



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ
ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΕΜΠΕΔΗΣΗΣ**

(Κωνσταντόπουλος Χρήστος)

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος, Καθηγητής, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2015

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την βαθμονόμηση και τον χαρακτηρισμό ενός αισθητήρα τύπου GMI, με ταυτόχρονη μελέτη της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, καθώς και του τρόπου που επηρεάζει την εμπέδηση του αισθητήρα.

Abstract

This thesis discusses the design, manufacture, calibration and characterization of a GMI-type sensor, while studying the change in the magnetic field and how it affects the sensor impedance.

*Copyright © Κωνσταντόπουλος Χρήστος, 2015
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved*

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., καθώς επίσης και στο εργαστήριο ηλεκτρονικής της Σχολής Η.Μ.Μ.Υ. Με αφορμή την ολοκλήρωση της, εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες στον κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη συνεχή καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και για τη συμβολή του στην κατανόηση πολλών επιμέρους θεμάτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υ.Δ. Νεοκλή Χατζηγεωργίου, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Η/Υ, ο οποίος με βοήθησαν να κατανοήσω καλύτερα τη λειτουργία των αισθητήρων.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Κατάλογος Εικόνων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	10
1 Εισαγωγή.....	11
2 Αισθητήρες Πεδίου.....	13
2.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου.....	13
2.1.1 Αισθητήρες Επαγωγής.....	13
2.1.2 SQUID (Superconductive Quantum Inference Devices).....	14
2.1.2.1 Φαινόμενο Meissner.....	15
2.1.2.2 Κβαντισμός της μαγνητικής ροής.....	15
2.1.2.2 Το φαινόμενο Josephson.....	16
2.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου Γης.....	16
2.2.1 Αισθητήρες Πύλης-ροής (FluxGate).....	17
2.2.1.1 Αρχή λειτουργίας.....	18
2.2.2 Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης.....	19
2.2.3 Αισθητήρες AMR.....	20
2.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου.....	21
2.3.1 Αισθητήρες GMR.....	22
2.3.2 Αισθητήρες Hall.....	24
2.3.2.1 Φαινόμενο Hall.....	25
3 Θεμελιώδεις πτυχές των GMI αισθητήρων.....	26
3.1 Ορισμός γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης.....	26
3.2 Εμπέδηση του μαγνητικού αγωγού.....	27
3.2 Υστέρηση και ασυμμετρία στους GMI αισθητήρες.....	31
3.2.1 Ασυμμετρία στο GMI.....	33
3.2.2 Ασύμμετρη GMI λόγω συνεχές ρεύμα πόλωσης.....	33

3.2.3	Ασύμμετρη GMI λόγω ac πεδίου πόλωσης.....	36
3.2.4	Ασύμμετρο GMI λόγω εναλλαγής πολικότητας	36
3.3	Κριτήρια για την επιλογή του υλικού για GMI αισθητήρα	39
3.3.1	Άμορφα Υλικά	39
3.3.2	Μαγνητική Ανισοτροπία	41
4	Πειραματική διαδικασία	43
4.1	Εισαγωγή.....	43
4.1	Εξοπλισμός	43
5	Αποτελέσματα	46
5.1	Αποτελέσματα των μετρήσεων για τον GMI με πυρήνα CoFeSiB	46
5.2	Αποτελέσματα των μετρήσεων για τον GMI με πυρήνα CoSiB	50
5.3	Συγκριτικά διαγράμματα	53
	Βιβλιογραφία	57
	Παράρτημα Α	60

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Φαινόμενο Meissner.....	15
Εικόνα 2-2: Κβάντωση μαγνητικής ροής.	16
Εικόνα 2-3: Βασική σχηματική απεικόνιση ενός αισθητήρα Fluxgate.	17
Εικόνα 2-4: Απλοποιημένες κυματομορφές: (πάνω) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (κάτω) σε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο H_0	19
Εικόνα 2-5: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου.	21
Εικόνα 2-6: Απεικόνιση των spin σε δύο φερρομαγνητικές στρώσεις (FM) που διαχωρίζονται από μία μη- μαγνητική στρώση (NM).	23
Εικόνα 2-7: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων.	24
Εικόνα 2-8: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλετε.	24
Εικόνα 2-9: Δομή αισθητήρα Hall. (α) Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και (β) Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.	25
Εικόνα 3-1: Η εμπέδηση (Z) και (β) ο λόγος του GMI [$\Delta Z/Z(\%)$] που αλλάζει σαν συνάρτηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.	27
Εικόνα 3-2: Ορισμός της εμπέδησης.....	27
Εικόνα 3-3: Πάνω διάγραμμα: dc εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο (H_{dc}) εξαρτώμενο με το βάθος διείσδυσης (δ_m) και αντιστρέψιμη διαπερατότητα (μ_r). Κάτω εικόνα: Σχηματική απεικόνιση της αλλαγής του βάθους διείσδυσης δ_m σε σχέση με το H_{dc} για σύρμα αλλά και ταινίας.	30
Εικόνα 3-4: Μαγνητικό πεδίο εξαρτώμενο απο το GMI effect μετρούμενο στα $f=5\text{MHz}$ με αυξανόμενο (μπλέ) και μειούμενο (κόκκινο) μαγνητικό πεδίο. Στο ένθετο παρουσιάζεται το βάθος σε σχέση με την συχνότητα.	32
Εικόνα 3-5: AGMI καμπύλες για συχνότητα $f=1\text{ MHz}$ για διαφορετικό dc ρεύμα πόλωσης [6].	35
Εικόνα 3-6: Το πεδίο ευαισθησίας του GMI αλλάζει ως συνάρτηση του ανοπτιυμένου πεδίου (H_a) σε διαφορετικές συχνότητες. Το ένθετο δείχνει τον GMI μετρημένο με $H_a=2\text{Oe}$ και $f=0.1\text{ MHz}$ [6].	38
Εικόνα 3-7: Απεικόνιση διαδικασίας δημιουργίας ταινιών υαλώδους μετάλλου [3].	41
Εικόνα 4-1: Το 4275A MULTI- FREQUENCY LCR METER της Hewlett –Packard.	43
Εικόνα 4-2: Το 7651 PROGRAMMABLE DC SOURCE της YOKOGAWA.....	44
Εικόνα 4-3: Κλωβός Faraday στον οποίο εσωκλείεται ο αισθητήρας GMI.	44
Εικόνα 4-4: Ο αισθητήρας GMI μέσα στον κλωβό.....	45
Εικόνα 5-1: Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla	48
Εικόνα 5-2: Διάγραμμα μεταβολής της γωνίας αντίστασης του πηνίου σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.	49
Εικόνα 5-3: Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.	52
Εικόνα 5-4: Διάγραμμα μεταβολής της γωνίας αντίστασης του πηνίου σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.	53

Εικόνα 5-5: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 100kHz.....	53
Εικόνα 5-6: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 400kHz.....	54
Εικόνα 5-7: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 1MHz.....	54
Εικόνα 5-8: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 4MHz.....	55
Εικόνα 5-9: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 10MHz.....	55

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1: Μετρήσεις με πυρήνα CoFeSiB	46
Πίνακας 5-1: Μετρήσεις με πυρήνα CoSiB.....	50

1 Εισαγωγή

Οι μαγνητικοί αισθητήρες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη τεχνολογία. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε σχεδόν όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην υψηλή πυκνότητα μαγνητική εγγραφή (σκληροί δίσκοι), στην πλοήγηση, στη στρατιωτική υποστήριξη και ασφάλεια, στην ανίχνευση στόχων και στην παρακολούθηση, στα αντικλεπτικά συστήματα, στις μη καταστροφικές δοκιμές, στη μαγνητική σήμανση και στην επισήμανση, στις γεωμαγνητικές μετρήσεις, στον χώρο της έρευνας, στις μετρήσεις μαγνητικών πεδίων στα διαστημόπλοιο και στις βιομαγνητικές μετρήσεις στο ανθρώπινο σώμα.

Ένα ευρύ φάσμα των μαγνητικών αισθητήρων, όπως οι αισθητήρες επαγωγής, οι αισθητήρες πύλης ροής, οι μαγνητικοί αισθητήρες που εξετάζουν το φαινόμενο Hall, οι μαγνητο-οπτικοί αισθητήρες, οι αισθητήρες γιγάντιας μαγνητοαντίστασης (GMR), τα μαγνητόμετρα απήχησης και η συσκευή υπεραγώγιμης κβαντικής παρεμβολής (SQUID), είναι πλέον διαθέσιμοι στην βιομηχανία.

Ένας μαγνητικός αισθητήρας μετατρέπει άμεσα το μαγνητικό πεδίο σε μετρούμενη τάση ή αντίσταση. Η ευαισθησία προσδιορισμού του μαγνητικού πεδίου ενός μαγνητικού αισθητήρα έχει βασικό ρόλο στον προσδιορισμό της λειτουργίας του αλλά και στον ορισμό των πιθανών εφαρμογών του. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες SQUID με υψηλότερη ευαισθησία σε σχέση με τους απλούς μαγνητικούς αισθητήρες (10⁻¹⁰-10⁻⁴ Oe) έχουν χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται εναλλαγή του πεδίου ή η παρουσία μόνιμων διπολικών μαγνητών, όπως η χαρτογράφηση της εγκεφαλικής λειτουργίας και η ανίχνευση των ανωμαλιών μέσω των μαγνητικών πεδίων. Οι επαγωγικοί αισθητήρες, οι αισθητήρες πύλης ροής και οι αισθητήρες GMR, χαρακτηρίζονται από μέτρια ευαισθησία 10⁻⁶-10⁻² Oe έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των αλλαγών τόσο στο μέτρο, όσο και στην κατεύθυνση του πεδίου της Γης. Χρησιμοποιούνται στη μαγνητική καθοδήγηση, στην καθοδήγηση πυραύλων, καθώς και στην μεταλλευτική έρευνα. Τέλος, οι αισθητήρες Hall με χαμηλή ευαισθησία των 1-10⁻⁶ Oe έχουν χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως, στις μνήμες μαγνητικής ανάγνωσης και στη μετρήσεις ρευμάτων.

Εκτός από την απαιτούμενη ευαισθησία, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το πλήθος των εφαρμογών των μαγνητικών αισθητήρων είναι το κόστος επεξεργασίας και η κατανάλωση ενέργειας. Όταν συγκρίνουμε το κόστος επεξεργασίας και κατανάλωση ισχύος των υφιστάμενων μαγνητικών αισθητήρων, ο αισθητήρας GMR έχουν το χαμηλότερο κόστος και την κατανάλωση ενέργειας, αν και η ευαισθησία του είναι μάλλον χαμηλή (<1%/Oe).

Πρόσφατα, η ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων υψηλής απόδοσης έχει ωφεληθεί από η ανακάλυψη ενός νέου μαγνητικό φαινομένου, αυτό της γιγάντιας

μαγνητοεμπέδησης (GMI). Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη μεγάλη αλλαγή στην ac αντίσταση ενός μαγνητικού αγωγού, όταν υποβάλλεται σε ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος), όπου μέταλλο «βάσης» είναι άμορφο. Έχει αποδειχθεί ότι οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μαγνητικών αισθητήρων.

Το κυριότερο πλεονέκτημα η εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία των αισθητήρων GMI. Σε σύγκριση με έναν αισθητήρα GMR που έχει μια ευαισθησία $\sim 1\%/Oe$, η ευαισθησία ενός τυπικού αισθητήρα GMI μπορεί να αγγίζει το $500\%/Oe$. Αν και η ανάπτυξη των αισθητήρων GMI είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, είναι το χαμηλό κόστος τους σε συνδυασμό με την υψηλή ευελιξία τους εγγυάται την ευρεία εφαρμογή τους στο εγγύς μέλλον.

Ιστορικά, το GMI έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα από τη στιγμή που οι Panina και Mohri, το 1994, ανακοίνωσαν την ανακάλυψη του φαινομένου της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης, με άμορφο σύρμα με βάση το Co. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν από τις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές. Κατά συνέπεια, η έρευνα στο πεδίο αυτό έχει επικεντρωθεί κυρίως στην θερμική επεξεργασία των πυρήνων του αισθητήρα ή/και για την ανάπτυξη νέων υλικών, με βελτιωμένες ιδιότητες.

Για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη καινοτόμων αισθητήρων GMI, απαιτείται η εις βάθος κατανόηση των φαινομένων που διέπουν τους αισθητήρες GMI και η μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται.

2 Αισθητήρες Πεδίου

2.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου

Οι αισθητήρες ασθενούς μαγνητικού πεδίου είναι αυτοί που παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης ασθενών μαγνητικών πεδίων. Ως ασθενή πεδία θεωρούνται τα πεδία που είναι μικρότερα του 1μ gauss. Σε αυτή την κατηγορία εριλαμβάνονται δύο τύποι αισθητήρων:

- τα πηνία ανίχνευσης (search coils), τα οποία ανήκουν στους επαγωγικούς αισθητήρες και
- τα μαγνητόμετρα SQUIDS

2.1.1 Αισθητήρες Επαγωγής

Οι αισθητήρες επαγωγής βασίζονται στο νόμο του Faraday.

$$V_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d N * A * \mu_0 * \mu_r(t) * H(t)}{dt} \quad (2-1)$$

Όπου:

V_i = η επαγόμενη τάση στα άκρα του πηνίου

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

Φ = η μαγνητική ροή που περνά από το πηνίο

$A(t)$ = η κάθετη διατομή του πηνίου

$H(t)$ = το μαγνητικό πεδίο

μ_0 = μαγνητική διαπερατότητα του αέρα.

$\mu_r(t)$ = η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα.

Η εξίσωση (2-1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_i = \frac{d\Phi}{dt} = NA\mu_0\mu_r \frac{dH(t)}{dt} + N\mu_0\mu_r \frac{dA(t)}{dt} + NA\mu_0H \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (2-2)$$

Τα πηνία λήψης (search coils) βασίζονται στον πρώτο όρο της εξίσωσης (2-2). Ο μεσαίος όρος, περιγράφει περιστρεφόμενα πηνία, όπου ο όρος $A(t)$ είναι η ωφέλιμη περιοχή του επιπέδου κάθετα στο μετρούμενο πεδίο. Ο τρίτος όρος, είναι η εξίσωση που διέπει τα μαγνητόμετρα πύλης ροής (fluxgate).

Ένα σωληνοειδές επαγωγικό πηνίο μαγνητομέτρου αποτελείται από πολλά επίπεδα σπειρών. Τα πηνία ανίχνευσης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τα πηνία που βασίζονται σε πυρήνα αέρα, και σε αυτά με πυρήνα σιδηρομαγνητικό. Τα πηνία με σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά είναι λιγότερα σταθερά από αυτά χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τέτοιου είδους πηνία πρέπει να είναι

διευρυμένα, λεπτά και να έχουν χαμηλή απομαγνήτιση. Οι επαγωγικοί αισθητήρες είναι παθητικού τύπου και πρέπει να διαχωριστούν από τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής, οι οποίοι απαιτούν κυκλώματα διέγερσης για τη λειτουργία τους. Τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής θα εξεταστούν στην κατηγορία GMI.

Συνοπτικά για τα πηνία «ανίχνευσης» χρησιμοποιούνται στη γεωφυσική για να μετρούν αδύνατους παλμούς του πεδίου της γης και για συχνότητες με εύρος (1 mHz έως 1 Hz). Στο εύρος των ακουστικών συχνοτήτων μπορεί να λειτουργούν σαν μικρόφωνο, όπως επίσης για καταγραφή και ανάγνωση μαγνητικών ταινιών. Στη μεταλλουργεία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση-μελέτη των δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται μετά από διέγερση, όπως για παράδειγμα τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

Τα πηνία με πυρήνα αέρα, σε συνδυασμό με μαγνητόμετρα πύλης ροής (Fluxgate) χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη DC συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται με την αφαίρεση από τη μέτρηση του fluxgate της μέτρησης από τα πηνία ανίχνευσης.

Για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, η απόκριση της συχνότητας των πηνίων ανίχνευσης είναι γραμμική. Ωστόσο αυτό εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τα πηνία πολλών περιελήξεως εμφανίζουν κατανεμημένες χωρητικότητες, και λόγω της υψηλής επαγωγής τους, προκαλούν συντονισμό στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες η έξοδος των πηνίων ανίχνευσης είναι μη γραμμική. Η παρασιτική αυτή χωρητικότητα επηρεάζεται από τη συχνότητα και κατά συνέπεια, παρόλο που είναι προβλέψιμη η μεταβολή με τη θερμοκρασία, η απόκριση της συχνότητας αλλάζει με τη θερμοκρασία. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη με τη συχνότητα, το δε ρεύμα εξόδου παρουσιάζει μια γραμμική απόκριση για συχνότητες $f \gg R/2\pi L$. Με την αύξηση της διατομής του πηνίου η ευαισθησία αυξάνεται. Ο παράγοντας R/L εξαρτάται από την ποσότητα του χαλκού, τον αριθμό των σπειρών και τη διατομή του πηνίου, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή. Όπως για παράδειγμα να ανταποκρίνεται στο θόρυβο εισόδου του ενισχυτή [1].

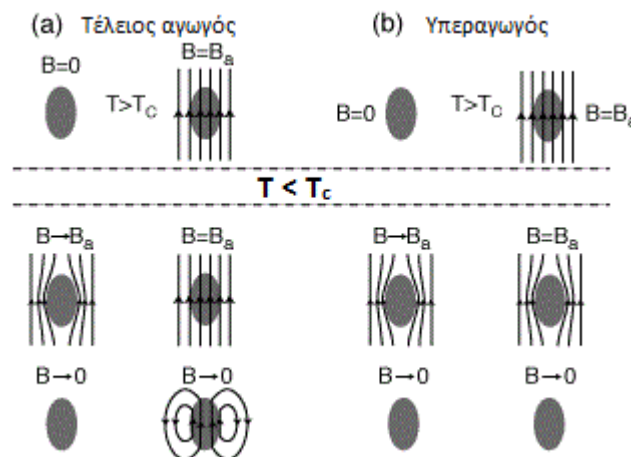
2.1.2 SQUID (Superconductive Quantum Inference Devices)

Τα μαγνητόμετρα SQUIDs βασίζονται στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, δηλαδή, στο φαινόμενο κατά το οποίο συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζουν δραματική μείωση της ειδικής τους αντίστασης, η οποία μηδενίζεται σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν το απόλυτο μηδέν [2]. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Ολλανδό φυσικό Heike Kamerlingh Onnes. Ο ίδιος μαζί με έναν από τους φοιτητές του ανακάλυψαν ότι

κάτω από τη θερμοκρασία των 4,15 K, η ειδική αντίσταση του Υδραργύρου μηδενίζεται [3]. Ο μηχανισμός που επιτρέπει αυτήν την υπεραγωγιμότητα είναι η ανταλλαγή φωνονίων (phonon) μεταξύ των ζευγών ηλεκτρονίων (Cooper pairs), σύμφωνα με τη θεωρία των Bardeen- Cooper- Schriber (BCS) [2].

2.1.2.1 Φαινόμενο Meissner

Μια σημαντική ιδιότητα των υπεραγωγών, είναι ότι κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία απωθεί το μαγνητικό πεδίο σαν να ήταν ένα τέλειο διαμαγνητικό υλικό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Meissner. Όταν το υλικό βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από την κρίσιμη, οι γραμμές της μαγνητικής ροής διαπερνούν το υλικό, όπως ήταν για κάθε μέσο με χαμηλή μ_r . Όταν όμως η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ο υπεραγωγός είναι χαμηλότερη της κρίσιμης, τότε απωθεί όλο το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του δημιουργώντας ένα επιφανειακό ρεύμα. Αυτό συμβαίνει σαν συνέπεια των εξισώσεων Maxwell, στις οποίες δεν μπορεί να υπάρξει διαφορά δυναμικού πεδίου στον υπεραγωγό.

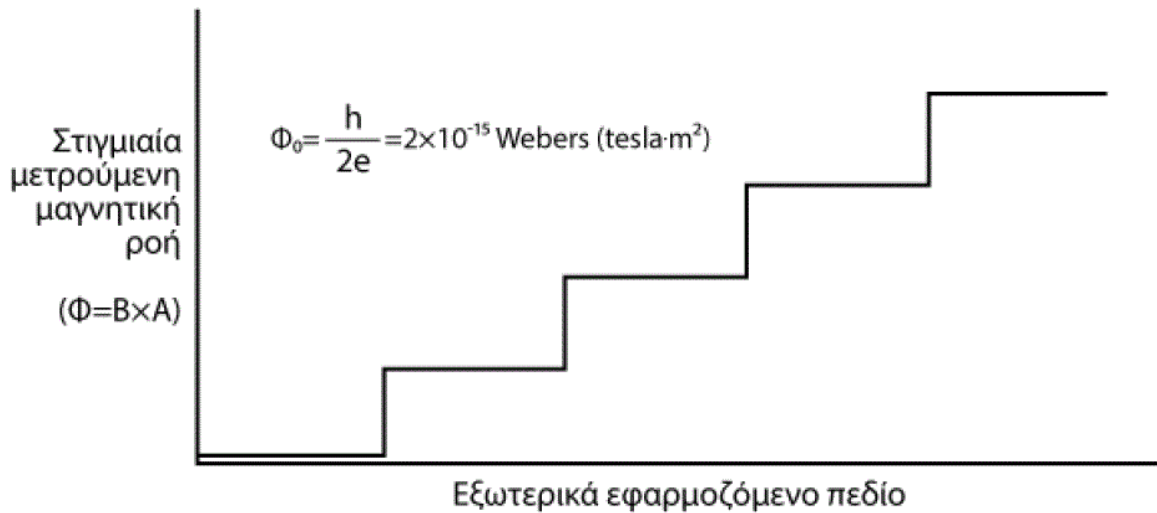


Εικόνα 2-1: Φαινόμενο Meissner.

2.1.2.2 Κβαντισμός της μαγνητικής ροής

Η παγιδευμένη μαγνητική ροή έχει κάποιες ασυνήθιστες ιδιότητες: Δεν μπορούμε να αλλάξουμε με συνεχές τρόπο την μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή είναι ένα κβαντισμένο φαινόμενο. Το μικρότερο κβάντο ροής ισούται με $h/2e$ ή με $2.0679 \times 10^{-15} \text{ Wb}(\text{T} \cdot \text{m}^2)$. Κατά συνέπεια η αλλαγή της μαγνητικής ροής συμβαίνει μόνο σε διακριτά επίπεδα, και είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του ελάχιστου κβάντου ροής.

$$\Phi = n \frac{h}{2e} \quad (2-3)$$



Εικόνα 2-2: Κβάντωση μαγνητικής ροής.

2.1.2.2 Το φαινόμενο Josephson

Η ένωση Josephson, είναι η ένωση δύο υπεραγωγών, οι οποίοι ανάμεσά τους χωρίζονται από ένα λεπτό μονωτή με πάχος ορισμένων νανομέτρων. Λόγω του λεπτού πάχους του διακένου, υπάρχει η πιθανότητα ένα ζεύγος Cooper να διασχίσει την ένωση, λόγω του φαινομένου σήραγγας (tunneling). Για μικρά μήκη, μικρότερα του συνεκτικού μήκους και για ρεύματα μικρότερα του κρίσιμου ρεύματος I_c , το ρεύμα διαπερνά το φράγμα χωρίς πτώση τάσης. Για ένα υπεραγωγίμο βρόχο, ο οποίος διακόπτεται με μία ασθενή επαφή Josephson, η μαγνητική ροή δημιουργεί ένα ρεύμα στο βρόχο. Όταν το ρεύμα είναι κάτω από το κρίσιμο ρεύμα, ο βρόχος συμπεριφέρεται ως κανονικός υπεραγωγός. Οποιαδήποτε αλλαγή στην μαγνητική ροή προκαλεί ένα ρεύμα θωράκισης, το οποίο στην συνέχεια δημιουργεί ένα μικρό μαγνητικό πεδίο το οποίο τείνει να αντισταθμίσει την αλλαγή στην μαγνητική ροή.

2.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου Γης

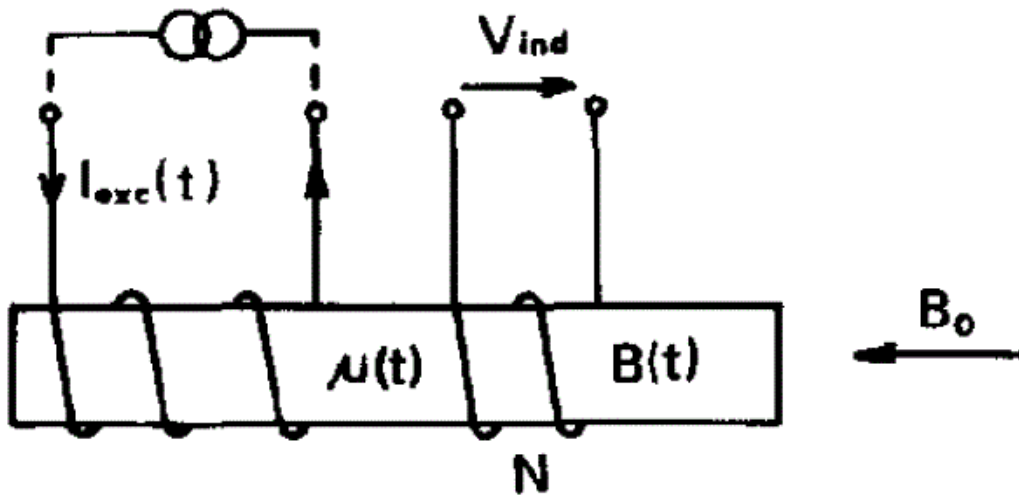
Οι μαγνητικοί αισθητήρες αυτού του τύπου συχνά χρησιμοποιούν το πεδίο της γης. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν το πεδίο αυτής ως αναφορά για τον καθορισμό της πορείας, αλλά και τον εντοπισμό ανωμαλιών που προκαλούν μεταλλικά αντικείμενα στο πεδίο αυτής. Στην κατηγορία των αισθητήρων αυτών ανήκουν οι αισθητήρες:

- Fluxgate
- Magneto inductive
- AMR (Anisotropic Magnetic Resistance)

2.2.1 Αισθητήρες Πύλης-ροής (FluxGate)

Οι αισθητήρες Fluxgate είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως απαιτητικές εφαρμογές. Το μαγνητόμετρο πύλης-ροής είναι ένα υψηλής ευαισθησίας μαγνητόμετρο. Υπάρχουν δύο τύποι σε αυτή την κατηγορία: τα parallel fluxgate και τα orthogonal fluxgate (OFG). Τα parallel fluxgate χρησιμοποιούν δύο πηνία. Το πρώτο είναι το πηνίο διέγερσης και δεύτερο το πηνίο λήψης, και στηρίζεται στην δεύτερη αρμονική της τάσης κατά τη ανίχνευσης πηνίου. Τα «Parallel fluxgates» είναι κατασκευασμένα με πυρήνα δακτυλίου, έχουν χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις που απαιτούν υψηλή ανάλυση, όπως για την μακροχρόνια παρατήρηση του γεωμαγνητικού πεδίου καθώς επίσης και σε διαστημικές αποστολές.

Οι αισθητήρες τύπου fluxgate είναι μια συμπαγής συσκευές που έχουν τη δυνατότητα μέτρησης τόσο του πλάτους όσο και τη διεύθυνση μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ευαισθησία τους είναι υψηλή και μπορούν να μετρήσουν πεδία από $10^{-10}T$ έως και $10^{-4}T$. Η βασική αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3: Βασική σχηματική απεικόνιση ενός αισθητήρα Fluxgate.

Το μαλακό μαγνητικό υλικό του πυρήνα του αισθητήρα είναι περιοδικά κορεσμένο σε αμφότερες τις πολικότητες από το πεδίο διέγερσης ac, το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα διέγερσης i_{exc} μέσω του πηνίου διέγερσης. Εξ αιτίας αυτού, η διαπερατότητα του πυρήνα αλλάζει και η ροή dc που συνδέεται με το μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο B_0 διαμορφώνεται. Η πύλη (gating) της ροής που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας είναι κορεσμένος έδωσε το όνομα στη συσκευή.

Στην εικόνα 2-3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου. Η έξοδος της συσκευής είναι συνήθως η τάση V_1 η οποία επάγεται στο αισθητήριο πηνίο στη δεύτερη ή και ανωτέρας τάξης αρμονική της συχνότητας διέγερσης. Η τάση αυτή είναι ανάλογη του μετρούμενου πεδίου.

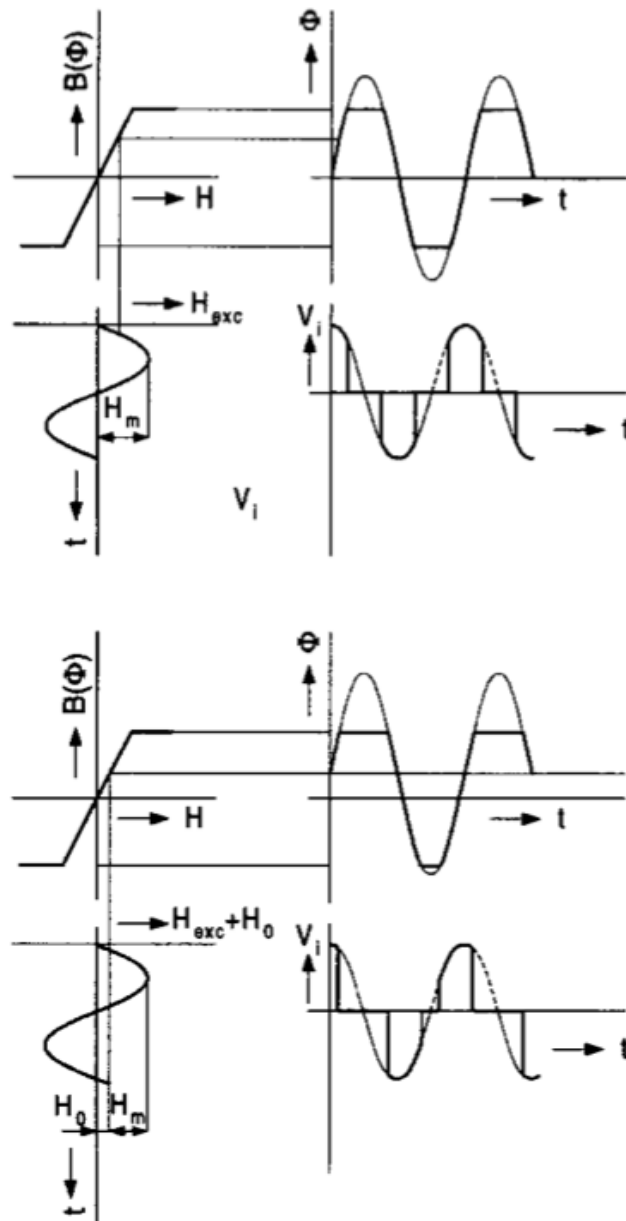
Η πρώτη πατέντα σε αισθητήρες fluxgate καταχωρήθηκε από τον H.P. Thomas το 1931. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο για την ανίχνευση υποβρυχίων και αργότερα για γεωφυσικές εφαρμογές. Αισθητήρες Fluxgate απαντιούνται και σε διαστημικές εφαρμογές και μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και στο φεγγάρι αλλά και στο μακρινό διάστημα. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των fluxgate είναι για να μετρούν χαμηλής έντασης ρεύματα ή να συγκρίνουν δύο ρεύματα μεταξύ τους.

Η ανάλυση των Fluxgate μπορεί να φθάσει τα 10 pTesla και 1 nTesla για σταθερότητα μακράς διάρκειας. Η απόκλιση που μπορεί να προκληθεί λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι περίπου $0.1 \text{ nTesla}/^\circ\text{C}$. Το επίπεδο θορύβου είναι συγκρίσιμο με αυτό των SQUID υψηλών θερμοκρασιών, αλλά με μεγαλύτερο δυναμικό εύρος.

2.2.1.1 Αρχή λειτουργίας

Έστω ότι έχουμε ένα ιδανικό βρόχο υστέρησης του ενός μισού του αισθητήρα ($F1 \text{ Vs}$). Η διέγερση είναι ίδια με τα χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών. Εφόσον το μαγνητικό κύκλωμα είναι κλειστό, όπως φαίνεται στη εικόνα 2-4 (πάνω). Όταν εφαρμόζεται DC εξωτερικό πεδίο, η χαρακτηριστική καμπύλη του βρόγχου παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-4 (κάτω). Για μερικές κρίσιμες τιμές του H της διέγερσης, το μισό του πυρήνα, στο οποίο το πεδίο διέγερσης έχει την ίδια διεύθυνση με το μετρούμενο πεδίο, γίνεται κορεσμένο. Τη στιγμή αυτή η χαλάρωση (reluctance) του μαγνητικού κυκλώματος αυξάνεται πολύ γρήγορα, επειδή η ροή περιορίζεται από την πύλη (flux is "gated"). Η διαπερατότητα του άλλου μισού πυρήνα μειώνεται. Επιπλέον, η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται από το εξωτερικό πεδίο κατά μήκος του άξονα H .

Η χαρακτηριστική του δεύτερου μισού του πυρήνα είναι συμμετρική ως προς τον Φ άξονα. Με την άθροιση των δύο βρόχων παρατηρούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του Φ ως προς την H διέγερση χαρακτηριστική. Το πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς (το οποίο αντιστοιχεί σε αλλαγές κορυφής ως προς κορυφή του πηνίου λήψης) αυξάνεται με το μετρούμενο πεδίο. Αναφορικά με την εξάρτηση, αυτή είναι γραμμική μέχρι που η ένταση του πεδίου να είναι υψηλή και ολόκληρος ο αισθητήρας να κορεστεί [4].



Εικόνα 2-4: Απλοποιημένες κυματομορφές: (πάνω) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (κάτω) σε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο H_0 .

2.2.2 Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης βασίζονται στο φαινόμενο της σκέδασης των ηλεκτρονίων, η οποία εξαρτάται από τη διεύθυνση της στροφορμής (spin) ως προς το στιγμιαίο (spontaneous) μαγνητισμό των φερρομαγνητικών υλικών. Την κατηγορία αυτή μπορούμε να τη χωρίσουμε σε τρεις υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία είναι οι αισθητήρες με ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR), οι οποίες μαγνητοαντιστάσεις κατασκευάζονται σε λεπτά υμένα. Η δεύτερη υποκατηγορία είναι οι αντιστάσεις γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR), οι οποίες βασίζονται στο φαινόμενο της

ανταλλαγής σύζευξης (coupling) στα υπέρλεπτα μαγνητικά και μη μαγνητικά επίπεδα (superlattices). Η τρίτη υποκατηγορία αφορά τους αισθητήρες τύπου κολοσσιαίας μαγνητοαντίστασης (CMR).

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης ανακαλύφθηκε το 1857 από τον Thomson, αλλά μόνο τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης έχει καταστεί δυνατή η εφαρμογή τους στην βιομηχανία των αισθητήρων καθώς και στην δημιουργία κεφάλων ανάγνωσης- καταγραφής δεδομένων. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί βασίζεται στην εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας και στις απαιτήσεις για μείωση του μεγέθους.

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι κατάλληλοι για μέσης τάξης πεδία, όπως αυτά του μαγνητικού πεδίου της γης και σε εφαρμογές μέτρησης θέσης. Μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές μικροηλεκτρονικής, ώστε να είναι μικρού μεγέθους και υψηλής ακρίβειας, αλλά συνάμα χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, στους σκληρούς δίσκους υπάρχει μια κεφαλή GMR σε κάθε βελόνα ανά μία επιφάνεια δίσκου.

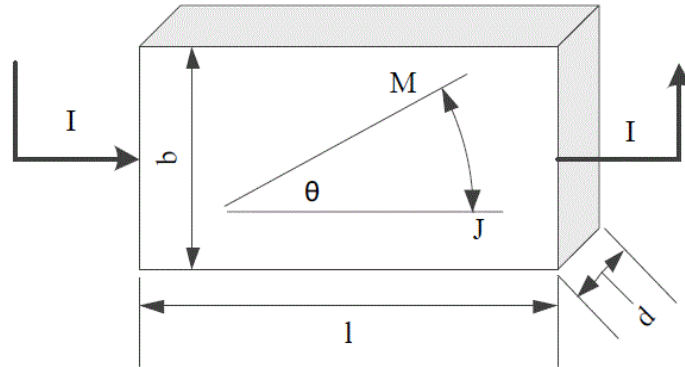
2.2.3 Αισθητήρες AMR

Το φαινόμενο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης βασίζεται στον ανισοτροπικό σκεδασμό των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην ζώνης σθένους, π.χ. το 3d τροχιακό των στοιχείων μετάπτωσης Fe, Co, και Ni. Η ενέργεια των δύο καταστάσεων της στροφορμής της μαγνητικής ροπής ($\pm\mu_B$) διαφέρει κατά την κβαντική μηχανική από την ενέργεια ανταλλαγής. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση φερρομαγνητισμού και φερριμαγνητισμού.

Η θεωρητική ανάλυση των AMR δίνεται από τους «όρους» της στάθμης Fermi και το διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρονίων της κατάστασης. Η δυσκολία είναι ότι το ανισοτροπικό μέρος της αντίστασης εξαρτάται από το ακριβές τρισδιάστατο σχήμα της επιφάνειας Fermi (της 3d πτυχής της στάθμης Fermi), η οποία δεν είναι γνωστή με ακρίβεια εκτός από πολύ λίγα μαγνητικά υλικά. Ως εκ τούτου, οι θεωρητικοί δεν έχουν καταφέρει να υπολογίσουν το φαινόμενο περισσότερο από το ένα δέκατο του πλάτους. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι όλα τα δεδομένα για τα υλικά θα πρέπει να βρεθούν εμπειρικά. Το πλάτος και το πρόσημο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (ARM) δεν μπορούν να προβλεφθούν με ευκολία.

Παρόλα αυτά, τα περισσότερα υλικά έχουν θετική σταθερά ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, το οποίο σημαίνει ότι η υψηλή αντίσταση εμφανίζεται όταν τα διαστήματα που περιγράφουν την αυθόρμητη μαγνήτιση M_s και την πυκνότητα ρεύματος J είναι παράλληλα. Η παρακάτω απεικόνιση παριστάνει μια μαγνητική περιοχή ενός φερρομαγνητικού λεπτού υμενίου. Το φαινόμενο AMR μπορεί να περιγραφεί απλά στο δισδιάστατο χώρο. Όπως φαίνεται οι διαστάσεις του ορθογωνίου λεπτού φερρομαγνητικού υμενίου είναι: l το μήκος, b το πλάτος, και d το πάχος. Επίσης φαίνεται

το σύστημα συντεταγμένων. Ένα εφαρμοζόμενο πεδίο κατά τον Hy περιστρέφει το Ms κατά γωνία θ από τον εύκολο άξονα μαγνήτισης στο δύσκολο άξονα της ομοαξονικής ανισοτροπίας [1].



Εικόνα 2-5: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου.

Η παρακάτω εξίσωση δίνει την εξάρτηση της σταθεράς ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τη γωνία $\theta = \phi - \psi$.

$$\rho(\theta) = \rho_0 + (\rho_p - \rho_0) \cdot \cos^2(\theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cdot \cos^2(\theta) \quad (2-4)$$

Όπου $\rho = \rho_p$ για M_s παράλληλο με το ρεύμα J και $\rho = \rho_0$ για M_s κάθετο με το ρεύμα J. Το πηλίκο $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ είναι η σταθερά μαγνητοαντίστασης.

Η εξίσωση που δίνει η αντίσταση είναι:

$$R(\theta) = \rho(\theta) \frac{l}{bd} = R + \Delta R \cos^2(\theta) \quad (2-5)$$

2.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας μόνιμος μαγνήτης για να δημιουργήσει το πεδίο του οποίου η μεταβολή ανιχνεύεται στη συνέχεια από έναν αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου είναι κατάλληλοι για τέτοιες εφαρμογές. Η χρήση του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, συνήθως μεγαλύτερου από το πεδίο της γης, δεν πρέπει να επηρεάζει μόνιμα τον αισθητήρα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται δύο αισθητήρες:

- GMR
- Hall

2.3.1 Αισθητήρες GMR

Οι αισθητήρες GMR ανακαλύφθηκαν το 1988 ανεξάρτητα από τις ομάδες των Albert Fert του πανεπιστημίου του Paris-Sud, της Γαλλίας, και Peter Grünberg του Forschungszentrum Julich, της Γερμανίας. Το 2007 ο Fert και ο Grünberg βραβεύτηκαν με Nobel Φυσική για την πρακτικής σημασίας πειραματικής ανακάλυψής τους.

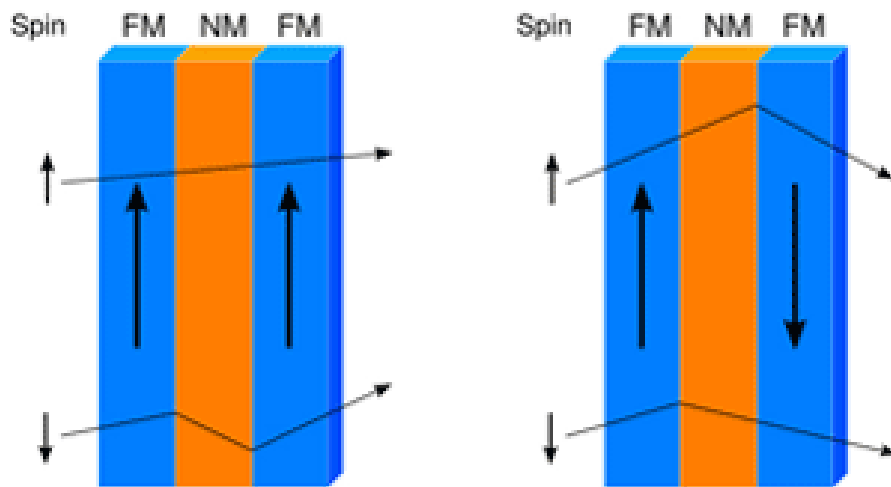
Πιο συγκεκριμένα ο αισθητήρας GMR είναι το αποτέλεσμα της κβαντομηχανικής μαγνητοαντίστασης που παρατηρήθηκε σε δομές thin-film με τη χρήση εναλλασσόμενων, φερρομαγνητικών και μη –μαγνητικών αγώγιμων στρώσεων.

Το φαινόμενο παρατηρήθηκε ως μία σημαντική αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση ανάλογα με το αν η μαγνήτιση των γειτονικών σιδηρομαγνητικών στρώσεων είναι παράλληλη ή σε αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση. Η συνολική αντίσταση που παρατηρείται είναι σχετικά χαμηλή για την παράλληλη ευθυγράμμιση και σχετικά υψηλή για την αντιπαράλληλη. Η κατεύθυνση της μαγνήτισης μπορεί να ελέγχεται, για παράδειγμα, με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η επίδραση βασίζεται στην εξάρτηση της σκέδασης των ηλεκτρονίων με τον προσανατολισμό του spin.

Η κύρια εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες GMR είναι για την ανάγνωση δεδομένων από σκληρούς δίσκους, σε βιοαισθητήρες, σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), και άλλες συσκευές. Οι GMR με πολύστρωματικές δομές χρησιμοποιούνται επίσης σε μνήμες μαγνητοαντίστασης τυχαίας προσπέλασης (MRAM) ,ως κύτταρα που αποθηκεύουν ένα bit πληροφορίας.

Στη βιβλιογραφία, ο όρος γιγάντιας μαγνητοαντίστασης (GMR) μερικές φορές συγχέεται με την κολοσσιαία μαγνητοαντίσταση σιδηρομαγνητικών και αντι-σιδηρομαγνητικών ημιαγωγών, η οποία δεν έχει σχέση με την πολυστρωματική δομή [5].

Ένας απλοϊκός τρόπος να κατανοήσουμε το φαινόμενο GMR είναι να κοιτάξουμε τις μεταβολές της αντίστασης της απλούστερης δομής του GMR: Ο προσανατολισμός του διάνυσματος των spin σε μια δομή που αποτελείται από επαλληλίες στρωμάτων-επιπέδων φερρομαγνητικού (FM) και μη (NF) υλικού. Κάθε φερρομαγνητικό επίπεδο χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα μαγνητικού διπόλου. Για περισσότερη απλοποίηση των μαγνητικών φαινομένων, ένα από τα φερρομαγνητικά επίπεδα τοποθετείται με ένα παρακείμενο αντιφερρομαγνητικό επίπεδο, έτσι ώστε ένα από τα δύο μαγνητικά στρώματα να είναι ελεύθερο να ανταποκριθεί στο εξωτερικό επιβαλλόμενο πεδίο. Τα επίπεδα αυτά έχουν πάχη της τάξης των νανομέτρων και το πάχος ολόκληρης της στοίβας των επιπέδων κυμαίνεται από 10nm έως 20nm. Η αντίσταση μεταξύ των επιπέδων είναι η μικρότερη όταν τα μαγνητικά δίπολα είναι παράλληλα, ενώ στην περίπτωση των αντιπαράλληλων μαγνητικών διπόλων εμφανίζεται η μεγαλύτερη αντίσταση (Εικόνα 2-6).



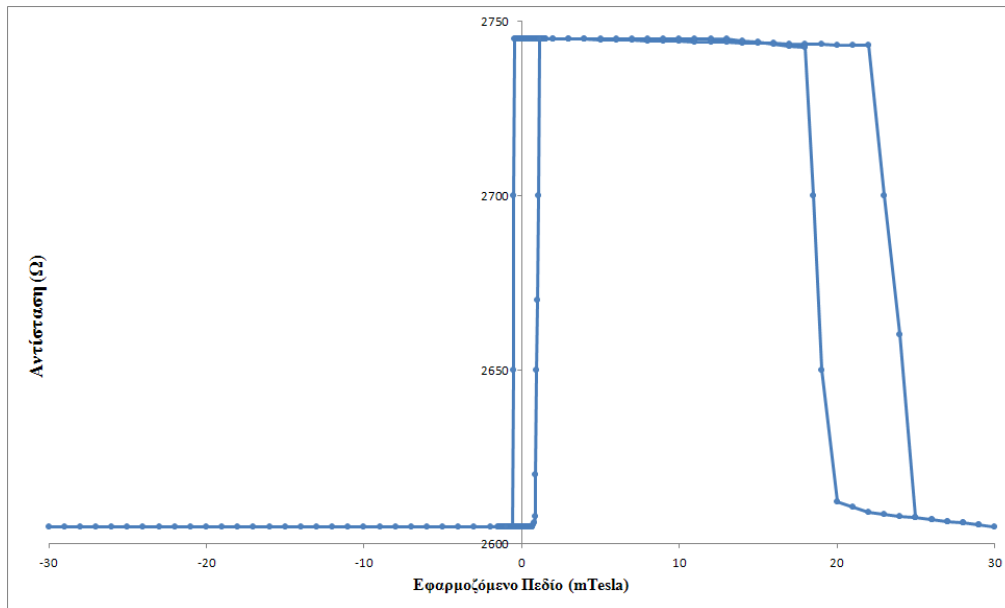
Εικόνα 2-6: Απεικόνιση των spin σε δύο φερρομαγνητικές στρώσεις (FM) που διαχωρίζονται από μία μη-μαγνητική στρώση (NM).

Η αντίσταση που έχει ο GMR σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του πεδίου, όπως τη σχέση που έχει το B με το βρόχο H ενός «ασύνδετου» (unpinned) FM επιπέδου. Στην εικόνα 5 και 6 φαίνονται οι βρόχοι αυτού. Εάν στα μαλακά μαγνητικά υλικά ο μαγνητισμός περιστρέφεται πάνω στο επίπεδο του φιλμ αντί να αναστρέφεται, η αντίσταση των προσκείμενων επιπέδων μεταβάλλεται. Εάν υποθέσουμε ότι κάθε μαγνητικό επίπεδο μπορεί να είναι ομοιόμορφο, η εξάρτηση της αντίστασης και της γωνίας του μαγνητισμού είναι:

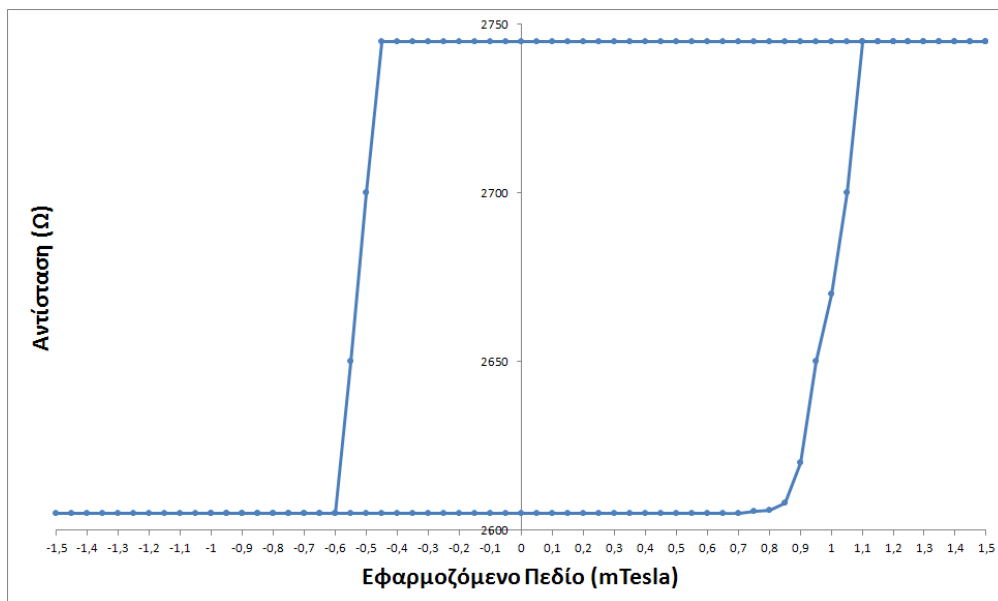
$$R(\theta) = R_{par} + \frac{\Delta R}{2} (1 - \cos(\theta)) \quad (2-6)$$

Εδώ ο όρος είναι το μέτρο της μέγιστης μεταβολής καθώς η γωνία θ περιστρέφεται από παράλληλα σε αντιπαράλληλα μεταξύ των δύο επιπέδων FM. Δηλαδή και είναι οι αντιστάσεις, όταν τα επίπεδα είναι παράλληλα και αντιπαράλληλα.

$$\Delta R = R_{anti} - R_{par} = R_{max} - R_{min} \quad (2-7)$$



Εικόνα 2-7: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων.



Εικόνα 2-8: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλετε.

2.3.2 Αισθητήρες Hall

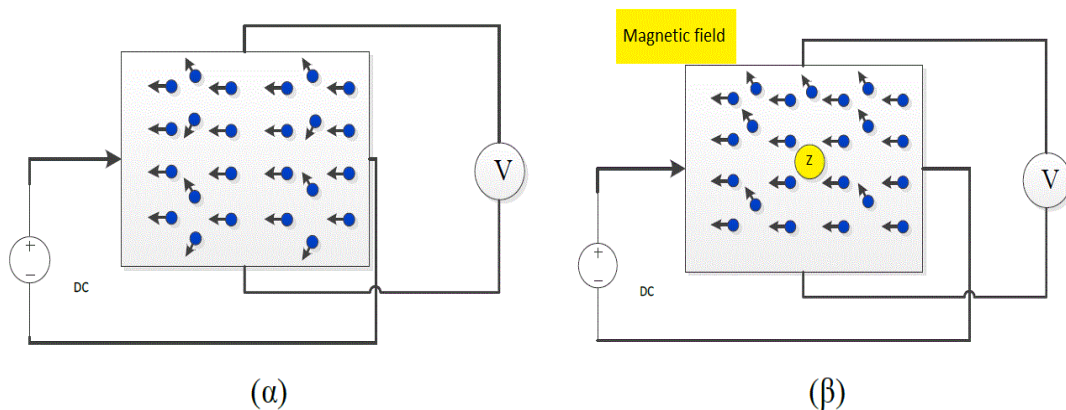
Οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall είναι πιθανόν οι πιο διαδεδομένοι παγκοσμίως . Είναι ενδιαφέρον, ότι ο μαγνητικός αισθητήρας Hall, σχετικά σπάνια χρησιμοποιείται για να μετρήσει μόνο ένα μαγνητικό πεδίο. Είναι πολύ πιο χρησιμοποιείται ως βασικό συστατικό σε αισθητήρες επαφές για γραμμική θέση, γωνιακή θέση, ταχύτητα, περιστροφή, και το ηλεκτρικό ρεύμα. Η πρώτη εφαρμογή εκτός

εργαστηρίου ήταν στα 1950 σαν αισθητήρας ισχύος σε φούρνους μικροκυμάτων. Το 1968 έγινε η πρώτη εφαρμογή αισθητήρων σε ηλεκτρολογία [1].

Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον Dr. Edwin Hall 1879, όταν ακόμα ήταν υποψήφιος διδάκτορας στο πανεπιστήμιο του «Johns Hopkins» της Βαλτιμόρης. Ο Hall προσπαθούσε να επιβεβαιώσει τη θεωρία για τη ροή ηλεκτρονίων, το οποίο είχε πρωτοειπωθεί από τον Kelvin τριάντα χρόνια νωρίτερα. Ο Hall βρήκε ότι όταν τοποθετήσουμε ένα μαγνήτη, έτσι ώστε η μαγνητική ροή να περνά κάθετα στην επιφάνεια ενός φύλλου χρυσού το οποίο διαπερνά ρεύμα, εμφανίζεται μία διαφορά τάσης στα απέναντι άκρα. Βρήκε επίσης ότι η τάση αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά τον αγωγό και ανάλογη της μαγνητικής ροής που διαπερνά κάθετα τον αγωγό.

2.3.2.1 Φαινόμενο Hall.

Το φαινόμενο Hall λαμβάνει χώρα όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου το οποίο είναι κάθετο στο ρεύμα. Οι φορείς του φορτίου στον αγωγό εκτρέπονται από την αρχική τους πορεία λόγω του μαγνητικού πεδίου και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο (πεδίο Hall) το οποίο έχει τη διεύθυνσή κάθετη στο ηλεκτρικό ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο. Αν πυκνότητα ρεύματος J_x είναι στην διεύθυνση x , και το μαγνητικό πεδίο B_z είναι στη διεύθυνση z , τότε το πεδίο Hall θα έχει φορά είτε προς $+y$ είτε προς $-y$, ανάλογα με την πολικότητα των φορέων φορτίου του υλικού.



Εικόνα 2-9: Δομή αισθητήρα Hall. (α) Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και (β) Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

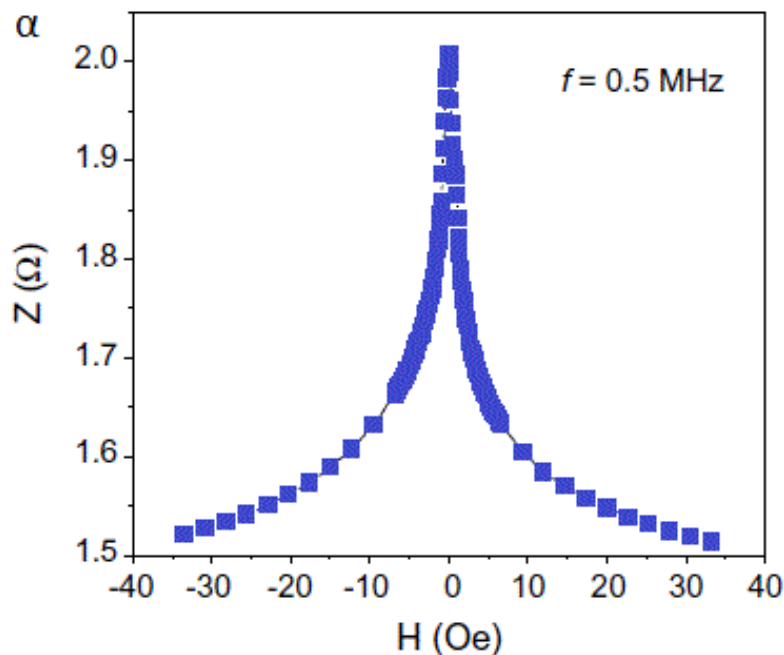
3 Θεμελιώδεις πτυχές των GMI αισθητήρων

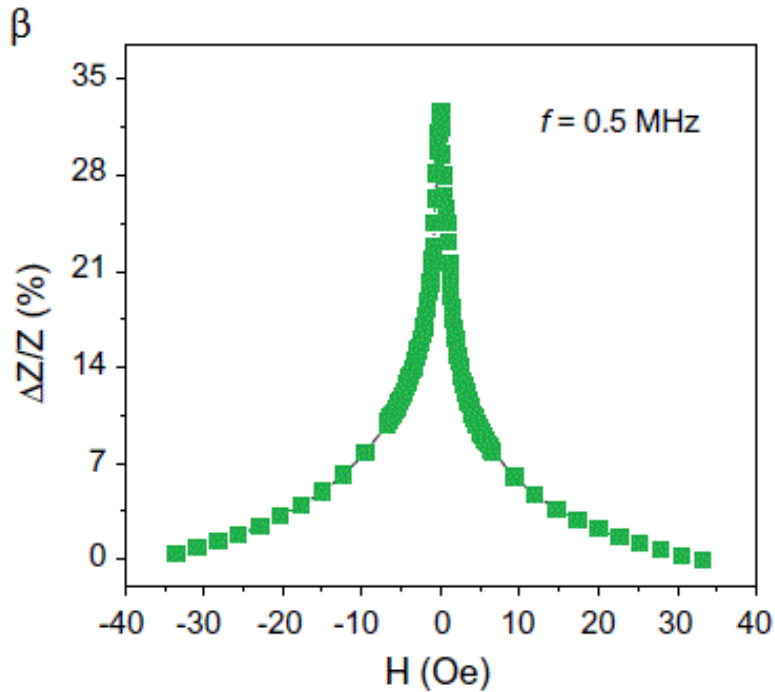
3.1 Ορισμός γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης

Όταν ένα μαλακός σιδηρομαγνητικός αγωγός υποβάλλεται σε ρεύμα μικρού εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), παρατηρείται μια μεγάλη μεταβολή στην ac εμπέδηση του αγωγού, και μπορεί να επιτυγχάνεται κατόπιν εφαρμογής ένας μαγνητικού πεδίου (εικόνα 3-1). Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση (GMI). Ένα τυπικό παράδειγμα της επίδρασης GMI εμφανίζεται στην Εικ. 3-1β. Η σχετική αλλαγή της σύνθετης αντίστασης «εμπέδηση» (Z) με εφαρμοζόμενο πεδίο (H), η οποία ορίζεται ως το αποτέλεσμα γιγαντιαίας μαγνητο-αντίστασης (GMI), εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta Z/Z(\%) = 100\% \times \frac{Z(H) - Z(H_{\max})}{Z(H_{\max})} \quad (3-1)$$

όπου H_{\max} είναι συνήθως το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο το οποίο επαρκεί για τον κορεσμό της αντίστασης. Στην πράξη, η τιμή του H_{\max} είναι διαθέσιμη, για δεδομένο πειραματικό εξοπλισμό. Μερικοί ερευνητές χρησιμοποιούν το $H_{\max} = 0$ στην Εξ. (3.1), αν και ο ορισμός της τιμής αυτής δεν μπορεί να είναι κατάλληλος, επειδή η τιμή του $Z(0)$ εξαρτάται από την παραμένουσα μαγνητική κατάσταση του υλικού.

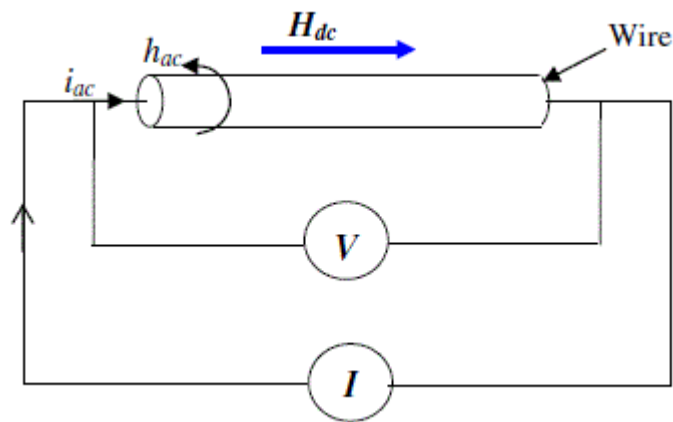




Εικόνα 3-1: Η εμπέδηση (Z) και (β) ο λόγος του GMI [$\Delta Z/Z(\%)$] που αλλάζει σαν συνάρτηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

3.2 Εμπέδηση του μαγνητικού αγωγού

Σύμφωνα με τον ορισμό, η σύνθετη αντίσταση, $Z = R + j\omega L$ (R και L είναι η αντίσταση και αυτεπαγωγή, αντίστοιχα) ενός μαγνητικού αγωγού δίνεται από το λόγο V_{ac} / I_{ac} , όπου I_{ac} είναι το πλάτος ενός ημιτονοειδούς ρεύματος $I = I_{ac} \exp(-j\omega t)$ που διέρχεται από αγωγός, και V_{ac} είναι η τάση που μετράται μεταξύ των άκρων του αγωγού. Στην παρακάτω εικόνα δείχνει μια σχηματική απεικόνιση του ορισμού της σύνθετης αντίστασης.



Εικόνα 3-2: Ορισμός της εμπέδησης.

Σημειώνετε ότι αυτός ο ορισμός ισχύει μόνο για ένα ομοιόμορφο μαγνητικό αγωγό . Παρ'όλα αυτά, για έναν μεταλλικό σιδηρομαγνήτη με μήκος L και εμβαδόν διατομής q , πραγματοποιείται μια γραμμική προσέγγιση, όπου η αντίσταση του μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Z = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} = \frac{LE_z(S)}{q(j_z)_q} = R_{dc} \frac{j_z(S)}{(j_z)_q} \quad (3-2)$$

Όπου E_z και j_z είναι η διαμήκη εξάρτημα του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση του ρεύματος, αντίστοιχα, και το R_{dc} είναι η ηλεκτρική αντίσταση dc. αντίστοιχα, και R_{dc} είναι η ηλεκτρική αντίσταση DC. S είναι η τιμή στην επιφάνεια, και η $\langle \rangle_q$ είναι η μέση τιμή της διατομής q . Εναλλακτικά, η έκφραση για το Z μπορεί να δίδεται σε σχέση με την επιφανειακή εμπέδηση του τανυστή ξ :

$$Z = R_{dc} \frac{q}{\rho l} \left(\xi_{zz} - \xi_{z\varphi} \frac{h_z(S)}{h_\varphi(S)} \right) \quad (3-3)$$

όπου q είναι η ειδική αντίσταση, L το μήκος του αγωγού και h_z και h_φ είναι η αξονική και περιφερειακή σύσταση του ac μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα. Η πυκνότητα ρεύματος $j(r)$ στην Εξ. (3.2) ή το μαγνητικό πεδίο h στην Εξ. (3.3) του αγωγού μπορούν γενικά να ληφθούν στο πλαίσιο της κλασικής ηλεκτροδυναμικής των συνεχών , λύνοντας ταυτόχρονα τη μειούμενη εξίσωση Maxwell:

$$\nabla^2 - \frac{\mu_0}{\rho} \dot{M} = \frac{\mu}{\rho} \dot{M} - \text{grad div } M \quad (3-4)$$

και η εξίσωση Landau-Lifshitz για την κίνηση του διανύσματος μαγνήτισης

$$M = \gamma M \times H_{\text{eff}} - \frac{\alpha}{M_s} \times M - \frac{1}{\tau} (M - M_0) \quad (3-5)$$

όπου γ είναι η γυρομαγνητικός λόγος, η M_s η μαγνήτιση κορεσμού, M_0 η στατική μαγνητισμού, H_{eff} το αποτελεσματικό μαγνητικό πεδίο, και α η παράμετρος απόσβεσης.

Είναι δύσκολο να επιτευχθεί η ακριβής λύση του προβλήματος με την επίλυση ταυτόχρονα της εξίσωσης Maxwell (3.4) και της εξίσωσης της κίνησης Landau-Lifshitz Εξ. (3.5). Αντ'αυτού, μία από τις συχνές υποθέσεις είναι η γραμμική σχέση μεταξύ της επαγωγής και του μαγνητικού πεδίου του υλικού ($B = \mu H$ όπου η μ είναι σταθερή) και χρησιμοποιεί αυτή τη σχέση για να λύσει την εξίσωση Maxwell αγνοώντας την εξίσωση της κίνησης Landau-Lifshitz Εξ. (3.5). Για παράδειγμα, όπως το αποτέλεσμα στο κλασικό επιδερμικό φαινόμενο Εξ. (3.4) λαμβάνεται,

η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση Z του ενός κυλινδρικού μαγνητικό αγωγό και μια επίπεδη άπειρου μήκους ταινία είναι, αντίστοιχα,

$$Z = R_{dc}ktJ_0(kt)/2J_1(kt) \quad (3-6)$$

και

$$Z = R_{dc} \cdot jkta \cosh(jka) \quad (3-7)$$

όπου J_0 και J_1 είναι οι Bessel λειτουργίες του πρώτου είδους, t είναι η ακτίνα του σύρματος, $2a$ είναι ο πάχος του ribbon, R_{dc} είναι η ηλεκτρική αντίσταση για ένα dc και $k = (1 + j) / \delta_m$ με φανταστική μονάδα j . δ_m είναι το βάθος διείσδυσης σε ένα μαγνητικό μέσο, με περιφερειακή διαπερατότητας ($\mu\phi$) για την περίπτωση του σύρματος,

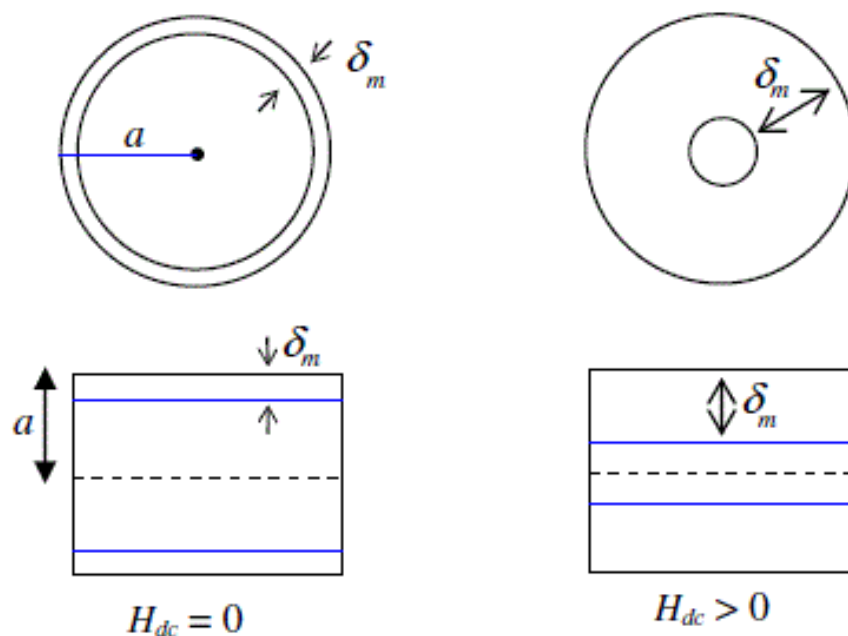
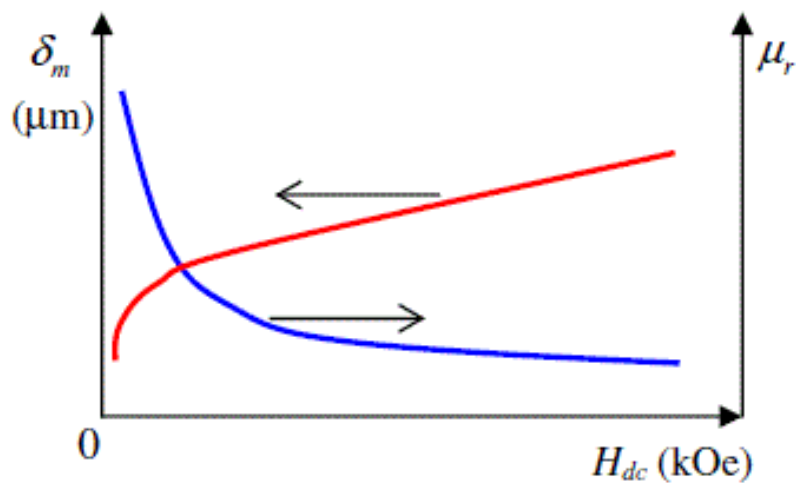
$$\delta_m = \frac{c}{\sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu \phi}} \quad (3-8)$$

και με εγκάρσια διαπερατότητας (μ_T) για την περίπτωση της ταινίας,

$$\delta_m = \frac{c}{\sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu_T}} \quad (3-5)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, σ την ηλεκτρική αγωγιμότητα, και $f = \omega/2\pi$ είναι η συχνότητα του ac (I_{ac}) ρέει κατά μήκος του δείγματος.

Σύμφωνα με τις παραπάνω τέσσερις εξισώσεις, το GMI μπορεί να γίνει κατανοητή ως μια συνέπεια της αύξησης του βάθους του επιδερμικού φαινομένου, μέχρι να φτάσει την ακτίνα του σύρματος (t) με μείωση της περιφερειακής διαπερατότητας στην Εξ. (3.8), ή μέχρι να φτάσει το ήμισυ του πάχους της ταινίας (a) με μείωση της εγκάρσιας διαπερατότητας στην Εξ. (3.9) κάτω από ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος. Για να αποκτήσει μεγάλες τιμές το GMI, είναι απαραίτητο να μειωθεί του βάθος του «δέρματος» με την επιλογή μαγνητικών υλικών που έχουν μεγάλες $\mu\phi$ (ή μ_T) και μικρές δ_m και R_{dc} . Είναι σαφές ότι μια μεγάλη διαπερατότητα μειώνει το βάθος του δέρματος που αργότερα αυξάνεται από το εφαρμοζόμενο πεδίο (εικόνα 3-3).



Εικόνα 3-3: Πάνω διάγραμμα: dc εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο (H_{dc}) εξαρτώμενο με το βάθος διείσδυσης (δ_m) και αντιστρέψιμη διαπερατότητα (μ_r). Κάτω εικόνα: Σχηματική απεικόνιση της αλλαγής του βάθους διείσδυσης δ_m σε σχέση με το H_{dc} για σύρμα αλλά και ταινίας.

Στην πραγματικότητα, οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες του Z αλλάζουν με το dc εφαρμοζόμενο πεδίο, H_{dc} . Για μία πρώτη προσέγγιση, το συστατικό ή αντίσταση, R , μπορεί να εκφράζεται ως :

$$R = (\rho l) / 2\pi(a - \delta_m)\delta_m \quad (3-10)$$

Αυτό σημαίνει ότι οι εν λόγω αλλαγές στην δm προκαλούνται από το H_{dc} μέσω μf (ή μT) και θα τροποποιήσει την R και κατά συνέπεια τη Z . Επιπλέον το βάθος διείσδυσης στο επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση της H_{dc} μέσω της μέτρησης του R . Η αυτεπαγωγή L μπορεί να εκφράζεται ως εξής:

$$L = 0.175\mu_0 l f \langle \mu_r \rangle / \omega \quad (3-11)$$

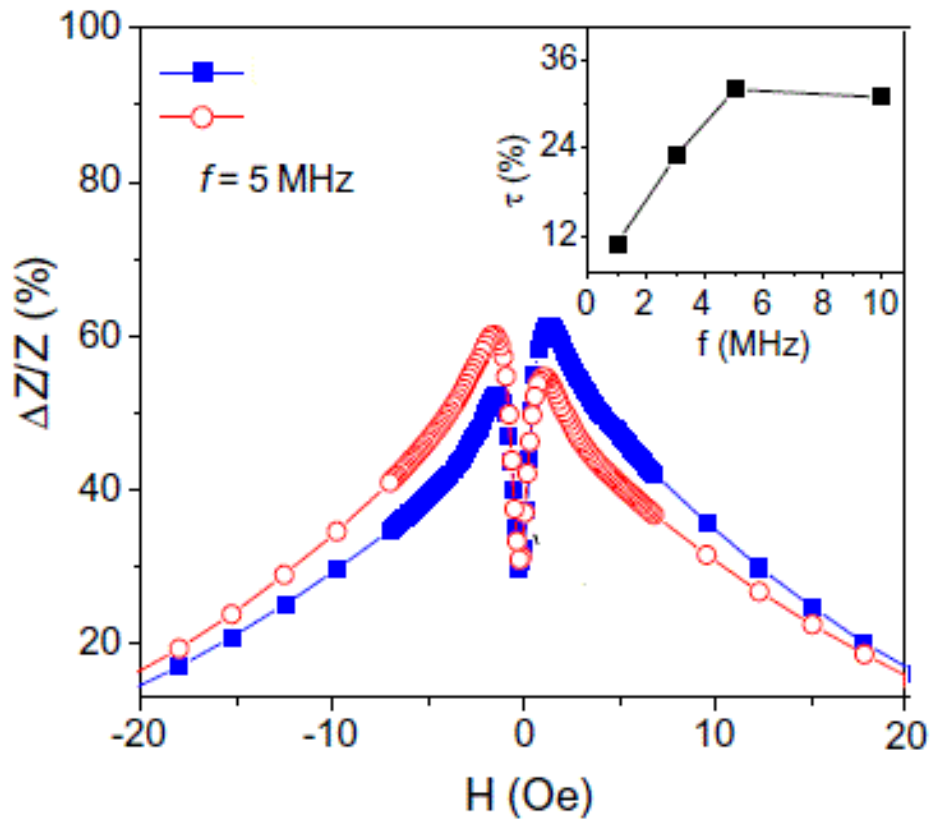
όπου μ_0 και $\langle \mu_r \rangle$ είναι η διαπερατότητα κενού και η μέση σχετική περιφερειακή διαπερατότητα, αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι οι αλλαγές στην $\langle \mu_r \rangle$ προκαλείται από το H_{dc} , καθώς επίσης θα αλλάξει L και ως εκ τούτου το Z . Κατά συνέπεια, οι αλλαγές τόσο R και L συμβάλλουν σε εκείνους που Z και επομένως στο GMI.

3.2 Υστέρηση και ασυμμετρία στους GMI αισθητήρες

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που αφορούν την υστερητική συμπεριφορά στην καμπύλη του GMI σε σχέση με την αύξηση και τη μείωση της εφαρμοζόμενης dc τάσης και κατά συνέπεια του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται στην Εικ. 3-4. Η εμφάνιση της διπλής κορυφή με μια «πτώση» κοντά στο μηδέν παρατηρήθηκε σε συχνότητες $f > 1$ MHz. Με την αύξηση της συχνότητα, η «πτώση» $\eta(\%)$ και η υστέρηση στην καμπύλη του GMI αυξήθηκαν αρχικά έως την συχνότητα ($f = 5$ MHz) και στη συνέχεια μειώθηκε ελαφρά σε υψηλότερες συχνότητες (ένθετο Εικ. 3-4). Στις μπλέ μετρήσεις η βουτιά αντανάκλα μία αύξηση της ανισοτροπίας κατά τη διαμήκη διεύθυνση του ribbon με την αυξανόμενη συχνότητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η υστέρηση σε DC μαγνητικά πεδία, κάτω από το πεδίο ανισοτροπίας, είναι πιθανόν να σχετίζεται με την μαγνήτιση λόγω της εκτόπισης των μαγνητικών τοιχωμάτων.

Τέτοια φαινόμενα υστέρησης στην καμπύλη του GMI μπορεί να ερμηνευθούν από την εξέταση της αντίστοιχης διεργασίας μαγνητισμού που λαμβάνει χώρα στο δείγμα. Επιπλέον, υπάρχουν δύο είδη μαγνητικών πεδίων (ή δύο μαγνητικές ανισοτροπίες) που δρουν στο δείγμα όταν υποβάλλονται σε μετρήσεις ο GMI αισθητήρας: η μία αντιστοιχεί στο ac μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα AC κατά μήκος του δείγματος, και το άλλο είναι το dc αξονικό μαγνητικό πεδίο που επιβάλλεται ίδια πάνω από το πρώτο. Όταν επιτευχθεί κορεσμός, το μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος καθορίζει τη μαγνήτιση, και η ac μαγνητικό πεδίο παίζει μικρό ρόλο στο περιστροφικό διάνυσμα της μαγνήτισης στο εσωτερικό του δείγματος. Όταν το μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος μειώνεται, ο μαγνήτιση αρχίζει να ανιχνεύει την παρουσία της ac μαγνητικό πεδίο, και το διάνυσμα της μαγνήτιση αρχίζει να περιστρέφεται, αυξάνοντας έτσι την εγκάρσια διαπερατότητα και, ως εκ τούτου την αντίσταση. Όταν επιτευχθεί το πεδίο

ανισοτροπίας, η μαγνήτιση μπορεί ελεύθερα να περιστρέφεται κάτω από η επιρροή του ac μαγνητικού πεδίου. Η εγκάρσια διαπερατότητα φθάνει στο μέγιστο και η επίδραση GMI φτάνει στην κορυφή. Όταν το μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος μειώνεται περαιτέρω, μία μη αναστρέψιμη διαδικασία αρχίζει να λαμβάνει χώρα, με αποτέλεσμα την μη αναστρέψιμη εισφορές με τις εγκάρσιες αποφύσεις μαγνητισμού. Κατά συνέπεια, παρατηρήθηκε μια υστερητική συμπεριφορά στον αισθητήρα. Με λίγα λόγια, η προέλευση της υστέρησης του GMI που σχετίζονται με την υστέρηση της διαδικασία μαγνητισμού και την χωρική κατανομή της μαγνητικής ανισοτροπίας, η οποία καθορίζει τη δομή της περιοχής σε μεταλλικά γυαλιά, και της μαγνητικής διαπερατότητας τους. Η υστέρηση είναι συχνά μικρή σε ομογενή μαγνητικά υλικά και μπορεί να απομακρυνθεί με ανάπτυξη άμορφων δειγμάτων κάτω από την εφαρμογή εξωτερικής τάσης καθώς επίσης και ένα μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 3-4: Μαγνητικό πεδίο εξαρτόμενο από το GMI effect μετρούμενο στα $f=5$ MHz με αυξανόμενο (μπλέ) και μειούμενο (κόκκινο) μαγνητικό πεδίο. Στο ένθετο παρουσιάζεται το βάθος σε σχέση με την συχνότητα.

3.2.1 Ασυμμετρία στο GMI

Σε σιδηρομαγνητικά υλικά, μια μικρή ασυμμετρία στην καμπύλη GMI σε σχέση με την αύξηση και τη μείωση του πεδίου, φαίνεται να απαντιούνται στη φύση σε μικρά DC-bias μαγνητικά πεδία, κάτω από το πεδίο ανισοτροπίας. Αυτό μπορεί να τροποποιηθεί είτε με την εφαρμογή ενός πολωμένου dc ρεύματος ή ενός AC πολωμένου πεδίου κατά μήκος του άξονα του δείγματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης του GMI, ή εξαιτίας των εναλλαγών της πόλωσης.

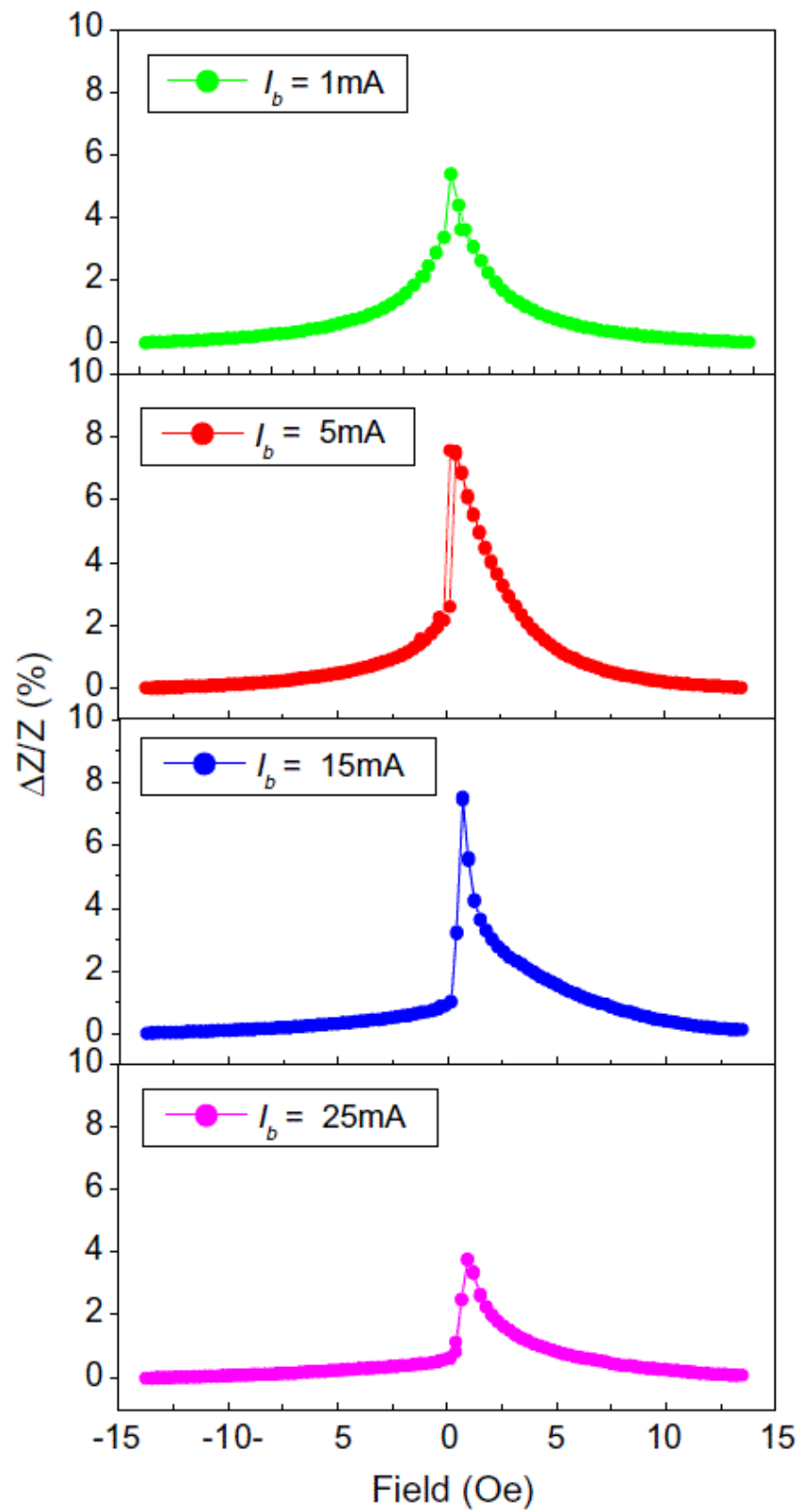
3.2.2 Ασύμμετρη GMI λόγω συνεχές ρεύμα πόλωσης

Όταν ένα ρεύμα πόλωσης dc (I_{dc}) εφαρμόζεται παράλληλα με το ac ρεύμα (I_{ac}) και το dc εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (H_a), προκαλεί ένα περιφερειακό dc μαγνητικό πεδίο (H_{dc}), από κοινού με το περιφερειακό ac μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το ρεύμα AC (H_{ac}). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την προχώρηση της περιμετρικής διαδικασίας μαγνητισμού έναντι του εξωτερικού dc μαγνητικού πεδίου (H_a). Αυτός είναι ο συνδυασμός της ελικοειδούς μαγνητικής ανισοτροπίας και του πεδίου που παράγεται περιφερειακά του dc πεδίου με την τρέχουσα πόλωση να προκαλεί μια ασυμμετρία στη καμπύλη του GMI με πυρήνα άμορφη ταινία (με Co για μέταλλο βάσης) με ένα συνεχές ρεύμα πόλωσης επάνω στο εναλλασσόμενο ρεύμα οδήγησης. Σε αυτήν την περίπτωση, μία συμμετρική SP (single pick) ή DP (double pick) καμπύλης GMI θα πρέπει να εμφανιστεί σε περίπτωση απουσίας του συνεχούς ρεύματος πόλωσης. Αλλά μια πολύ μικρή ασυμμετρία της καμπύλης των αισθητήρων GMI, εξακολουθεί να παρατηρείται και στην περίπτωση των $I_{dc} = 0$, αντανακλώντας την παρουσία της εσωτερικής ελικοειδούς ανισοτροπίας στο σύρμα. Όταν η τρέχουσα πόλωση dc (I_{dc}) εφαρμόστηκε, εμφανίστηκε η ασυμμετρία στο GMI, ανάλογα με την κατεύθυνση και το μέγεθος της I_{dc} .

Το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από την μέτρηση της καμπύλης ενός ασύμμετρου GMI (AGMI) σε διαφορετικά ρεύματα DC-πόλωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 3-5. Μία μικρή ασυμμετρία εμφανίζεται για $I_b = 1$ mA, και καθώς το I_b αυξάνεται μέχρι περίπου $I_b = 15$ mA, η ασυμμετρία γίνεται μεγαλύτερη, αλλά στη συνέχεια μειώνεται για $I_b = 25$ mA. Η αλλαγή αυτή είναι πιθανό να οφείλεται στην επιρροή της μονής κατεύθυνσης πεδίου πόλωσης πάνω στα μαγνητικά τοιχώματα στην περιφερειακή κατεύθυνση. Το περιφερειακό πεδίο πόλωση που παράγεται από το dc δημιουργεί την ac ευαισθησία, η οποία προκύπτει από την μετακίνηση των τοιχωμάτων, ασύμμετρη κατά την εφαρμογή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου κατά το μήκος του άξονα του σύρματος. Ο συνδυασμός του εξωτερικού στατικού μαγνητικού πεδίου και της dc πόλωσης του ρεύματος που εφαρμόζεται κατά το μήκος του σύρματος επιτρέπει την αποτελεσματική εισαγωγή ενός ελικοειδούς πεδίου που ενεργούν για πάνω στο σύρμα. Ως εκ τούτου, ο GMI γίνεται ασύμμετρος σε σχέση με το σήμα του εφαρμοζόμενου στατικού πεδίου, και

αυτή η ασυμμετρία γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση της πόλωσης του περιφερειακού πεδίου. Όταν η περιφερειακή πόλωση του πεδίου είναι αρκετά μεγάλη, η κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων καταστέλλεται. Αυτό, μαζί με την ασυμμετρία, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας και συνεπώς η μειωμένη επίδραση του φαινομένου του GMI. Έχει βρεθεί ότι η διαπερατότητα από την κίνηση των κυρίων τοιχωμάτων του πυρήνα είναι σχεδόν σταθερή, ανεξάρτητα από το ρεύμα πόλωσης, ενώ η διαπερατότητα από την περιστροφή του κεντρικού τομέα (μ_{rot}) αυξάνει με το ρεύμα πόλωσης έως 15 mA και στη συνέχεια μειώνεται. Η αύξηση του μ_{rot} πάνω από το $I_b = 15$ mA οφείλεται στην ενίσχυση του πυρήνα του όγκου του περιφερειακού τομέα, αλλά η μείωση των I_{rot} για υψηλότερο ρεύμα προκαλείται κυρίως από την παρεμπόδιση της περιστροφής μαγνητισμού από ισχυρό πεδίο πόλωσης. Αυτό εξηγεί γιατί η AGMI μειώνεται σε μέγεθος κάτω από $I_b = 25$ mA. Έχει, επίσης, βρεθεί ότι με την αύξηση του ρεύματος πόλωσης DC, η θέση της κορυφής του AGMI μετατοπίζεται ελαφρώς ώστε να μειώσει τα dc πεδία. Όταν η κατεύθυνση του ρεύματος πόλωσης DC αντιστρέφεται, η ασυμμετρία αντιστρέφει επίσης. Με την αύξηση της συχνότητας, η ασυμμετρία στο GMI πρώτα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται αποδίδοντας ένα μέγιστο σε μια ορισμένη συχνότητα. Όταν η συχνότητα υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, η ασυμμετρία του προφίλ GMI μικραίνει. Αυτό συμβαίνει επειδή η επίδραση του dc πεδίου πόλωσης πάνω στη περιστρεφόμενη μαγνήτιση είναι μικρότερη σε σχέση με την κίνηση των τοιχωμάτων. Τα ευρήματα αυτά είναι χρήσιμα για την κατασκευή ενός γραμμικού αισθητήρα πόλωσης πεδίου.

Σε μια προσπάθεια να εξηγήσει θεωρητικά τον προτεινόμενο μηχανισμό για τον AGMI αισθητήρα σε άμορφα σύρματα λόγω της τρέχουσας dc πόλωσης, βασίζεται στο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο, του Panina et al. Το οποίο έδειξε ότι η συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης της επιφανείας (δηλαδή, ζ_{zz}) γίνεται ασύμμετρη όταν προστίθεται ένα dc μαγνητικό πεδίο. Η ασυμμετρία έχει σχέση με την αξονικό βρόχος υστέρησης που είναι επίσης ασύμμετρος. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί η AGMI εμφανίστηκε σε άμορφα καλώδια (με μέταλλο βάσης το Co) χωρίς στρέψης. Αυτό έχει πειραματικά επαληθεύεται από Phan et al. Φαίνεται ότι η ελικοειδής εσωτερική πίεση υπάρχει σε μη περιστρεφόμενο άμορφο καλώδιο (με μέταλλο βάσης το Co). Έχει εκτιμηθεί περαιτέρω ότι η ελικοειδής εσωτερική πίεση είναι μικρότερη σε άμορφο σύρμα με μέταλλο βάσης το Co σε σχέση αυτό που έχει μέταλλο βάσης Fe, λόγω της διαφορά στις δομές των περιοχών τους. Είναι λοιπόν η ελικοειδής εσωτερική ανισοτροπία που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αξονική διαδικασία μαγνήτισης και κατά συνέπεια στους AGMI. Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο μοντέλο πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο.



Εικόνα 3-5: AGMI καμπύλες για συχνότητα $f=1$ MHz για διαφορετικό dc ρεύμα πόλωσης [6].

3.2.3 Ασύμμετρη GMI λόγω ac πεδίου πόλωσης

Όταν ένα άμορφο σύρμα (με βασικό μέταλλο το Co) υποβάλλεται σε παλμικό ελικοειδές μαγνητικό πεδίο, που παράγεται από τον συνδυασμό ενός παλμού εναλλασσόμενου ρεύματος που διέρχεται μέσω του σύρματος και ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από αυτό, μπορεί να δημιουργηθεί ασυμμετρία στο προφίλ του GMI. Τα περιφερειακά και αξονικά συστατικά του ελικοειδούς πεδίου δόθηκαν από το σύρμα και το μαγνητισμένο πηνίο, αντίστοιχα. Η επίδραση ενός πεδίου πόλωση ac (H_b) που δημιουργείται από το πολωμένο ρεύμα AC σχετικά με την χαρακτηριστική τάση του σύρματος, σχετίζεται με τη διαδικασία ac εγκάρσια μαγνήτιση επαγωγής, οπότε η ασυμμετρία στο GMI μπορεί να προκύψει από τον συνδυασμό του ελικοειδή μαγνητισμού και του AC αξονικού μαγνητισμού . Αυτή η διαδικασία πιστεύεται ότι είναι παρόμοια με εκείνη της επίδρασης Matteucci, στο οποίο μία τάση εμφανίζεται με την παρουσία ενός αξονικού πεδίο, που οδηγεί τα μαγνητικά τοιχώματα. Η ομοιότητα εμφανίζεται μόνο σε υψηλή συχνότητα όταν η επαγόμενη μαγνήτιση έχει έναν περιστροφικό μηχανισμό. Επειδή η συμβολή στην τάση οφείλεται στην H_b , παρομοιάζεται με αυτή που προκαλείται από το ρεύμα (i) από μόνη της, και μπορεί να αλλάξει την τάση σε σχέση με τη συμπεριφορά H_{ex} όταν αυξάνεται η συχνότητα. Στην πραγματικότητα, η Matteucci συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης, μπορεί επίσης να ελέγχεται από τον αριθμό των στροφών της οδήγησης του πηνίου. Όταν ο αριθμός είναι μεγάλος, το αποτέλεσμα του Matteucci συμβάλει θετικά στην εμπέδηση και η ασυμμετρία μπορεί να παρατηρηθεί.

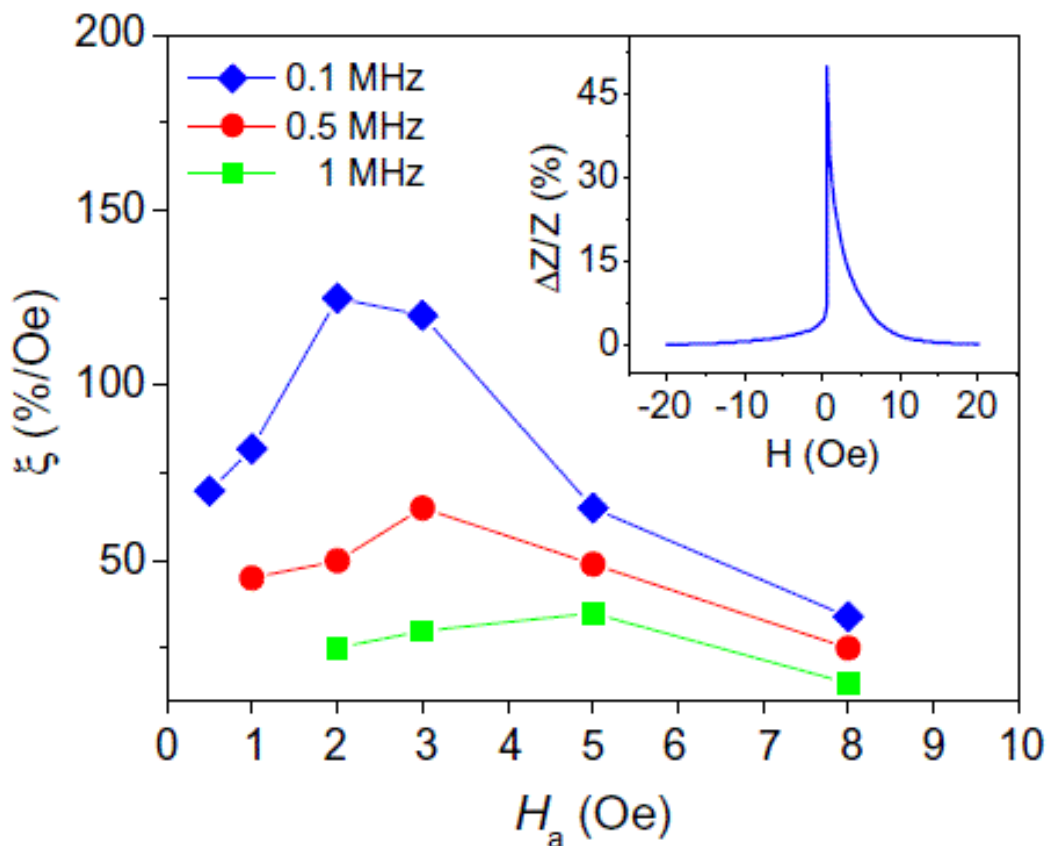
3.2.4 Ασύμμετρο GMI λόγω εναλλαγής πολικότητας

Αυτό ο τύπος του AGMI, η οποία είναι η λεγόμενη GMI- valve, αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Kim et al. κατά τη διερεύνηση της επίδρασης αδύναμου πεδίου, κατά τον διαμήκη άξονα κατά τη διάρκεια που πραγματοποιούνταν ανόπτωση στη κατατομή του GMI σε συνεργασία το άμορφο σύρμα. Αργότερα, πραγματοποιήθηκαν εκτενή πειραματικές και θεωρητικές έρευνες για την κατανόηση την προέλευση αυτού του ασύμμετρου GMI αισθητήρα. Βρέθηκε ότι όταν μία άμορφη κορδέλα (με μέταλλο βάσης το Co) ανοπτηθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία της τάξης ($T_a = 350-380$ °C) στον αέρα με την επιβολή ενός ασθενές μαγνητικού πεδίου ($H_a = 0.05-3$ Oe) κατά μήκος της ταινίας, εμφανίστηκε μια μεγάλη ασυμμετρία στην καμπύλη του GMI. Σε σχετικά χαμηλές συχνότητες ($0,1$ MHz), τα διαγράμματα του GMI έδειξαν ένα τυπικό χαρακτηριστικό DP για $H_a \leq 100$ MOe, ενώ μόνο μία κορυφή εμφανίστηκε κάτω από την υψηλότερη H_a , με την κορυφή στην αντί-παράλληλη περιοχή του πεδίου να εξαφανίζεται πλήρως. Η γιγαντο-μαγνητοεμπέδωση για τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε ανόπτωση υπό την επιβολή πεδίου, έδειξε επίσης μια διακριτή μεταβολή στην χαρακτηριστική καμπύλη της AGMI με την αύξηση της

συχνότητα. Η κορυφή στο αντι-παράλληλο πεδίο εμφανίστηκε και πάλι σε συχνότητες πάνω από 1 MHz, και με την αύξηση της συχνότητας ανεπτύχθηκε περαιτέρω. Το φαινόμενο AGMI έχει αποδοθεί στην επιφανειακή κρυστάλλωση, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα η επιφάνεια να γίνεται φτωχή σε B και Si λόγω της οξειδωσης της. Επιπλέον, αυτό το είδος της θερμικής επεξεργασίας παράγει ασύμμετρους βρόχους υστέρησης στις άμορφες κορδέλες και οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της εσωτερικής άμορφης φάσης, και της κρυσταλλικής η οποία βρίσκεται στο εξωτερικό στρώμα και είναι μαγνητικά σκληρότερη. Όταν η κρυστάλλωση πραγματοποιήθηκε υπό ασθενές μαγνητικό πεδίο, οι κρυσταλλίτες ήταν μαγνητικά προσανατολισμένοι, με αποτέλεσμα να υπάρχει κατευθυντικότητα στην επιφάνεια της ανισοτροπία. Η επιρροή της μονής κατεύθυνσης της επιφάνειας ανισοτροπίας στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά την εγκάρσια κατεύθυνση, προκαλεί με τη σειρά του την ασυμμετρία στην γιγαντιαία μαγνητοεμπέδωση.

Σε μια προσπάθεια να εξηγήσουν ποιοτικά τους χαρακτηριστικά του AGMI, ένα φαινομενολογικό μοντέλο πρόσφατα προτάθηκε από τους Buznikov et al.. Στο πλαίσιο αυτού του μοντέλου, η επίδραση ενός επιφανειακού κρυσταλλικού στρώματος στην απόκριση του GMI περιγράφεται με όρους ενός αποτελεσματικού πεδίου πόλωσης, λόγω της σύζευξης μεταξύ του κρυσταλλικού στρώματος και της άμορφης φάσης. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η παρουσία ενός πεδίου πόλωσης αλλάζει σημαντικά την απόκριση του GMI. Σε χαμηλές συχνότητες, η μετατόπιση των μαγνητικών τοιχωμάτων οδηγεί σε μια βήματική αλλαγή στο προφίλ του GMI. Σε υψηλές συχνότητες, η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων μειώνεται και ένα ασύμμετρο DP-επιτυγχάνετε στη συμπεριφορά του GMI. Αυτό το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να περιγράψει ποιοτικά τα χαρακτηριστικά του AGMI σε ένα διάμηκες ασθενές μαγνητικό πεδίο, κατά την ανόπτυση άμορφου ribbon με Co ως βασικό μέταλλο, αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει το ερώτημα γιατί AGMI μειώνεται σημαντικά όταν η ανόπτυση του δείγματος πραγματοποιείται στον αέρα και σε αρκετά υψηλό μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, η κορυφή GMI για αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές άρχισαν να εμφανίζονται και πάλι σε σχετικά υψηλά πεδία κατά τη διάρκεια της ανόπτησης (15 Oe), η οποία ήταν πιθανό να οφείλεται στην κυρίαρχη επίδραση της μονής κατεύθυνσης της ανισοτροπίας πάνω από την μονοαξονική ανισοτροπία της κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, και την περιστροφή των μαγνητικών ροπών. Αυτό το εύρημα έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά από τους Phanet al. από την εξέταση του συμπλόκου της φασματικής διαπερατότητα σε σχέση με την περιστροφικό DC μαγνητικό πεδίο. Έχει επισημανθεί ότι η ανόπτηση σε ανοικτό χώρο υπό την επιβολή μαγνητικού πεδίου (H_a) μικρότερο από το πεδίο ανισοτροπίας (H_k) κατά μήκος της ταινίας παρουσιάζει μια ιδιόμορφη δομή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της εγκάρσια διαπερατότητα και μια μεγαλύτερη

ασυμμετρία στον GMI . Η ανόπτηση με την επιβολή μαγνητικών πεδίων ελαφρώς υψηλότερο από το πεδίο ανισοτροπίας ($H_a > H_k$) επάγει μία μονόδρομη μαγνητική ανισοτροπία κατά μήκος του ribbon και αυτή μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη για να εμποδίσει την κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων κατά την εγκάρσια κατεύθυνση, μειώνοντας έτσι σημαντικά την επίδραση του GMI . Είναι ενδιαφέρον, η βέλτιστη συμπεριφορά του GMI, η οποία αντιστοιχεί σε υψηλότερη ευαισθησία πεδίου του αισθητήρα 125% / Oe, και παρατηρήθηκε στην συχνότητα των $f = 0,1$ MHz σε ανωπτυμένο ribbon υπό την επίδραση ενός πεδίου $H_a=2\text{Oe}$ (εικόνα 3-6) . Αυτό είναι ιδανικό για την ανάπτυξη γραμμικής πολικότητας αισθητήρων. Ωστόσο, περαιτέρω θεωρητικές μελέτες είναι αναγκαίες για να προβλεφθεί μια ποσοτική εξήγηση για το παρατηρούμενο φαινόμενο.



Εικόνα 3-6: Το πεδίο ευαισθησίας του GMI αλλάζει ως συνάρτηση του ανοπτυμένου πεδίου (H_a) σε διαφορετικές συχνότητες. Το ένθετο δείχνει τον GMI μετρημένο με $H_a=2\text{Oe}$ και $f=0.1$ MHz [6].

3.3 Κριτήρια για την επιλογή του υλικού για GMI αισθητήρα

Για να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό σε εφαρμογές αισθητήρων τύπου GMI, θα πρέπει να τηρούνται δύο βασικές απαιτήσεις, δηλαδή, μια υψηλή αναλογία στην GMI (ή ένα μεγάλο GMI φαινόμενο) και μια υψηλή ευαισθησία προς το εφαρμοζόμενο πεδίο (ή υψηλής μαγνητικής απόκρισης). Εν όψει της θεωρητικής ανάλυσης και των πειραματικά αποτελεσμάτων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τη δημιουργία ενός αρκετά ευαίσθητου GMI θα πρέπει το μαγνητικό υλικό που έχει στον πυρήνα να έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- χαμηλή αντίσταση, q ,
- υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, μ ,
- υψηλό κορεσμό μαγνητισμού, M_s , και
- μικρό σιδηρομαγνητικό παράμετρος χαλάρωσης (ή χαμηλή παράμετρος απόσβεσης), α .

Σε αυτό το πλαίσιο, κρυσταλλικά σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν το πλεονέκτημα της χαμηλότερης αντίστασης (Q), αλλά τα άμορφο υλικά έχουν καλύτερη μαλακή μαγνητική συμπεριφορά (π.χ., υψηλότερη μαγνητική διαπερατότητα, μ , και ο κορεσμός μαγνητισμού, M_s) επειδή δεν έχουν μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπία. Ειδικότερα, τα μη-μαγνητοσυστολικά υλικά μπορεί να εμφανίσουν την καλύτερη GMI απόδοση, επειδή η μαγνητοελαστική συμβολή τους στη μαγνητική ανισοτροπία ουσιαστικά χειροτερεύει τη μαλακή μαγνητική συμπεριφορά. Η βελτίωση στη μαγνητική συμπεριφορά ενός πραγματικού άμορφου υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί με κατάλληλη θερμική κατεργασία ή / και την εφαρμογή των εξωτερικών παραμέτρων (μηχανική καταπόνηση, μαγνητικό πεδίο, κ.λπ.) κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ταυτόχρονη βελτίωση της GMI απόκρισης και της ευαισθησίας του πεδίου. Η παράμετρος απόσβεσης (α) συχνά παρατηρείται στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, όπου ο σιδηρομαγνητικός συντονισμός λαμβάνει χώρα, ενώ μπορεί να αγνοηθεί στην περιοχή των ενδιάμεσων συχνοτήτων (δηλαδή, $f = 0,1 - 10$ MHz), όπου χρησιμοποιούνται οι περισσότεροι αισθητήρες τύπου GMI. Επιπλέον, για πρακτικούς εφαρμογές, η δυνατότητα κατασκευής και το κόστος των υλικών παίζει επίσης σημαντικό ρόλο [6, 7].

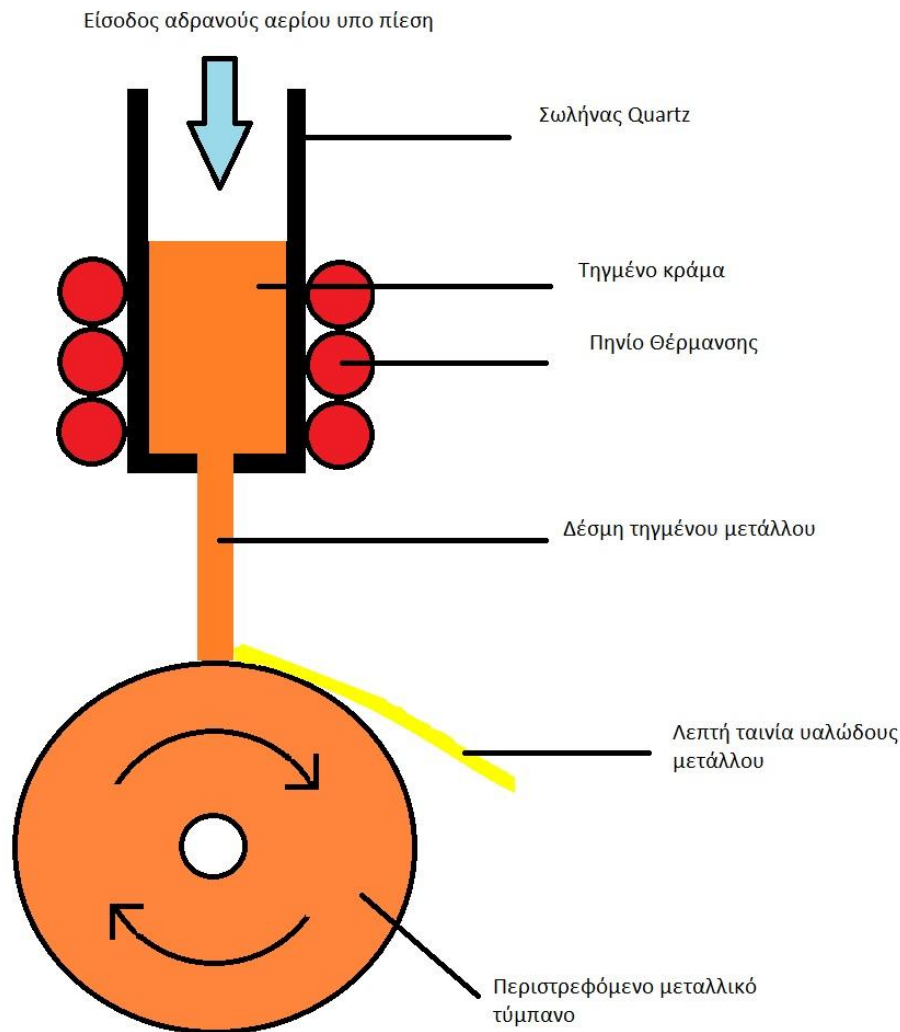
3.3.1 Άμορφα Υλικά

Πολλά άμορφα στερεά δημιουργούνται με την ταχεία ψύξη του υγρού σε θερμοκρασίες όπου οι κινήσεις των ατόμων είναι τόσο αργές ώστε να είναι αδύνατο να γίνει η κρυστάλλωση του υλικού. (Ο ρυθμός της ψύξης μετράται σε σχέση με τον ρυθμό κρυστάλλωσης, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την ατομική διάχυση). Αναφερόμαστε σε αυτά τα υλικά με το όνομα γυαλιά. Στην υγρή κατάσταση, τα άτομα έχουν επαρκή κινητική ενέργεια ώστε να μπορούν να δημιουργούν δεσμούς και να τους σπάνε με μεγάλη συχνότητα, καθώς επίσης και να τους

παραμορφώνουν ή να τους κάμπτουν και να τους διαστρεβλώνουν. Παρατηρείται μεταβολή στη γωνία μεταξύ των δεσμών όπως επίσης και περιστροφή των ατόμων γύρω από τους δεσμούς (στρέψη των δεσμών). Επομένως η γεωμετρία του δεσμού δεν είναι η ίδια γύρω από όλα τα άτομα γεγονός που έχει ως συνέπεια την μη ύπαρξη τάξης μεγάλης εμβέλειας και τη δημιουργία μιας άμορφης δομής.

Για να δημιουργηθεί η υαλώδης κατάσταση, ρίχνουμε απότομα την θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία πήξης, όπου η διαδικασία της ατομικής διάχυσης η οποία είναι απαραίτητη για την διάταξη των ατόμων σύμφωνα με την κρυσταλλική συμμετρία, είναι εξαιρετικά αργή σε σύγκριση με την κλίμακα του χρόνου της παρατήρησης. Τότε η υγρή δομή παγώνει. Αυτό σημαίνει ότι σε μία άμορφη δομή η διάταξη μεν του κάθε ατόμου είναι καθορισμένη, γιατί κάθε άτομο πληροί τις συνθήκες που επιβάλλει ο χημικός δεσμός, αλλά συνολικά η δομή στερείται τάξης μεγάλης εμβέλειας. Συνεπώς υπάρχει τάξη μικρής εμβέλειας. Η δομή είναι ένα συνεχές τυχαίο δίκτυο ατόμων (συχνά ονομάζεται μοντέλο CRS, continuous random solid), για τα άμορφα στερεά. Λόγω της απουσίας τάξης μεγάλης εμβέλειας, τα άμορφα υλικά δεν έχουν κρυσταλλικές ατέλειες, όπως όρια κόκκων και εξαρθρώσεις, οι οποίες μπορούν να φανούν εξαιρετικά χρήσιμες σε ορισμένες εφαρμογές.

Το αν κατά την ψύξη ενός υγρού θα σχηματιστεί ένα γυαλί ή ένα κρυσταλλικό στερεό εξαρτάται από ένα συνδυασμό παραγόντων, όπως τα χαρακτηριστικά του χημικού δεσμού που υπάρχει μεταξύ των ατόμων ή των μορίων, το ιξώδες του υγρού (από το οποίο καθορίζεται πόσο εύκολα θα κινούνται τα άτομα), το ρυθμό της ψύξης και τη σχέση της πραγματικής θερμοκρασίας με τη θερμοκρασία ψύξης. Από την άλλη μεριά, είναι σχεδόν αδύνατο κατά την ψύξη ενός καθαρού μετάλλου, όπως ο χαλκός, να μην γίνει κρυστάλλωση και να δημιουργηθεί γυαλί. Ο μεταλλικός δεσμός, καθώς οφείλεται σε ένα νέφος αερίων που καταλαμβάνει το χώρο ανάμεσα στα άτομα του μετάλλου, είναι μη κατευθυντικός, και επομένως, κατά την ψύξη τα ιόντα του χαλκού μετατοπίζονται εύκολα (και επομένως γρήγορα) το ένα σε σχέση με το άλλον και δημιουργούν ένα κρύσταλλο. Παρ' όλα αυτά υπάρχει μεγάλος αριθμός κραμάτων μετάλλων-μετάλλων Cu66-Zr33) και μετάλλων μεταλλοειδών (Fe80B20, Pd80Si20) τα οποία σχηματίζουν γυαλιά εφόσον ψυχθούν πάρα πολύ απότομα, με ρυθμό δηλαδή μείωσης της θερμοκρασίας ίσο με $10^6 - 10^8 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$. Στην πράξη, τέτοιοι ρυθμοί ψύξης επιτυγχάνονται με την εκτόξευση ενός λεπτού πίδακα του μεταλλικού τήγματος προς ένα ψυχρό κύλινδρο χαλκού που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Κατά την επαφή του τήγματος με τον κύλινδρο, το τήγμα παγώνει μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου και δημιουργεί μια λεπτή ταινία ενός μεταλλικού γυαλιού. Η διαδικασία είναι γνωστή ως περιστροφή τήγματος (melt spinning) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3-7: Απεικόνιση διαδικασίας δημιουργίας ταινιών υαλώδους μετάλλου [3].

3.3.2 Μαγνητική Ανισοτροπία

Η επίδραση που ασκούν τα μαγνητικά φαινόμενα σε στερεά νανοδιαστάσεων είναι γνωστή ήδη από τις περασμένες δεκαετίες, βάσει των θεωριών Bloch και Neel. Η προοπτική νέων εφαρμογών, όπως οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και οι διατάξεις υψηλής πυκνότητας εγγραφής, αποτελεί σήμερα τη βασική κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη λεπτών φερρομαγνητικών υμενίων. Η μελέτη της μαγνήτισης διδιάστατων υμενίων πάντως, οφείλεται εν πολλοίς στις θεωρητικές προβλέψεις της προηγούμενης δεκαετίας, σχετικών με την ενίσχυση των μαγνητικών ροπών σε μονοστρωματικά επίπεδα μεταλλικών στοιχείων της 3d υποστοιβάδας, αναπτυχθέντων σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα. Καθώς η μέτρηση της

μαγνητικής ροπής είναι εξαιρετικά δύσκολη σε λεπτά υμένια, η μαγνητική ανισοτροπία είναι συνήθως η ποσότητα, μέσω της οποίας είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ένα μαγνητικό λεπτό υμένιο . Το αξιοσημείωτο αυτό φαινόμενο είναι τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους εντονότερο από ότι στην περίπτωση bulk φερρομαγνητικών υλικών και πηγάζει από την επιφανειακή έλλειψη συμμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, η ανισοτροπία οφείλεται είτε σε αλληλεπιδράσεις μαγνητικών διπόλων, είτε σε αλληλεπιδράσεις του spin του ηλεκτρονίου με τα γειτονικά τροχιακά του. Η πρώτη μορφή αλληλεπίδρασης ευθύνεται για την ανισοτροπία σχήματος και την παρατηρούμενη μαγνήτιση εντός του επιπέδου (inplane magnetization) λεπτών υμενίων. Η δεύτερη μορφή ευθύνεται για τη μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία και τον παρατηρούμενο προσανατολισμό της μαγνήτισης, σε σχέση με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες. Λόγω της έλλειψης συμμετρίας συχνά υπεισέρχεται και ο όρος της επιφανειακής ανισοτροπίας, ο οποίος ευθύνεται για τη μαγνητοσυστολική ανισοτροπία που παρατηρείται σε πολυστρωματικές δομές, λόγω εισαγωγής τάσεων από την ασυμφωνία των κρυσταλλικών παραμέτρων. Ο συντελεστής ανισοτροπίας είναι ευθέως ανάλογος του αντιστρόφου του πάχους . Σε πολύ μικρά πάχη επομένως, η μαγνητική ανισοτροπία είναι δυνατόν να υπερκεράσει την ενέργεια απομαγνήτισης, οπότε προκύπτει το εντυπωσιακό φαινόμενο της αυθόρμητης μαγνήτισης εκτός του επιπέδου (out of plane magnetization) . Σε γενικές γραμμές, η μαγνητική συμπεριφορά συστημάτων λεπτών υμενίων επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, όπως είναι η παρουσία φάσεων ενδοδιάχυσης ή ξένων στοιχείων προσμίξεως. Προσοφθηθέντα άτομα και επιφανειακές αντιδράσεις μεταξύ τους, επίσης εκφυλίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του υμενίου. Την πλέον καταλυτική επίδραση πάντως φαίνεται να ασκεί η τοπογραφία της επιφανείας. Είναι γνωστό, ότι η παρουσία επιφανειακής τραχύτητας σε πολύ λεπτά υμένια αποτελεί πηγή απομαγνήτισης εντός του επιπέδου τους. Η ενέργεια απομαγνήτισης είναι ανάλογη του λόγου της επιφανειακής τραχύτητας προς το πάχος του υμενίου και δύναται να θεωρηθεί ως μια επιπρόσθετη πηγή επιφανειακής ανισοτροπίας φύσεως διπόλων . Το φαινόμενο αυτό εξασθενεί σε απολύτως επίπεδα υμένια. Μεταξύ των στοιχείων μεταπτώσεως, το κοβάλτιο εμφανίζει την υψηλότερη μαγνητική ανισοτροπία. Σε μορφή λεπτών υμενίων, έχει προβλεφθεί ένα κρίσιμο μέγεθος πάχους (13 Å), κάτω από το οποίο η μαγνήτιση (υψηλού συνεκτικού πεδίου) διευθετείται κάθετα ως προς την επιφάνειά τους και παράλληλα προς τον άξονα c της HCP δομής (εύκολος άξονας μαγνήτισης), λόγω ελαχιστοποίησης της επιφανειακής ενέργειας. Παράλληλα, η εξαιρετική μαγνητική συμπεριφορά του κοβαλτίου το έχει καταστήσει αναγκαίο υλικό βάσης σε διατάξεις [7].

4 Πειραματική διαδικασία

4.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, όσο και στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κι Μηχανικών Η/Υ του Ε.Μ.Π.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων δημιουργήθηκε αισθητήρας με δυνατότητα αλλαγής του πυρήνα του. Οι δύο τύποι πυρήνων που εξετάστηκαν ήταν άμορφες ταινίες CoFeSiB και CoSiB. Ο GMI αισθητήρας για να λειτουργήσει χρειάζεται αρνητικά μαγνητοσυστολικές ταινίες ως πυρήνες, κάτι το οποίο είναι οι πυρήνες που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Εξοπλισμός

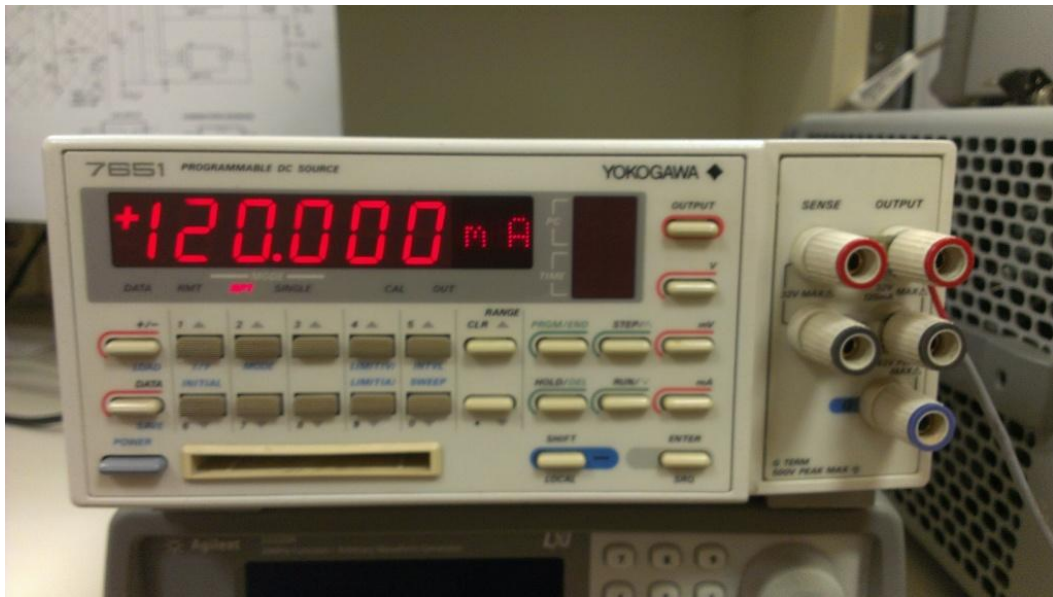
Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι το:

- 4275A MULTI- FREQUENCY LCR METER της Hewlett – Packard (Εικόνα 4-1).
- 7651 PROGRAMMABLE DC SOURCE της YOKOGAWA (Εικόνα 4-2), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία

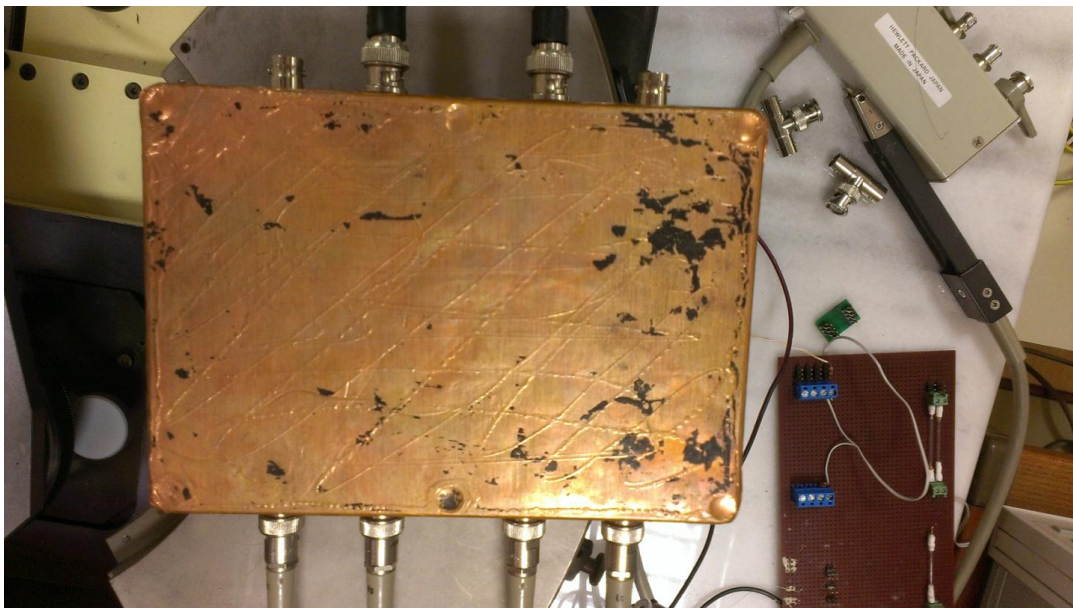
Κατά τις μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι η απόκριση του αισθητήρα ήταν ασύμμετρη, αυτό συνέβη λόγω του ότι ήταν ενεργοποιημένο το DC Bias του LCR Meter, και το οποίο δεν μπορούσε να απενεργοποιηθεί λόγω απουσίας του απαραίτητου εξοπλισμού.



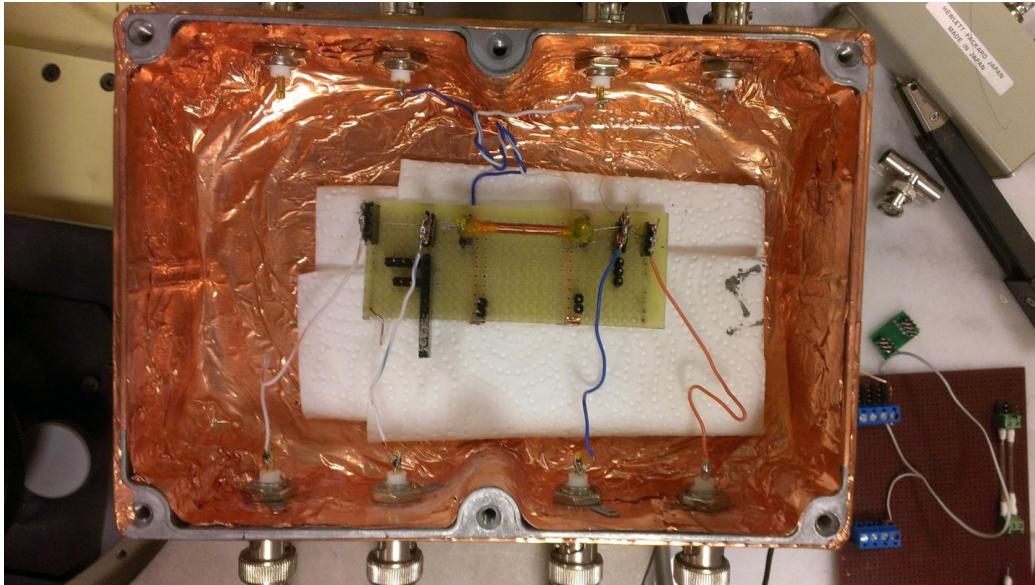
Εικόνα 4-1: Το 4275A MULTI- FREQUENCY LCR METER της Hewlett –Packard.



Εικόνα 4-2: Το 7651 PROGRAMMABLE DC SOURCE της YOKOGAWA.



Εικόνα 4-3: Κλωβός Faraday στον οποίο εσωκλείεται ο αισθητήρας GMI.



Εικόνα 4-4: Ο αισθητήρας GMI μέσα στον κλωβό.

5 Αποτελέσματα

5.1 Αποτελέσματα των μετρήσεων για τον GMI με πυρήνα CoFeSiB

Πίνακας 5-1: Μετρήσεις με πυρήνα CoFeSiB

CoFeSiB										
	100kHz		400kHz		1MHz		4MHz		10MHz	
mA	Z (100k)	Degrees(100k)	Z (400k)	Degrees (400k)	Z (1M)	Degrees(1M)	Z (4M)	Degrees(4M)	Z (4M)	Degrees(10M)
-120	10.7688	22.051	16.075	31.36	20.97	37.62	38.62	39.36	62.28	30.92
-110	10.9547	22.566	16.678	31.67	21.98	37.57	40.75	38.72	64.45	30.57
-100	11.2347	23.095	17.297	31.96	23.02	37.5	42.62	38.35	66.78	30.21
-90	11.4785	23.612	17.933	32.25	24.07	37.43	44.59	37.98	69.53	29.72
-80	11.7545	24.136	18.65	32.54	25.2	37.41	46.72	37.56	72.45	29.2
-70	12.0276	24.687	19.41	32.83	26.4	37.48	49.07	37.21	75.8	28.61
-60	12.3469	25.269	20.02	33.34	27.69	37.65	51.56	37.08	79.83	28.08
-50	12.6881	25.862	20.82	33.76	28.94	37.84	53.75	37.65	83.73	28.07
-40	13.0399	26.523	21.7	34.21	30.22	38.16	55.95	37.92	85.33	29.96
-30	13.4576	27.168	22.54	34.78	31.72	38.32	59.71	37.42	88.42	30.57
-20	13.9739	27.769	23.5	35.35	33.31	38.38	61.6	38.45	91.01	31.54
-10	14.6412	28.641	24.7	36.08	35.78	38.52	63.25	39.97	94.45	32.12
-10	13.863	27.96	23.2	36.54	39.84	36.6	55.55	41.91	83.86	34.16
-9	13.963	28.05	23.23	36.66	39.14	37.04	55.7	41.99	84.44	34.16
-8	14.062	28.15	23.07	36.75	38.94	37.32	55.85	42.14	84.99	34.17
-7	14.172	28.27	23.17	36.9	38.6	37.56	56.14	42.19	85.63	34.14
-6	14.295	28.43	23.19	37.03	38.52	37.78	56.65	42.23	86.41	34.07
-5	14.451	28.57	23.3	37.12	38.445	38.11	57.36	42.17	87.36	33.9
-4	14.633	28.69	23.55	37.22	38.4075	38.275	58.16	42.14	88.49	33.72

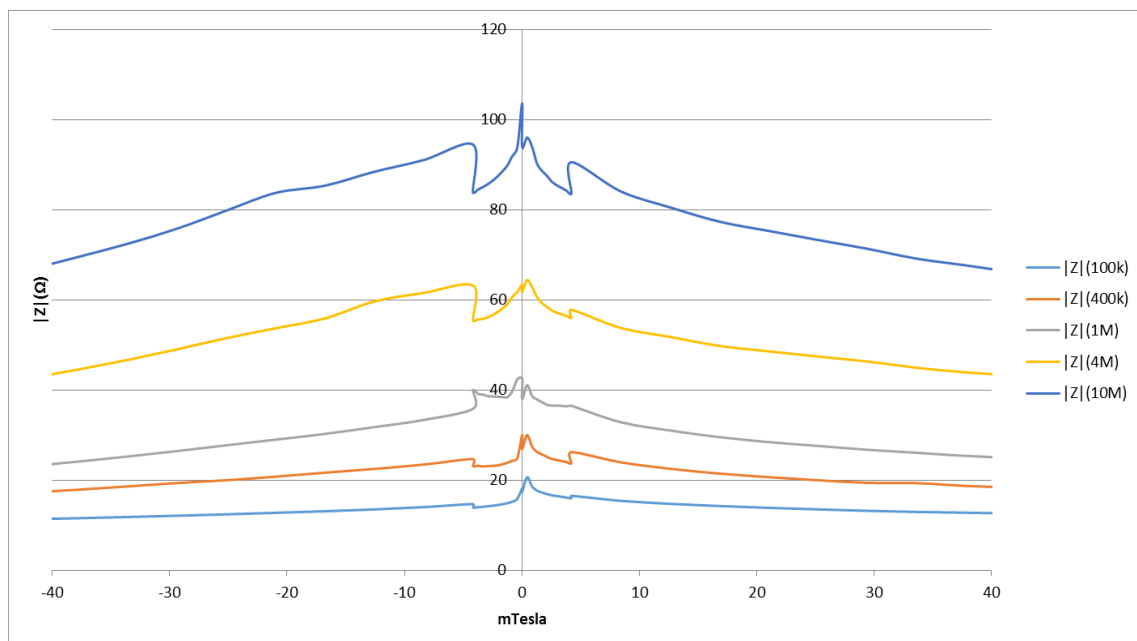
Συνέχεια Πίνακα 5-1

-3	14.855	28.84	23.9	37.35	38.37	38.44	59.13	42.11	89.82	33.52
-2	15.2	28.92	24.33	37.44	39.7	38.23	60.71	41.87	91.89	33
-1	15.857	28.58	24.89	36.52	42.3	36.37	61.8	41.64	93.7	32.32
0	18.217	27.116	30.01	32.8	42.5	35.65	63.4	40.91	103.61	29.59
0	17.368	26.43	26.95	32.89	37.91	36.33	61.8	40.99	93.92	31.38
1	20.72	27.38	30.04	30.21	41.05	33.05	64.44	38.6	96.01	28.13
2	18.65	27.67	27.5	33.07	38.65	37.8	62.9	39.77	93.99	29.21
3	17.72	27.18	26.3	33.93	37.87	38.45	60.7	40.29	90.29	30.35
4	17.28	26.99	25.77	34.15	37.28	38.65	59.35	40.34	88.63	30.64
5	16.91	26.85	25.22	34.41	36.7	38.84	58.53	40.46	87.55	30.81
6	16.66	26.57	24.75	34.28	36.49	38.75	57.71	40.57	86.23	31.01
7	16.48	26.44	24.52	34.24	36.51	38.61	57.22	40.5	85.41	31.02
8	16.31	26.36	24.3	34.28	36.44	38.5	56.84	40.42	84.82	30.98
9	16.14	26.23	24.05	34.28	36.35	38.4	56.48	40.36	84.21	30.99
10	15.987	26.11	23.81	34.31	36.5	38.25	56.06	40.35	83.6	30.98
10	16.504	26.699	26.25	33.9	36.48	38.3	57.85	39.9	90.52	29.83
20	15.4037	25.322	24.01	33.31	32.82	38.39	53.81	40.23	84.06	30.13
30	14.7208	24.514	22.57	32.99	30.97	38.41	51.81	39.98	80.5	29.9
40	14.2169	23.763	21.5	32.45	29.5	38.15	49.82	39.82	77.34	29.76
50	13.8057	23.296	20.71	32.12	28.39	37.85	48.61	39.32	75.28	29.25
60	13.4657	22.889	20.02	31.88	27.54	37.5	47.45	38.85	73.26	28.81
70	13.1347	22.451	19.44	31.48	26.69	36.95	46.35	38.34	71.32	28.38
80	12.891	21.942	19.37	30.75	26.02	36.48	44.95	38.05	69.12	28.17
90	12.7101	21.588	18.76	30.35	25.32	36.01	43.92	37.42	67.63	27.7
100	12.529	21.276	18.37	29.95	24.85	35.58	43.21	37.01	66.06	27.3
110	12.3524	21.045	18.06	29.62	24.44	35.15	42.42	36.7	64.76	26.82
120	12.2452	20.88	17.75	29.38	24.09	34.87	41.53	36.69	63.45	26.77

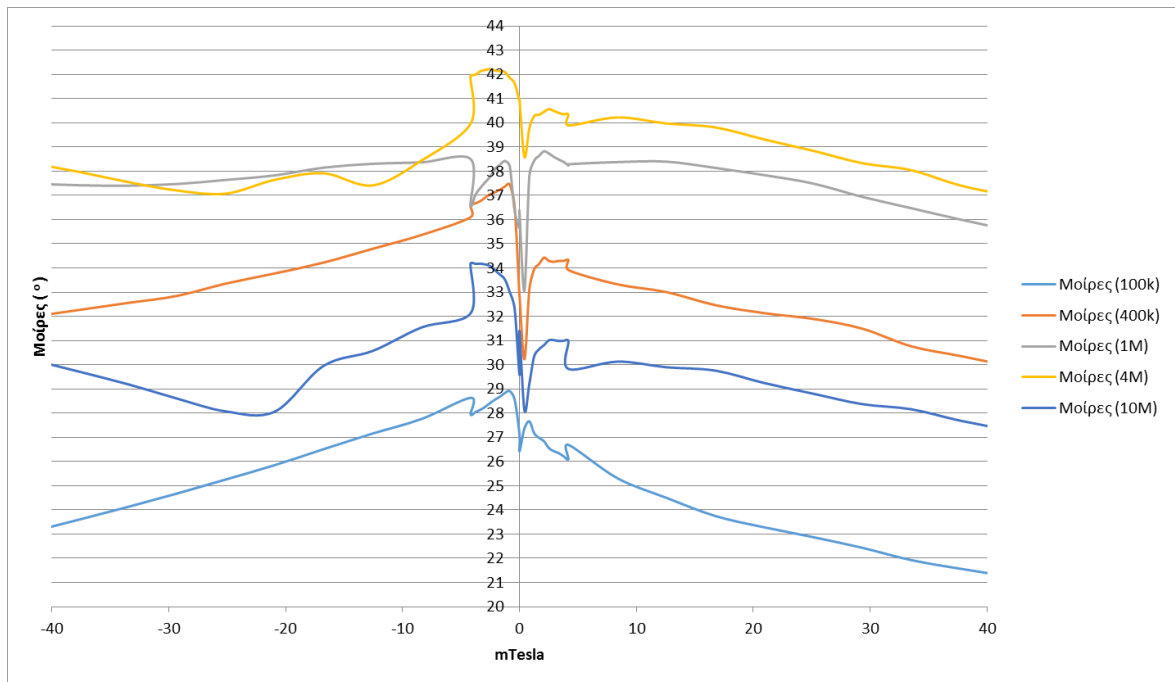
Το διάγραμμα 1, δείχνει την μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με μαγνητικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι το από τα θετικά στα αρνητικά εμφανίζεται μια ασυμμετρία κατά τον κατακόρυφο άξονα. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι η παρουσία του συνεχούς πεδίου της γης το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ολίσθησης κατά τον άξονα του ρεύματος προς τα θετικά. Ο δεύτερος λόγος αλλοίωσης της συμμετρίας ως προς τον κατακόρυφο άξονα είναι, η παρουσία συνεχούς ρεύματος μέσα από το σύρμα, κάτι το οποίο οδηγεί στη δημιουργία ανισοροπίας στο υλικό. Αριστερά και δεξιά της τιμής μηδέν με εξαίρεση την περιοχή τιμών από -10 έως και +10mA η καμπύλη είναι παραβολικού σχήματος. Η ανισοτροπίας αυτή είναι εμφανέστερη στη φάση της αντίστασης του υλικού του σύρματος.

Αυτό γίνεται εμφανέστερο στο δεύτερο διάγραμμα στο οποίο ουσιαστικά βλέπουμε τη φάση του άμορφου σύρματος συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου. Η απόκριση της φάσης της αντίστασης του αισθητήρα μεταβάλλεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με μέτρο της αντίστασης γύρω από την περιοχή του μηδενός. Στην αρνητική περιοχή παρατηρείται μια παραβολική καμπύλη, η οποία έρχεται σε αντίθεση με τις θετικές τιμές όπου εμφανίζεται μια υπερβολική καμπύλη.

Σε περίπτωση μηδενισμού του εξωτερικού πεδίου, παρατηρούμε ότι το μέτρο της αντίστασης του σύρματος γίνεται μέγιστο ενώ η φάση παρουσιάζει ισχυρό τοπικό ελάχιστο.



Εικόνα 5-1: Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla



Εικόνα 5-2: Διάγραμμα μεταβολής της γωνίας αντίστασης του πηνίου σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.

5.2 Αποτελέσματα των μετρήσεων για τον GMI με πυρήνα CoSiB

Πίνακας 5-2: Μετρήσεις με πυρήνα CoSiB

CoSiB										
	100kHz		400kHz		1MHz		4MHz		10MHz	
mA	Z (100k)	Degrees(100k)	Z (400k)	Degrees(400k)	Z (1M)	Degrees(1M)	Z (4M)	Degrees(4M)	Z (10M)	Degrees(10M)
-120	7.178	3.67	7.294	8.16	8.028	14.61	11.547	30.02	17.482	38.2
-110	7.181	3.69	7.299	8.26	8.044	14.79	11.632	30.11	17.627	38.14
-100	7.187	3.73	7.308	8.37	8.068	14.98	11.722	30.3	17.751	37.92
-90	7.193	3.8	7.318	8.48	8.091	15.19	11.819	30.45	17.872	37.5
-80	7.198	3.85	7.329	8.61	8.121	15.41	11.921	30.5	17.98	37.82
-70	7.205	3.92	7.343	8.75	8.157	15.65	12.025	30.45	18.11	37.59
-60	7.21	3.99	7.362	8.9	8.2	15.87	12.126	30.29	18.18	37.35
-50	7.215	4.06	7.379	9.04	8.245	16.04	12.191	30	18.24	36.7
-40	7.224	4.12	7.4	9.1	8.285	16.01	12.172	29.55	18.1	36.45
-30	7.232	4.15	7.421	9.01	8.301	15.63	12.035	28.93	17.72	36.08
-20	7.264	4.16	7.452	8.71	8.293	14.92	11.785	27.95	17.23	35.42
-10	7.328	4.11	7.549	8.29	8.323	13.93	11.543	26.36	16.65	34.22
-10	7.473	4.34	7.588	8.44	8.404	14.05	11.628	26.42	16.665	34.02
-9	7.477	4.34	7.589	8.37	8.396	13.92	11.578	26.26	16.612	33.55
-8	7.478	4.32	7.595	8.32	8.391	13.8	11.533	26.21	16.511	33.48
-7	7.482	4.32	7.596	8.26	8.386	13.67	11.495	26.07	16.426	33.44
-6	7.493	4.3	7.6	8.21	8.378	13.55	11.457	25.9	16.407	33.21
-5	7.499	4.29	7.656	8.14	8.376	13.44	11.427	25.62	16.349	33.03
-4	7.505	4.28	7.663	8.1	8.373	13.33	11.393	25.47	16.291	32.87
-3	7.524	4.24	7.639	7.99	8.445	13.13	11.375	25.21	16.249	32.68

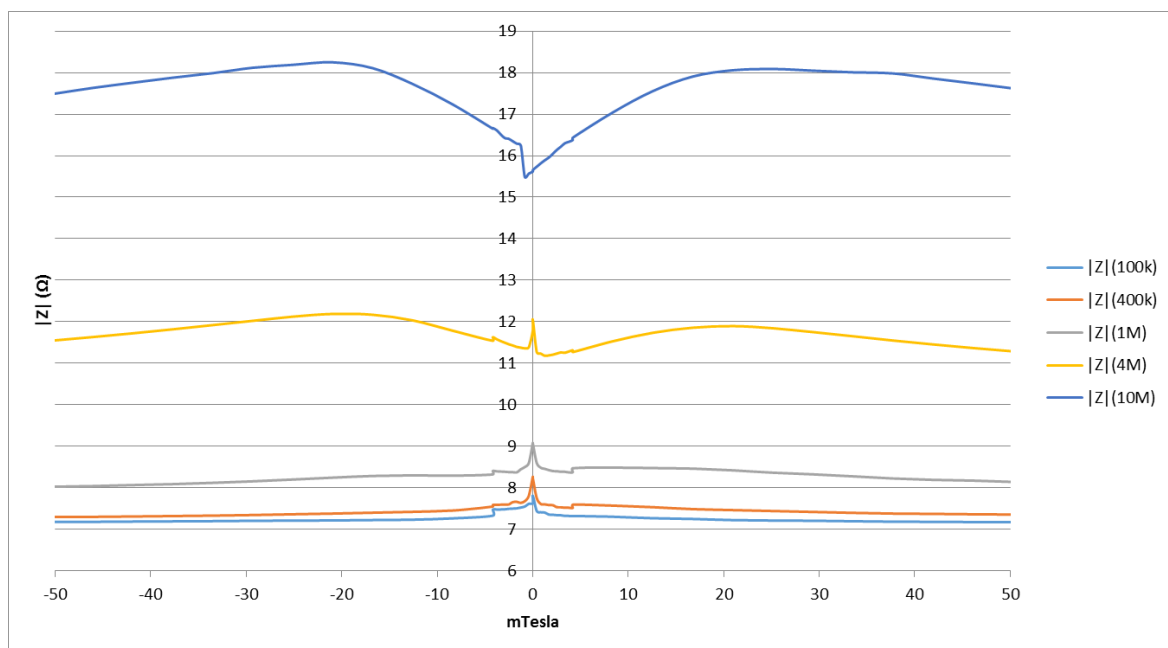
Συνέχεια Πίνακα 5-2

-2	7.548	4.22	7.679	7.93	8.498	12.97	11.359	24.89	15.493	32.83
-1	7.614	4.28	7.808	7.86	8.592	12.71	11.384	24.56	15.573	32.93
0	7.626	6.56	8.268	8.88	9.074	12.42	11.784	24.01	15.623	33.57
0	7.804	7.22	8.239	8.43	9.061	12.35	12.045	22.95	15.657	33.05
1	7.438	4.29	7.747	7.95	8.589	12.9	11.263	24.89	15.741	33.18
2	7.411	4.19	7.611	7.98	8.482	13.1	11.23	25.16	15.821	33.34
3	7.404	4.21	7.603	8.02	8.456	13.21	11.178	25.48	15.893	33.53
4	7.356	4.27	7.585	8.04	8.426	13.32	11.188	25.69	15.958	33.7
5	7.351	4.27	7.582	8.08	8.403	13.39	11.205	25.88	16.046	33.82
6	7.342	4.32	7.534	8.18	8.399	13.48	11.232	26.01	16.141	33.93
7	7.339	4.36	7.531	8.22	8.386	13.61	11.26	26.14	16.218	34.07
8	7.325	4.43	7.522	8.26	8.386	13.7	11.251	26.35	16.301	34.13
9	7.322	4.43	7.52	8.3	8.371	13.84	11.282	26.48	16.335	34.331
10	7.319	4.44	7.517	8.34	8.375	13.92	11.311	26.62	16.38	34.77
10	7.321	4.29	7.594	8.41	8.469	14.02	11.269	27.21	16.434	34.58
20	7.303	4.38	7.571	8.79	8.484	14.88	11.53	28.35	17.04	35.92
30	7.267	4.49	7.533	9.1	8.474	15.59	11.735	29.27	17.55	36.51
40	7.25	4.45	7.486	9.29	8.46	15.97	11.859	29.85	17.9	36.85
50	7.222	4.36	7.462	9.24	8.419	16.05	11.897	30.33	18.05	37.3
60	7.212	4.3	7.44	9.13	8.364	15.93	11.845	30.65	18.08	37.76
70	7.207	4.26	7.418	8.97	8.324	15.73	11.752	30.86	18.04	37.9
80	7.195	4.18	7.395	8.82	8.276	15.51	11.652	30.95	18	37.72
90	7.185	4.11	7.379	8.69	8.226	15.3	11.548	30.99	17.974	37.41
100	7.181	4.06	7.37	8.58	8.193	15.12	11.454	30.99	17.852	37.61
110	7.176	4	7.361	8.47	8.174	14.93	11.366	30.71	17.735	37.98
120	7.171	3.96	7.355	8.38	8.144	14.72	11.286	30.62	17.615	38.05

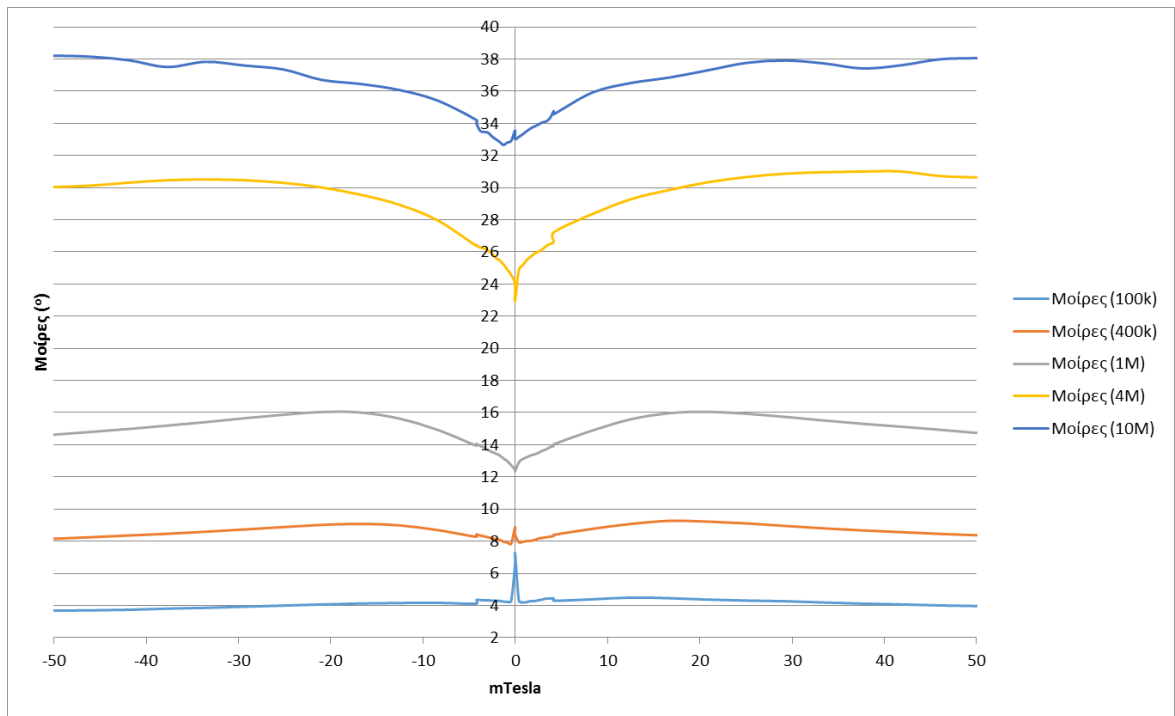
Παρατηρώντας το διάγραμμα 3 εμφανίζεται μία συμμετρική συμπεριφορά του αισθητήρα ως προς την τιμή μηδέν και για όλο το εύρος της μέτρησης. Στις χαμηλές συχνότητες παρατηρείται ότι η καμπύλη είναι υπερβολική και η οποία καταλήγει σε μία μέγιστη τιμή. Ανεβαίνοντας σε συχνότητα η μεταβολή του μέτρου της αντίστασης παρουσιάζει αλλαγή καμπυλότητας, όπου στα 10MHz καταλήγει σε παραβολική συμπεριφοράς της καμπύλης εκατέρωθεν του μηδενός, όπου και εμφανίζει ολικό ελάχιστο.

Το ίδιο γίνεται εμφανές και στο διάγραμμα 4 μόνο που επειδή όπως προείπαμε τα διαγράμματα τις φάσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία η παραβολική συμπεριφορά εμφανίζεται από τις χαμηλές συχνότητες. Παρατηρούμε ότι στις συχνότητες των kHz εμφανίζεται και πάλι μία κορυφή η οποία βαίνει μειούμενη με την αύξηση της συχνότητας και αντιστρέφεται πλήρως από την τιμή του 1MHz και πάνω όπου και πάλι εμφανίζει ολικό ελάχιστο.

Οι ασυμμετρίες εκατέρωθεν του μηδενός οφείλονται στους ίδιους ακριβώς λόγους όπως περιεγράφηκαν στα διαγράμματα 1 και 2.



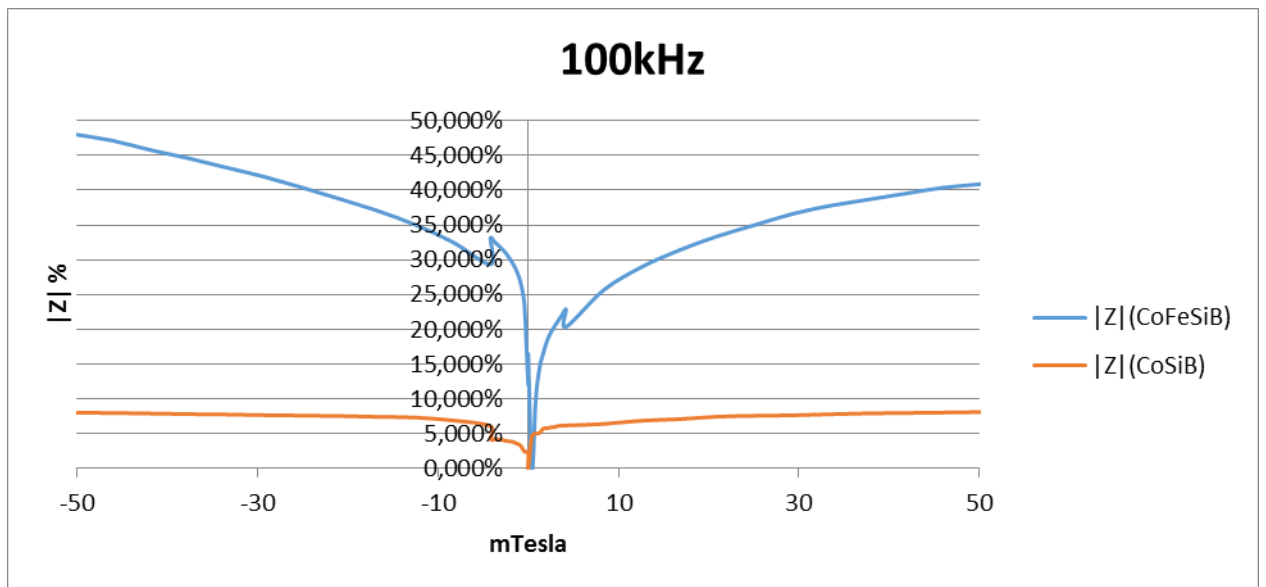
Εικόνα 5-1: Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.



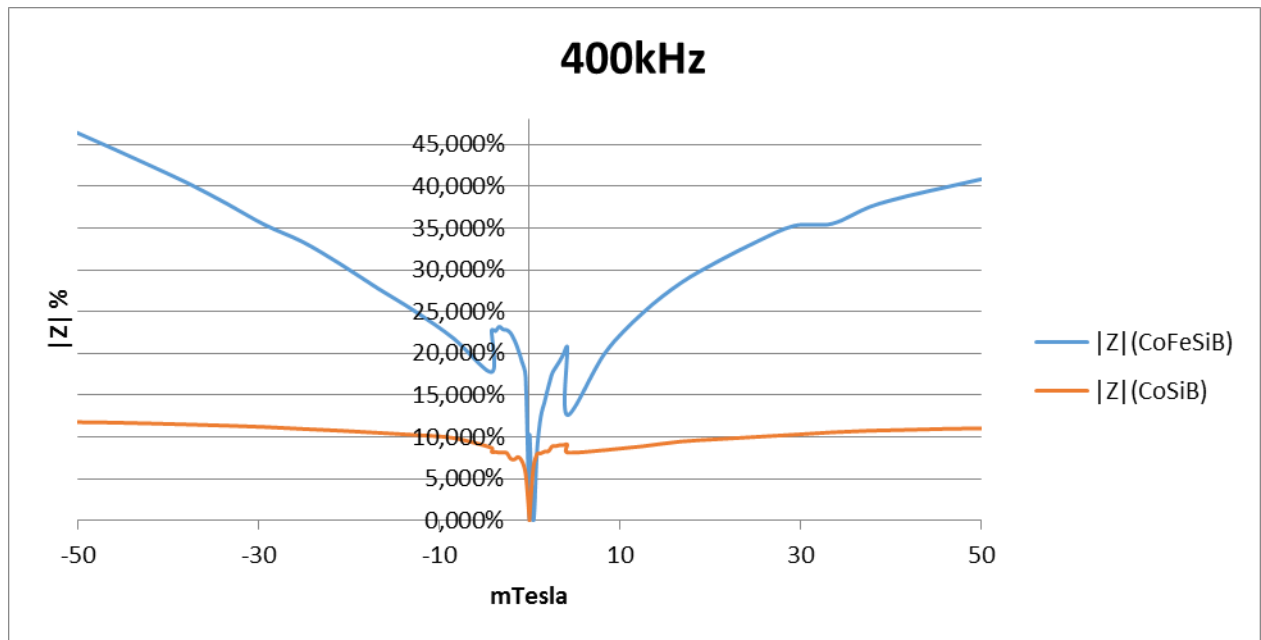
Εικόνα 5-2: Διάγραμμα μεταβολής της γωνίας αντίστασης του πηνίου σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο σε mTesla.

5.3 Συγκριτικά διαγράμματα

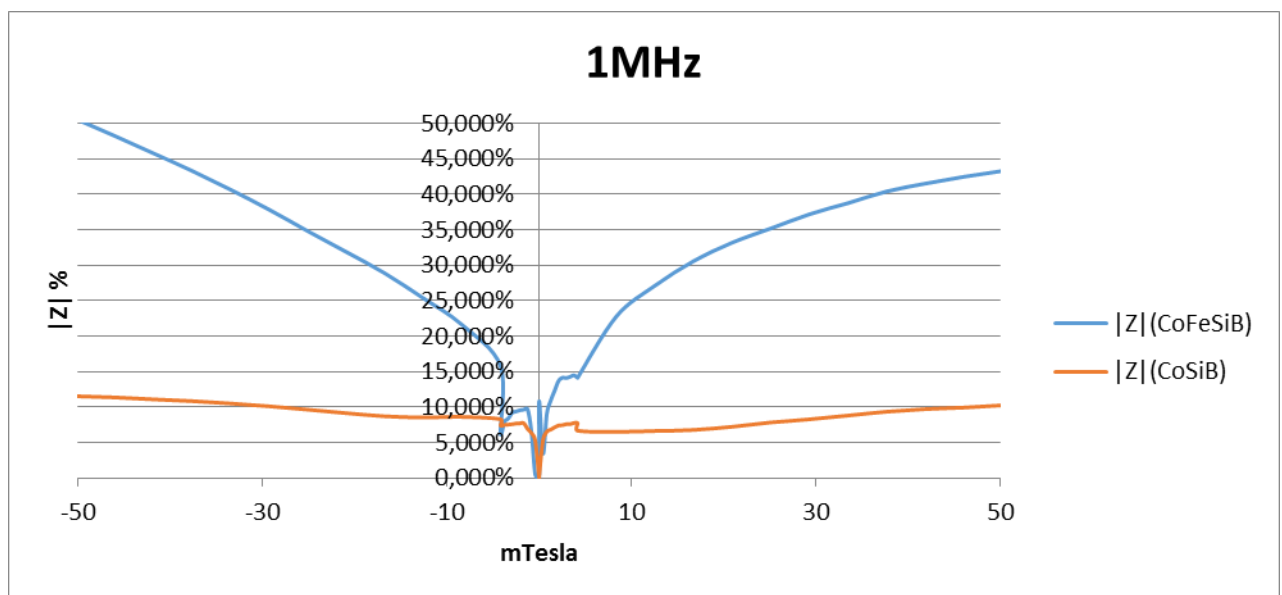
Παρακάτω δημιουργήθηκαν τα συγκριτικά διαγράμματα του CoFeSiB με το CoSiB σχετικά με την εμπέδηση.



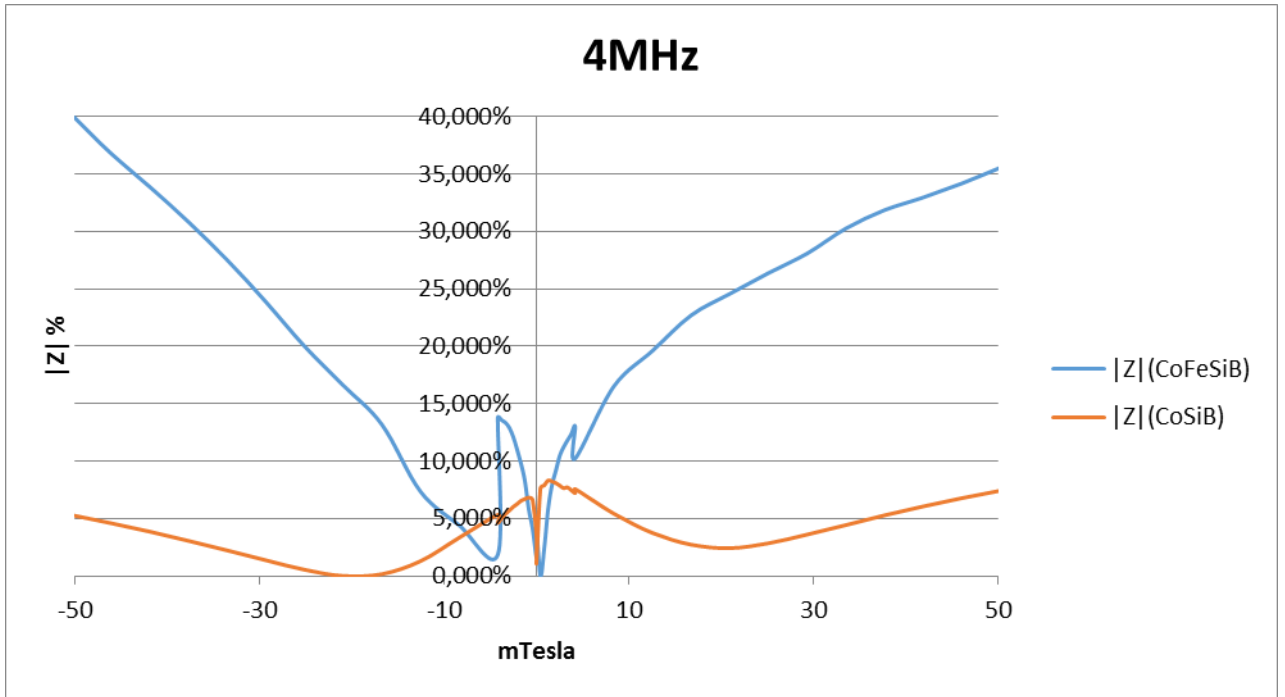
Εικόνα 5-3: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 100kHz



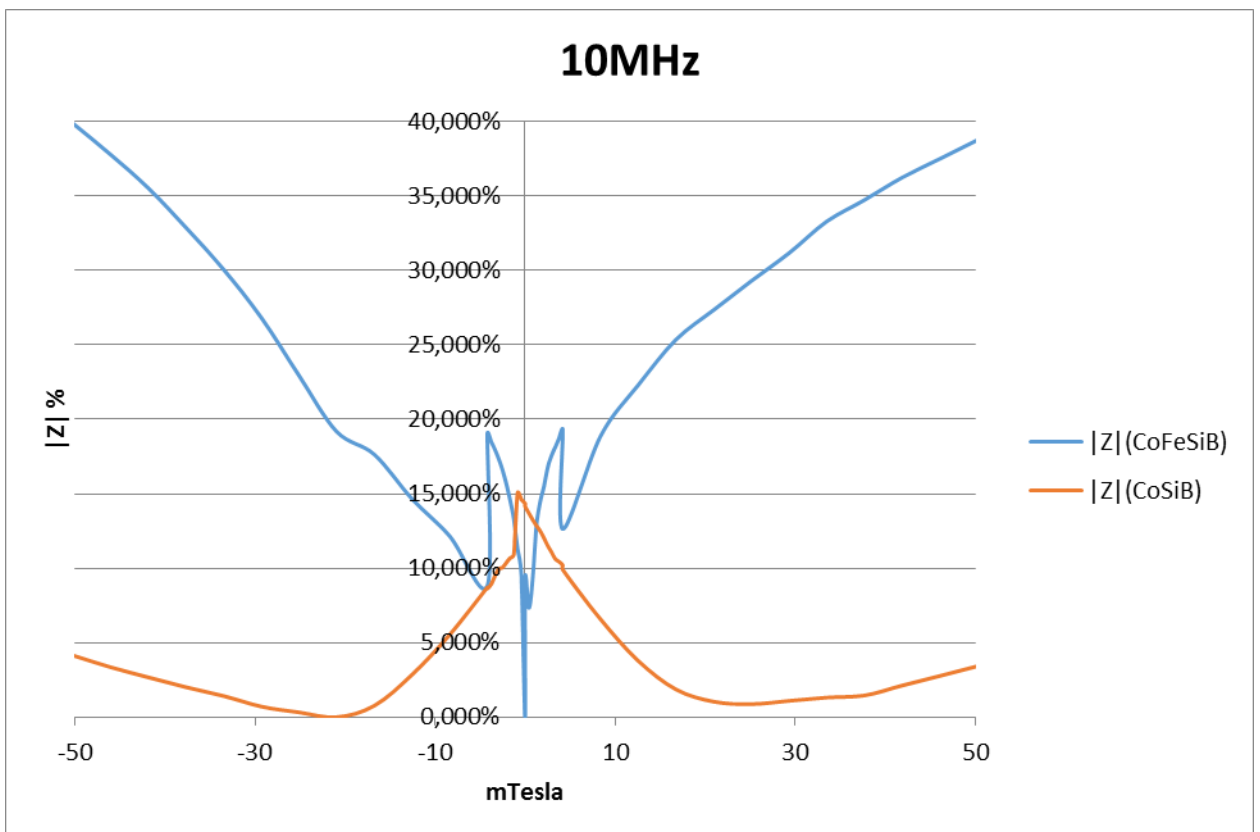
Εικόνα 5-4: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 400kHz



Εικόνα 5-5: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πηνίο στα 1MHz



Εικόνα 5-6: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο στα 4MHz



Εικόνα 5-7: Συγκριτικό διάγραμμα του αισθητήρα με πυρήνες CoFeSiB και CoSiB σχετικά με την επί της εκατό μεταβολή του μέτρου της αντίστασης σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο στα 10MHz

Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι στις χαμηλές συχνότητες και οι δύο πυρήνες συμπεριφέρονται πανομοιότυπα. Παρ' όλα αυτά το CoFeSiB παρουσιάζει πιο απότομες και μεγάλες μεταβολές, και οφείλεται στη μεγαλύτερη ευαισθησία του υλικού. Επιπλέον το CoSiB παρουσιάζει αναστροφή η οποία γίνεται αρχικά αντιληπτή από την τιμή των 4MHz. Στην συχνότητα των 10 MHz παρουσιάζει πλήρη αναστροφή της καμπύλης και εμφανίζει μέγιστο στην τιμή μηδέν.

Παρατηρούμε επίσης ότι αν φέρουμε μια παράλληλη στον άξονα των x' και σε κάποια συγκεκριμένη τιμή της εμπέδησης, τα σημεία που τέμνουν την καμπύλη σε τιμές μικρότερες των -4.18 mTesla και μεγαλύτερη των 4.18 mTesla δεν αντιστοιχούν σε αντίθετες τιμές όπως έπρεπε να συμβαίνει. Αυτό οφείλεται στα άμορφα σύρματα που χρησιμοποιήθηκαν ως πυρήνες.

Ποιο συγκεκριμένα τα άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα CoSiB) και με μαγνητοσυστολή κοντά στο μηδέν (π.χ. σύρματα CoFeSiB), η ψύξη του υλικού με τάση προκαλεί μια κυκλική ανισοτροπία στην επιφάνεια του σύρματος ενώ στο εσωτερικό του μια ανισοτροπία που είναι κάθετη στον άξονα του σύρματος. Η σύζευξη μεταξύ της θλιπτικές τάσεις και της αρνητική μαγνητοσυστολή προκαλεί τον προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών στην περιφερειακή διεύθυνση.

Επιπλέον το dc-bias το οποίο διαπιστώθηκε ότι ήταν ανοιχτό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων προκαλεί μεταβολή στον άξονα ανισοτροπίας του άμορφου υλικού που χρησιμοποιείται ως πυρήνας του αισθητήρα.

Βιβλιογραφία

Κεφάλαια 1-3

- [1] P. Ripka, Magnetic Sensors and Magnetometers, Boston, London: ARTECH HOUSE, INC, 2001.
- [2] Χ. Ευάγγελος, Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα "Ηλεκτρονικά Υλικά", Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [3] S. O. Kasar, Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, 2 επιμ., Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2004.
- [4] P. Ripka, «Review of fluxgate sensor,» Sensors and Actuators, p. 13, 25 February 1992.
- [5] E. L. Nagaev, «Lanthanum manganites and other giant-magnetoresistance magnetic conductors,» Soviet Physics Uspekhi, August 1996.
- [6] H.-X. P. Manh- Huong Phan, «Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications,» Science Direct, p. 97, 15 2007.
- [7] Ν. Δ. Παπαδόπουλος, Ανάπτυξη μαλακών μαγνητικών Υμενίων με εεγχόμενη ανισοτροπία, Αθήνα: ΕΜΠ, 2009.

Κεφάλαια 4-5

- [1] DS Vlachos, DK Fragoulis, JN Avaritsiotis An adaptive neural network topology for degradation compensation of thin film tin oxide gas sensors, Sensors and Actuators B: Chemical, 45, 3, p. 223–228, 1997
- [2] CA Papadopoulos, DS Vlachos, Effect of surface catalysts on the long-term performance of reactively sputtered tin and indium oxide gas sensors, Sensors and Actuators B: Chemical 42, 2, p. 95–101, 1997
- [3] I. Giouroudi, A. Ktena and E. Hristoforou, Microstructural characterization of cylindrical Fe_{1-x}Ni_x thin films, J. Opt. Adv. Mat., 6, p. 45-50, 2004

- [4] E. Hristoforou, "Magnetostrictive Delay Lines: Engineering Theory and Sensing Applications", *Meas. Sci. & Technol.*, 14, p. R15-R47, 2003
- [5] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, A New Magnetic Field Sensor Based on Magnetostrictive Delay Lines, *IEEE Trans. Instr. & Meas.*, 46, p. 632-635, 1997
- [6] E. Hristoforou and D. Niarchos, Mechanical Sensors Based on Re-Entrant Flux Reversal, *IEEE Trans. Mag.*, 28, p. 2190-2192, 1992
- [7] B. Dufay, S. Saez, C. Cordier, C. Dolabdjian, C. Dubuc, E. Hristoforou, S. Ubizskii, 2D hybrid yttrium iron garnet magnetic sensor noise characterization, *IEEE Sensors Journal* (12), art. 5873114, pp. 3211-3215, 2011
- [8] P. Dimitropoulos, J.N. Avaritsiotis, E. Hristoforou, Boosting the Performance of Miniature Fluxgates With Novel Signal Extraction Techniques, *Sensors and Actuators A*, 90, p. 56-72, 2001
- [9] C. Petridis, I Petrou, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Determining appropriate magnetic core properties for a new type of flux-gate like sensor, *Sensor Letters*, 5, p. 98-101, 2007
- [10] P. D. Dimitropoulos, J. N. Avaritsiotis and E. Hristoforou, A novel micro-Fluxgate sensor based on the AMR effect of ferromagnetic film-resistors, *Sensors and Actuators A*, 107, p. 238-247, 2003
- [11] E. Hristoforou, H. Hauser and PD Dimitropoulos, On a New Principle of Smart Multi-Sensor Based on Magnetic Effects, *IEEE Sensors*, 6, p. 372-379, 2006
- [12] E. Hristoforou, New monolithic three dimensional field sensors with high sensitivity, *J. Opt.Adv. Mat.*, 8, p. 1691-1697, 2006
- [13] C. Petridis, A. Ktena, E. Laskaris, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Ni-Fe thin film coated Cu wires for field sensing applications, *Sensor Letters*, 5, p. 93-97, 2007
- [14] C. Petridis, PD Dimitropoulos, E. Hristoforou, New Magnetic Field Sensor Based on Combined Flux-Gate/Hall-Effect Arrangement, *IEEE Sensors Journal*, 9, p. 128-134, 2009

- [15] J. Petrou, P. D. Dimitropoulos and E. Hristoforou, New 2-D Fluxgate Devices Based on the Phase Modulation of Magnetization Rotation in AMR Films, *Sensors and Actuators A*, 129, p.107-111, 2006
- [16] I Petrou, P Skafidas, E Hristoforou, Electronic toll and road traffic monitoring system using 3-D field AMR sensors, *Sensor Letters*, 11, p. 91-95, 20013
- [17] P.D. Dimitropoulos, G.I. Stamoulis, E. Hristoforou, A 3-d hybrid Jiles-Atherton/Stoner- Wohlfarth magnetic hysteresis model for inductive sensors and actuators, *IEEE Sensors Journal*, 6, p. 721-736, 2006
- [18] I. Sasada and H. Kashima Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental mode, *Japan Journal of the Magnetics Society of Japan* Vol. 33 No. 2, p. 43-45, 2009

Παράρτημα Α

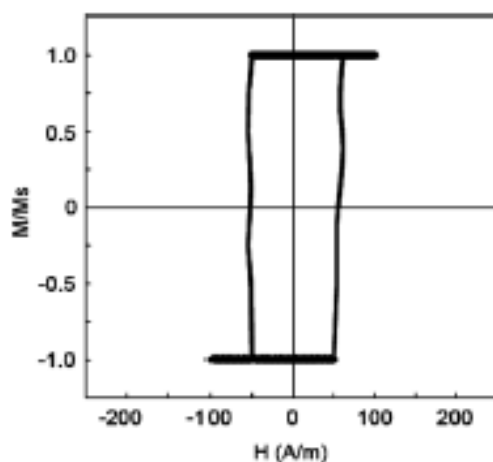
Ιδιότητες των GMI Μαγνητικών Συρμάτων

Βρόχοι Υστέρησης

Οι βρόχοι υστέρησης προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τις μαγνητικές ιδιότητες των μαγνητικών υλικών. Λόγω της διαφοράς σύζευξης μεταξύ του εσωτερικού εφελκυσμού και της μαγνητοσυστολής μπορούν να παρατηρηθούν διαφορετικής μορφής βρόχοι υστέρησης για υλικά με θετική, αρνητική ή κοντά στο μηδέν αλλά αρνητική μαγνητοσυστολή.

Άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα

Στα άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου παρουσιάζουν έναν ορθογώνιο βρόχο υστέρησης στον οποίο παρουσιάζονται μεγάλα αξονικά άλματα Barkhausen λόγω της εσωτερικής αξονικής δομής των μαγνητικών περιοχών. Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα, τότε ο βρόχος υστέρησης γίνεται μικρότερος και τα άλματα Barkhausen μειώνονται καθώς όπως αναφέραμε παραπάνω μικραίνει η περιοχή της εσωτερικής αξονικής μαγνητικής περιοχής του σύρματος (εικόνα 1).



Εικόνα 1: Ο Βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου

Τα άλματα Barkhausen μπορούν να παρατηρηθούν και σε άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου με πολύ μικρό μήκος (περίπου 1–2mm) καθώς ο μικρός λόγος της διαμέτρου προς το μήκος του σύρματος έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο παράγοντας απομαγνήτισης.

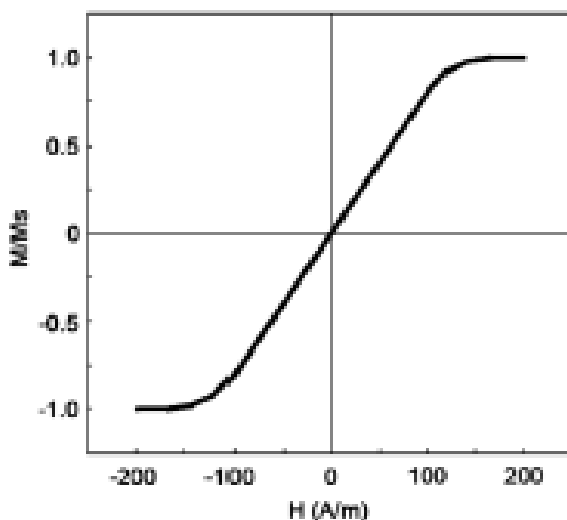
Έχει βρεθεί επίσης ότι άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου που βασίζονται στο Fe γίνονται νανοκρύσταλλοι υπό θερμική κατεργασία με αποτέλεσμα ο βρόχος υστέρησης από ορθογώνιος να γίνει ομαλή χωρίς άλματα Barkhausen.

Άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου

Στα άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου (π.χ. σύρματα Co–Si–B) λόγω της μηχανικής τάσης ο εύκολος άξονας είναι κάθετος στον άξονα του σύρματος με αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροπές να προσανατολιστούν σε κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του σύρματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο ο βρόχος υστέρησης να είναι μικρός. Στα σύρματα αυτά δεν εμφανίζονται άλματα Barkhausen εξαιτίας της απουσίας εσωτερικής αξονικής δομής των μαγνητικών περιοχών.

Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα υάλου αυξάνεται η αξονική ανισοτροπία (εικόνα 21) και εμφανίζεται αξονική δομή στις εσωτερικές μαγνητικές περιοχές. Με την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης (~50MPa) στο σύρμα θα εμφανιστούν άλματα Barkhausen καθώς θα ξαναεμφανιστεί ακτινική δομή στις εσωτερικές μαγνητικές περιοχές .

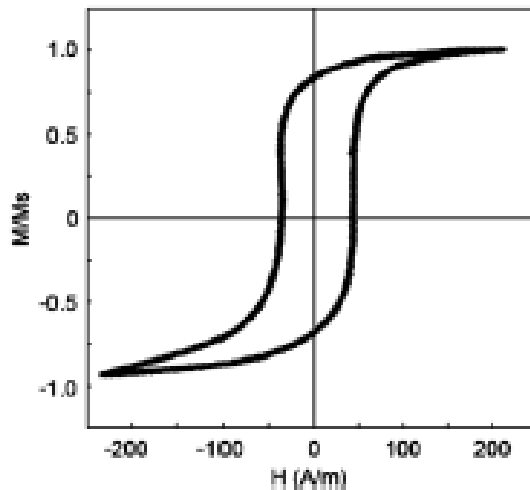
Το διαφορετικό μέγεθος της τάσης μεταξύ των συρμάτων με και χωρίς περίβλημα υάλου με αρνητική μαγνητοσυστολή ($\lambda < 0$), το οποίο οφείλεται στη διαφορετική δομή των εσωτερικών μαγνητικών περιοχών, οδηγεί σε διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αυτών.



Εικόνα 2 : Ο βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου

Άμορφα σύρματα με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή
Στα άμορφα σύρματα με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή (π.χ. σύρματα Co–Fe–Si–B) λόγω της διακύμανσης μαγνητοσυστολικών και μαγνητοελεστικών ενεργειών εισάγονται ανισοτροπίες με αποτέλεσμα ο βρόχος υστέρησης να είναι κανονικός και να μην εμφανίζονται άλματα Barkhausen.

Όταν αφαιρεθεί το περίβλημα και εφαρμοστεί εφελκυστική τάση (~30MPa) τότε εμφανίζονται άλματα Barkhausen. Η μικρότερη τιμή της εφελκυστικής τάσης στην περίπτωση των άμορφων συρμάτων με περίβλημα υάλου με αρνητική και κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή από εκείνη των άμορφων συρμάτων με αρνητική μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου αποδίδεται στη μικρή τιμή της σταθεράς της μαγνητοσυστολής τους.



Εικόνα 3: Ο βρόχος υστέρησης για άμορφα σύρματα με αρνητική ή κοντά στο μηδέν μαγνητοσυστολή με περίβλημα υάλου.

Διαπερατότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια παράμετρος που καθορίζει αν το μαγνητικό υλικό είναι μαλακό. Η τιμή της σχετίζεται με τη δομή των μαγνητικών περιοχών και εξαρτάται από τη γεωμετρία του, την κατανομή της τάσης στο υλικό καθώς και την εσωτερική κατανομή της μαγνήτισης η οποία μπορεί να εξαρτάται από τη συχνότητα. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να συσχετιστεί με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και την μηχανική τάση.

Τα άμορφα μαγνητικά σύρματα με μηδενική μαγνητοσυστολή (π.χ. Co–Fe–Si–B) έχουν τη μεγαλύτερη τιμή στη διαπερατότητα. Αυτά τα σύρματα είναι τα κατάλληλα για τη μελέτη του GMI φαινομένου.

Τα άμορφα σύρματα με θετική ή αρνητική μαγνητοσυστολή έχουν μικρή διαπερατότητα, αν και αν τους αφαιρεθεί το περίβλημα υάλου, εφόσον τους μειώνεται η εσωτερική τάση, η σχετική διαπερατότητα αυξάνεται και εν συνεχεία αν τους εφαρμοστεί εφελκυστική τάση αυξάνεται περισσότερο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορεί να ασκηθεί μεγάλη εφελκυστική τάση καθώς σε αυτή την περίπτωση η σχετική διαπερατότητα μειώνεται και δεν αυξάνεται.

Όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο κάθετο στον άξονα του σύρματος ή σε κυκλική διεύθυνση, αυξάνεται η μετατόπιση της μαγνητικής περιοχής ή ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών στην κυκλική διεύθυνση και κατ' επέκταση η κυκλική συνιστώσα της διαπερατότητας. Όσο το μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο του πεδίου ανισοτροπίας τη σχετική διαπερατότητα αυξάνεται και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν είναι κοντά στο πεδίο ανισοτροπίας, ενώ μειώνεται στην αντίθετη περίπτωση.

Διαδικασία μαγνήτισης

Στα άμορφα σύρματα αρνητική (π.χ. Co–Si–B) ή μηδενικής μαγνητοσυστολής (π.χ. Co–Fe–Si–B) όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο κάθετο στον άξονα του σύρματος η μετατόπιση των μαγνητικών περιοχών και ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών εξαρτώνται από το μέγεθος του πεδίου, και αλλάζουν την κυκλική συνιστώσα της μαγνήτισης. Αν το μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί κατά τον άξονα του σύρματος η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών εμποδίζεται γιατί εφαρμόζεται στο δύσκολο άξονα. Το διάμηκες μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει το βρόγχο υστέρησης από τετραγωνικό σε γραμμικό. Η αλλαγή της κυκλικής συνιστώσας της μαγνήτισης σχετίζεται με την εμπέδηση και συνεπώς το GMI είναι παρατηρήσιμο καθώς το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει τη συνιστώσα της μαγνήτισης.

Στα άμορφα σύρματα με θετική μαγνητοσυστολή (σύρματα βασιζόμενα στο Fe) εμφανίζουν ένα μικρό GMI λόγω της ακτινικής δομής της εξωτερικής επιφάνειας του σύρματος, καθώς δεν είναι η κατάλληλη για αν μπορούν αν μετακινηθούν οι μαγνητικές περιοχές στην εγκάρσια διεύθυνση. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα οι μαγνητικές περιοχές που βρίσκονται στα δύο άκρα διογκώνονται προς το εσωτερικό του σύρματος. Στο πεδίο ανισοτροπίας η μία μαγνητική περιοχή κινείται προς την άλλη και αυτό αλλάζει τη μαγνήτιση.

