	.....
Input voltage (either input, see Note 3)	.....
Duration of output short circuit (see Note 4)	.....	unlim
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 5)	.....	500
Operating free-air temperature range	.....	0°C to 70
Storage temperature range	.....	-65°C to 150
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: JG package	.....	300
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: D or P package	.....	260

- NOTES: 1. All voltage values, unless otherwise noted, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
 2. Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
 3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
 4. The output may be shorted to ground or either power supply.
 5. For operation above 64°C free-air temperature, derate the D package to 464 mW at 70°C at the rate of 5.8 mW/°C.

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} \pm = \pm 15\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†			OP-7C			OP-7D			OP-7E			UNIT
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	25°C	60	150	60	150	30	75	- μV				
			0°C to 70°C	85	250	85	250	45		130			
α_{VIO} Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	0°C to 70°C	0.5	1.8	0.7	2.5	0.3	1.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$				
Long-term drift of input offset voltage	See Note 6			0.4		0.5		0.3	$\mu\text{V}/\text{mo}$				
Offset adjustment range	$R_S = 20\ \text{k}\Omega$, See Figure 1	25°C	± 4		± 4		± 4		mV				
I_{IO} Input offset current		25°C	0.8	6	0.8	6	0.5	3.8	nA				
		0°C to 70°C	1.6	8	1.6	8	0.9	5.3					
α_{IIO} Temperature coefficient of input offset current		0°C to 70°C	12	50	12	50	8	35	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$				
I_{IB} Input bias current		25°C	± 1.8	± 7	± 2	± 12	± 1.2	± 4	nA				
		0°C to 70°C	± 2.2	± 9	± 3	± 14	± 1.5	± 5.5					
α_{IIB} Temperature coefficient of input bias current		0°C to 70°C	18	50	18	50	13	35	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$				
V_{ICR} Common-mode input voltage range		25°C	± 13	± 14	± 13	± 14	± 13	± 14	V				
		0°C to 70°C	± 13	± 13.5	± 13	± 13.5	± 13	± 13.5					
V_{OM} Peak output voltage	$R_L \geq 10\ \text{k}\Omega$	25°C	± 12	± 13	± 12	± 13	± 12.5	± 13	V				
			$R_L \geq 2\ \text{k}\Omega$	± 11.5	± 12.8	± 11.5	± 12.8	± 12		± 12.8			
			$R_L \geq 1\ \text{k}\Omega$		± 12		± 12	± 10.5		± 12			
			$R_L \geq 2\ \text{k}\Omega$	0°C to 70°C	± 11	± 12.6	± 11	± 12.6		± 12	± 12.6		
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} \pm = \pm 3\text{ V}$, $V_O = \pm 0.5\text{ V}$, $R_L \geq 500\ \text{k}\Omega$	25°C	100	400	400		150	400	V/mV				
		25°C	120	400	120	400	200	500					
		0°C to 70°C	100	400	100	400	180	450					
B_1 Unity gain bandwidth		25°C	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	MHz				
r_i Input resistance		25°C	8	33	7	31	15	50	M Ω				
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = \pm 13\text{ V}$, $R_S = 50\ \Omega$	25°C	100	120	94	110	106	123	dB				
		0°C to 70°C	97	120	94	106	103	123					
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	$V_{CC} \pm = \pm 3\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$, $R_S = 50\ \Omega$	25°C	7	32	7	32	5	20	$\mu\text{V}/\text{V}$				
		0°C to 70°C	10	51	10	51	7	32					
P_D Power dissipation	$V_O = 0$, No load	25°C	80	150	80	150	75	120	mW				
			$V_{CC} \pm = \pm 3\text{ V}$, $V_O = 0$, No load	4	8	4	8	4		6			

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise noted.

NOTE 6: Since long-term drift cannot be measured on the individual devices prior to shipment, this specification is not intended to be a guarantee or warranty. It is an engineering estimate of the averaged trend line of drift versus time over extended periods after the first thirty days of operation.

POST OFFICE BOX 658012 • DALLAS, TEXAS 75265

TEXAS
INSTRUMENTS

2-149

OP-07C, OP-07D, OP-07E
ULTRA-LOW-OFFSET-VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

Operational Amplifiers

2

OP-07C, OP-07D, OP-07E
ULTRA-LOW-OFFSET VOLTAGE OPERATIONAL AMPLIFIERS

operating characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$ (unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		OP-7C			OP-7D			OP-7E		
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX
V_n Equivalent input noise voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$f = 10\text{ Hz}$		10.5		10.5		10.3		10.3	
		$f = 100\text{ Hz}$		10.2		10.3		10.0		10.0	
		$f = 1\text{ kHz}$		9.8		9.8		9.6		9.6	
V_{NPP} Peak-to-peak equivalent input noise voltage	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}, T_A = 25^\circ\text{C}$			0.38		0.38		0.35		0.35	
I_n Equivalent input noise current	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$f = 10\text{ Hz}$		0.35		0.35		0.32		0.32	
		$f = 100\text{ Hz}$		0.15		0.15		0.14		0.14	
		$f = 1\text{ kHz}$		0.13		0.13		0.12		0.12	
I_{NPP} Peak-to-peak equivalent input noise current	$f = 0.1\text{ Hz to }10\text{ Hz}, T_A = 25^\circ\text{C}$			15		15		14		14	
SR Slew rate	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega, T_A = 25^\circ\text{C}$			0.3		0.3		0.3		0.3	

†All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified.

2
Operational Amplifiers

TYPICAL APPLICATION DATA

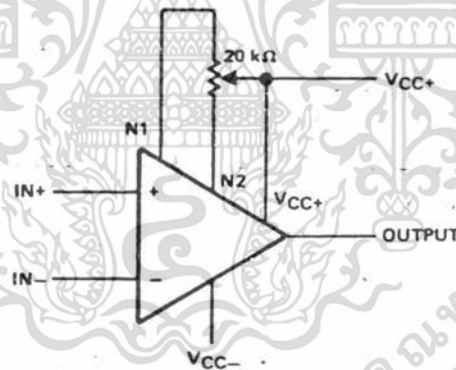


FIGURE 1. INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์

2-150

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา INSTRUMENTS ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบ



POST OFFICE BOX 655012 • DALLAS, TEXAS 75265

MC1488

QUAD MDTL LINE DRIVER
EIA-232D

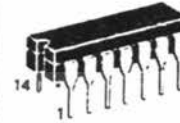
SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUIT

QUAD LINE DRIVER

The MC1488 is a monolithic quad line driver designed to interface data terminal equipment with data communications equipment in conformance with the specifications of EIA Standard No. EIA-232D.

Features:

- Current Limited Output
 ± 10 mA typ
- Power-Off Source Impedance
 300 Ohms min
- Simple Slew Rate Control with External Capacitor
- Flexible Operating Supply Range
- Compatible with All Motorola MDTL and MTTL Logic Families



L SUFFIX
 CERAMIC PACKAGE
 CASE 632



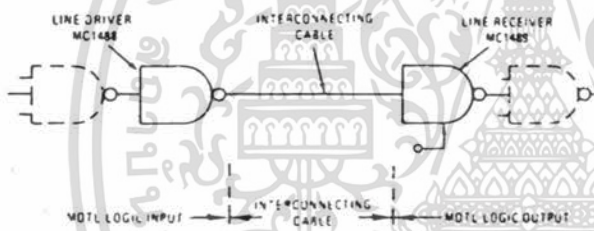
P SUFFIX
 PLASTIC PACKAGE
 CASE 646

D SUFFIX
 PLASTIC PACKAGE
 CASE 751A
 (SO-14)

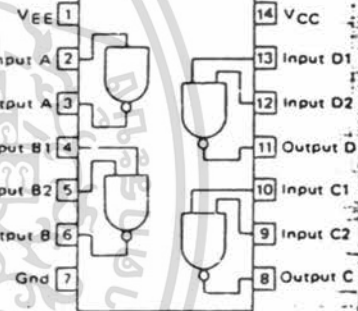


7

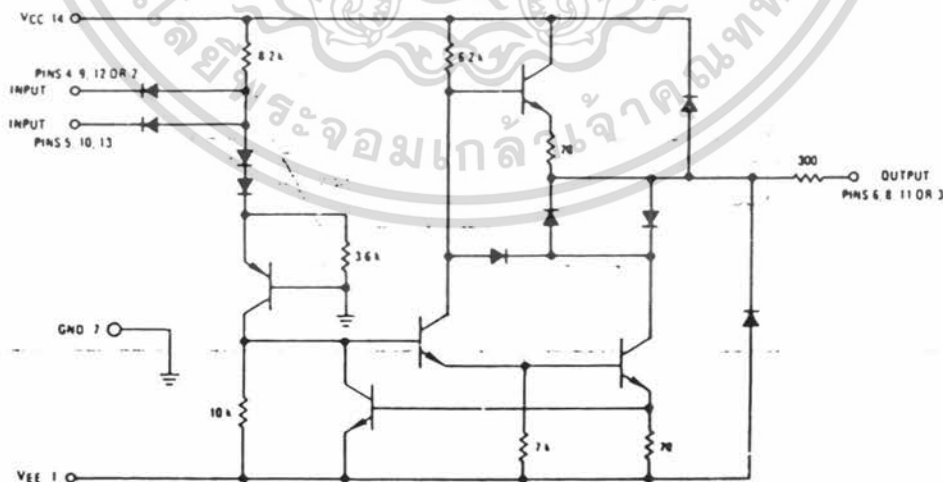
TYPICAL APPLICATION



PIN CONNECTIONS



CIRCUIT SCHEMATIC
 (1/4 OF CIRCUIT SHOWN)



MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC} V_{EE}	+15 -15	Vdc
Input Voltage Range	V_{IR}	$-15 \leq V_{IR} \leq 7.0$	Vdc
Output Signal Voltage	V_O	± 15	Vdc
Power Derating (Package Limitation, Ceramic and Plastic Dual-In-Line Package) Derate above $T_A = +25^\circ\text{C}$	P_D $1/R_{\theta JA}$	1000 6.7	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +75	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +175	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +9.0 \pm 1\% \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \pm 1\% \text{ Vdc}$, $T_A = 0$ to 75°C unless otherwise noted.)

Characteristic	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input Current — Low Logic State ($V_{IL} = 0$)	1	I_{IL}	—	1.0	1.6	mA
Input Current — High Logic State ($V_{IH} = 5.0 \text{ V}$)	1	I_{IH}	—	—	10	μA
Output Voltage — High Logic State ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $R_L = 3.0 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = +9.0 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $R_L = 3.0 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = +13.2 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -13.2 \text{ Vdc}$)	2	V_{OH}	+6.0 +9.0	+7.0 +10.5	—	Vdc
Output Voltage — Low Logic State ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $R_L = 3.0 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = +9.0 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $R_L = 3.0 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = +13.2 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -13.2 \text{ Vdc}$)	2	V_{OL}	-6.0 -9.0	-7.0 -10.5	—	Vdc
Positive Output Short-Circuit Current, Note 1	3	I_{OS+}	+6.0	+10	+12	mA
Negative Output Short-Circuit Current, Note 1	3	I_{OS-}	-6.0	-10	-12	mA
Output Resistance ($V_{CC} = V_{EE} = 0$, $|V_O| = \pm 2.0 \text{ V}$)	4	r_o	300	—	—	Ohms
Positive Supply Current ($R_L = \infty$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +12 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +12 \text{ Vdc}$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +15 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{CC} = +15 \text{ Vdc}$)	5	I_{CC}	—	+15 +4.5 +19 +5.5 —	+20 +6.0 +25 +7.0 +34 +12	mA
Negative Supply Current ($R_L = \infty$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -12 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -12 \text{ Vdc}$) ($V_{IH} = 1.9 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -15 \text{ Vdc}$) ($V_{IL} = 0.8 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -15 \text{ Vdc}$)	5	I_{EE}	—	-13 — -18 — —	-17 -500 -23 -500 -34 -2.5	mA μA mA μA mA mA
Power Consumption ($V_{CC} = 9.0 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \text{ Vdc}$) ($V_{CC} = 12 \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -12 \text{ Vdc}$)		P_C	—	—	333 576	mW

SWITCHING CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +9.0 \pm 1\% \text{ Vdc}$, $V_{EE} = -9.0 \pm 1\% \text{ Vdc}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$.)

Propagation Delay Time ($Z_L = 3.0 \text{ k}$ and 15 pF)	6	t_{PLH}	—	275	350	ns
Fall Time ($Z_L = 3.0 \text{ k}$ and 15 pF)	6	t_{FHL}	—	45	75	ns
Propagation Delay Time ($Z_L = 3.0 \text{ k}$ and 15 pF)	6	t_{PHL}	—	110	175	ns
Rise Time ($Z_L = 3.0 \text{ k}$ and 15 pF)	6	t_{TLH}	—	55	100	ns

Note 1. Maximum Package Power Dissipation may be exceeded if all outputs are shorted simultaneously.

7

CHARACTERISTIC DEFINITIONS

FIGURE 1 - INPUT CURRENT

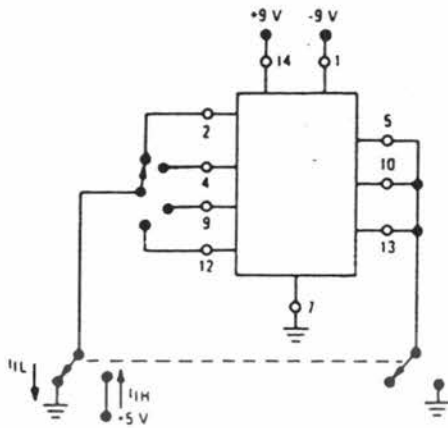


FIGURE 2 - OUTPUT VOLTAGE

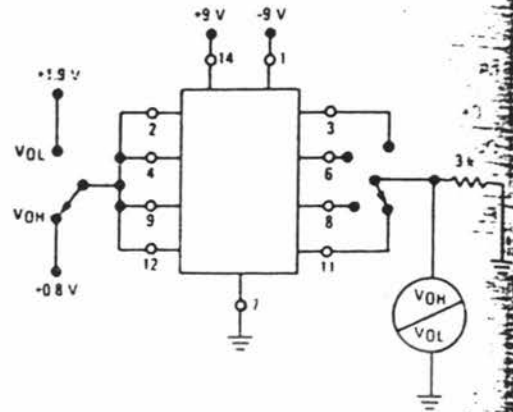


FIGURE 3 - OUTPUT SHORT CIRCUIT CURRENT

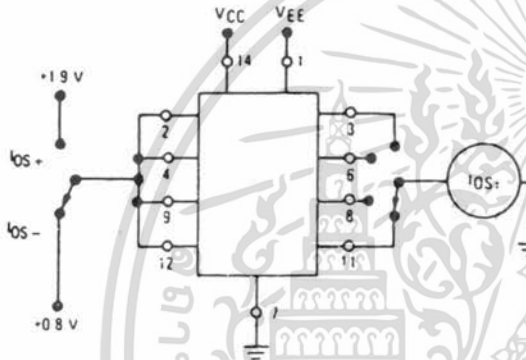


FIGURE 4 - OUTPUT RESISTANCE (POWER-OFF)

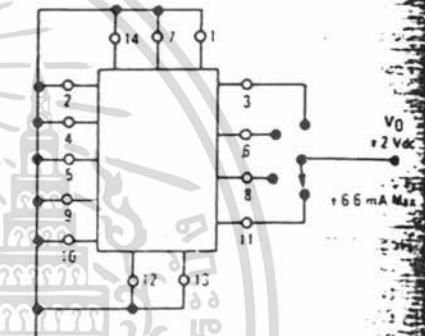


FIGURE 5 - POWER-SUPPLY CURRENTS

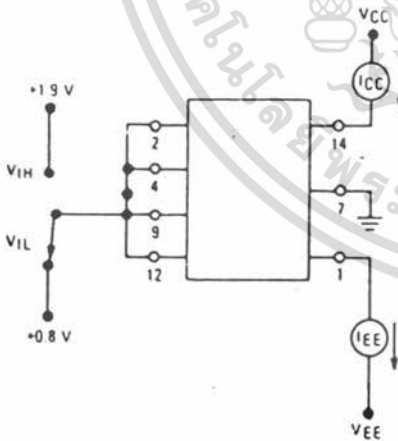
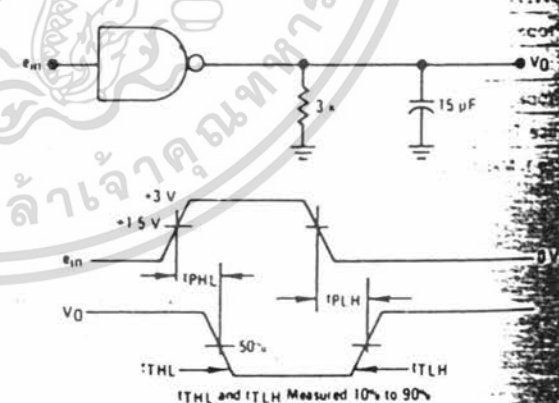


FIGURE 6 - SWITCHING RESPONSE



7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใด

TYPICAL CHARACTERISTICS

($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

FIGURE 7 — TRANSFER CHARACTERISTICS
versus POWER-SUPPLY VOLTAGE

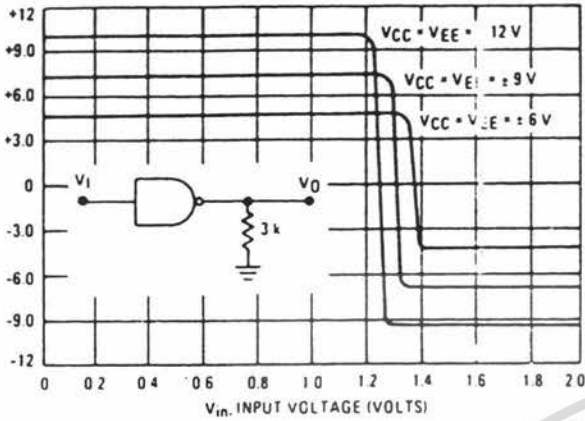


FIGURE 8 — SHORT-CIRCUIT OUTPUT CURRENT
versus TEMPERATURE

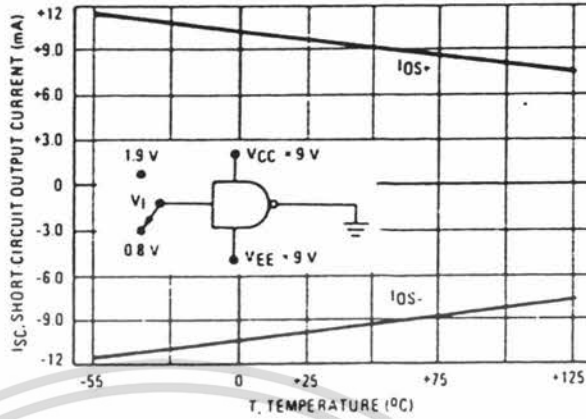


FIGURE 9 — OUTPUT SLEW RATE
versus LOAD CAPACITANCE

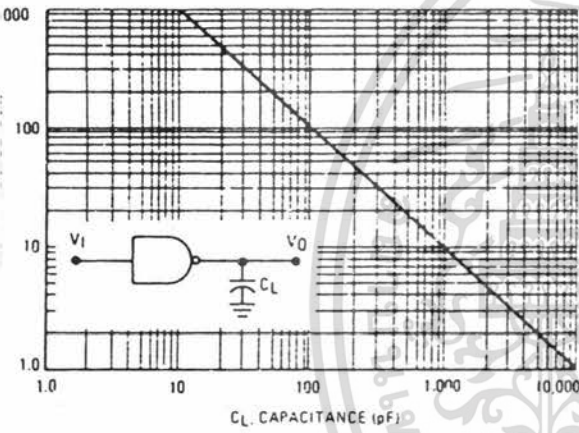


FIGURE 10 — OUTPUT VOLTAGE
AND CURRENT-LIMITING CHARACTERISTICS

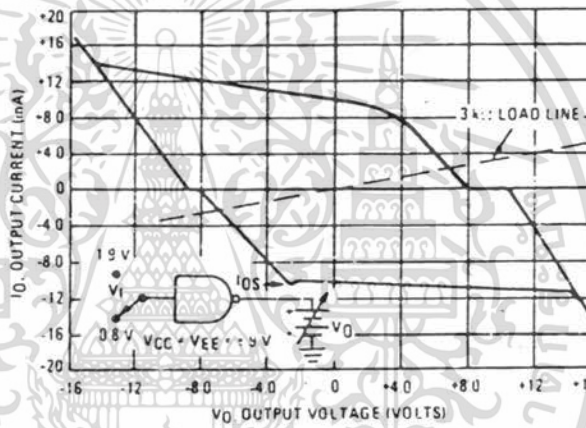
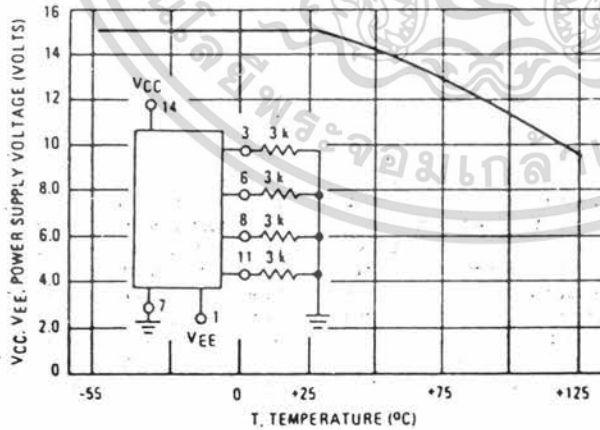


FIGURE 11 — MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE
versus POWER-SUPPLY VOLTAGE



7

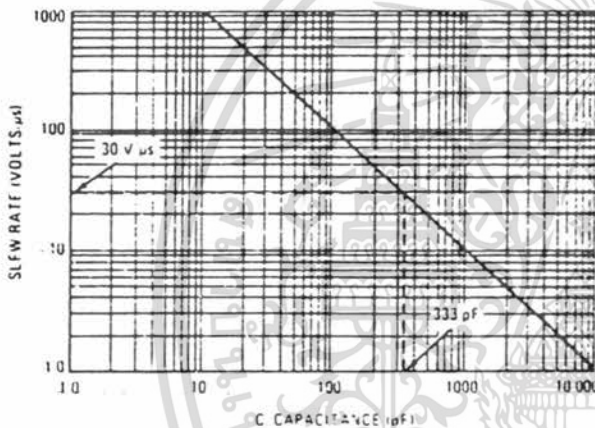
APPLICATIONS INFORMATION

The Electronic Industries Association EIA-232D specification detail the requirements for the interface between data processing equipment and data communications equipment. This standard specifies not only the number and type of interface leads, but also the voltage levels to be used. The MC1488 quad driver and its companion circuit, the MC1489 quad receiver, provide a complete interface system between DTL or TTL logic levels and the EIA-232D defined levels. The EIA-232D requirements as applied to drivers are discussed herein.

The required driver voltages are defined as between 5 and 15-volts in magnitude and are positive for a Logic "0" and negative for a Logic "1." These voltages are so defined when the drivers are terminated with a 3000 to 7000-ohm resistor. The MC1488 meets this voltage requirement by converting a DTL/TTL logic level into EIA-232D levels with one stage of inversion.

The EIA-232D specification further requires that during transitions, the driver output slew rate must not exceed 30 volts

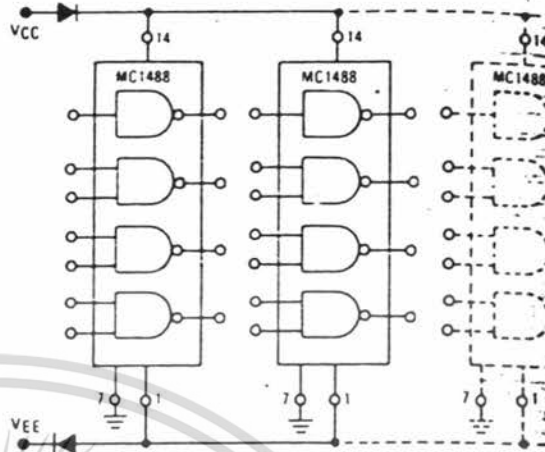
FIGURE 12 - SLEW RATE versus CAPACITANCE FOR $I_{SC} = 10 \text{ mA}$



per microsecond. The inherent slew rate of the MC1488 is much too fast for this requirement. The current limited output of the device can be used to control this slew rate by connecting a capacitor to each driver output. The required capacitor can be easily determined by using the relationship $C = I_{OS} \times \Delta T / \Delta V$ from which Figure 12 is derived. Accordingly, a 330 pF capacitor on each output will guarantee a worst case slew rate of 30 volts per microsecond.

The interface driver is also required to withstand an accidental short to any other conductor in an interconnecting cable. The worst possible signal on any conductor would be another driver using a plus or minus 15 volt, 500 mA source. The MC1488 is designed to indefinitely withstand such a short to all four outputs in a package as long as the power-supply voltages are greater than 9.0 volts (i.e., $V_{CC} \geq 9.0 \text{ V}$; $V_{EE} \leq -9.0 \text{ V}$). In some power-supply designs, a loss of system power causes a low impedance on the power-supply outputs. When this occurs, a low impedance to ground would exist at the power inputs to the MC1488 effectively shorting the 300 ohm output resistors to ground. If all four outputs were then shorted to plus or minus 15 volts, the power dissipation in these resistors

FIGURE 13 - POWER-SUPPLY PROTECTION TO MEET POWER-OFF FAULT CONDITIONS



would be excessive. Therefore, if the system is designed to permit low impedances to ground at the power-supplies of the drivers, a diode should be placed in each power-supply lead to prevent overheating in this fault condition. These two diodes, as shown in Figure 13, could be used to decouple all the driver packages in a system. (These same diodes will allow the MC1488 to withstand momentary shorts to the ± 25 volt limits specified in the earlier Standard EIA-232B.) The addition of the diodes also permits the MC1488 to withstand faults with power-supplies of less than the 9.0 volts stated above.

The maximum short-circuit current allowable under fault conditions is more than guaranteed by the previously mentioned 10 mA output current limiting.

Other Applications

The MC1488 is an extremely versatile line driver with a myriad of possible applications. Several features of the driver enhance this versatility:

1. Output Current Limiting — this enables the circuit designer to define the output voltage levels independent of power supplies and can be accomplished by diode clamping of the output pins. Figure 14 shows the MC1488 used as a DTL to MOS translator where the high level voltage output is clamped one diode above ground. The resistor divider shown is used to reduce the output voltage below the 300 mV above ground MOS input level limit.

2. Power Supply Range — as can be seen from the schematic drawing of the drivers, the positive and negative driving elements of the device are essentially independent and do not require matching power-supplies. In fact, the positive supply can vary from a minimum seven volts (required for driving the negative pulldown section) to the maximum specified 15 volts. The negative supply can vary from approximately -2.5 volts to the minimum specified -15 volts. The MC1488 will drive the output to within 2 volts of the positive or negative supplies as long as the current output limits are not exceeded. The combination of the current-limiting and supply-voltage features allow a wide combination of possible outputs within the same quad package. Thus if only a portion of the four drivers are used for driving EIA-232D lines, the remainder could be used for DTL to MOS or even DTL to DTL translation. Figure 15 shows one such combination.

MC1488

FIGURE 14 - MOTL/MTTL-TO-MOS TRANSLATOR

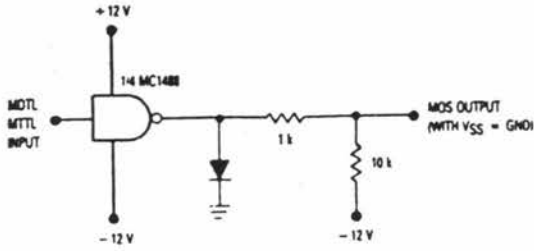
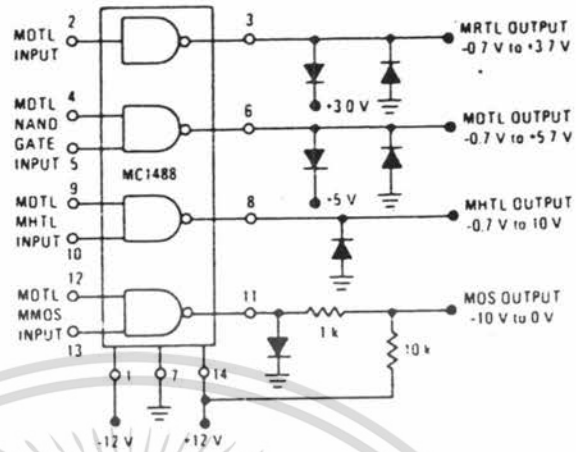


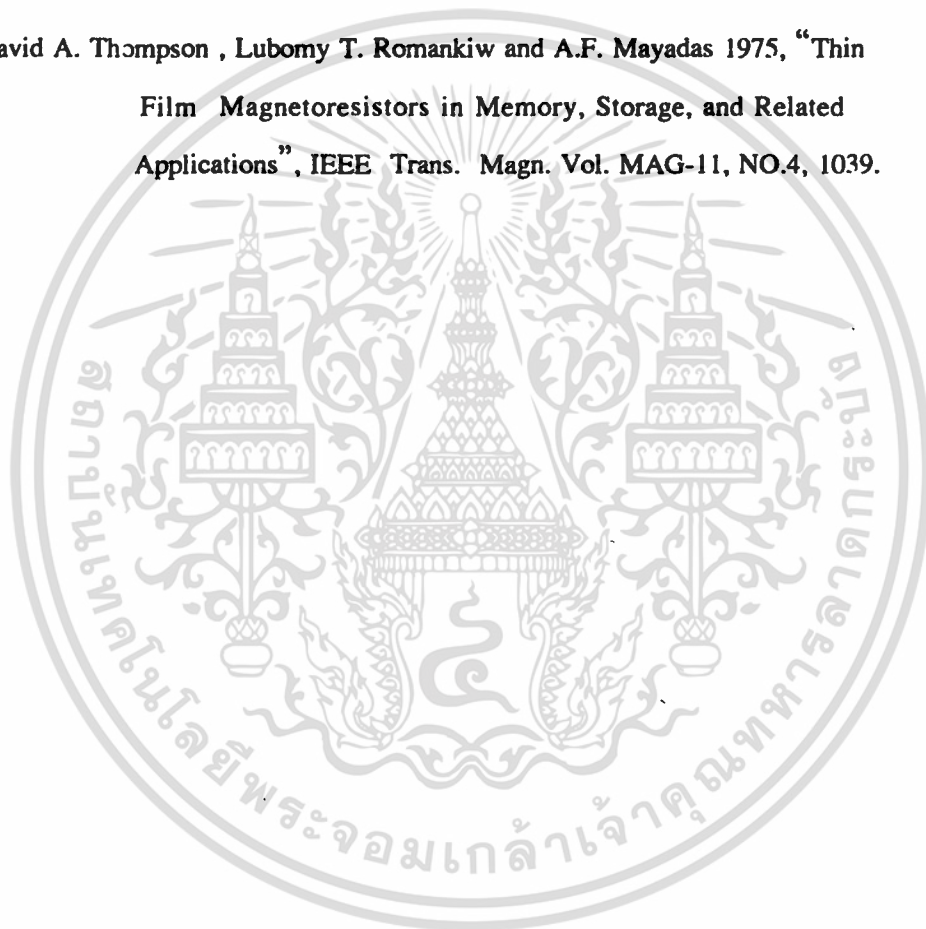
FIGURE 15 - LOGIC TRANSLATOR APPLICATIONS



7

เอกสารอ้างอิง

- [1] B.D. Curie 1980 : “Introduction to Magnetic Materials” , Wiley U.S.A. ,
115-127, 207-212, 284, 341-347, 525-528.
- [2] C. Kittel 1969 : “Introduction to Solid State Physics” , the 4th ed., Wiley
U.S.A.
- [3] David A. Thompson , Lubomy T. Romankiw and A.F. Mayadas 1975, “Thin
Film Magnetoresistors in Memory, Storage, and Related
Applications” , IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-11, NO.4, 1039.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้