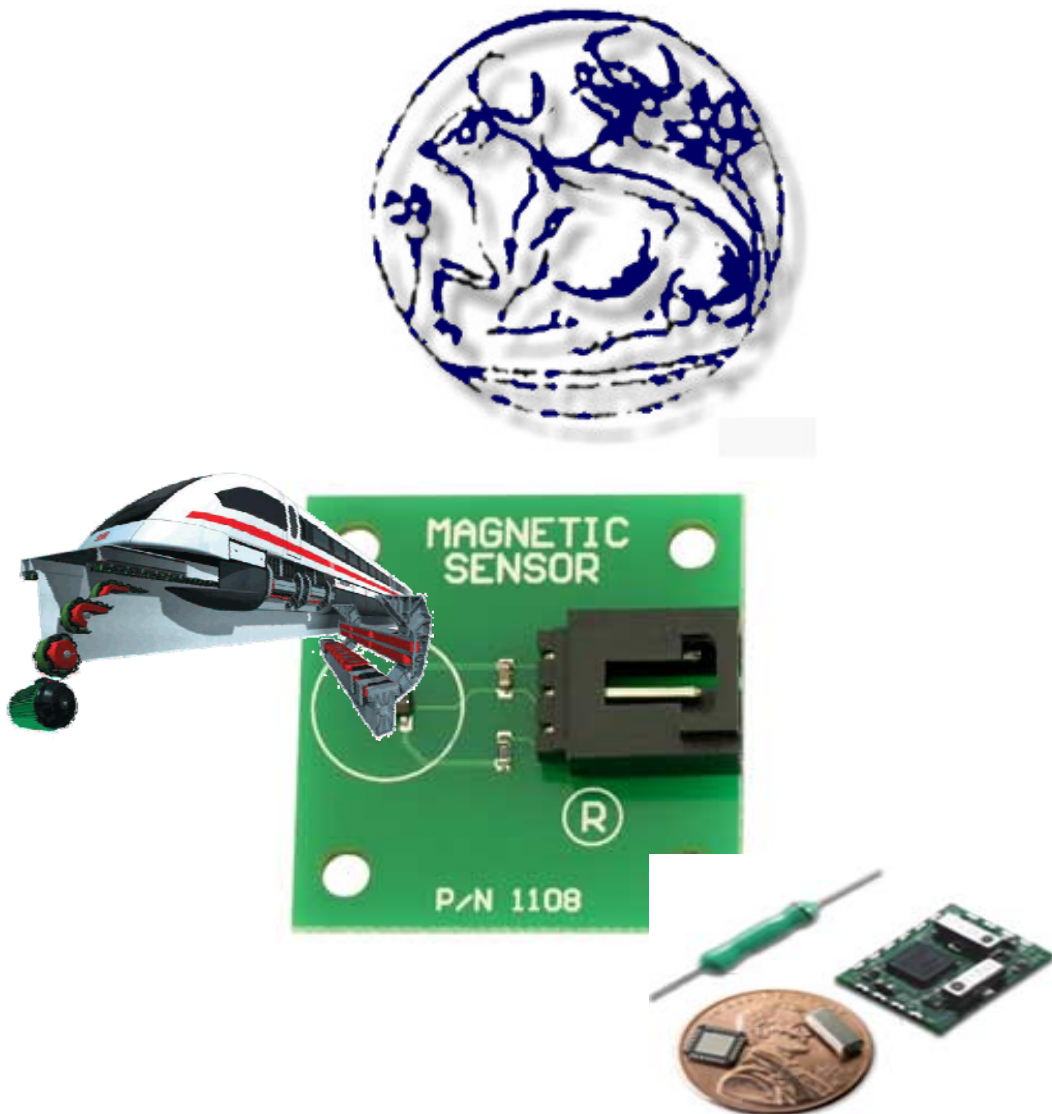


# ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΣΧΟΛΗ ΣΤΕΦ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν. ΜΑΥΡΟΚΟΥΚΟΥΛΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΚΟΡΝΗΛΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα εξαρτήματα που επιτρέπουν να «δει» κάποιος ένα μαγνητικό πεδίο ονομάζομαι Μαγνητικοί αισθητήρες.. Οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν άπειρες εφαρμογές. Γενικά μετρούν μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται σε διάφορα σημεία συστημάτων με τελικό σκοπό την καλή λειτουργία των συστημάτων. Οι υπολογιστές έχουν απεριόριστη μνήμη χάρη στη χρήση μαγνητικών αισθητήρων στους μαγνητικούς σκληρούς δίσκους και στις δισκέτες εγγραφής. Τα αεροπλάνα πετούν ασφαλέστερα εξαιτίας της υψηλής σταθερότητας των διακοπών χωρίς επαφή οι οποίοι έχουν μαγνητικούς αισθητήρες .Στην εργασία αυτή περιγράφονται οι 11 πιο διαδεδομένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν οι μαγνητικοί αισθητήρες καθώς και οι εφαρμογές αυτών.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ..... 6

#### ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1	Ο μαγνητισμός στην αρχαιότητα .....	6
1.2	Ο μαγνητισμός ως τον 19 <sup>ο</sup> αιώνα.....	9
1.3	Ο μαγνητισμός τον 20ο αιώνα .....	15
1.4	Κύριες χρήσεις μόνιμων μαγνητών σήμερα .....	17

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ..... 21

#### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

2.1	Γενικά.....	21
2.2	Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων .....	22
2.3	Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	28
2.4	Πεδία Εφαρμογών Αισθητήρων .....	30

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... 32

#### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

3.1	Εισαγωγή .....	32
3.2	Μεγέθη και μονάδες .....	32
3.3	Μαγνητικό πεδίο .....	34
3.4	Μαγνητική επαγωγή .....	35
3.5	Μαγνητική επαγωγή και ένταση μαγνητικού πεδίου σε υλικό .....	38
3.6	Μαγνητική ροπή.....	39
3.7	Μαγνήτιση.....	42
3.8	Μαγνητική επιδεκτικότητα .....	43
3.9	Σημαντικότερες Ιδιότητες των Σιδηρομαγνητών .....	44

3.10 Κατάταξη των μαγνητικών υλικών .....	50
---	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ..... 51**

### **ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

4.1 Εισαγωγή .....	51
4.2 Search-Coil Μαγνητόμετρο .....	53
4.3 Flux- Gate Μαγνητόμετρο .....	55
4.4 Optically Pumped Μαγνητόμετρο.....	58
4.5 Nuclear precession Μαγνητόμετρο.....	60
4.6 SQUID μαγνητόμετρο .....	61
4.7 Hall Effect Αισθητήρας.....	63
4.8 Magnetoresistive Μαγνητόμετρο.....	65
4.9 Μαγνητοδίοδοι.....	68
4.10 Μαγνητοτρανζίστορ.....	70
4.11 Fiber-Optic Μαγνητόμετρο .....	71
4.12 Magneto-Optical Αισθητήρας .....	72

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ..... 75**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

5.1 Εισαγωγή .....	75
5.2 Εφαρμογές στην πλοήγηση .....	75
5.3 Εφαρμογές ανίχνευσης οχημάτων .....	77
5.4 Εφαρμογές στην ιατρική .....	85
6.5 Εφαρμογές στην γεωφυσική .....	89
5.6 Μαγνητική εγγραφή.....	98
6.7 Ανιχνευτές μετάλλων.....	112
5.8 Αισθητήρας φαινομένου Hall .....	114
5.9 Μαγνητόμετρο πρωτονίου.....	121

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 ..... 124**

### **ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΤΕΡΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΝΟΜΩΝ ΠΟΥ**

### **ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

Π1.1 Νόμος Faraday .....	124
Π1.2 Φαινόμενο ZEEMAN .....	127
Π1.3 Υπεραγωγιμότητα (SUPERCONDUCTIVITY) .....	127
Π1.4 Φαινόμενο HALL (HALL EFFECT) .....	130
Π1.5 Μαγνητοαντίσταση .....	132
Π1.6 Μαγνητο – οπτικό φαινόμενο.....	133
Π1.7 Το φαινόμενο JOSEPHSON .....	133
Π1.8 Η δύναμη Lorentz .....	135

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2..... 138**

**ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΡΘΡΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3..... 144**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

#### 1.1 Ο μαγνητισμός στην αρχαιότητα [1]

Ακόμα και σήμερα, η ημερομηνία που πιστεύεται ότι ανακαλύφθηκαν αρχικά οι μαγνήτες και η περιοχή στην οποία έγινε αυτή η ανακάλυψη, δεν είναι απολύτως σαφής. Δύο πολιτισμοί διεκδικούν την πατρότητα : ο **ελληνικός** και ο **κινέζικος**.

Όσον αφορά τον δυτικό πολιτισμό, ο μαγνητισμός, καθώς και η προέλευση της λέξης, μας επιστρέφουν στην ελληνική πόλη της Μαγνησίας, η οποία είναι κοντά στα σύνορα της Μακεδονίας Αυτό το διατύπωσε ο **Lucretius** της Ρώμης 96-53 Π.Χ., στο βιβλίο του "Η φύση των πραγμάτων").

Ο **Πλάτωνας** έδωσε μια ακριβή περιγραφή των ιδιοτήτων των μαγνητών. Έγραψε ότι *"Αυτή η πέτρα όχι μόνο προσελκύει τον σίδηρο, αλλά μεταδίδει σε αυτόν μια παρόμοια δύναμη και μπορείτε να δείτε πολλά κομμάτια σιδήρου να ενώνονται μεταξύ τους για να διαμορφώσουν μια μακριά σειρά. Όλα τα κομμάτια σιδήρου αντλούν τη δύναμη τους από την αρχική πέτρα"*. Με άλλα λόγια, ανακάλυψε ή τουλάχιστον κατέγραψε για πρώτη φορά ένα φαινόμενο που σήμερα καλείται μαγνητική επαγωγή.

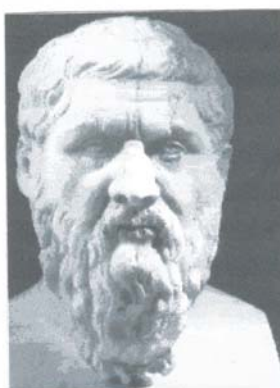
Σύμφωνα με τους **Επικούρειους** \*<sup>1</sup>, ο σχηματισμός ενός κενού διαστήματος μεταξύ του μαγνήτη και του αντικειμένου ήταν η αιτία κάποιας μετακίνησης των ατόμων από το σίδηρο προς το μαγνήτη προκειμένου να γεμιστεί το κενό. Συνεπεία αυτής της ατομικής μετακίνησης, ολόκληρο το αντικείμενο κινείται προς το κενό.

Οι **Ανιμιστές** \*<sup>2</sup> εξέτασαν το μαγνήτη σαν να έχει μια θεία προέλευση και κατ' αυτό τον τρόπο εξήγησαν όλα τα χαρακτηριστικά του. Αυτή η υπόθεση έγινε αποδεκτή ακόμη και από τον Θαλή και τον Αναξαγόρα και βρήκε πολλούς σημαντικούς οπαδούς μέχρι το δέκατο έβδομο αιώνα.

Ο **Διογένης** εξήγησε τη μαγνητική έλξη με έναν παράξενο τρόπο. Είπε ότι "Η υγρασία του σιδήρου προσελκύεται στην ξηρότητα του μαγνήτη.

Ο **Αριστοτέλης**, 384-322 Π.Χ. διατύπωσε ότι ένας μαγνήτης δεν ήταν φυσικά ικανός να προσελκύσει το σίδηρο, αλλά ότι προκάλεσε μια "μαγνητική αρετή" μέσα στο αντικείμενο σιδήρου. Αυτή η μαγνητική αρετή ήταν υπεύθυνη για την πραγματική μετακίνηση.

Συνοπτικά η εξέλιξη του μαγνητισμού στην αρχαία Ελλάδα φαίνεται στον Πίνακα 1.



**Εικόνα 1.1**

*Πλάτωνας .Από τους πρωτεργάτες του μαγνητισμού*

*\*1 Οι Επικούρειοι δίδασκαν ότι η ψυχή αποτελείται από τα πιο λεπτά και πιο κινητικά άτομα του σύμπαντος, λεπτότερα ακόμη και από αυτά του αέρα και της φωτιάς, και σε αυτό απέδιδαν τις λειτουργίες της σε σχέση με τη σκέψη και τις αισθήσεις. Κατ' αυτούς, όταν τραυματίζεται το σώμα, μερικά άτομα της ψυχής διαρρέουν. Αν το ποσοστό τους είναι μεγάλο, τότε επέρχεται θάνατος του σώματος και όλα τα άτομα της ψυχής σκορπίζονται.*

*\*2 Φιλοσοφική σχολή που είχε σαν κύρια ιδέα της ότι όλα τα πράγματα στη φύση έχουν ψυχή.*

ΠΛΑΤΩΝΑΣ	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ
ΕΠΙΚΟΥΡΕΙΟΙ	ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΩΝ
ΑΝΙΜΙΣΤΕΣ	ΘΕΙΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ
ΔΙΟΓΕΝΗΣ	ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΞΗΡΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΡΕΤΗ

### **Πίνακας 1.1**

*Έλληνες Φιλόσοφοι και φιλοσοφικές σχολές στην αρχαία Ελλάδα για τον μαγνητισμό*

### **Ο μαγνητισμός στην αρχαία Κίνα**

Από το δεύτερο μισό της πρώτης χιλιετίας Π.Χ., ο μαγνητισμός είναι ένα από τα πολύ συχνά εμφανιζόμενα θέματα στην κινεζική λογοτεχνία. Στην Κίνα, οι μαγνήτες έλαβαν τα διάφορα ονόματα, το πιο κοινό των οποίων ήταν "**Tzhu Shih**", που σημαίνει πέτρα αγάπης. Ένα άλλο όνομα που αποδόθηκε στο μαγνήτη ήταν "**Hsuan Shih**", που σημαίνει μυστήρια πέτρα. Αυτή η λέξη χρησιμοποιήθηκε αργότερα επίσης για τα μη μαγνητικά μεταλλεύματα σιδήρου.

Το Κινέζικο βιβλίο "**Master Lu's Spring and Autumn Annals**", (μια περίληψη της επιστήμης), είναι το παλαιότερο βιβλίο που εξετάζει τον μαγνητισμό. Γράφτηκε στο τέλος του τρίτου αιώνα π.Χ. Το 83 Μ.Χ. το "**Discourses Weighed in the Balance**" δημοσιεύθηκε. Σε αυτό το βιβλίο ο συντάκτης περιγράφει τη μαγνητική έλξη, ως αποτέλεσμα "συμπάθειας".

Στον πέμπτο αιώνα έγιναν οι πρώτες προσπάθειες να γίνουν οι ποσοτικές μετρήσεις της μαγνητικής δύναμης, μετρήσεις που ήταν σημαντικές για τις ιατρικές εφαρμογές των μαγνητών. Στο βιβλίο "**Lei Kung Phao Chih**", του σεβάσμιου Lei περιγράφηκε το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει τις ιατρικές - μαγνητικές ιδιότητες των πετρών .Πιο συγκεκριμένα έλεγε ότι αν τα 600g μαγνήτη προσελκύσουν το ίδιο βάρος σε σίδηρο τότε θεωρείται υψηλής ποιότητας



μαγνήτης και το ονόμασε "**Yen Nien Sha**". Εάν το ποσό σιδήρου που προσελκύεται ήταν μεταξύ 200 και 600g, η πέτρα ήταν ένας μέσος ποιοτικός μαγνήτης, και τον ονόμασε το "**Hsu Tshai Shin**". Εάν θα μπορούσε να προσελκύσει λιγότερο από 200g του σιδήρου, η πέτρα θα ήταν ένας χαμηλής ποιότητας μαγνήτης και τον ονόμασε απλά **μαγνητίτη**. Οι πέτρες που προσέλκυσαν λιγότερο από 100g θεωρήθηκαν μη μαγνητικά μεταλλεύματα.

## 1.2 Ο μαγνητισμός ως τον 19<sup>ο</sup> αιώνα

Το 1175 ο **Alexander Neckem**, ένας Άγγλος μοναχός περιγράφει την λειτουργία μιας πυξίδας, στο βιβλίο του « Σχετικά με την φύση των πραγμάτων. Η πρώτη προσπάθεια να περιγραφούν οι μαγνήτες, ξεφεύγοντας από την προκατάληψη, έγινε από τον **Peter Peregrinus** από την Maricourt, έναν Γάλλο σταυροφόρο, το 1296. Στο γράμμα του, "**Επιστολή σχετικά με τους μαγνήτες**" που λέγετε ότι το έγραψε ενώ ήταν φρουρός κατά την διάρκεια της πολιορκίας της πόλης Lucera, αναφέρει όλες τις γνώσεις του σχετικά με το ορυκτό μαγνητίτη, από το οποίο κατασκευάζονταν μέχρι τότε οι πυξίδες, και όλες τις ιδιότητες του.

Ο **Peregrinus** περιγράφει αρκετά πειράματα, που θεωρούνται ως η απαρχή της επιστημονικής έρευνας του μαγνητισμού, αρχικά στο γράμμα του αναφέρει πώς θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε τον μαγνήτη από μια κοινή πέτρα, στην συνέχεια περιγράφει την κατασκευή ενός σφαιρικού μαγνήτη και σχεδιάζει στην επιφάνειά του τις γραμμές που «προκαλούν οι μηχανικές δυνάμεις».

Τελικά καταλήγει στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο πόλοι, επειδή η γραμμές ενώνονται σε δύο αντίθετα σημεία της σφαίρας. Ακόμη αναφέρει ότι η πολικότητα ενός μαγνήτη μπορεί να αντιστραφεί από την δράση ενός ισχυρότερου μαγνήτη από τον πρώτο.

Η επιστολή του εκδόθηκε τελικά περίπου τρεις αιώνες μετά, το 1558 λαμβάνοντας την αξία που της έπρεπε ως η πρώτη επιστημονική αναφορά πάνω στο θέμα που ξέφευγε από την μαγεία και την προκατάληψη. Παρ' όλα αυτά, μέχρι τον καιρό της Βασίλισσας Ελισάβετ, δεν ήξεραν πως στην πραγματικότητα

λειτουργούσε η πυξίδα.

Ακολουθούν και άλλοι «ερευνητές» που ασχολούνται με το θέμα των μαγνητών, όπως τον **Roger Bacon** ( 1214-1292 ), τον **Jean de Saint Amand** (1261-1298), αλλά μπλέκουν την παρατήρηση με την μαγεία και τις απόκρυφες δυνάμεις, ενώ δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς που έθεσε ο Αριστοτέλης και απαιτούσε ένα μυστηριώδες μαγνητικό ρευστό ανάμεσα στα σώματα που αλληλεπιδρούν μαγνητικά. Η πρώτη αντίδραση στον Αριστοτέλη ήρθε από τον Άγγλο **William of Ockham** ( 1297-1350 ) που βασίστηκε στην απλή πειραματική μέθοδο. Με μία αξιοθαύμαστη δουλειά, αναφέρει ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει κάτι που θα εμποδίσει την μαγνητική έλξη, όταν δεν υπάρχει κάποιο υλικό ανάμεσα στα δύο σώματα.

Τους επόμενους αιώνες η έρευνα στον τομέα των μαγνητών πραγματοποιούνταν κυρίως από τεχνικούς και όχι από επιστήμονες, μάλλον γιατί οι μαγνήτες είχαν συνδεθεί με την πρακτική χρήση τους στην ναυσιπλοΐα. Κατά τον 15<sup>ο</sup> και 16<sup>ο</sup> αιώνα η ναυσιπλοΐα πήρε μεγαλύτερη οικονομική σημασία από τα οφέλη που θα μπορούσε να αποφέρει στα ανεπτυγμένα κράτη της εποχής και έτσι η θεωρητική και πρακτική έρευνα των μαγνητών αναζωπυρώθηκε. Ανάμεσα στους διακεκριμένους τεχνικούς της εποχής, σίγουρα ξεχωρίζει ο **Robert Norman**, ο οποίος έλυσε το πρόβλημα που εμφανίζονταν μέχρι τότε λόγω του κέντρου βάρους της μαγνητικής βελόνας τοποθετώντας την βελόνα έτσι που να κινείται όχι μόνο σε οριζόντιο επίπεδο αλλά και σε κατακόρυφο. Το 1550 ο **Gerolamo Cardano** διαπιστώνει ότι η «μαγνητική δύναμη» διαπερνάει το ξύλο, ενώ αντίθετα το ήλεκτρο δεν ασκεί δυνάμεις μέσω του ξύλου.

Ο Άγγλος **William Gilbert** (1544-1603), γιατρός της βασίλισσας Ελισάβετ της 1ης, ήταν ο πρώτος που ερεύνησε το φαινόμενο του μαγνητισμού, συστηματικά χρησιμοποιώντας επιστημονικές μεθόδους. Παράλληλα μελετούσε και τον ηλεκτρισμό. Μάλιστα, αυτός ήταν και ο πρώτος που χρησιμοποίησε την λέξη "**electricity**" από την ελληνική λέξη **ήλεκτρο**. Ακολούθησαν θεωρητικές ανακαλύψεις πάνω στην φύση του μαγνητισμού της γης από τον Γερμανό μαθηματικό **Carl Friedrich Gauss** (1777-1855).Αυτός ήταν και ο πρώτος που εισήγαγε την γλώσσα των μαθηματικών στην μελέτη του ηλεκτρισμού και του

μαγνητισμού.



**Εικόνα 1.2**

*Πορτραίτο του C. F. Gauss σε Γερμανικό χαρτονόμισμα*

Ποιοτικές μελέτες των μαγνητικών φαινομένων πραγματοποιήθηκαν τον 18<sup>ο</sup> αιώνα από τον Γάλλο **Charles Coulomb** (1736-1806), ο οποίος εισήγαγε τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου της δυνάμεως που αναπτύσσεται μεταξύ δυο σωμάτων που υπόκεινται σε μαγνητικές δυνάμεις και είναι ανάλογος των πεδίων του κάθε ενός και αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.

Ο Δανός φυσικός Hans **Christian Oersted** (1777-1851), καθηγητής στο πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης, ήταν ο πρώτος που συνέδεσε τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό. Το 1820 καθώς πραγματοποιούσε, σπίτι του μία επιστημονική επίδειξη σε φίλους και φοιτητές ανακάλυψε τυχαία την δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ ενός μαγνήτη και ενός σύρματος που διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα. Σκόπευε να δείξει πως ένα σύρμα που διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα, θερμαίνεται, καθώς και να κάνει και κάποια πειράματα μαγνητισμού, για τα οποία και είχε μία βελόνα πυξίδας, πάνω σε ξύλινη βάση.

Καθώς έκανε την επίδειξη του ηλεκτρισμού, παρατήρησε με έκπληξη ότι όποτε ο διακόπτης του ηλεκτρικού ρεύματος ήταν ανοιχτός, η μαγνητική βελόνα κινούταν. Εκείνη την στιγμή δεν είπε τίποτα, τέλειωσε την επίδειξη και τους επόμενους μήνες δούλεψε σκληρά, προσπαθώντας να εξηγήσει το νέο αυτό φαινόμενο που παρατηρούσε. Δεν μπόρεσε όμως, η βελόνα ούτε έλκονταν από το σύρμα, ούτε απωθούνταν από αυτό. Αντίθετα, έτεινε να στέκετε σε κάποιες σωστές

γωνίες. Τελικά δημοσίευσε τις παρατηρήσεις του στα Λατινικά, χωρίς κάποια εξήγηση.

Πειράματα που αφορούσαν την επίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν παράλληλα από τον Άγγλο **Michael Faraday** (1791-1869). Παιδί μεταναστών στο Λονδίνο στα 14 του, ενώ δούλευε ως βοηθός βιβλιοδέτη, άρχισε να μελετάει την πληθώρα των βιβλίων που είχε στην διάθεση του, αποκτώντας επαρκή μόρφωση έτσι που του επέτρεψε να ασχοληθεί με την έρευνα. Ήταν ένας ακούραστος ερευνητής που δεν απογοητευόταν όταν συναντούσε δυσκολίες,

Το 1831 ανακάλυψε και αυτός, ανεξάρτητα από τον **Henry** πως ηλεκτρισμός θα μπορούσε να παραχθεί από τον μαγνητισμό μέσω της κίνησης ενός μαγνήτη. Αφού το απέδειξε αυτό και πειραματικά, ήταν ικανός να εξηγήσει ότι τα μαγνητικά πεδία που κινούταν και παρήγαγαν ηλεκτρισμό αποτελούσαν από δυναμικές γραμμές.

Αυτές μπορούσαν να προκαλέσουν ροή ρεύματος σε ένα σπειροειδές σύρμα που περιστρέφονταν ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη. Μάλιστα η πράξη δείχνει ότι όταν το πηνίο κόβει τις δυναμικές γραμμές, τότε κατά περίεργο τρόπο, παράγεται ηλεκτρισμός. Αυτά τα πειράματα επιδείκνυαν την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ( έννοια την οποία εισάγει το 1834 ο Faraday ) στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με αλλαγή της μαγνητικής πυκνότητας. Παρατήρησε ακόμη πως η αλλαγή του ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα, επάγει ρεύματα σε ένα γειτονικό κύκλωμα.

Σε όλη την δουλειά του Faraday, δεν συμπεριλαμβάνονται μαθηματικά. Από τα εκατοντάδες πειράματα του, που όλα μπορούν να εξηγηθούν με την ιδέα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής θα μπορούσαν να προκύψουν αρκετές εφευρέσεις, αλλά αυτές εμφανίστηκαν 50 με 100 χρόνια αργότερα.

Ο Faraday χρησιμοποίησε την ανακάλυψη του για να κατασκευάσει την πρώτη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος, στην οποία η συνεχής περιστροφή ενός αγωγίμου μεταλλικού ελάσματος ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη παρήγαγε συνεχές ρεύμα μετατρέποντας έτσι την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, αλλά πέρασαν περίπου πενήντα χρόνια πριν χρησιμοποιηθεί η εφεύρεση του αυτή για

την ευρεία παραγωγή ενέργειας\*<sup>1</sup>. θεωρείται ο κορυφαίος πειραματικός φυσικός του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Το 1834 ο **Emil Lenz** διατυπώνει έναν κανόνα που προσδιορίζει την κατεύθυνση των επαγόμενων ρευμάτων. Στην πρότυπη μορφή του ήταν ένας νόμος που έδενε τις δυνάμεις και όχι τα ρεύματα, « Τα επαγόμενα ρεύματα ρέουν σε τέτοια κατεύθυνση, ώστε να παράγουν μαγνητικές δυνάμεις οι οποίες προσπαθούν να διατηρήσουν σταθερή την μαγνητική ροή ». Έτσι ο Lenz μπορούσε να προβλέψει ότι αν προσπαθούσες να σπρώξεις έναν αγωγό σε ένα δυνατό μαγνητικό πεδίο, αυτός θα απωθούνταν. Ενώ αν θα προσπαθούσαμε να τραβήξουμε έναν αγωγό έξω από το πεδίο αυτό, τότε οι μαγνητικές δυνάμεις στα επαγόμενα ρεύματα θα αντιστέκονταν στην κίνηση μας.

Ο Σκοτσέζος μαθηματικός **James Clerk Maxwell** (1831-1879) όμως ήταν αυτός που θεμελίωσε θεωρητικά το ηλεκτρομαγνητισμό αναπαριστώντας τα διαφορετικά στοιχεία του ίδιου βασικού πεδίου δυνάμεων μετατρέποντας τις θεωρίες του Faraday σε ολοκληρωμένες μαθηματικές σχέσεις.

Το 1855 γράφει ένα σύγγραμμα στο οποίο κάνει μια προσπάθεια να ενώσει τις διορατικές σκέψεις του Faraday για τις μαγνητικές γραμμές με τις μαθηματικές αναλογίες του Thomson. Σε αυτό το σύγγραμμα πρώτη φορά γίνεται αισθητή η φυσική σημασία των τελεστών της απόκλισης και της καμπύλωσης στον ηλεκτρομαγνητισμό.

Το 1867 ο **Ludwig Lorenz** αναπτύσσει μια ηλεκτρομαγνητική θεωρία που περιγράφει την φύση του φωτός στην οποία τα δυναμικά, σε πολύ βασική μορφή, είναι το εναρκτήριο σημείο.

Ο Σκοτσέζος **Alexander Graham Bell** (1847-1922) , εφαρμόζοντας αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού και χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα για την μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό σήμα, κατασκεύασε το πρώτο τηλέφωνο το 1876.

<sup>1</sup>Ο *Michael Faraday* θεωρείται ο κορυφαίος πειραματικός φυσικός του 19ου αιώνα.

Ο Σέρβος **Nikola Tesla** (1856 – 1943) πειραματιζόμενος με γεννήτριες ανακάλυψε το 1883 το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, την βασική αρχή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό το μαγνητικό πεδίο εναλλάσσονταν μεταξύ δύο

αντίθετων κατευθύνσεων πενήντα φορές το δευτερόλεπτο (50 Hertz). Με ένα τέτοιο πεδίο κατασκεύασε την γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Εν συνεχεία ο Tesla, άρχισε να σχεδιάζει και έναν κινητήρα που θα μπορούσε να δουλέψει με αυτό το ρεύμα. Η δουλειά του Tesla ήταν η αφορμή στο να γίνει κατανοητό πως ήταν απαραίτητη παραγωγή AC ρεύματος αφού επέτρεπε την μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αφού μεταφέρονταν μεγάλες τάσεις οι οποίες μέσω μετασχηματιστών, έδιναν μικρότερες όπου αυτό ήταν απαραίτητο.



**Εικόνα 1.3**

*Πορτρέτο του **Nikola Tesla** σε Γιουγκοσλαβικό χαρτονόμισμα*

Έτσι το 1886 κατασκευάστηκε το πρώτο εργοστάσιο που έδινε εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά αρχικά χρησιμοποιούνταν μόνο για φωτισμό αφού ο Tesla ανακοίνωσε την εφεύρεση μηχανικού κινητήρα που να λειτουργεί με AC το 1888, και τότε η χρήση του AC ρεύματος διαδόθηκε ευρέως και άρχισαν να λειτουργούν αποδοτικά υδροηλεκτρικά εργοστάσια σε Αμερική και Ευρώπη. Προς τιμήν του, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, που είναι ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνούνε την μονάδα επιφάνειας, μετριέται σε Tesla

Το 1884 ο **Heinrich Hertz** κάνει βέβαιο ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  που προκύπτει από φόρτιση και η ένταση που προκύπτει επαγωγικά, αλλάζοντας το μαγνητικό πεδίο είναι ισοδύναμες.

Ο **Oliver Heaviside** το 1889 βρίσκει την σωστή έκφραση για τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ενός κινούμενου φορτισμένου σωματιδίου που ισχύει για μη σχετικιστικές ταχύτητες.

### 1.3 Ο μαγνητισμός τον 20ο αιώνα

Με μια λέξη, όλη η πρόοδος στους μαγνήτες τον 20ο αιώνα οφειλόταν στην γνώση της απομαγνητίζουσας ισχύς.

Η εξέλιξη άρχισε το 1917 όταν οι **K. Honda** και **T. Takai** πρόσθεσαν κοβάλτιο στο χάλυβα Βολφράμιου, αυξάνοντας σημαντικά την δύναμη των μόνιμων μαγνητών. Το 1919 ήταν διαθέσιμοι εμπορικά οι πρώτοι μαγνήτες που κατασκευάζονταν από τήξη μετάλλων.

Το 1930 ο **I. Mishima** παράγει τον πρώτο μαγνήτη Alnico που αποτελούνταν από κράμα σιδήρου, νικελίου και αλουμινίου. Το 1952 οι **J.J. Went**, **G.W. Rathenau**, **E.W. Gorter**, και **G.W. Van Oosterhout** της εταιρίας Phillips κατασκευάζουν και προωθούν στην αγορά τους πρώτους κεραμικούς μαγνήτες που βασίζονταν σε Βάριο, Στρόντιο και οξειδία στα οποία κυριαρχεί ο Σίδηρος.

Το 1966 ο **Karl J. Strnat** που εργάζονταν σε ένα εργαστήριο ερευνάς υλικών της Αμερικάνικης αεροπορίας ανακάλυψε ότι το μίγμα Σαμάρου – Κοβάλτιου,  $\text{SmCo}_5$  παρήγαγε ακόμη καλύτερους μαγνήτες με υψηλό ενεργειακό παράγωγο ( $18 \text{ MGOe}$ ), ξεκινώντας έτσι την κατασκευή μαγνητών με μίγματα που περιέχουν σπάνιες γαίες. Ο ίδιος μαζί με τον **Alden Ray** ανέπτυξαν ένα ακόμη καλύτερο ( $30 \text{ MGOe}$ ) μίγμα Σαμάρου – Κοβάλτιου  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

Το 1983, κάτω από την επίβλεψη της **Κινέζικης ακαδημίας επιστημών** αναπτύσσεται ένα κράμα μετάλλων που έδινε καλύτερους μαγνήτες ( $35 \text{ MGOe}$ ) και αποτελείται από μίγμα Νεοδύμιου, Σιδήρου και Βόριου ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ).

Το ενεργειακό παράγωγο των μαγνητών όπως παρατηρούμε διπλασιαζόταν κάθε 12 χρόνια, κατά μέσον όρο κατά την διάρκεια του 20ού αιώνα. Οι μαγνήτες που διαθέτουμε τώρα είναι περισσότερο από εκατό φορές πιο ισχυροί από αυτούς με τους οποίους έπαιζε ο Einstein σαν παιδί. Οι βελτιωμένοι αυτοί μαγνήτες εκτός της υψηλής μαγνήτισής τους, **Curie** η οποία υποδηλώνει ότι το βασικό στοιχείο τους είναι ο σίδηρος.

Οι βελτιωμένοι μόνιμοι μαγνήτες αρχίζουν να κερδίζουν έδαφος σε αρκετές εφαρμογές σε σχέση με τους ηλεκτρομαγνήτες, λαμβάνοντας υπόψη την

προσαρμοστικότητα τους και το γεγονός ότι είναι πιο φτηνοί. Σήμερα το 55% του πλήθους των μόνιμων μαγνητών που παράγονται είναι μαγνήτες Φερρίτη, το 35% μαγνήτες σπάνιων γαιών και το υπόλοιπο κυρίως κράματος Alnico. Κατά όγκο, η παγκόσμια παραγωγή είναι κατά μέσον όρο 80g σκληρού μαγνήτη Φερρίτη και 1g μαγνήτη σπάνιων γαιών, για κάθε άνθρωπο στην γη ετησίως. Μια από τις κυριότερες χρήσεις των μαγνητών είναι σε κινητήρες, αυτοί αντέχουν σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους  $100^{\circ}\text{C}$ , ενώ γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μαγνητών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και στους  $400^{\circ}\text{C}$ .

Ο βασικός μαγνήτης δεν είναι πλέον ένα πέταλο, αλλά ένας μεταλλικός δίσκος με ύψος ίσο σε περίπου τη μισή διάμετρο του γουόκμαν, του βίντεο, ή του τηλεφώνου μας. Υπάρχουν πολλές χρήσεις αυτών των μαγνητών σε όλους τους τομείς της καθημερινής μας ζωής. Όταν μια μέση οικογένεια στη δεκαετία του '50 κατείχε δύο μαγνήτες, η ίδια οικογένεια έχει στο σπίτι της εκατοντάδες από αυτούς.



**Εικόνα 1.4**  
*Μοντέρνοι μαγνήτες*

Οι υπεραγωγοί (superconductors) είναι μια άλλη κατηγορία πολύ δυνατών μαγνητών. Αυτοί χάνουν ξαφνικά την ηλεκτρική τους αντίσταση όταν η θερμοκρασία τους πέσει κοντά στο απόλυτο μηδέν. Τότε το ρεύμα ρέει μέσα τους ελεύθερα, χωρίς απώλειες ενέργειας και μπορούν να αναπτυχθούν πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία. Για να πετύχουμε την υπεραγωγιμότητα πρέπει το μέταλλο ή το μεταλλικό κράμα να ψυχθεί ανάμεσα στα 1 με 10 Kelvin με υγρό ήλιο. Βέβαια η



χρήση του υγρού ήλιου είναι περιοριστική, αφού αυτό είναι αρκετά ακριβό. Επομένως θα θέλαμε υπεραγωγούς που να δουλεύουν σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Οι επιστήμονες της IBM έχουν καταφέρει με την μέθοδο κατασκευής κυκλωμάτων για υπολογιστές να παράγουν με αέρια εναπόθεση έναν κρύσταλλο με διάμετρο μίας ίντσας και πάχος ένα  $\mu\text{m}$ , έναν υπεραγωγό από τον οποίο περνάει ένα ρεύμα 100.000 A ανά τετραγωνικό εκατοστό.

Αν καταφέρουν οι επιστήμονες να αυξήσουν και άλλο την θερμοκρασία, ώστε να φτάσουμε στην θερμοκρασία δωματίου και λυθούν τα προβλήματα που έχουν να κάνουν με την διάδοση τόσο υψηλών ρευμάτων, τότε οι υπεραγωγοί θα μπορέσουν να βγουν από τα εργαστήρια και να χρησιμοποιηθούν σε νέες αξιοθαύμαστες εφαρμογές. Με πιο αποτελεσματικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και εύκολη αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ρεύματος.



**Εικόνα 1. 5**

*Τρένο μαγνητικής αιώρησης. Τα Μαγνητικά τρένα αιωρούνται πάνω στις ράγες φτάνοντας ασύλληπτες ταχύτητες, έχοντας φτάσει τα 581 km/h.*

#### **1.4 Κύριες χρήσεις μόνιμων μαγνητών σήμερα**

Στον 20<sup>ο</sup> αιώνα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην δημιουργία μόνιμων μαγνητών σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Η ενέργεια που παράγουμε από

τους μαγνήτες διπλασιάζεται κάθε δώδεκα χρόνια. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά τα πεδία που βρίσκουν εφαρμογές σήμερα.

### **Ηλεκτρομηχανικές διατάξεις και μηχανές**

- Ηλεκτρικοί κινητήρες: σύγχρονοι, ασύγχρονοι, γραμμικής ή βαθμωτής λειτουργίας κ.λ.π.
- Ηλεκτρογεννήτριες: ασύγχρονες, σύγχρονες γεννήτριες μμονοφασικού ή τριφασικού ρεύματος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οδόμετρα κ.λ.π.
- Όργανα μετρήσεων: όργανα κινητού πηνίου και κινητού μαγνήτη.
- Όργανα ελέγχου: διακόπτες κυκλωμάτων, relays, θερμοστάτες, ανάφλεξη κινητήρων εσωτερικής καύσης, εκτυπωτές, έλεγχος robots, έλεγχος επιφανειών πλοήγησης και ευστάθειας αεροσκαφών, έλεγχος της θέσης των κεφαλών ανάγνωσης και εγγραφής σε μαγνητικά, μαγνητοοπτικά και οπτικά μέσα (FDs, HDs, CDs, videοκ.λ.π.), έλεγχος της θέσης των κεφαλών εκτύπωσης σε εκτυπωτές και σχεδιαστές κ.λ.π.

### **Ακουστικοί μετατροπείς**

- Γεννήτριες ήχου: μεγάφωνα, ακουστικά, κουδούνια, βομβητές, υπέρηχοι κ.λ.π.
- Αισθητήρες ήχου: δυναμικά μικρόφωνα, δέκτες υπερήχων κ.λ.π.

### **Διατάξεις μηχανικών δυνάμεων και ροπών**

- Διατάξεις ανύψωσης και επαφής: μαγνητικές άρπαγες, ανυψωτήρες, κλείσιμο συμβατικών θυρών και θυρών ψυγείων, παιχνίδια, διαφημιστικές επιγραφές κ.λ.π.
- Διατάξεις διαχωρισμού: μαγνητικοί διαχωριστές μετάλλων, φίλτρα αποιονισμού νερού, τύμπανα φωτοτυπικών κ.λ.π.
- Μαγνητικές συζεύξεις και πεδησεις: σύγχρονες συζεύξεις ροπής,

μετατροπείς περιστροφικής κίνησης σε γραμμική, συζευκτές και φρένα δινορευμάτων κ.λ.π.

- Μαγνητικές αναρτήσεις και ανυψώσεις: παθητικά βαττόμετρα, υπερφυγοκεντροτήρες, γυροσκόπια, στροβιλομοριακές αντλίες κενού, ηλεκτρομαγνητική ανύψωση οχημάτων κ.λ.π.
- Ηλεκτροζυγοί: σύγχρονες διατάξεις ζύγισης για πολυκαταστήματα και γερανογέφυρες.

### **Μικροκυματικές διατάξεις, έλεγχος δεσμών ηλεκτρονίων και ιόντων**

- Σωλήνες ισχύος: magnetrons (radar, φούρνοι μικροκυμάτων), gyrotrons, klystrons, κ.λ.π.
- Διατάξεις κυματοδήγησης: πολωτικά στοιχεία φερρίτη ή YIG σε φίλτρα συντονισμού, διακόπτες και απομονωτές
- Επιταχυντές σωματιδίων, πηγές ακτινοβολίας Synchrotron, Lasers ελευθέρων ηλεκτρονίων: φακοί, μαγνήτες απόκλισης, διαμορφωτές κ.λ.π.
- Φασματογράφοι μαζών : μαγνήτες απόκλισης.
- Καθοδικοί σωλήνες: παγίδες ιόντων, εστίαση κ.λ.π.

### **Αισθητήρες**

- Αισθητήρες με μόνιμους μαγνήτες: επαγωγικοί, Hall, μαγνητοαντίστασης, θερμοευαίσθητα στοιχεία.
- Μετρούμενα μεγέθη: θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση, ροή υγρών και θερμότητας, θερμοκρασία, πίεση, ταλάντωση κ.λ.π.
- Περιοχές αξιοποίησης: βιομηχανία, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, περιφερειακά υπολογιστών, εξοπλισμός γραφείων κ.λ.π.

### **Ιατρικές εφαρμογές**

- Διατάξεις απεικόνισης NMR: συνεχές μαγνητικό πεδίο σε τομογράφους.

- Μηχανικές προσθέσεις: βαλβίδες, βοηθητικές αντλίες αίματος, τεχνητά μέλη, οδοντικές προσθέσεις κ.λ.π.
- Διαγνωστικά μέσα: καθετήρες, αισθητήρες- μετατροπείς, ακουστικά κ.λ.π.
- Χειρουργικά εργαλεία: σφιγκτήρες.

### **Διάφορες εφαρμογές**

- Μαγνητικές κλειδαριές: κλειδιά και κύλινδροι με κώδικα.
- Κοσμηματοποιΐα: συνδέσεις, σκουλαρίκια κ.λ.π.
- Ηλεκτρονικά Chokes: πεδίο πόλωσης πυρήνα.
- Μνήμες μαγνητικών φουσαλίδων: πεδίο πόλωσης για τη διατήρηση των φουσαλίδων.
- Τεχνολογία κενού: ιοντικές αντλίες, βαλβίδες κ.λ.π.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ [2]

#### 2.1 Γενικά

*Αισθητήρας γενικά, λέγεται μία διάταξη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση ή ανίχνευση ενός φυσικού μεγέθους.*

Η σημασία των αισθητήρων για τον άνθρωπο είναι σχεδόν αυτονόητη. Οι πρώτοι αισθητήρες εμφανίζονται μαζί με τα έμβια όντα και αποτελούν όργανα τους. Το μάτι και το αφτί είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα. Το πρώτο ανιχνεύει τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και το δεύτερο τον ήχο, δηλαδή κύματα πίεσης. Πολύ αργότερα, ο άνθρωπος συνειδητοποιεί ότι χρειάζεται όργανα μέτρησης για να λύσει καθημερινά πρακτικά προβλήματα, όπως αυτό της μέτρησης του μήκους, του βάρους ή του όγκου. Στη συνέχεια η επιθυμία του ανθρώπου να γνωρίσει τη Φύση αλλά και διάφοροι πρακτικοί λόγοι, δημιουργούν την ανάγκη μέτρησης περισσότερων φυσικών μεγεθών. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το πρώτο θερμόμετρο εμφανίζεται το 1585, ενώ το βαρόμετρο το 1643.

Οι πρώτοι αισθητήρες και όργανα μέτρησης είναι μηχανικά. Έτσι, η αρχή λειτουργίας των πρώτων θερμομέτρων βασίζεται στην μεταβολή των διαστάσεων των υλικών που χρησιμοποιούνται (υδράργυρος ή οινόπνευμα) για την κατασκευή τους, ενώ του βαρομέτρου βασίζεται στην μεταβολή της στάθμης ενός ρευστού ανάλογα με την ασκούμενη σε αυτό πίεση. Η συστηματική μελέτη του ηλεκτρισμού οδήγησε στην ανάπτυξη νέων αισθητήρων - ηλεκτρικών -, η έξοδος των οποίων ήταν ένα αναλογικό σήμα το οποίο με κατάλληλη επεξεργασία απεικόνιζε της μεταβολές του φυσικού μεγέθους που μετρούσε. Η ανάπτυξη των ημιαγωγών είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αισθητήρων ημιαγωγών αλλά και ψηφιακών οργάνων μέτρησης των μεγεθών.

Για να συνειδητοποιήσει κανείς τη ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των

αισθητήρων, αρκεί να θυμηθεί ότι τα αυτοκίνητα παραγωγής της δεκαετίας του '60 και του '70, περιελάμβαναν δύο μόνο απλούς ηλεκτρικούς αισθητήρες, ένα για την μέτρηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού και ένα δεύτερο για την μέτρηση της στάθμης του καυσίμου ενώ τα σύγχρονα αυτοκίνητα διαθέτουν πολλαπλάσιους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την:

- Μέτρηση της πίεσης των ελαστικών,
- Μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής,
- Ανίχνευση βροχής,
- Μέτρηση της φωτεινότητας του περιβάλλοντος,
- Ανάγκη ενεργοποίησης των ζωνών ασφαλείας και των αερόσακων,
- Ανάγκη ενεργοποίησης του συστήματος αντιμπλοκαρίσματος των τροχών και για πληθώρα άλλων αναγκών για τις οποίες δεν μπορούμε να επεκταθούμε εδώ.

Σημαντική ώθηση στην εξέλιξη των αισθητήρων έδωσε η ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων της σύγχρονης έρευνας στις θετικές επιστήμες καθώς και της εξέλιξης της τεχνολογίας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στη διαστημική τεχνολογία και στη Φυσική των Σωματιδίων.

Οι μελλοντικοί εξελιγμένοι αισθητήρες αναμένεται ότι θα προκύψουν από την έρευνα στη νανοτεχνολογία και τη βιοτεχνολογία.

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας αναλύονται τα γενικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, ενώ στα επόμενα κεφάλαια εξετάζονται συγκεκριμένοι αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πεδίο εργαστηριακών / ερευνητικών αλλά και βιομηχανικών εφαρμογών.

## **2.2 Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων**

Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων ονομάζονται κάποιες παράμετροι που τους χαρακτηρίζουν όταν, έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενου μεγέθους. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει το μετρούμενο μέγεθος είτε να είναι σταθερό, είτε να μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με τη δυνατότητα του αισθητήρα να ανταποκριθεί τη μεταβολή αυτή.

## Πιστότητα

Με τον όρο *πιστότητα* αποδίδεται ο αγγλικός όρος *accuracy*. Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον *οποίο* μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα δίνεται συνήθως ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα. Αν, για παράδειγμα, ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0 - 10 *bar* έχει πιστότητα  $\pm 1.0\%$  της πλήρους κλίμακας, τότε η μέγιστη αβεβαιότητα του αισθητήρα θα είναι ίση με 0,1 *bar*. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο αισθητήρας δίνει ως αποτέλεσμα 1 *bar*, τότε η μέγιστη αναμενόμενη αβεβαιότητα θα είναι ίση με το 10% της τιμής αυτής. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο εύρος των μετρομένων τιμών, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή πιστότητα των μετρήσεων. Αν δηλαδή έχουμε μία εφαρμογή στην οποία οι πιέσεις μεταβάλλονται στο διάστημα 0 — 1 *bar* είναι λάθος να επιλέξουμε αισθητήρα περιοχής λειτουργίας 0 — 10 *bar*.

## Ακρίβεια

Ο όρος *ακρίβεια* (*accuracy*) εκφράζει τον βαθμό ελευθερίας του αισθητήρα από *τυχαία σφάλματα*. Αν πάρουμε μεγάλο αριθμό μετρήσεων από έναν ακριβή αισθητήρα, τότε η μεταξύ τους διασπορά θα είναι μικρή. Η ακρίβεια συγχέεται συχνά με την πιστότητα. Η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκην και μεγάλη πιστότητα. Ένας ακριβής αισθητήρας μπορεί να έχει κακή πιστότητα. Κακής πιστότητας μετρήσεις από έναν ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι η μετρήσεις έχουν *συστηματικό σφάλμα* (*bias*), γεγονός το *οποίο* μπορεί να διορθωθεί με *βαθμονόμηση* (*διακρίβωση*) του αισθητήρα.

## Επαναληψιμότητα – αναπαραγωγιμότητα

Οι όροι *Επαναληψιμότητα* και *αναπαραγωγιμότητα* είναι ταυτόσημοι, χρησιμοποιούνται όμως ο καθένας σε διαφορετικές περιπτώσεις. Και οι δύο αναφέρονται στο πόσο κοντά είναι τα αποτελέσματα ενός αισθητήρα που μετρά το ίδιο σταθερό μέγεθος, ή μεν επαναληψιμότητα όταν οι συνθήκες μέτρησης είναι σταθερές, η δε αναπαραγωγιμότητα, όταν οι συνθήκες μέτρησης μεταβάλλονται.

## Ανοχή

Η *ανοχή* συνδέεται στενά με την πιστότητα και ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μιας τιμής. Δεν πρόκειται για στατικό χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα, αλλά το αναφέρουμε, γιατί πολλές φορές η πιστότητα δίνεται ως ανοχή.

## Εύρος

Με τον όρο *εύρος* αναφερόμαστε στην ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας.

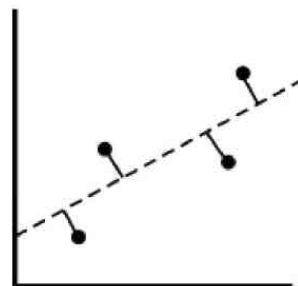
## Συστηματικό σφάλμα

Ως *συστηματικό σφάλμα* (bias) είναι ένα σταθερό σφάλμα, το ίδιο για όλο το εύρος του αισθητήρα, το οποίο συνήθως μπορεί να μηδενιστεί μέσω βαθμονόμησης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα συστηματικού σφάλματος εμφανίζεται στις οικιακές ζυγαριές, οι οποίες μπορεί να δείχνουν μη μηδενική ένδειξη, ακόμη και χωρίς φορτίο. Αυτή η μη μηδενική ένδειξη αποτελεί το συστηματικό σφάλμα το οποίο πρέπει να αφαιρέσουμε από την ένδειξη που παίρνουμε κατά τη μέτρηση ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή.

### Σχήμα 2.1

Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα





## Γραμμική απόκριση

Είναι γενικά επιθυμητό η απόκριση ενός αισθητήρα να μεταβάλλεται γραμμικά με το μετρούμενο μέγεθος. Τα σημεία του Σχήματος 2.1 απεικονίζουν την σχέση μεταξύ σήματος εισόδου (οριζόντιος άξονας) και εξόδου (κατακόρυφος άξονας) ενός αισθητήρα. Η γραμμή μεταξύ των σημείων χαράσσεται εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μη - γραμμικότητα εκφράζεται ως η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των σημείων και της γραμμής. Η μη - γραμμικότητα εκφράζεται συνήθως ως η απόκλιση του εύρους του αισθητήρα.

## Ευαισθησία στη μέτρηση

Πρόκειται για το λόγο της μεταβολής στην ένδειξη του αισθητήρα, προς τη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που την προκάλεσε. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι η ευαισθησία ισούται με την εφαπτομένη της γραφικής παράστασης του Σχήματος 2.1.

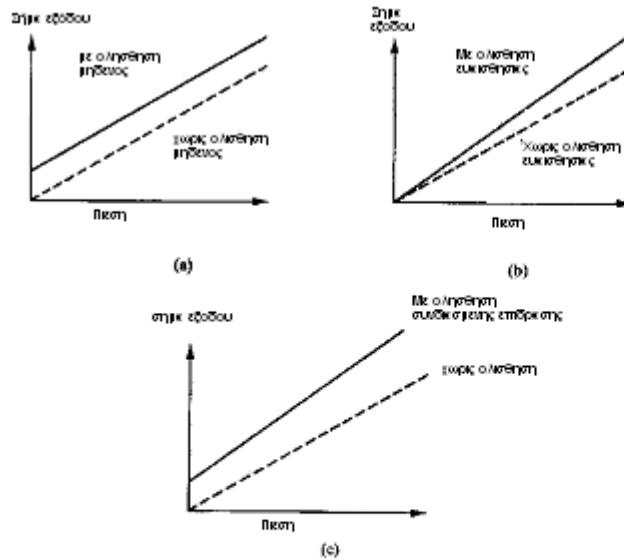
## Ευαισθησία στη διαταραχή

Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν όταν αυτό λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών συνθηκών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κλπ. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα.

Μεταβολή κάποιων από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η *ευαισθησία στη διαταραχή*. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δύο και είναι γνωστά ως *ολίσθηση του μηδενός*) και *ολίσθηση ευαισθησίας*.

Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες από μια παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός, μία για κάθε παράμετρο. Χαρακτηριστική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης, φαίνεται στο Σχήμα 2.2

Η ολίσθηση ευαισθησίας ορίζεται ως το ποσό μεταβολής της ευαισθησίας ενός αισθητήρα λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Εκφράζεται μέσω *συντελεστών ολίσθησης ευαισθησίας*, οι οποίοι εκφράζουν το μέγεθος της ολίσθησης ανά μονάδα μεταβολής της περιβαλλοντικής παραμέτρου που την προκάλεσε.



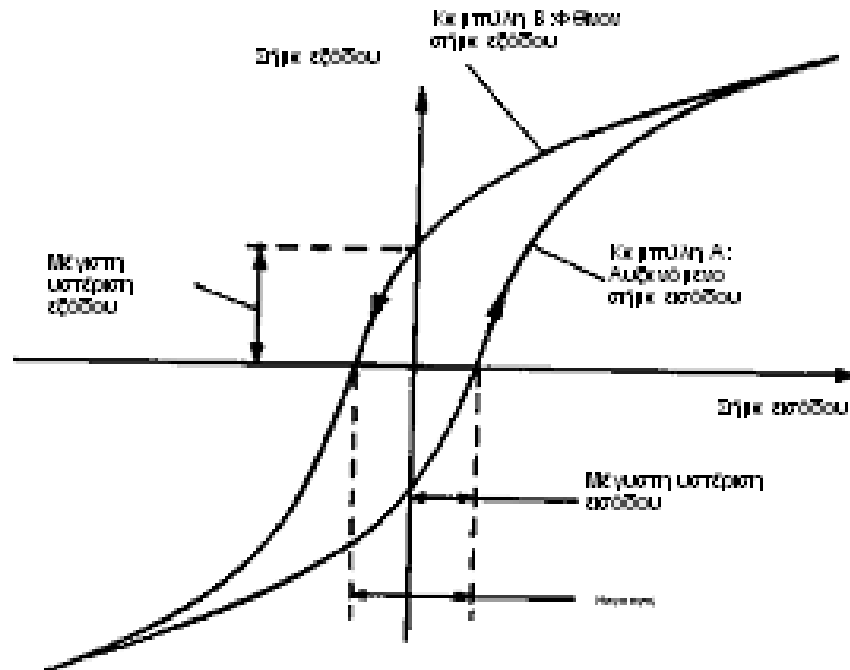
**Σχήμα 2.2**

- a. Ολίσθηση μηδενός,
- b. Ολίσθηση ευαισθησίας,
- c. Συνδυασμένη επίδραση των δύο ολισθήσεων

## Υστέρηση

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα ο οποίος παρουσιάζει υστέρηση. Αν η τιμή του σήματος εισόδου μεταβάλλεται σταθερά, ξεκινώντας από αρνητικές τιμές, το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Α. Αν κατόπιν το σήμα εξόδου μειώνεται σταδιακά, τότε το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη Β. Η μη ταύτιση των δύο καμπυλών «φορτίσεως -

εκφορτίσεως» είναι γνωστή ως *υστέρηση*. Η υστέρηση εκφράζεται μέσω της *μέγιστης υστέρησης εισόδου* και της *μέγιστης υστέρησης εξόδου*, οι οποίες ορίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

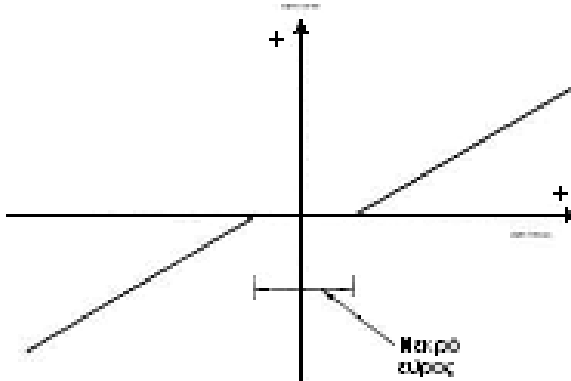


**Σχήμα 2.3**

*Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με υστέρηση*

## Νεκρό εύρος

Ως *νεκρό εύρος* ορίζεται το εύρος του σήματος εισόδου, για το οποίο το σήμα εξόδου είναι μηδενικό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα, κάθε αισθητήρας ο οποίος εμφανίζει υστέρηση εμφανίζει και νεκρό εύρος. Παρ' όλα αυτά ακόμη και αισθητήρες οι οποίοι δεν εμφανίζουν σημαντική υστέρηση, μπορεί να εμφανίζουν νεκρό εύρος.



**Σχήμα 2.4**

*Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με νεκρό εύρος.*

## **Κατώφλι**

Αν το σήμα εισόδου ενός αισθητήρα αυξάνεται σταδιακά ξεκινώντας από μηδενική τιμή, αυτό θα πρέπει να λάβει μία ορισμένη - μη μηδενική- τιμή πριν ο αισθητήρας δώσει κάποιο μη μηδενικό σήμα εξόδου. Αυτή η ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου, ονομάζεται *κατώφλι* του αισθητήρα. Το κατώφλι άλλοτε δίνεται ως απόλυτη τιμή και άλλοτε ως ποσοστό του εύρους εξόδου του αισθητήρα.

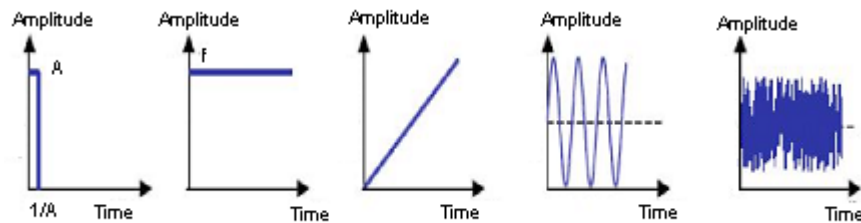
## **Διακριτική ικανότητα**

Ως *διακριτική ικανότητα* ενός αισθητήρα ορίζεται η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου, ώστε να προκληθεί μεταβολή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα.

## **2.3 Δυναμικά χαρακτηριστικά**

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση του σε ένα σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε

μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τα στατικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι λόγοι αυτής της διαφοροποίησης είναι ότι οι αισθητήρες περιλαμβάνουν στοιχεία που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ. α. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου (σχήμα 2.5).



**Σχήμα 2.5**

*Κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου*

**Πίνακας 2.1**  
*Επιθυμητά  
χαρακτηριστι  
κά αισθητήρα*

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Ιδανική τιμή</b>
Απόκριση	Γραμμική .
Αρχική τιμή εξόδου	Μηδέν.
Χρόνος απόκρισης	Μηδέν.
Εύρος συχνοτήτων	Άπειρο.
Χρόνος ως το 90 % της	Μηδέν.
Ένδειξη πλήρους κλίμακας	Βαθμονομημένη μέγιστη έξοδος.
Περιοχή λειτουργίας	Άπειρη.
Ευαισθησία	Υψηλή και σταθερή.
Διακριτική ικανότητα	Άπειρη.

Τα ιδανικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αισθητήρας αναγράφονται συνοπτικά στον πίνακα 2.1, σ'ένα όμως, πραγματικό αισθητήρα η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του διαφέρουν αρκετά. Οι αιτίες είναι τόσο τα κατασκευαστικά προβλήματα που προκύπτουν όσο και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του, επιπλέον, αν ο αισθητήρας συνοδεύεται από κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα τότε αυτό το κύκλωμα μπορεί επίσης να επιβάλλει περιορισμούς στη λειτουργία του.

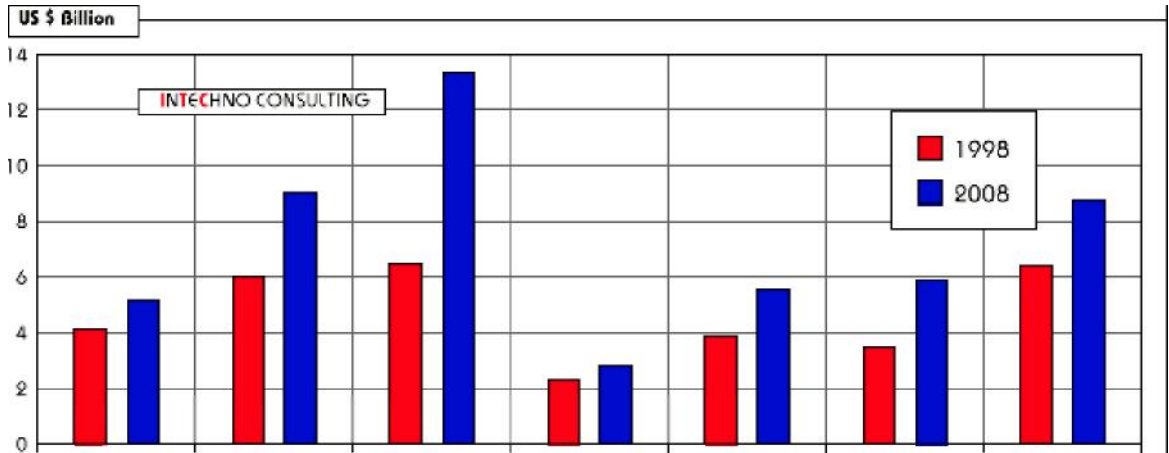
## 2.4 Πεδία Εφαρμογών Αισθητήρων

Οι αισθητήρες έχουν άπειρες εφαρμογές. Δεν υπάρχει συσκευή που να μην χρησιμοποιεί κάποιας μορφής αισθητήρα. Συνοπτικά ανάλογα με τον κλάδο που τους χρησιμοποιεί , οι εφαρμογές των αισθητήρων μπορούν κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **Διαγνωστική**  
ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης
- **Φαρμακευτική**  
ανίχνευση και έλεγχος φαρμάκων
- **Ιατρική**  
διαγνωστική
- **Βιομηχανία τροφίμων και αγροτική οικονομία**  
διαγνωστική τροφίμων
- **Βιοτεχνολογία**  
ψηφίδες DNA, ψηφίδες πρωτεϊνών, ψηφίδες κυττάρων
- **Χημεία**  
Ειδικοί αισθητήρες μεγέθους ολοκληρωμένου κυκλώματος ( lab-on-a-chip )
- **Τεχνολογία περιβάλλοντος**  
μετρήσεις περιβαλλοντολογικές του αέρα νερού αποβλήτων

- **Αυτοκινητοβιομηχανία**

Κατασκευή αυτοκινήτων από robot ,έλεγχος της ποιότητας των καυσίμων, ανάλυση αερίων, αερόσακοι



**Σχήμα 2.5**

*Παγκόσμια αγορά αισθητήρων*

Στο σχήμα 2.5 καταγράφεται η αύξηση πωλήσεων στην παγκόσμια αγορά αισθητήρων, για τους κυριότερους τομείς εφαρμογών, η οποία αναμένεται το 2008 σε σχέση με το 1998 . Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας αγοράς αισθητήρων για το διάστημα 1998-2008 υπολογίζεται περίπου 4.5%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

#### 3.1 Εισαγωγή

Τόσο από θεωρητική, όσο και από πρακτική σκοπιά, η σπουδαιότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι οι σιδηρομαγνήτες (κατ' οικονομία στην έννοια αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα σιδηρομαγνητικά υλικά). Οι εφαρμογές των υλικών αυτών καταλαμβάνουν ένα ευρύτατο τεχνολογικό φάσμα. Η χρησιμότητα των σιδηρομαγνητών πηγάζει από την υψηλή τους διαπερατότητα, που επιτρέπει την επίτευξη υψηλών τιμών μαγνητικής επαγωγής σε μέτρια μαγνητικά πεδία, την ικανότητά τους να παραμένουν μαγνητισμένα, και να δρουν, έτσι, ως πηγές μαγνητικού πεδίου, και από το γεγονός, ότι η ροπή στρέψης ενός μαγνητικού διπόλου παρουσία μαγνητικού πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Τα στοιχεία του περιοδικού συστήματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μαγνητών είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο και ορισμένες λανθανίδες (σπάνιες γαίες).

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία των σιδηρομαγνητών.

#### 3.2 Μεγέθη και μονάδες

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα σημαντικότερα μεγέθη, οι συμβολισμοί και οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης.





Μέγεθος	Συμβολισμός	SI & mksa	Παράγοντας μετατροπής	Gaussian & cgs emu
Μαγνητική επαγωγή	B	Tesla (T)	$10^4$	gauss (G)
Μαγνητική ροή	Φ	Weber (Wb)	$10^8$	maxwell (Mx)
Ένταση μαγνητικού πεδίου	H	A/m	$4\pi/10^3$	oested (Oe)
Μαγνήτιση	M	A/m	$10^3$	emu/cm <sup>3</sup>
Ειδική Μαγνήτιση	σ	A*m <sup>2</sup> /kg	1	emu/g
Μαγνητική ροπή	m	A*m <sup>2</sup>	$10^3$	emu
Μαγνητική επιδεκτικότητα	χ	αδιάστατο	1/4π	αδιάστατο
Ειδική επιδεκτικότητα	Χ <sub>ρ</sub>	m <sup>3</sup> /kg	$10^3/4\pi$	cm <sup>3</sup> /g
Μοριακή επιδεκτικότητα	χ <sub>mol</sub>	m <sup>3</sup> /mol	$10^6/4\pi$	cm <sup>3</sup> /mol
Μαγνητική διαπερατότητα	μ	H/m	$10^7/4\pi$	αδιάστατο
Σχετική διαπερατότητα	μ <sub>r</sub>	Αδιάστατο		δεν ορίζεται

**Πίνακας 3.1**  
*Μεγέθη, συμβολισμοί και μονάδες μέτρησης.*

- Στο Διεθνές Σύστημα (SI) όπως επίσης και στο Ορθολογισμένο Συστήμα MKSA ( Meter Kilogram Second Ampere) η μαγνητική επαγωγή συμβολίζεται με B και η μονάδα της είναι το Tesla. Η σχέση της Μαγνητικής Επαγωγής B σχετίζεται με την Μαγνητική Ροή M και την Μαγνήτιση H με την σχέση  $B=\mu_0(H+M)$ , όπου  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

- Στο Γκαουσιανό σύστημα (Gaussian) όπως επίσης και στο σύστημα CGS emu ( Centimetre Gram Second electro - magnetic units) η Μαγνητική Επαγωγή B μετριέται σε Gauss και η σχέση της με τις ποσότητες B και H δίνεται από την σχέση  $B=H+4\pi M$ , ενώ η  $\mu_0=1$ .

- Η μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο γίνεται με πολλαπλασιασμό ή διαίρεση των μονάδων με το συντελεστή μετατροπής που δίνεται στον πίνακα 3.1. Π.χ. Για να βρούμε με ποσά Gauss ισούται ένα Tesla από τον πίνακα 3.1 βλέπουμε ότι ο συντελεστής μετατροπής είναι  $10^4$  ή 10000 και επομένως  $1\text{Tesla}= 10000\text{Gauss}$ .

- Οι μαθηματικοί τύποι που συνδέουν τις κύριες Μονάδες που αναφέρονται σε μαγνητικά μεγέθη όπως **Tesla (T)**, **Gauss (G)** , **Weber (W)** **Μαγνήτιση (M)** με τις θεμελιώδεις μονάδες των Συστημάτων δίδονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$T \equiv \frac{J}{A \cdot m^2} \equiv \frac{kg}{A \cdot s^2}$$

$$Wb \equiv \frac{J}{A} \equiv \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$$

$$\frac{H}{m} \equiv \frac{N}{A^2} \equiv \frac{kg \cdot m}{A^2 \cdot s^2}$$

$$G \equiv Oe \equiv \frac{g^{1/2}}{cm^{1/2} \cdot s}$$

$$Mx \equiv G \cdot cm^2$$

$$emu \equiv g \cdot cm^3$$

(Το *emu* δεν αποτελεί μονάδα, αλλά συντομογραφία του  $G \cdot cm^3$ )

- 1  $\mu B = 9.274015 \cdot 10^{-24} A \cdot m^2$  (μαγνητόνη Bohr)
- 1  $\mu N = 5.050787 \cdot 10^{-27} A \cdot m^2$  (πυρηνική μαγνητόνη)
- 1 φο =  $2.067835 \cdot 10^{-15} Wb$  (quantum ροής)

### 3.3 Μαγνητικό πεδίο [3]

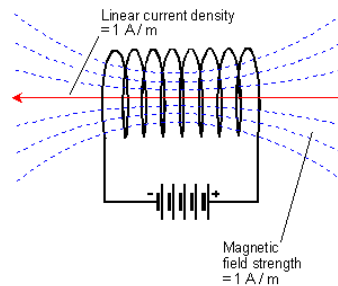
Μία από τις θεμελιώδεις ιδέες του μαγνητισμού είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν σε μία περιοχή του χώρου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο αυτό σημαίνει, ότι στην περιοχή αυτή υπάρχει μία μεταβολή της ενέργειας. Αυτή η ενέργεια, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δυνάμεων. Οι δυνάμεις, που εμφανίζονται ανιχνεύονται με διάφορους τρόπους όπως π.χ. από την επιτάχυνση ενός ηλεκτρικού φορτίου, που κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, επίσης από την δύναμη, που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, ή από την στρέψη ενός μαγνητικού διπόλου, όπως ο ραβδοειδής μαγνήτης ή ακόμη και από των αναπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων σε ορισμένους τύπους ατόμων. Η απόκλιση της βελόνας μίας πυξίδας, που είναι ένα παράδειγμα μαγνητικού διπόλου, είναι ίσως η περισσότερο γνωστή ιδιότητα ενός μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητικό πεδίο είναι πάντα αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων. Για παράδειγμα, ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει σε αγωγό δημιουργεί γύρω

του μαγνητικό πεδίο, όπως ανακάλυψε ο Oersted το 1819. Μαγνητικό πεδίο παράγεται και από έναν μόνιμο μαγνήτη. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχουν συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά η τροχιακή και περιστροφική κίνηση των ηλεκτρονίων, τα λεγόμενα ρεύματα Ampère, στο εσωτερικό του μόνιμου μαγνήτη, που οδηγούν στη μαγνήτιση του υλικού στο εσωτερικό του, και στην δημιουργία μαγνητικού πεδίου στον εξωτερικό χώρο. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις τόσο σε ρευματοφόρους αγωγούς, όσο, και σε μόνιμους μαγνήτες.

### Ένταση μαγνητικού πεδίου $H$

Η ένταση του Μαγνητικού πεδίου  $H$  μετράτε σε  $A/m$  και υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να οριστεί πρακτικά η μονάδα του. Ένας τρόπος που μπορεί να μετρηθεί πρακτικά το  $H$  είναι ο ακόλουθος, θεωρούμε ένα πηνίο διαμέτρου 1 μέτρου που αποτελείται από  $n$  αριθμό σπειρών. Το πηνίο αυτό διαρέεται από ρεύμα εντάσεως  $1/n$  A. Η έντασης  $H$  του πεδίου που δημιουργείται στο κέντρο του πηνίου ορίζεται σαν την μονάδα έντασης μαγνητικού πεδίου. Στην εικόνα φαίνεται παραστατικά ο παραπάνω ορισμός.



**Σχήμα 3.1**

*Πρακτικός ορισμός της Μονάδας έντασης Μαγνητικού πεδίου*

## 3.4 Μαγνητική επαγωγή

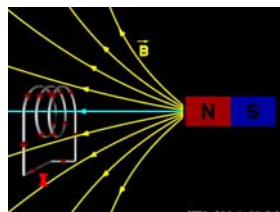
Όταν ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται σε ένα μέσο από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, η απόκριση του μέσου είναι η μαγνητική του επαγωγή  $B$ . Η μαγνητική επαγωγή

ορισμένες φορές αναφέρεται και σαν πυκνότητα μαγνητικής ροής. Όταν στον κενό χώρο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται η μαγνητική ροή  $\Phi$ . Η μαγνητική ροή δίνεται σε μονάδες weber (Wb) και ο ρυθμός μεταβολής της μπορεί να μετρηθεί, καθώς παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σε ένα κλειστό κύκλωμα αγωγού μέσα από τον οποίο περνά η μαγνητική ροή. Όμως, το ποσό μαγνητικής ροής, που παράγεται από μία δοσμένη ένταση μαγνητικού πεδίου  $H$ , εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου και μεταβάλλεται από μέσο σε μέσο. Η μαγνητική επαγωγή μπορεί να ορισθεί σαν η μαγνητική ροή 1 Wb που περνά από επιφάνεια εμβαδού  $1 \text{ m}^2$ . Καθώς η μαγνητική ροή εξαρτάται από το μέσο, η μαγνητική επαγωγή είναι κι αυτή ιδιότητα του μέσου, σε αντίθεση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, που είναι μία ιδιότητα του χώρου.

Συνηθέστερα, η μαγνητική επαγωγή ορίζεται με όρους δύναμης, που ασκείται σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο  $q$  ή σε ηλεκτρικό ρεύμα και μετράται σε μονάδες Tesla (T), κατ' αναλογία προς τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που ορίζεται με όρους δύναμης, που ασκείται σε στατικά ηλεκτρικά φορτία. Εάν ένα ηλεκτρικό φορτίο  $q$  κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα  $v$  η δύναμη  $F$ , που ασκείται στο φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

Η παραπάνω εξίσωση ορίζει το Tesla (T), τη μονάδα της μαγνητικής επαγωγής. Ένα Tesla είναι η μαγνητική επαγωγή σε ένα σημείο του χώρου, όπου ασκείται δύναμη 1 N σε ηλεκτρικό φορτίο 1 Cb, που κινείται με ταχύτητα 1 m/s κάθετα προς την μαγνητική επαγωγή. Στον Πίνακα 3.1 δίνονται ορισμένες τιμές μαγνητικής επαγωγής για ορισμένα υλικά .

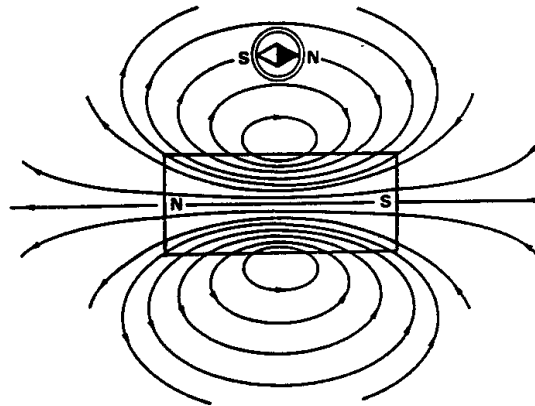


Πηγή	B [T]
Μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια της γης	$5 \times 10^{-5}$
Μόνιμοι μαγνήτες	$10^{-2} - 1$
Ηλεκτρομαγνήτες με πυρήνα σιδήρου	μέχρι 3
Υπεραγώγιμοι μαγνήτες	μέχρι 20

### Πίνακας 3.1

Τιμές μαγνητικής επαγωγής για διάφορα υλικά .

Η μαγνητική επαγωγή B μπορεί να περιγραφεί σχηματικά από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, που είναι πάντα κλειστές διαδρομές, όπως φαίνεται στο Σχ.3.2.



### Σχέδιο 3.2

Γραμμές του μαγνητικού πεδίου

Σε πολλά μέσα, και στο κενό, η μαγνητική επαγωγή B είναι μία γραμμική συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου H. Ειδικότερα, στον κενό χώρο ισχύει:

$$B = \mu_o \cdot H = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^7 \cdot H \quad (3)$$

όπου  $\mu_o$  είναι η διαπερατότητα του κενού, η οποία είναι παγκόσμια σταθερά και

μετράται σε H/m.

### 3.5 Μαγνητική επαγωγή και ένταση μαγνητικού πεδίου σε υλικό

Όταν ένα υλικό τοποθετείται μέσα σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_0$ , τρεις τύποι μαγνητικής συμπεριφοράς είναι δυνατοί: διαμαγνητισμός, παραμαγνητισμός και σιδηρομαγνητισμός. Μέσα σε ένα διαμαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_{int}$ , είναι λίγο μικρότερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_0$ . Μέσα σε ένα παραμαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_{int}$ , είναι λίγο μεγαλύτερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_0$ , ενώ μέσα σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό η εσωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_{int}$ , είναι πολύ μεγαλύτερη από την εξωτερική μαγνητική επαγωγή,  $B_0$ . Με άλλα λόγια, οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής αραιώνουν από ένα διαμαγνητικό υλικό, συγκεντρώνονται από ένα παραμαγνητικό υλικό, και συγκεντρώνονται ισχυρά από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως φαίνεται στο Σχ. 3..

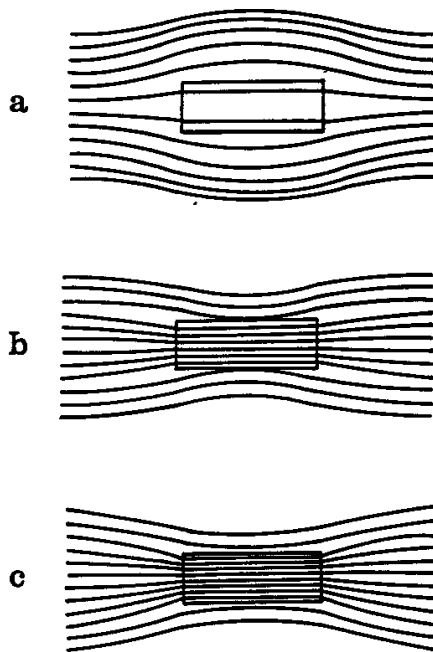
2Μετρήσεις σε διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά δείχνουν, ότι σε μικρά εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία η μαγνητική επαγωγή  $B_{int}$  είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$

$$B_{int} = \mu_r \cdot \mu_o \cdot H$$

όπου,  $\mu_r$  είναι η σχετική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού, που είναι αδιάστατο μέγεθος, σε δεδομένη θερμοκρασία και πίεση. Στα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά η ένταση του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H_{int}$  δεν διαφέρει ουσιαστικά από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$ . Η διαπερατότητα ενός μαγνητικού υλικού,  $\mu$ , ορίζεται από την σχέση:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$$

και εφόσον η  $\mu_r$  είναι αδιάστατο μέγεθος η  $\mu$  εκφράζεται στις ίδιες μονάδες που εκφράζεται και η  $\mu_0$  δηλαδή σε  $H/m$  ή  $A/m^2$  . Η σχετική διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της ευκολίας με την οποία οι δυναμικές γραμμές διαπερνούν ένα υλικό και είναι  $< 1$  για τα διαμαγνητικά υλικά και  $> 1$  για τα παραμαγνητικά. Στην περίπτωση των σιδηρομαγνητικών υλικών, η σχέση ανάμεσα στο  $B_{int}$  και στο  $H_{int}$  δεν είναι τόσο απλή, διότι γενικά εξαρτάται από την μαγνητική προϊστορία του δείγματος. Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό η ένταση του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H_{int}$  μπορεί να διαφέρει ουσιαστικά από την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , λόγω του πεδίου απομαγνήτισης, όπως αναφέρεται στα επόμενα.



**Σχέδιο 3.2**

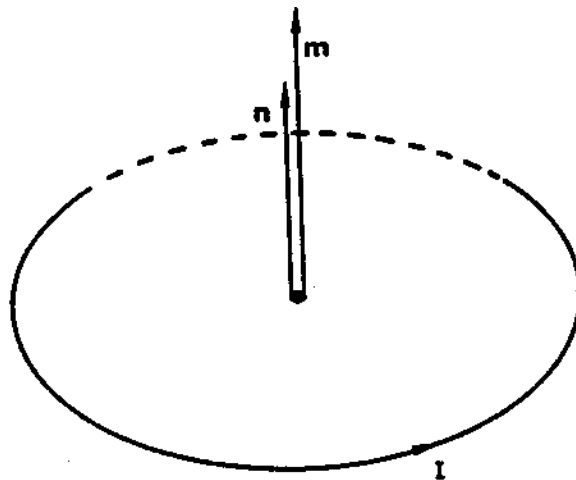
*Δυναμικές γραμμές μαγνητικής επαγωγής σε διαμαγνητικό (a), παραμαγνητικό(b) και σιδηρομαγνητικό (c) υλικό.*

### **3.6 Μαγνητική ροπή [4]**

Ένας επίπεδος βρόχος ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέετε από ρεύμα  $I$  με εμβαδόν  $a$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4 έχει μαγνητική διπολική ροπή  $M$  που δίνεται από τη σχέση:

$$M = I \cdot a \cdot n$$

όπου  $n$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα προς το επίπεδο του βρόχου. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής διπολικής ροπής είναι το  $\text{Am}^2$ .



**Σχέδιο. 3.4**

*Μαγνητική διπολική ροπή βρόχου ρεύματος εμβαδού  $a$*

Όταν ένας βρόγχος ρεύματος ή ένας ραβδοειδής μαγνήτης τοποθετηθεί μέσα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο,  $B_0$ , τείνει να προσανατολίσει την μαγνητική διπολική ροπή  $m$  παράλληλα προς τη μαγνητική επαγωγή μέσω της δράσης μίας ροπής στρέψης,  $T$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$T = m \times B_0$$

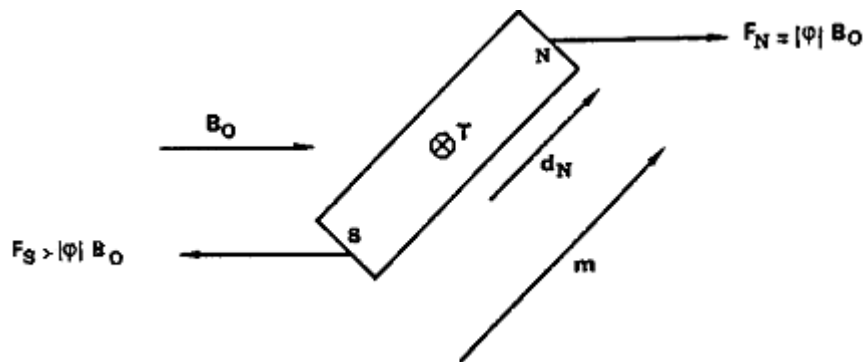


Η μαγνητική διπολική ροπή ενός ραβδοειδούς μαγνήτη αναλύεται ως ακολούθως, εάν οι πόλοι του μαγνήτη μπορούσαν να ξεχωριστούν θα αισθάνονταν μία δύναμη  $F_N$  και  $F_S$ , αντίστοιχα, όταν ο μαγνήτης τοποθετηθεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $B_0$ . Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες προς την εξωτερική μαγνητική επαγωγή έτσι ώστε:

$$\vec{F} = \pm |\phi| \vec{B}_0$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $\phi$  εκφράζει την ισχύ του μαγνητικού πόλου και είναι θετικός για τον βόρειο πόλο και αρνητικός για τον νότιο πόλο, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Η μονάδα του  $\phi$  θα είναι τότε N/T ή Am. Η μαγνητική διπολική ροπή  $m$  του μαγνήτη θα ορίζεται σαν:

$$\vec{m} = 2 |\phi| \vec{d}_N$$



**Σχέδιο 3.5**

*Μαγνητική διπολική ροπή ραβδοειδούς μαγνήτη μέσα σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή.*

Όπου  $d_N$  είναι το διάνυσμα, που ξεκινά από το κέντρο του μαγνήτη και καταλήγει στο βόρειο πόλο.

Υπό την επίδραση της ροπής στρέψης, το επίπεδο του βρόχου ρεύματος στρέφεται, έως ότου γίνει κάθετο προς τις δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής. Παρόμοια, ο ραβδοειδής μαγνήτης θα στραφεί, έως ότου γίνει παράλληλος προς τις δυναμικές γραμμές της μαγνητικής επαγωγής. Για έναν τέτοιο προσανατολισμό, η μαγνητική ενέργεια είτε του βρόχου είτε του μαγνήτη, που ορίζεται σαν:

$$E_p = \vec{m} \cdot \vec{B}_0$$

ελαχιστοποιείται και η μαγνητική ροή, που περνά από το βρόχο ή από τη διατομή του μαγνήτη μεγιστοποιείται.

### 3.7 Μαγνήτιση

Ως μαγνήτιση  $M$  ορίζεται η μαγνητική ροπή στη μονάδα του όγκου ενός υλικού:

$$\vec{M} = n\vec{m}$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των μαγνητικών διπολικών ροπών  $m$  ανά κυβικό μέτρο. Η μονάδα της μαγνήτισης θα είναι τότε A/m, όπως και της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Εάν ένα υλικό τοποθετηθεί μέσα σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή  $B_0$  ή σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$  η εσωτερική μαγνητική επαγωγή στο υλικό,  $B_{int}$ , θα δίνεται από τη σχέση:

$$B_{int} = B_0 + \mu_0 \cdot M = \mu_0 \cdot (H + M)$$

Στη σχέση αυτή δεν λαμβάνονται υπ' όψιν φαινόμενα απομαγνήτισης κι έτσι το  $H_{int}$  δίνεται προσεγγιστικά από το  $H$  . Στα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά η σχέση που ισχύει για την μαγνήτιση είναι :

$$M=(\mu_r -1)\cdot H$$

### 3.8 Μαγνητική επιδεκτικότητα [1α]

Η παραπάνω εξίσωση οδηγεί στον ορισμό της σταθεράς αναλογίας,  $\mu_r-1$ , η οποία ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα  $x$  και ισχυει :

$$M=x\cdot H=(\mu_r -1)\cdot H$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα, όπως ορίζεται παραπάνω είναι αδιάστατο μέγεθος, ονομάζεται δε και επιδεκτικότητα όγκου. Είναι ένα μέτρο της ευκολίας, με την οποία ένα δεδομένο υλικό μαγνητίζεται. Για ένα διαμαγνητικό υλικό το  $x$  είναι αρνητικό και τάξης μεγέθους  $10^{-6}$ . Αυτό δείχνει, ότι η μαγνήτιση σε ένα τέτοιο υλικό είναι αντιπαράλληλη προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Αρνητική επιδεκτικότητα σημαίνει, ότι  $\mu_r < 1$  και ότι η εσωτερική μαγνητική επαγωγή είναι μικρότερη από την εφαρμοζόμενη εξωτερική μαγνητική επαγωγή. Για ένα παραμαγνητικό υλικό το  $x$  είναι θετικό με τάξη μεγέθους  $10^{-4}$ . Αυτό σημαίνει, ότι είναι σχετικά εύκολο να μαγνητισθεί ένα τέτοιο υλικό και ότι η εσωτερική μαγνητική επαγωγή είναι μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη εξωτερική μαγνητική επαγωγή. Άλλες εκφράσεις, που χρησιμοποιούνται για την μαγνητική επιδεκτικότητα είναι η επιδεκτικότητα μάζας,  $x_m$ , και η μοριακή επιδεκτικότητα,  $x_m$ , οι οποίες σε μονάδες SI σχετίζονται με την επιδεκτικότητα όγκου με τις σχέσεις:

$$x_m = \frac{x}{\rho}$$

$$\chi_m = \frac{M\chi}{\rho}$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα σε  $\text{kg/m}^3$  και  $M$  η μοριακή μάζα σε  $\text{kg/mol}$ . Οι μονάδες του  $\chi_m$  και  $\chi_m$  θα είναι, αντίστοιχα,  $\text{m}^3/\text{kg}$  και  $\text{m}^3/\text{mol}$ .

Η εξάρτηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας από τη θερμοκρασία ακολουθεί το νόμο του Curie:

$$X = C / T$$

όπου  $C$  είναι η σταθερά Curie και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία. Η ατομική θεωρία του μαγνητισμού υποδεικνύει, ότι η μοριακή επιδεκτικότητα και η ατομική μαγνητική διπολική ροπή συνδέονται από τη σχέση:

$$X_M = \mu_0 N_A m^2 / (3kT)$$

όπου  $N_A$  ο αριθμός του Avogadro,  $6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,  $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  και  $m$  η μαγνητική ροπή σε  $\text{Am}^2$ . Από τις παραπάνω δύο εξισώσεις προκύπτει ότι η σταθερά Curie δίνεται από τη σχέση:

$$C = \mu_0 N_A m^2 / (3k)$$

### 3.9 Σημαντικότερες Ιδιότητες των Σιδηρομαγνητών [1α]

## Διαπερατότητα

Η υψηλή διαπερατότητα είναι η πιο σημαντική ιδιότητα των σιδηρομαγνητών. Η διαπερατότητα ενός σιδηρομαγνητικού υλικού δεν είναι σταθερή συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου, όπως συμβαίνει στα παραμαγνητικά υλικά. Για να περιγράψει κανείς τις ιδιότητες ενός συγκεκριμένου σιδηρομαγνήτη είναι απαραίτητο να μετρηθεί η μαγνητική επαγωγή  $B$  σαν συνάρτηση του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου  $H$  σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του  $H$ , δηλαδή να παραχθεί η καμπύλη  $B$  ως προς  $H$ , γνωστή ως *βρόχος υστέρησης*. Στους σιδηρομαγνήτες η αρχική σχετική διαπερατότητα παίρνει τιμές από 10 έως  $10^5$ . Οι υψηλότερες τιμές συναντώνται σε ειδικά κράματα που περιλαμβάνουν νικέλιο και σίδηρο

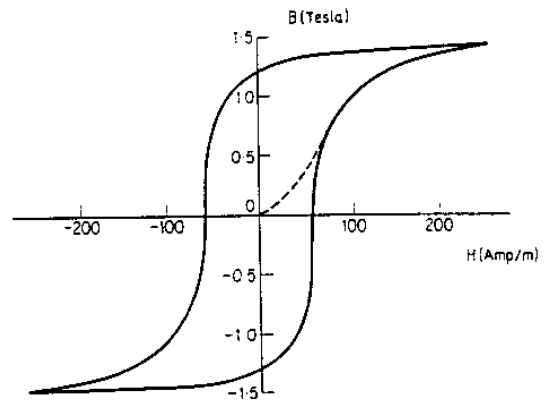
## Διατήρηση της μαγνήτισης

Είναι γνωστό, ότι οι σιδηρομαγνήτες μπορούν να μαγνητιστούν. Αυτό σημαίνει, πως, αφού εκτεθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο η μαγνήτισή τους διατηρείται ακόμη και όταν απομακρυνθεί το μαγνητικό πεδίο. Η διατήρηση της μαγνήτισης διακρίνει τους σιδηρομαγνήτες από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία αν και εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δεν παραμένουν μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνση του πεδίου.

## Το φαινόμενο της υστέρησης

Ο συνηθέστερος τρόπος να παρουσιασθούν οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες ενός σιδηρομαγνητικού υλικού είναι η σχεδίαση καμπύλης της μαγνητικής επαγωγής  $B$  για διάφορα πεδία  $H$ , που ονομάζεται *βρόχος υστέρησης*. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν καμπύλες μαγνήτισης  $M$  ως προς  $H$ , οι οποίες, όμως, περιέχουν την ίδια πληροφορία, καθώς  $B_0 = \mu_0 (H+M)$ . Το φαινόμενο της υστέρησης σε ένα κομμάτι σιδήρου παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Warburg το 1881.

**Σχέδιο 3.6**  
Τυπικός βρόχος υστέρησης ενός  
σιδηρομαγνητικού υλικού.



Ο όρος *υστέρηση* εισήχθη από τον Ewing ο οποίος πρώτος μελέτησε συστηματικά το φαινόμενο. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης δίνεται στο Σχ. 3.6 Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών, που είναι χρήσιμες στις διάφορες εφαρμογές, καθορίζονται ουσιαστικά από τον βρόχο υστέρησής τους. Έτσι, υλικά κατάλληλα για μετασχηματιστές πρέπει να έχουν υψηλή διαπερατότητα και μικρές απώλειες υστέρησης λόγω της απαίτησης για αποδοτική μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υλικά για ηλεκτρομαγνήτες πρέπει να έχουν μικρή παραμένουσα μαγνήτιση και μικρό συνεκτικό πεδίο, ώστε να εύκολα η μαγνήτισή τους να μηδενίζεται, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Οι μόνιμοι μαγνήτες πρέπει να έχουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση και υψηλό συνεκτικό πεδίο, ώστε να διατηρούν τη μαγνήτισή τους όσο περισσότερο γίνεται.

### Μαγνήτιση κόρου

Από το βρόχο υστέρησης είναι εμφανές, ότι ένα σιδηρομαγνητικό υλικό στην αρχική του κατάσταση δεν είναι μαγνητισμένο. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$  προκαλεί την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής προς την διεύθυνση του πεδίου. Μετά από μία τιμή του  $H$  η μαγνήτιση φθάνει στον κόρο και παίρνει μία τιμή  $M_0$ . Στην κατάσταση αυτή όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στο υλικό είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Η μαγνήτιση κόρου  $M_0$  εξαρτάται μόνον από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής ροπής  $m$  και τον αριθμό των ατόμων στη μονάδα του όγκου  $n$ :

$$\vec{M}_0 = n\vec{m}$$

Με την έννοια αυτή το  $M_0$  εξαρτάται μόνον από το υλικό και όχι από τη μικροδομή του. Ορισμένες τυπικές τιμές μαγνήτισης κόρου για διαφορετικά υλικά δίνονται στον Πίνακα 3.2

<b>Υλικό</b>	<b>(<math>10^6</math> A/m)</b>
Σίδηρος	1,71
Κοβάλτιο	1,42
Νικέλιο	0,48
78 Permalloy (78%Ni, 22%Fe)	0,86
Supermalloy (80% Ni, 15%Fe, 5%Mo)	0,63
Metglas 2605 ( $Fe_{80}B_{20}$ )	1,27
Metglas 2615 ( $Fe_{80}P_{16}C_3B_1$ )	1,36
Permendur (50% Co, 50% Fe)	1,91

### **Πίνακας 3.2**

*Μαγνήτιση κόρου διαφόρων Σιδηρομαγνητών*

#### **Παραμένουσα μαγνήτιση**

Αφού ένα υλικό μαγνητισθεί, όταν το πεδίο μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται αλλά διατηρεί μία θετική τιμή. Η τιμή αυτή ονομάζεται *παραμένουσα μαγνητική επαγωγή*  $B_r$  και η αντίστοιχη τιμή της μαγνήτισης παραμένουσα μαγνήτιση  $M$ . Ορισμένοι συγγραφείς διακρίνουν την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και την παραμένουσα μαγνήτιση σε αυτές, που προκύπτουν όταν το υλικό μαγνητισθεί σε ένα αυθαίρετο επίπεδο και σε αυτή, που προκύπτει

αφού μαγνητισθεί στη μαγνήτιση κόρου.

### **Συνεκτικό πεδίο**

Η μαγνητική επαγωγή  $B$  μηδενίζεται όταν εφαρμοσθεί ένα αντίστροφο μαγνητικό πεδίο έντασης  $H_0$ , το οποίο ονομάζεται *συνεκτικό πεδίο*. Εξαρτάται ισχυρά από την κατάσταση του δείγματος και μπορεί να επηρεαστεί από εξωγενείς παράγοντες όπως, π.χ., η μικροδομή του υλικού, η θερμική επεξεργασία ή τέλος και η παραμόρφωση. Όπως και με την παραμένουσα μαγνήτιση, ορισμένοι συγγραφείς κάνουν τη διάκριση ανάμεσα στο συνεκτικό πεδίο, που προκύπτει αφού το υλικό μαγνητισθεί σε ένα αυθαίρετο επίπεδο και σε αυτό, που προκύπτει αφού μαγνητισθεί στη μαγνήτιση κόρου. Το συνεκτικό πεδίο, που προκύπτει από τον μηδενισμό της μαγνήτισης  $M$  δεν ταυτίζεται υποχρεωτικά με το συνεκτικό πεδίο, που προκύπτει από τον μηδενισμό της μαγνητικής επαγωγής  $B$ .

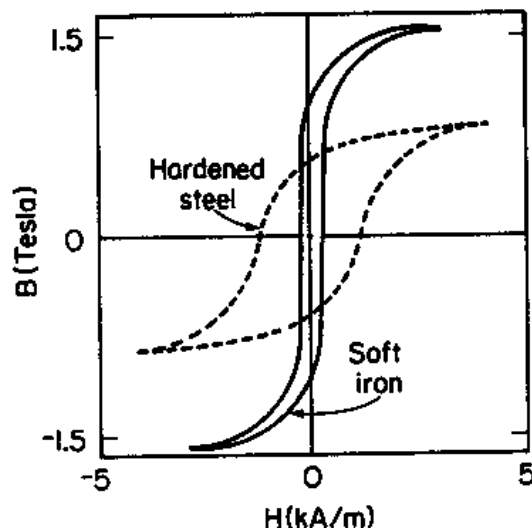
### **Θερμοκρασία Curie**

Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες γίνονται παραμαγνητικά. Η χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης από την σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική συμπεριφορά ονομάζεται *θερμοκρασία Curie*. Στη θερμοκρασία αυτή η διαπερατότητα μειώνεται απότομα και το συνεκτικό πεδίο και η παραμένουσα μαγνήτιση μηδενίζονται. Στις πρακτικές εφαρμογές, όταν το υλικό πρέπει να λειτουργήσει σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες είναι σημαντικό να εμφανίζει υψηλή θερμοκρασία Curie. Στον Πίνακα 3.3 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές θερμοκρασίας Curie για διάφορα μαγνητικά υλικά.

### **Πίνακας 3.3**



Υλικό	Θερμοκρασία Curie [°C]
Σίδηρος	770
Νικέλιο	358
Κοβάλτιο	1130
Γαδολίνιο	20
Terfenol	380-430
$Nd_2Fe_{14}B$	312
Alnico	850
$SmCo_5$	720
Σκληροί φερρίτες	400-700
$BaFe_{12}O_{19}$	450



**Σχέδιο 3.6**

Εξάρτηση του βρόχου υστέρησης του σιδήρου ή του χάλυβα από την σκληρότητα, που οφείλεται σε προσμίξεις μη μαγνητικών στοιχείων, όπως C, ή σε ψυχρή κατεργασία.

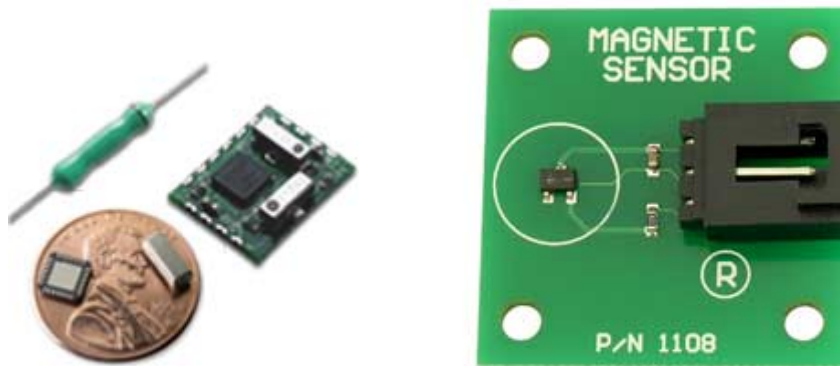
### 3.10 Κατάταξη των μαγνητικών υλικών

Μία απλή κατάταξη των μαγνητικών υλικών γίνεται, συνήθως, με βάση το συνεκτικό τους πεδίο. Το συνεκτικό πεδίο είναι εξωγενής ιδιότητα, που εξαρτάται σημαντικά από τη θερμική, μηχανική και χημική επεξεργασία του υλικού. Κάτι, βέβαια, που δεν ισχύει για άλλες μαγνητικές παραμέτρους, όπως είναι, π.χ., η μαγνήτιση κόρου. Στο παρελθόν παρατηρήθηκε, ότι ο σίδηρος και ορισμένοι χάλυβες, που παρουσίαζαν μηχανική σκληρότητα εμφάνιζαν, επίσης και υψηλό συνεκτικό πεδίο, ενώ άλλοι χάλυβες, που ήταν μηχανικά μαλακοί εμφάνιζαν χαμηλές τιμές συνεκτικού πεδίου. Για το λόγο αυτό οι όροι “σκληρό” και “μαλακό” χρησιμοποιήθηκαν για την διάκριση των μαγνητικών υλικών με βάση το συνεκτικό πεδίο. Γενικότερα, “σκληρά” μαγνητικά υλικά θεωρούνται εκείνα, που εμφανίζουν συνεκτικά πεδία μεγαλύτερα από 10 kA/m (125 Oe), ενώ “μαλακά” εκείνα με συνεκτικά πεδία μικρότερα από 1 kA/m (12.5 Oe).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

#### 4.1 Εισαγωγή



**Σχήμα 4.1**

*Διάφορα είδη μοντέρνων μαγνητικών αισθητήρων*

Τα εξαρτήματα που επιτρέπουν να «δει» κάποιος ένα μαγνητικό πεδίο ονομάζονται Μαγνητικοί αισθητήρες. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται μερικοί από αυτούς που έχουν πολύ μικρές γεωμετρικές διαστάσεις. Οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν άπειρες εφαρμογές. Γενικά μετρούν μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται σε διάφορα σημεία συστημάτων με τελικό σκοπό την καλή λειτουργία των συστημάτων. Οι υπολογιστές έχουν απεριόριστη μνήμη χάρη στη χρήση μαγνητικών αισθητήρων στους μαγνητικούς σκληρούς δίσκους και στις δισκέτες εγγραφής. Τα αεροπλάνα πετούν ασφαλέστερα εξαιτίας της υψηλής σταθερότητας των διακοπών χωρίς επαφή οι οποίοι έχουν μαγνητικούς

αισθητήρες. Οι βιομηχανίες έχουν υψηλή παραγωγικότητα εξαιτίας της υψηλής σταθερότητας και του χαμηλού κόστους των μαγνητικών αισθητήρων. Η λειτουργία των περισσότερων μαγνητικών αισθητήρων βασίζεται στην στενή σχέση μεταξύ των μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων. Στην εργασία αυτή θα περιγραφούν οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για να λειτουργίσουν οι μαγνητικοί αισθητήρες:

- 1) Search-coil magnetometer (1 pT - 1 kT)
- 2) Flux-gate magnetometer (10 pT - 10 mT)
- 3) Optically pumped magnetometer (1 pT - 100  $\mu$ T)
- 4) Nuclear-precession magnetometer (10 pT - 10 mT)
- 5) SQUID magnetometer (10 fT - 10 nT)
- 6) Hall-effect sensor (100  $\mu$ T - 100 T)
- 7) Magnetoresistive magnetometer (10 pT - 10 mT)
- 8) Magnetodiode (10  $\mu$ T - 1 T)
- 9) Magnetotransistor (1  $\mu$ T - 1 T)
- 10) Fiber-optic magnetometer (100 fT - 1 mT)
- 11) Magneto-optical sensor (100  $\mu$ T - 1 kT)

Ένα κοινό στοιχείο όλων των εφαρμογών είναι ότι οι μαγνητικοί αισθητήρες εξασφαλίζουν αξιοπιστία συγκρινόμενοι με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων. Οι μαγνητικοί αισθητήρες εκμεταλλεύονται μια ευρεία κλίμακα από αρχές της φυσικής και της χημείας. Έντεκα από τις πιο κοινές τεχνολογίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, στον οποίο συγκρίνονται μεταξύ τους κατά προσέγγιση με βάση την κλίμακα ευαισθησίας τους. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η κλίμακα ευαισθησίας για κάθε είδος αισθητήρα επηρεάζεται από τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά. Επιπλέον υπάρχουν και πολλοί άλλοι παράγοντες όπως, η απόκριση της συχνότητας, το μέγεθος και η ισχύς, που καθιστούν έναν αισθητήρα κατάλληλο για μία εφαρμογή.

Magnetic Sensor Technology	Detectable Field (gauss)				
	$10^{-10}$	$10^{-6}$	$10^{-0}$	$10^3$	$10^6$
1.Search-Coil Magnetometer					
2.Flux-Gate Magnetometer					
3.Optically Pumped Magnetometer					
4.Nuclear-Precession Magnetometer					
5.SQUID Magnetometer					
6.Hall-Effect Sensor					
7.Magnetoresistive Magnetometer					
8.Magnetodiode					
9.Magnetotransistor					
10.Fiber-Optic Magnetometer					
11.Magneto-Optical Sensor					

\*Note: IT- $10^4$ G- $10^9$ Y

### Πίνακας 4 .2

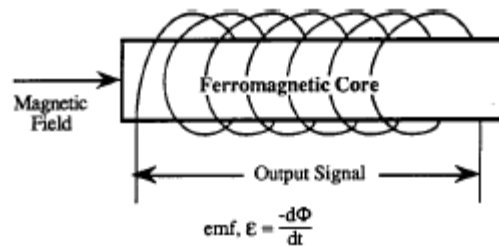
Πίνακας σύγκρισης μαγνητικών αισθητήρων.

## 4.2. Search-Coil Μαγνητόμετρο [5]

Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται το μαγνητόμετρο του τύπου Search-Coil, είναι ο νόμος του Faraday για την επαγωγή. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το κύριο εξάρτημα που χρησιμοποιείται στο Μαγνητόμετρο αυτού του τύπου. Όπως φαίνεται από το σχήμα αποτελείται από ένα πηνίο που συνήθως είναι τυλιγμένο πάνω από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που ονομάζεται πυρήνας και έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Ο πυρήνας χρησιμοποιείται για να αυξήσει την μαγνητική ροή στο πηνίο. Αν η μαγνητική ροή που υπάρχει γύρω από το πηνίο αλλάξει, τότε ένα ρεύμα διαρρέει την σπείρα και μία τάση μετριέται στα άκρα του πηνίου που είναι ανάλογη του μεγέθους της αλλαγής της ροής στο πηνίο.

*Μαγνητομετρο search-coil εμπορίου*





**Σχήμα 4.3**

*Βασικό εξάρτημα στο Μαγνητόμετρο τύπου Search Coil.*

Η ευαισθησία του μαγνητομέτρου τύπου Search-Coil εξαρτάται από:

- την διαπερατότητα του υλικού στον πυρήνα,
- τις γεωμετρικές διαστάσεις του πηνίου και
- το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής διαμέσου του

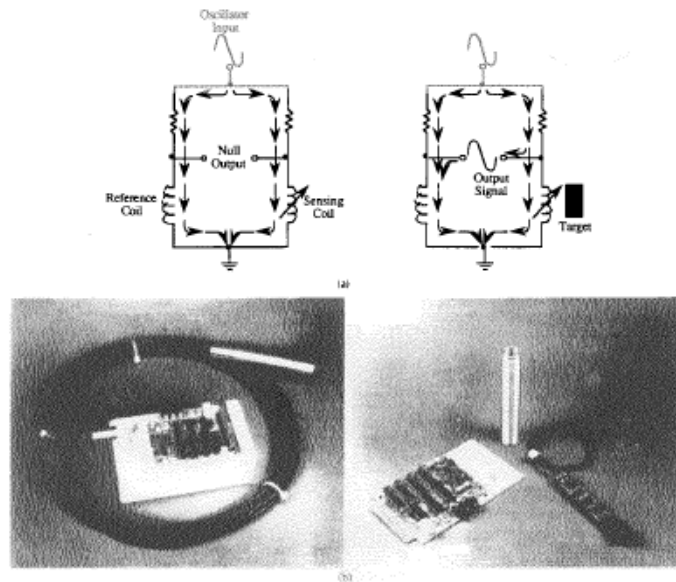
πηνίου.

Αισθητήρες αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύσουν ασθενή πεδία της τάξης 6-10 Gauss ενώ δεν υπάρχει άνω όριο στην κλίμακα ευαισθησίας τους. Αν το πεδίο που ανιχνεύουν είναι μεταβαλλόμενο χρονικά τότε τα όρια μεταβολής του πεδίου είναι από 1Hz έως 1MHz. Το άνω όριο καθορίζεται από την ακτίνα του πηνίου του αισθητήρα και της αντίστασης του. Τα πηνία των αισθητήρων έχουν διαστάσεις από 2 in έως 50 in.

Τα πηνία των αισθητήρων αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σαν ένα στοιχείο σε κυκλώματα τύπου γέφυρας Wheatstone . Υπάρχουν δύο είδη κυκλωμάτων.

- Το ένα χρησιμοποιεί μία επαγωγική γέφυρα ισορροπίας όπου μία επαγωγική αλλαγή στο ένα άκρο της γέφυρας (που είναι το πηνίο του αισθητήρα) παράγει μία μη ισορροπημένη (out-of balance) τάση στο κύκλωμα η οποία και ανιχνεύεται .

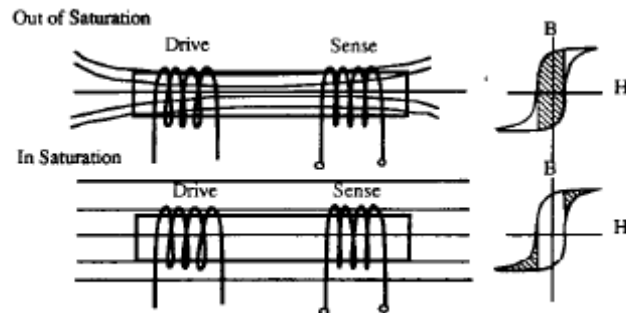
- Το δεύτερο είδος χρησιμοποιεί το πηνίο του αισθητήρα σαν το πηνίο ταλαντώσεως ενός ταλαντωτή. Η συχνότητα ταλάντωσης του ταλαντωτή μεταβάλλεται όταν στο πηνίο του αισθητήρα πλησιάσει κάποιο αντικείμενο ή πεδίο που αλλάζει την μαγνητική επαγωγή του πηνίου. Ένα παράδειγμα τέτοιου τύπου αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 4.4



**Σχήμα 4.4**

*Search-Coil μαγνητόμετρο που λειτουργεί σαν ενεργό πηνίο ανίχνευσης.*

### 4.3 Flux- Gate Μαγνητόμετρο [6]



## Σχήμα 4.5

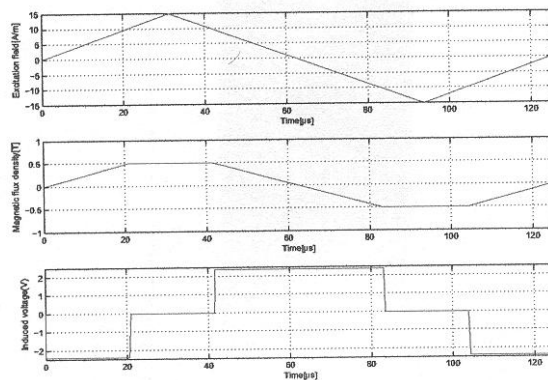
### Αρχή λειτουργίας του Flux Gate μαγνητόμετρο

Το μαγνητόμετρο Flux-Gate φαίνεται στο Σχ.4.5 .Αν και υπάρχουν διάφορες διαμορφώσεις αυτής της κατηγορίας Μαγνητομέτρων η αρχή λειτουργίας τους βασικά παραμένει η ίδια. Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι πλαισιωμένο από δύο πηνία. Στο ένα πηνίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα κατάλληλου συχνότητας που οδηγεί το σιδηρομαγνητικό υλικό σε κόρο. Στο δεύτερο πηνίο εμφανίζεται μια τάση η οποία εξαρτάται από το πεδίο που δημιουργεί το πρώτο πηνίο στο σιδηρομαγνητικό υλικό αλλά και στο υπάρχον εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Με κατάλληλη επεξεργασία της τάσεως εξόδου οι μεταβολές του εξωτερικού πεδίου μπορούν να μετρηθούν.

Στο σχήμα 4.6 είναι η γραφική παράσταση των παραμέτρων ενός μαγνητομέτρου του τύπου Flux gate . Η πρώτη καμπύλη είναι η μεταβολή του ρεύματος που οδηγεί το πηνίο, όπως φαίνεται από την καμπύλη το ρεύμα μεταβάλλεται από -15A έως +15A με ρυθμό μεταβολής με περίοδο 125μsec. Η δεύτερη καμπύλη δείχνει την μαγνητική ροή μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό όπως φαίνεται η μαγνητική ροή έρχεται σε κόρο. Στην τρίτη καμπύλη είναι η τάση που καταγράφεται στην έξοδο του δευτέρου πηνίου όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

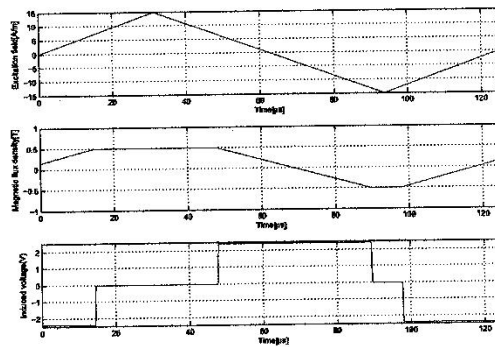
## Σχήμα 4.6

Γραφική παράσταση του ρεύματος, της μαγνητικής ροής του σιδηρομαγνητικού υλικού και η τάση εξόδου που μετράται στο δεύτερο πηνίο όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.





Στο σχήμα 4.7 είναι η γραφική παράσταση των παραμέτρων του ίδιου μαγνητομέτρου όπως το παραπάνω αλλά τώρα υπάρχει και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Όπως φαίνεται η έξοδος στην τάση που μετράται στην έξοδο του δευτέρου πηνίου είναι διαφορετική από αυτήν που υπάρχει στο σχήμα 4.6



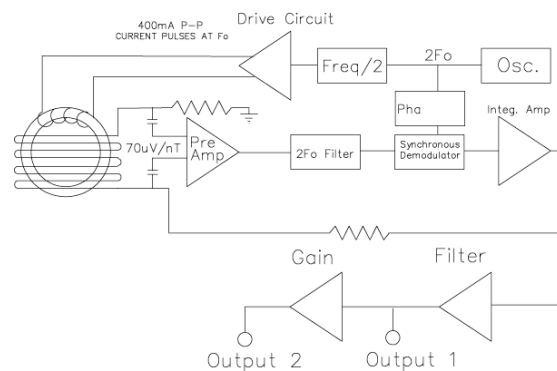
**Σχήμα 4.7**

Γραφική παράσταση του ρεύματος, της μαγνητικής ροής του σιδηρομαγνητικού υλικού και η τάση εξόδου που μετράται στο δεύτερο πηνίο όταν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Στο σχήμα 4.8 φαίνεται το χονδρικό διάγραμμα ενός μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate που χρησιμοποιεί σαν το σιδηρομαγνητικό υλικό ένα τοροειδή πυρήνα .

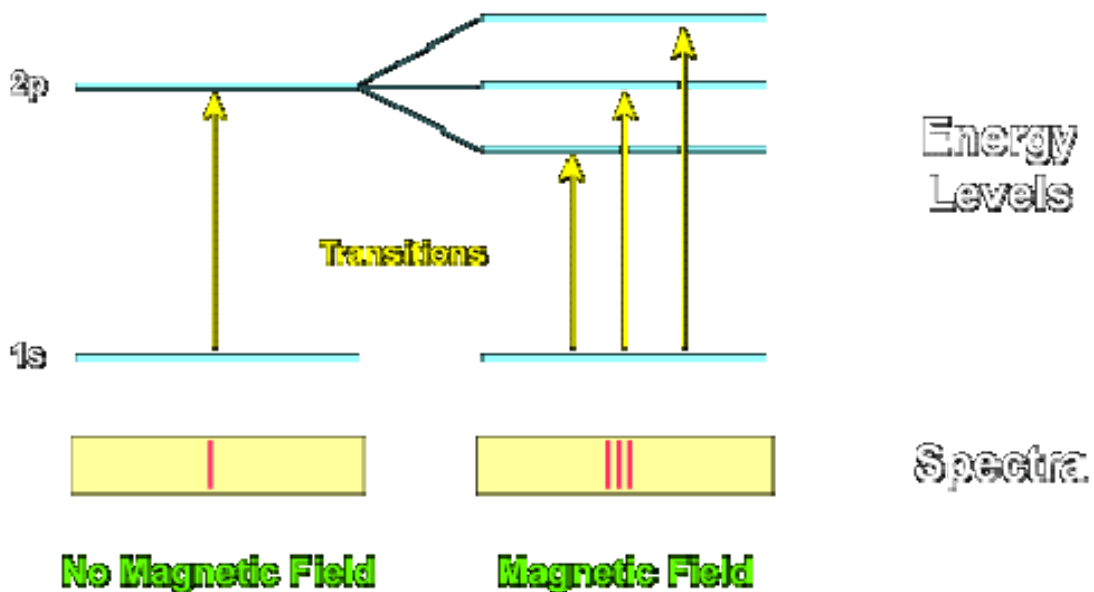
**Σχήμα 4.8**

Μαγνητόμετρο Flux Gate  
τοροειδούς πυρήνα και μικρού βρόγχου  
υστέρησης.



#### 4.4 Optically Pumped Μαγνητόμετρο [7]

Το Optically Pumped μαγνητόμετρο βασίζεται στο φαινόμενο Zeeman το οποίο παρατήρησε το 1896 ο γερμανός φυσικός Peter Zeeman. Στο σχήμα 4.9 φαίνεται μια γραφική απεικόνιση του φαινομένου Zeeman.

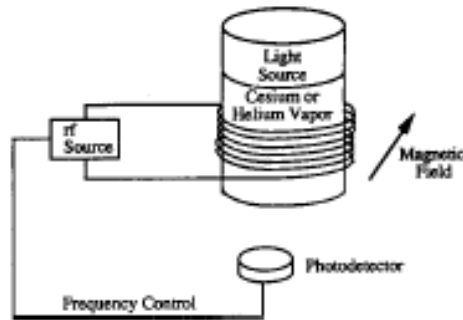


**Σχήμα 4.9**

*Γραφική απεικόνιση του φαινομένου Zeeman.*

Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 4.9 φαίνονται παραστατικά οι στοιβάδες ενός ατόμου στο οποίο παρατηρείται το φαινόμενο Zeeman. Όπως φαίνεται όταν το άτομο βρίσκεται σε περιβάλλον που δεν υπάρχει Μαγνητικό πεδίο τότε αν το άτομο διεγερθεί με κάποιο τρόπο, τα ηλεκτρόνια θα μεταφερθούν στην δεύτερη Δημήτριος Ν. Μαυροκουκουλάκης

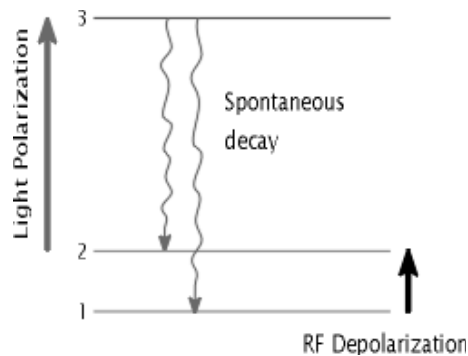
διαθέσιμη στοιβάδα. Αντίθετα αν το άτομο βρίσκεται υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου τότε η ανώτερη στοιβάδα διαιρείται σε περισσότερες στοιβάδες. Τα Μαγνητόμετρα αυτού του τύπου ονομάζονται *Optically pumped magnetometers* και το βασικό υλικό που χρησιμοποιούν είναι αλκαλικά μέταλλα από την πρώτη στήλη του περιοδικού συστήματος όπως το καίσιο το potassium.



**Σχήμα 4.10**

*Μαγνητόμετρο που βασίζεται στο φαινόμενο Zeeman*

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται σχηματικά ένα Μαγνητόμετρο που βασίζεται στο φαινόμενο Zeeman. Όπως φαίνεται αποτελείται από μια κάψουλα που περιέχει καίσιο σε αέρια μορφή . Μια πηγή φωτός φωτίζει την κάψουλα με το καίσιο. Μια πηγή RF μπορεί να επάγει ενέργεια στην κάψουλα που περιέχει το καίσιο.



**Σχήμα 4.11**

*Γραφική απεικόνιση της κατάστασης των ηλεκτρονίων σθένους του καιτίου  
σ ένα μαγνητόμετρο που βασίζεται στο φαινόμενο Zeeman*

Με την βοήθεια του σχήματος 4.11 θα εξηγηθεί η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους των μαγνητομέτρων. Φως ειδικής συχνότητας διεγείρει το άτομο και ηλεκτρόνια από την κατώτερη στοιβάδα (2) μεταφέρονται στην ανώτερη ενεργειακή στοιβάδα (3). Αυτά τα ηλεκτρόνια άμεσα μεταπίπτουν σε κατώτερη ενεργειακή στοιβάδα (1) . Χρησιμοποιώντας RF ενέργεια μπορούμε να μεταφέρουμε τα ηλεκτρόνια στην αρχική τους στοιβάδα (2). Η RF ενέργεια που απαιτείται εξαρτάται από το υπάρχον Μαγνητικό πεδίο.

Το Optically Pumped μαγνητόμετρο μετρά το ολικό μαγνητικό πεδίο, όποιος και αν είναι ο προσανατολισμός του, αντίθετα με τα περισσότερα μαγνητόμετρα, που μετρούν μόνο τη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου η οποία βρίσκεται κατά μήκος του ευαίσθητου άξονα. Η ευαισθησία και η δυναμική εμβέλεια ενός Optically Pumped μαγνητόμετρου όπως και τα περισσότερα μαγνητόμετρα καθορίζονται από τα εξωτερικά ηλεκτρονικά.

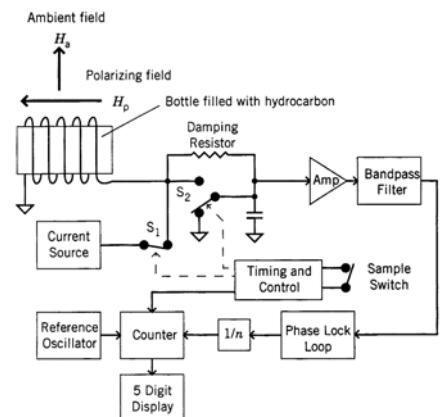
Τυπικές ευαισθησίες για το καίσιο και το ήλιο, το οποίο μερικές φορές χρησιμοποιείται αντί για το καίσιο, είναι 700kHz/G και 2.8MHz/G αντίστοιχα. Αυτό ερμηνεύεται στη κλίμακα ευαισθησίας από 1 έως 10G. Αυτός ο αισθητήρας είναι σχετικά μεγάλος και έχει υψηλή κατανάλωση ισχύος.

## 4.5 Nuclear precession Μαγνητόμετρο [8]

**Σχήμα 4.12**

*Τυπικό διάγραμμα μαγνητομέτρου του τύπου  
Nuclear*

Στο σχήμα 4.12 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα

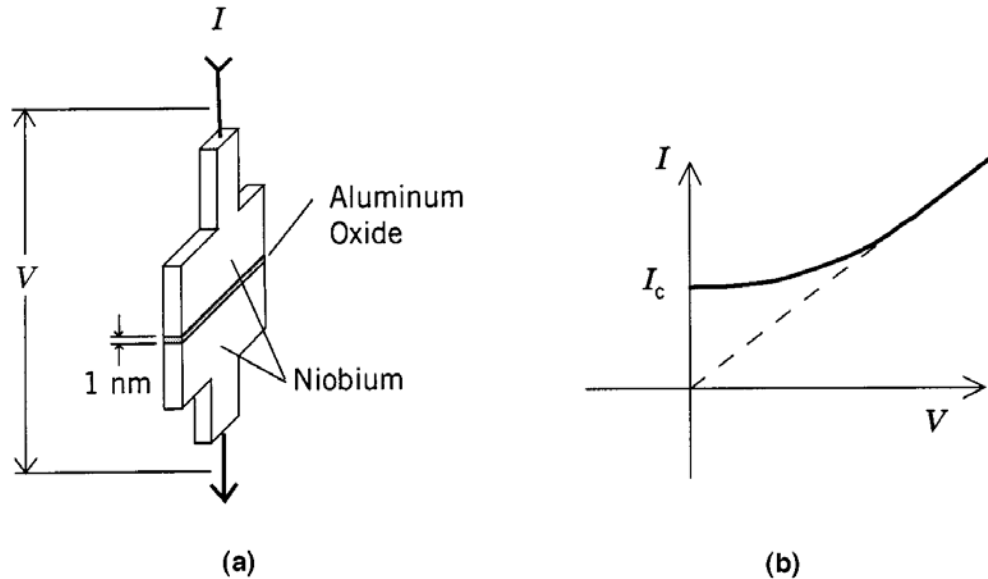


ενός Μαγνητομέτρου του τύπου Nuclear Precession . Όπως φαίνεται υπάρχει ένα φιαλίδιο που περιέχει ένα υλικό που είναι πλούσιο σε υδρογόνο (συνήθως κηροζίνη ή βενζίνη). Όταν το μαγνητόμετρο δεν λειτουργεί τότε οι άξονες περιστροφής (spin) των πρωτονίων είναι τυχαία προσανατολισμένοι με αποτέλεσμα το υλικό να είναι μαγνητικά ουδέτερο. Ένα πηνίο είναι τυλιγμένο εξωτερικά από το φιαλίδιο και με μια διάταξη διακοπών μπορούμε να περάσουμε ρεύμα μέσα από το πηνίο και να δημιουργήσουμε μαγνητικό πεδίο στο υλικό που είναι μέσα στο φιαλίδιο. Τότε οι πυρήνες των ατόμων του υλικού που περιέχεται στο φιαλίδιο προσανατολίζονται σύμφωνα με το πεδίο που δημιουργεί το πηνίο . Μόλις το ρεύμα που περνά από το πηνίο διακοπεί ο άξονας περιστροφής των πρωτονίων αρχίζει να παλινδρομεί με μια συχνότητα η οποία μπορεί να μετρηθεί και η οποία είναι ανάλογη με την ένταση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. Γι'αυτό το λόγο μόλις διακοπεί το ρεύμα το πηνίο συνδέεται σε μια σειρά ενισχυτών και φίλτρων που μετρούν την παραπάνω συχνότητα. Όπως τα Optically Pumped μαγνητόμετρα το Nuclear-Precession Μαγνητόμετρο μετρά το ολικό μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα μαγνητόμετρα έχουν κλίμακα ευαισθησίας από 1 έως 10G.

#### 4.6 SQUID μαγνητόμετρο [9]

Το μαγνητόμετρο τύπου SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) βασίζεται σε ένα φαινόμενο που παρατηρείται, όταν δυο υπεραγωγικά υλικά που χωρίζονται μεταξύ τους με μια πολύ λεπτή επιφάνεια ψηχθούν στους  $-269^{\circ}$  C. Στο σχήμα 4.13 παρίσταται σχηματικά η παραπάνω διάταξη. Τότε το φαινόμενο που παρατηρείται είναι ότι ένα ρεύμα ρέει μεταξύ των δύο υπεραγωγών ακόμα και με 0 volts διαφορά δυναμικού στα άκρα τους. Το μέγεθος του ρεύματος που ονομάζεται κρίσιμο ρεύμα είναι μια περιοδική συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου που υπάρχει στους δύο υπεραγωγούς. Το υλικό των δύο υπεραγωγών συνήθως είναι niobium ενώ το μονωτικό υλικό είναι οξείδιο του αλουμινίου. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτα από τον Brian D.

Josephson και γι αυτό η παραπάνω διάταξη ονομάστηκε “Josephson junction”.

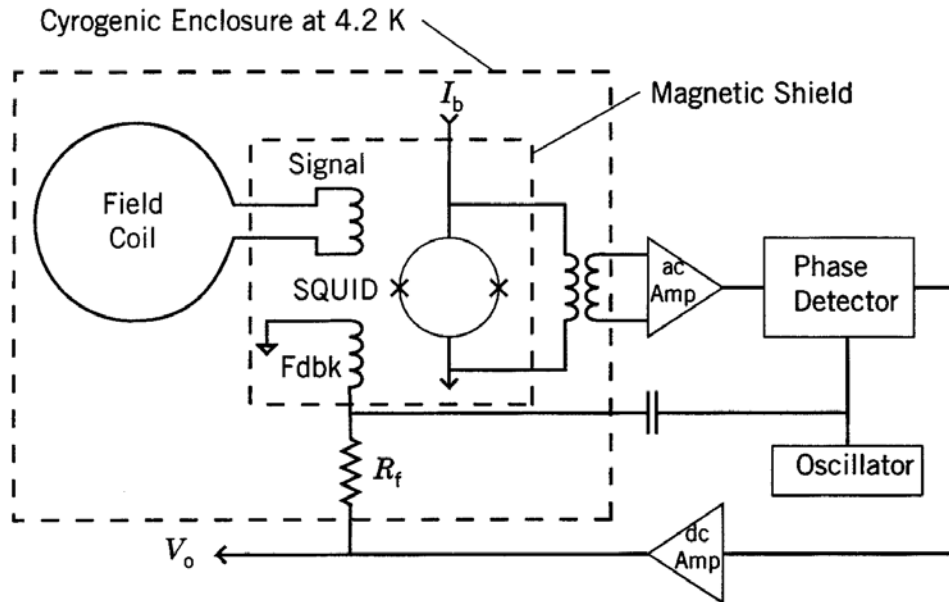


**Σχήμα 4.13**

Σχηματική παράσταση της διάταξης Josephson junction στην οποία βασίζεται η κατασκευή του μαγνητόμετρου SQUID

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται το χονδρικό διάγραμμα ενός μαγνητομέτρου τύπου SQUID που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα πολύ μεγάλο πεδίο μετρήσεων. Όπως φαίνεται από το σχήμα υπάρχει ένας χώρος όπου όλα τα υλικά βρίσκονται σε θερμοκρασία  $4.2^{\circ} \text{K}$ . Σ' αυτόν το χώρο υπάρχει μία μεγάλη σπείρα από καλώδιο που είναι συνδεδεμένη με ένα πηνίο πολλών στροφών το οποίο είναι μαγνητικά συζευγμένο με το SQUID. Σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες η σπείρα και το πηνίο σχηματίζουν ένα πηνίο, έτσι ένα εξωτερικό πεδίο θα δημιουργήσει ένα ρεύμα στο πηνίο. Οι σπείρες του πηνίου μεγεθύνουν την μαγνητική ροή που εφαρμόζεται στο SQUID. Πλέον αυτού του πεδίου εφαρμόζεται στο SQUID και ένα άλλο μικρής έντασης μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα ξεχωριστό πηνίο. Η έξοδος στα άκρα του SQUID είναι ένα διαμορφωμένη κατά πλάτος. Με

κατάλληλη επεξεργασία του σήματος εξόδου η τιμή του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται στην σπείρα μπορεί να μετρηθεί.

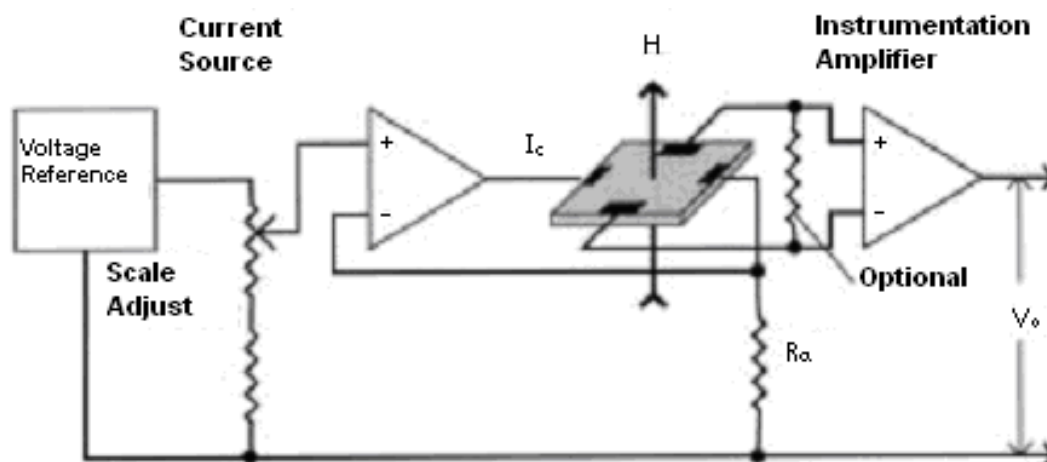


**Σχήμα 4.14**

*Χονδρικό διάγραμμα ενός μαγνητομέτρου τύπου SQUID*

## 4.7 Hall Effect Αισθητήρας [10]

Ο αισθητήρας Hall Effect στηρίζεται σε ένα φυσικό φαινόμενο που ανακαλύφθηκε από τον Hall πριν από 100 χρόνια. Το φαινόμενο Hall είναι ένα επακόλουθο της δύναμης Lorentz που είναι η δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτή η δύναμη είναι κάθετη τόσο κατά μήκος της διεύθυνσης της κίνησης όσο και στη διεύθυνση του πεδίου. Ο αισθητήρας Hall αποτελείται από ένα λεπτό ορθογώνιο πλαίσιο από κάποιο αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό που τοποθετείται μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό



**Σχήμα 4.15**

Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα Hall.

πεδίο κάθετο προς το επίπεδο του ορθογωνίου. Όταν κατά μήκος της διάστασης  $x$  εφαρμόζεται ένα ρεύμα τότε, στα άκρα κατά την διεύθυνση  $y$  παρατηρείται μια τάση. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αισθητήρα Hall μπορεί να είναι Χαλκός ή ημιαγωγιμο υλικό όπως Γάλλιο Αρσενικό (GaAs). Στο σχήμα 4.15 είναι το σχηματικό διάγραμμα ενός αισθητήρα Hall. Η τάση αναφοράς, ο τελεστικός ενισχυτής και η αντίσταση  $R_s$  σχηματίζουν μια πηγή ρεύματος για τον έλεγχο του ρεύματος στον αισθητήρα Hall. Για την καλύτερη λειτουργία του αισθητήρα η τάση αναφοράς και η αντίσταση  $R_s$  πρέπει να έχουν μεγάλη σταθερότητα. Η τάση Hall που παράγεται ενισχύεται από έναν ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εισόδου και είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου.

Hall Effect αισθητήρες με μικρό κόστος κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας πυρίτιο. Πιο ευαίσθητοι αισθητήρες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς III-IV, οι οποίοι έχουν ηλεκτρόνια μεγαλύτερης ευκινησίας από αυτά του πυρίτιου. Οι πιο εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες έχουν στοιχεία κατασκευασμένα από IIIIV ημιαγωγούς ινδίου αντιμονίου.





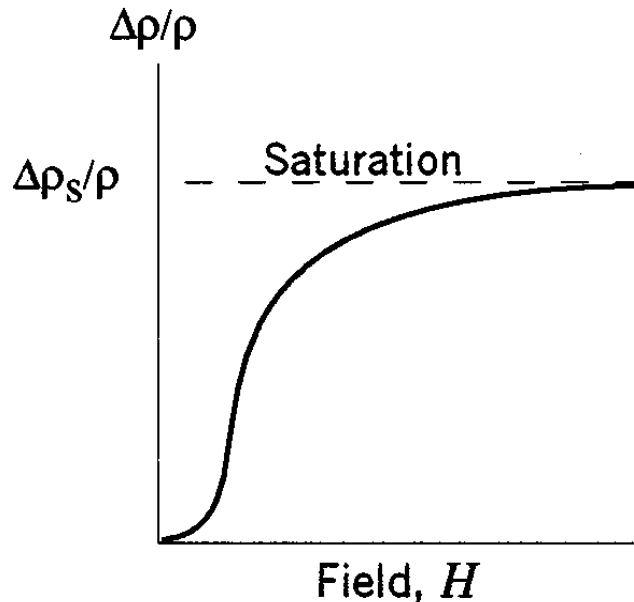
**Σχήμα 4.16**  
*Αισθητήρας Hall*

Οι συσκευές πυριτίου έχουν κλίμακα ευαισθησίας από 10G έως 1000G και οι αισθητήρες ινδίου αντιμονίου έχουν χαμηλότερο όριο στα επίπεδα 1-10G. Οι Hall Effect αισθητήρες μπορούν να μετρούν σταθερή ή μεταβαλλόμενη ροή. Είναι ελαφροί με μέγεθος περίπου 0.1 in<sup>2</sup>. Η απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία τους είναι μεταξύ 0.1 και 0.2W και μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρεία κλίμακα θερμοκρασίας. Συσκευές τέτοιου είδους είναι διαθέσιμες με κλίμακα θερμοκρασίας από 200°C έως περίπου στο απόλυτο μηδέν (-273°C). Στο σχήμα 4.16 φαίνεται ένας αισθητήρας Hall του εμπορίου.

#### **4.8 Magneroresistive Μαγνητόμετρο [11]**

Το φαινόμενο Μαγνητοαντίστασης ( Magneroresistive) παρατηρήθηκε αρχικά από τον William Thomson στο μέσον του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ανακάλυψε ότι όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σ' ένα κράμα τότε, η ειδική αντίσταση (resistivity) του, αλλάζει. Το ποσόν της αλλαγής εξαρτάται από το μέγεθος της μαγνήτισης και από την διεύθυνση προς την οποία ρέει το ρεύμα που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η ειδική αντίσταση. Κράματα Νικελίου και σιδήρου παρουσιάζουν την

μεγαλύτερη αλλαγή στην ειδική αντίσταση (περίπου 5%) .



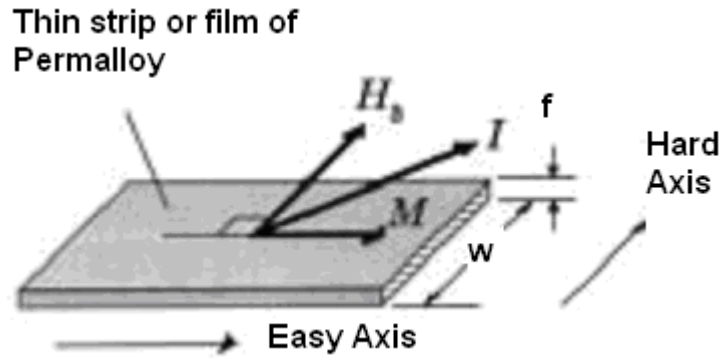
**Σχήμα 4.17**

*Αλλαγή στην ειδική αντίσταση με την μεταβολή του εφαρμοζόμενο μαγνητικού πεδίου σε υλικό που περιέχει Νικέλιο και Σίδηρο.*

Στο σχήμα 4.17 παρίσταται γραφικά η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε κράμα Νικελίου και σιδήρου για ένα πεδίο που έχει εφαρμοστεί παράλληλα προς την ροή του ρεύματος. Όπως φαίνεται από το σχήμα όσο το Μαγνητικό πεδίο αυξάνεται η ειδική αντίσταση αυξάνεται και ασυμπτωτικά πλησιάζει μια μέγιστη τιμή.

Το σχήμα και το μέγεθος της ανωτέρω καμπύλης εξαρτάται από το κράμα. Ένα κράμα με 80% Ni και 20% Fe δίνει μεγάλη Μαγνητοαντίσταση και είναι ιδανικό υλικό για Μαγνητοανατιστάσεις.

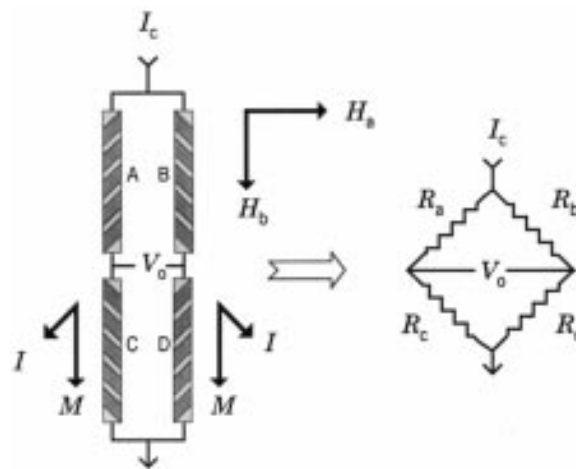
Όπως αναφέρθηκε πριν, η αλλαγή της ειδικής αντίστασης εξαρτάται από τις διευθύνσεις του Μαγνητικού πεδίου και ρεύματος. Αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίσταση (AMR).



**Σχήμα 4.18**

*Ένα στοιχείο Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης*

Στο σχήμα 4.18 είναι ένα στοιχείο Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης. Κατασκευαστικά το στοιχείο είναι μια λεπτή ορθογώνια επιφάνεια που περιλαμβάνει συνήθως Νικέλιο και σίδηρο. Κατά την διάρκεια της κατασκευής της, ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του στοιχείου για να το μαγνητίσει και να ορίσει τον «εύκολο άξονα» που σημειώνεται με το γράμμα M στο σχήμα. Το ρεύμα που περνά δια μέσου του στοιχείου σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τον «εύκολο άξονα». Ένα μαγνητικό πεδίο που θα εφαρμοστεί σε ορθή γωνία ως προς τον «εύκολο άξονα» προκαλεί περιστροφή στην διεύθυνση του M και αλλαγή στην Μαγνητοαντίσταση.



**Σχήμα 4.19**

*Αισθητήρας ενός Μαγνητομέτρου τύπου Μαγνητοαντίστασης*

Στο Σχήμα 4.19 δείχνεται ένας αισθητήρας που είναι κατάλληλος να χρησιμοποιηθεί σαν μαγνητόμετρο και έχει την μορφή γέφυρας Wheatstone . Οι αντιστάσεις που βρίσκονται σε διαγώνιες θέσεις έχουν τον ίδιο προσανατολισμό στην ροή του ρεύματος όπως φαίνεται και στο σχήμα . Ο προσανατολισμός του ρεύματος είναι

Έτσι οι αντιστάσεις είναι στις θέσεις A και D έχουν ένα προσανατολισμό στην ροή ρεύματος που διαφέρει κατά  $90^\circ$  από τον προσανατολισμό που έχει το ρεύμα που ρέει στις αντιστάσεις οι B και C . Αυτή η διάταξη μεγαλώνει την τάση εξόδου του αισθητήρα κατά τέσσερις φορές έναντι ενός αισθητήρα που χρησιμοποιεί μόνο μια μαγνητοαντίσταση.

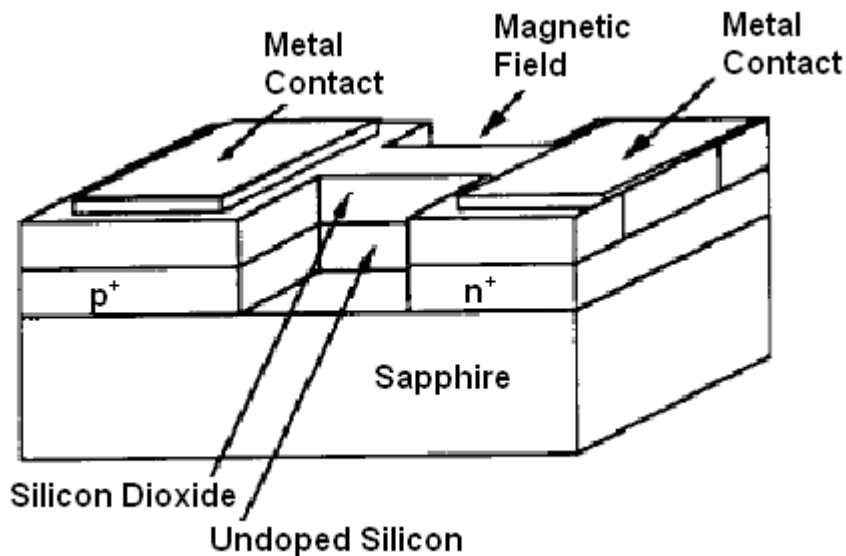
Οι Magnetoresistive αισθητήρες με open loop ηλεκτρονικά έχουν κλίμακα ευαισθησίας από 2 έως 50G και μία μπορούν να αποκριθούν σε εξαιρετικά ευρεία κλίμακα συχνοτήτων (ταχύτητα αλλαγής μαγνητικού πεδίου) από dc έως σχεδόν 1GHz. Οι αισθητήρες αυτοί είναι ελαφροί, μικροί και απαιτούν ισχύ μεταξύ 0.1-0.5mV και μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από  $-55^\circ\text{C}$  έως  $200^\circ\text{C}$ .

## 4.9 Μαγνητοδίοδοι [12]

Η μαγνητοδίοδος είναι βασικά μία δίοδος ημιαγωγού, δηλαδή μια p-n επαφή . Οι δύο περιοχές της διόδου δεν ενώνονται μεταξύ τους αλλά υπάρχει μια περιοχή πυριτίου (Si) ανάμεσα τους. Πάνω από το Si υπάρχει ένα στρώμα από  $\text{SiO}_2$  και κάτω από αυτό υπάρχει ζαφείρι, που είναι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο κατασκευάζεται ο αισθητήρας.

Αν μία μεταλλική επαφή συνδεθεί με την p-περιοχή της διόδου θα δίνει ένα θετικό δυναμικό ενώ μία μεταλλική επαφή συνδεδεμένη με την n-περιοχή δίνει αρνητικό δυναμικό. Οπές από την p-περιοχή και ηλεκτρόνια από την n-περιοχή θα εκχυθούν στην περιοχή του καθαρού πυριτίου.

Αν η δίοδος πολωθεί θετικά τότε το ρεύμα που θα περνά από την δίοδο είναι το άθροισμα το ρεύματος των οπών και του ρεύματος των ηλεκτρονίων γιατί οι αντίθετα φορτισμένοι φορείς κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις.



**Σχήμα 4.20**

*Μαγνητοδίοδος.*

Μερικοί φορείς, ειδικά αυτοί κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO<sub>2</sub> ή αυτοί κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού θα ανασυζευχθούν. Η απώλεια φορτισμένων φορέων αυξάνει την αντίσταση του υλικού. Απουσία πεδίου η ανασύζευξη στις δύο διεπιφάνειες συνεισφέρει στην αντίσταση. Ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορτισμένων φορέων τα εκτρέπει είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου.

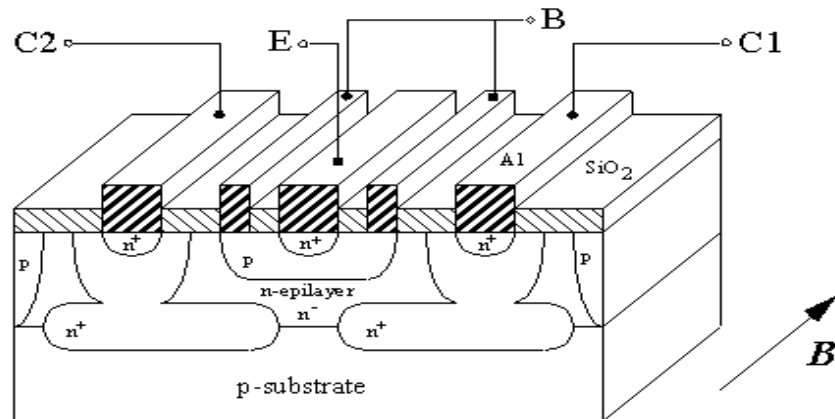
Τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές εκτρέπονται προς την ίδια διεύθυνση γιατί κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις. Φορτισμένοι φορείς κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού έχουν μεγαλύτερη τάση να ανασυζευχθούν από αυτούς κοντά στην διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO<sub>2</sub>. Έτσι αν ένα μαγνητικό εκτρέπει τους φορτισμένους φορείς προς τα κάτω, η αντίσταση του υλικού είναι μεγαλύτερη από την κανονική, ενώ αν τα εκτρέπει προς τα πάνω η αντίσταση γίνεται μικρότερη της κανονικής. Η απόκριση μιας μαγνητοδιόδου στο μαγνητικό

πεδίο είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που έχει μία συσκευή silicon Hall effect.

Ο αριθμός των κατάλληλων εφαρμογών για τις μαγνητοδίοδους θα ήταν μεγαλύτερος αν η συσκευή μπορούσε να φτιαχτεί σε standard τεχνολογία πυριτίου.

#### 4.10 Μαγνητοτρανζίστορ [13]

Αυτοί οι αισθητήρες, όπως και οι μαγνητοδίοδοι, είναι συσκευές που χρησιμοποιούν πυρίτιο. Αν η μαγνητοδίοδος είναι μία τύπος p-n επαφής, το μαγνητοτρανζίστορ είναι μία μορφή ενός npn τρανζίστορ.



**Σχήμα 4.21**

*Σχηματική παράσταση ενός Μαγνητοτρανζίστορ*

Ως γνωστόν το transistor αυτού του τύπου έχει ένα n-εκπομπό που χωρίζεται από έναν n-συλλέκτη με μία p-βάση. Η διαφορά με την μαγνητοδίοδο είναι ότι υπάρχουν δύο συλλέκτες αντί για έναν. Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται παραστατικά ένα Μαγνητοτρανζίστορ. Η κατασκευή του είναι τέτοια που αν δεν υπάρχει Μαγνητικό πεδίο τότε στους δύο συλλέκτες φτάνει ίσος αριθμός φορτισμένων φορέων.

Αν υπάρχει μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορτισμένων φορέων, αυτοί εκτρέπονται προς τον ένα ή τον άλλο συλλέκτη,

γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου. Οι τάσεις των δύο συλλεκτών τροφοδοτούνται από διαφορετικούς ενισχυτές των οποίων η απόδοση είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούν μαγνητοτρανζίστορ τώρα εκτιμούνται. Το μαγνητοτρανζίστορ αναμένετε να είναι 100 φορές πιο ευαίσθητο από μία συσκευή Hall-effect και βασίζεται σε πιο απλές τεχνολογίες παραγωγής π.χ χρησιμοποιείται υπόστρωμα πυριτίου Si που είναι φτηνό αντί το Ζαφείρι που χρειάζονται οι μαγνητοδίοδοι.

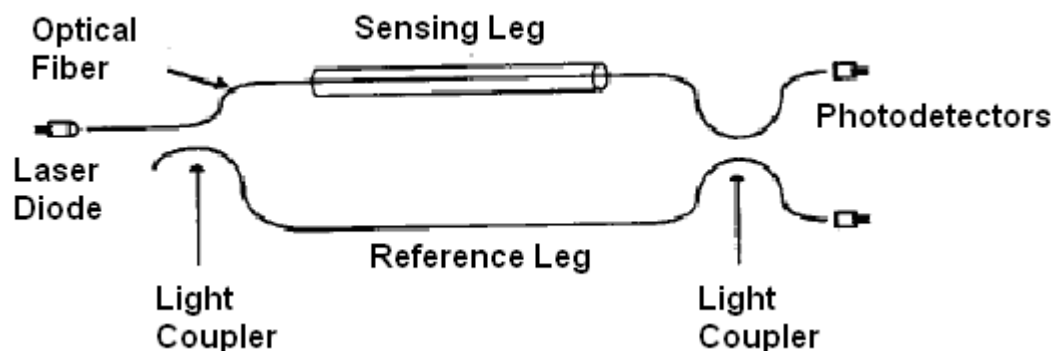
#### 4.11 Fiber-Optic Μαγνητόμετρο

Το μαγνητόμετρο τύπου Fiber-Optic είναι σχετικά ένας νέος αισθητήρας και βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Αποτελείται από δύο οπτικές ίνες που τοποθετούνται έτσι ώστε να διαμορφώνουν το συμβολόμετρο March-Zender. Όπως φαίνεται στο Σχ 4.22, φως από laser περνά διαμέσου ενός διαχωριστή δέσμης μέσα στις δύο ίνες, κινείται κατά μήκος των ινών, ανασυγκροτείται σε ένα συγκεντρωτή δέσμης και καταλήγει σε ένα φωτοανιχνευτή στο τέλος κάθε ίνας.

Μία από τις ίνες ή τυλίγεται γύρω ή επικαλύπτεται με ένα μαγνητοσυσταλικό υλικό που είναι ένα υλικό του οποίου οι διαστάσεις εξαρτώνται από τη διεύθυνση και το βαθμό μαγνήτισης του. Όταν το μαγνητοσυσταλικό υλικό μαγνητίζεται από ένα μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει την ίνα τότε, το μήκος της ίνας αλλάζει. Ως εκ τούτου το φως αυτού του σκέλους διανύει μεγαλύτερο μήκος από αυτό που δεν περιλαμβάνει το μαγνητοσυσταλικό υλικό και επομένως το φως από τα δύο σκέλη στην έξοδο δεν θα έχουν την ίδια φάση.

Αισθητήρας Fiber-Optic





**Σχήμα 4.22**

*Fiber Optic Μαγνητόμετρο.*

Η συμβολή των δύο κυμάτων του φωτός προκαλεί στο επίπεδο του φωτός στους φωτοανιχνευτές να αλλάξει κατά ένα ποσό που εξαρτάται από τη διαφορά φάσης. Διαφορές στην πορεία του φωτός με τιμή στα 3-10m είναι ανιχνεύσιμες από αυτού του τύπου τα συμβολόμετρα.

Η συσκευή είναι επίσης ευαίσθητη στον προσανατολισμό των γραμμών του πεδίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει την καμπυλότητα των γραμμών του πεδίου όπως επίσης και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον χρειάζεται προσπάθεια για να εξαλειφθεί το πρόβλημα του θορύβου και της συσκευασίας. Τα Fiber-Optic μαγνητόμετρο έχουν κλίμακα ευαισθησίας μεταξύ 7-10G .

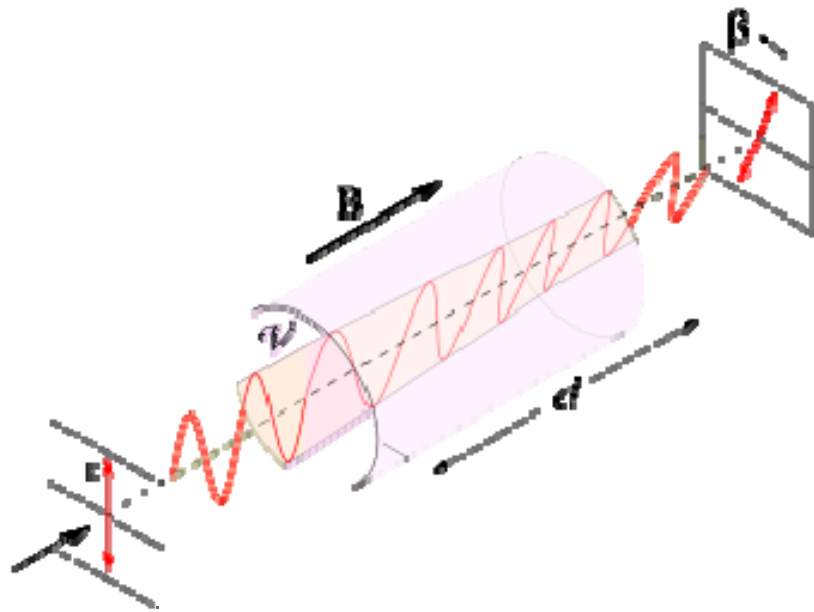
Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρούν είτε σταθερά πεδία είτε πεδία που μεταβάλλονται με συχνότητες κάτω των 60 kHz. Το μέγεθος τους εξαρτάται από την απαιτούμενη ευαισθησία, αλλά ένας τυπικός αισθητήρας έχει 4 in μήκος και 1 in πλάτος.

## **4.12 Magneto-Optical Αισθητήρας [14]**

Ο Magneto-Optical αισθητήρας στηρίζεται πάνω σ' ένα φαινόμενο που ανακάλυψε ο Faraday. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζεται σαν ένα μαγνητό-οπτικό



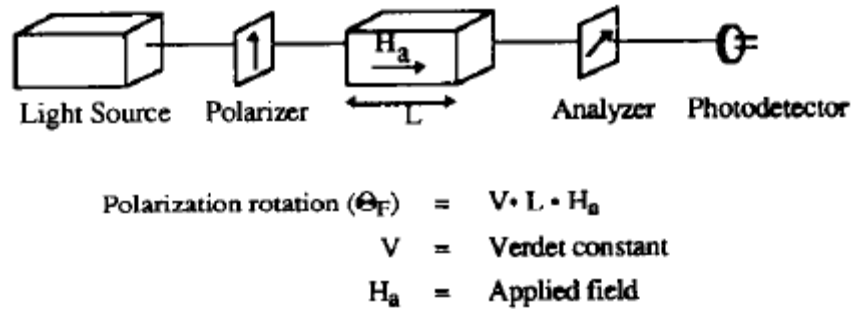
φαινόμενο ή αλληλοεπίδραση μεταξύ φωτός και μαγνητικού πεδίου. Αυτό που προκαλείται είναι περιστροφή του επιπέδου της πόλωσης του φωτός που περνά μέσα από κρυσταλλικό υλικό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή είναι ανάλογη της έντασης της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου που είναι στην διεύθυνση του φωτός. Στο σχήμα 4.23 είναι μια απεικόνιση του φαινομένου Faraday.



**Σχήμα 4.23**

*Απεικόνιση του φαινομένου Faraday*

Το φαινόμενο Faraday είναι εντονότερο σε μερικούς κρυστάλλους όταν οι διαδιδόμενες διευθύνσεις φωτός, οι κρυσταλλικοί άξονες και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι ευθυγραμμισμένα. Για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο πόλωσης του Faraday θεωρούμε ότι ένα επίπεδο κύμα πολωμένου φωτός μπορεί να αναλυθεί σε δύο κυκλικά πολωμένα κύματα, ένα κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού (cw) και ένα κατά την αντίθετη φορά (ccw). Η περιστροφή πόλωσης προκύπτει επειδή τα δύο κύματα διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στον κρύσταλλο. [15]



**Σχήμα 4.24**

*Magneto-Optical Αισθητήρας.*

Τα δύο κύματα όταν βγαίνουν από τον κρύσταλλο ξανασυντιθενται σε ένα γραμμικά πολωμένο κύμα , αλλά λόγω της διαφοράς των ταχυτήτων των δύο κυμάτων υπάρχει και διαφορά φάσεως η οποία τελικά δίνει την περιστροφή του γραμμικά πολωμένου κύματος. Στο Σχήμα 4.24 είναι το σχηματικό διάγραμμα ενός Μαγνητο-Οπτικού μαγνητομέτρου.

Η γωνία περιστροφής Faraday είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Μια σταθερά που χαρακτηρίζει τα υλικά είναι η σταθερά Verdet η οποία περιγράφει την ένταση του φαινομένου Faraday για κάθε υλικό. Το κύριο πλεονέκτημα των Μαγνητοοπτικών αισθητήρων έναντι των άλλων μαγνητικών αισθητήρων είναι η πολύ γρήγορη απόκριση σε αλλαγές εντάσεως του μαγνητικού πεδίου. Έχουν κατασκευαστεί αισθητήρες με απόκριση της τάξης των GHz.

Δυστυχώς η μαγνητική ευαισθησία των αισθητήρων αυτών είναι στην καλύτερη περίπτωση μέτρια γιατί το φαινόμενο πόλωσης Faraday είναι ένα ασθενές φαινόμενο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της γης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Οι μαγνητικοί αισθητήρες στις μέρες μας, είναι σε θέση να δώσουν λύση σε ‘κλασικά’ θέματα αισθητήρων όπως είναι εντοπισμός θέσης ή ο έλεγχος στάθμης.

Ένας μαγνητικός αισθητήρας μετατρέπει τη μεταβολή της έντασης ενός μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρικό σήμα. Η μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου μετράται με τους τρόπους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας. Οι εφαρμογές τους είναι άπειρες και αρχίζουν από τις πιο απλοϊκές και γνωστές σ’ όλους τους ανθρώπους όπως είναι π.χ. η μαγνητική πυξίδα μέχρι τις σύνθετες μεθόδους μέτρησης μεταβολών του μαγνητικού πεδίου της γης για ανίχνευση μέσα στο έδαφος πετρελαίου, αρχαιοτήτων, νερού κ.α.

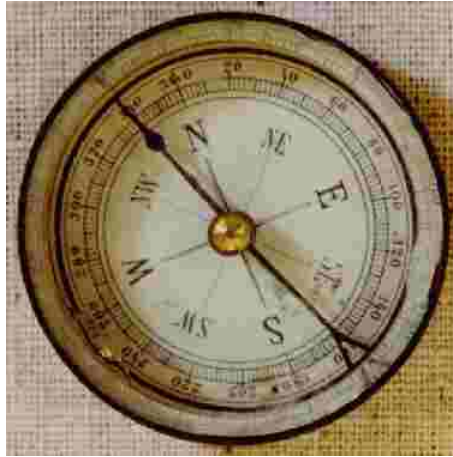
Οι εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων που θα εξεταστούν σ’ αυτό το κεφάλαιο είναι οι παρακάτω

#### **5.2 Εφαρμογές στην πλοήγηση**

##### **Πυξίδα - η παλαιότερη εφαρμογή [24]**

Η απλούστερη πυξίδα, βασίζεται στην επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου πάνω στη μαγνητική βελόνα. Η βελόνα της πυξίδας ευθυγραμμίζεται στην κατεύθυνση μαγνητικός Βορράς / Νότος, δείχνει δηλαδή προς ένα σημείο κοντά στον πραγματικό πόλο της γης. Μια βελόνη από μαγνητικό υλικό όπως ο μαγνητίτης, αναρτημένη από μια κλωστή κατευθύνεται πάνω στις γραμμές του μαγνητικού πεδίου της περιοχής όπου βρίσκεται και ηρεμεί με κατεύθυνση το

Μαγνητικό Μεσημβρινό του τόπου. Στο σχήμα 5.1 είναι η φωτογραφία μιας κλασσικής μαγνητικής πυξίδας.



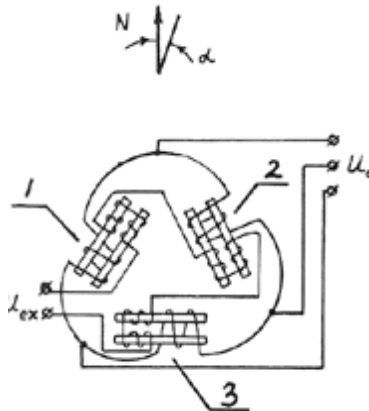
**Εικόνα 5.1**  
*Φορητή κλασσική Πυξίδα*

Αν το μέσον που χρησιμοποιεί την πυξίδα δεν είναι σταθερό αλλά αλλάζει γωνία κλίσεως τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο (π.χ. ένα πλοίο) τότε , για την στήριξη της πυξίδας χρησιμοποιείται ένα σύστημα που ονομάζεται σύστημα Cardan, που μόνιμα κρατά το επίπεδο της πυξίδας σε οριζόντια θέση. Τα μέταλλα με τα οποία είναι κατασκευασμένο το πλοίο επίσης επηρεάζει τις ενδείξεις της μαγνητικής πυξίδας. Γι' αυτό τον λόγο ο χώρος που τοποθετούνται οι πυξίδες έχει μελετηθεί για να έχει την δυνατόν μικρότερο επηρεασμό στην πυξίδα. Ένας άλλος τρόπος είναι να τοποθετείται η πυξίδα σε κάποιο σημείο του πλοίου που δεν υπάρχουν μεταλλικά αντικείμενα και οι ενδείξεις της πυξίδας να μεταφέρονται ηλεκτρικά στο πιλοτήριο του πλοίου. Οι πυξίδες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι του τύπου Flux-Gate Compass .

#### **Flux-gate πυξίδα [25]**

Μια πυξίδα του τύπου Flux-gate βασίζεται στην αρχή λειτουργίας ενός μαγνητομέτρου του ανωτέρω τύπου. Χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα ζεύγη πηνίων. Στο σχήμα 5.2 είναι το παραστατικό διάγραμμα μιας πυξίδας αυτού του

τύπου που χρησιμοποιεί τρία ζεύγη πηνίων. Όταν ο προσανατολισμός ως προς τον βορά αλλάξει τότε παράγεται μια τάση στην έξοδο που είναι ανάλογη της απόκλισης από τον βορά σε μοίρες. Το πλεονέκτημα αυτής της πυξίδας είναι ότι οι ενδείξεις της μπορούν να μεταφερθούν σε διάφορα σημεία του πλοίου .



**Σχήμα 5.2**

*Διάταξη πυξίδας τύπου Flux-gate*

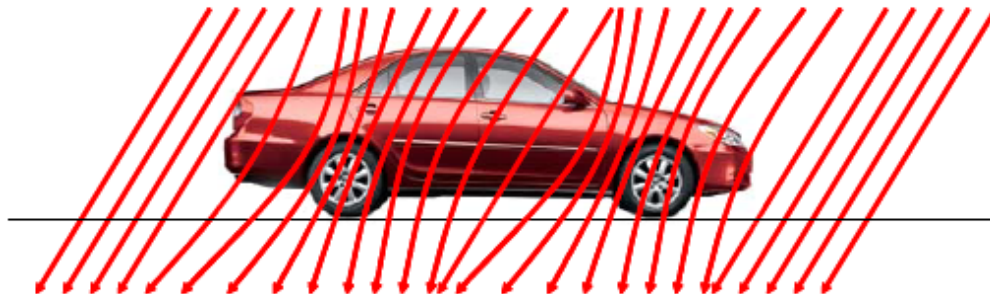
### **5.3 Εφαρμογές ανίχνευσης οχημάτων [26]**

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή στην βιομηχανία των αυτοκίνητων είναι η χρησιμοποίηση των Anisotropic Magneto Resistive sensors για την ανίχνευση οχημάτων που βρίσκονται κοντά στον αισθητήρα ή στο σύστημα των αισθητήρων . Οι Magneto –Resistive Sensors έχουν μικρό μέγεθος και απλότητα στην λειτουργία που βασίζεται στην γέφυρα Wheatstone. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται διάφορες εφαρμογές που αναφέρονται στην ανίχνευση οχημάτων.

Η ανίχνευση οχημάτων έχει προοδεύσει αρκετά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Αρχικά αυτό που ενδιέφερε ήταν η ανίχνευση ενός οχήματος σε διασταυρώσεις δρόμων χρησιμοποιώντας διάφορους τρόπους . Σήμερα όμως, απαιτούνται πολύ περισσότερες πληροφορίες στην ανίχνευση των οχημάτων, όπως η ταχύτητα, η διεύθυνση της κυκλοφορίας καθώς και ο αριθμός και ο τύπος των αυτοκίνητων που διέρχονται από κάποιο δρόμο.

Βασιζόμενοι στο γεγονός ότι τα σημερινά αυτοκίνητα έχουν αρκετή ποσότητα από σίδηρο χάλυβα νικέλιο και κοβάλτιο , οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι πολύ καλοί για να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση των οχημάτων. Σήμερα οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι αρκετά μικροί και λόγω της τεχνολογίας solid state η ενσωμάτωσή τους σε διάφορα συστήματα έχει γίνει ευκολότερη. Όμως τα περισσότερα αυτοκίνητα δεν εκπέμπουν μαγνητικά πεδία που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό τους. Αυτό το γεγονός κάνει αδύνατη την χρησιμοποίηση αισθητήρων του τύπου Hall Effect που απαιτούν την ύπαρξη πεδίου για να ενεργοποιηθούν.

Ευτυχώς υπάρχει το μαγνητικό πεδίο της γης που είναι περίπου 0,5 gauss έτσι μαγνητικοί αισθητήρες «ασθενών πεδίων» μπορούν να ανιχνεύσουν μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προκαλούν τα κοντινά οχήματα. Η εικόνα 5.3 δείχνει γραφικά πως οι μαγνητικές γραμμές εκτρέπονται όταν διαπερνούν αυτοκίνητο που περιλαμβάνει μαγνητικά υλικά.



**Σχήμα 5.3**

*Διαταραχή των Μαγνητικών γραμμών του γήινου πεδίου από την παρουσία οχήματος*

Όπως οι μαγνητικές γραμμές πυκνώνουν ή αραιώνουν (ουσιαστικά η αριθμητική τιμή του γήινου πεδίου μεταβάλλεται ) ένας μαγνητικός αισθητήρας που έχει τοποθετηθεί εκεί θα υφίσταται τις ίδιες μαγνητικές επιδράσεις που το αυτοκίνητο δημιουργεί στο μαγνητικό πεδίο της γης.

Ο αισθητήρας όμως δεν λαμβάνει το ίδιο πόσο της επίδρασης που

λαμβάνει ολόκληρο το αυτοκίνητο. Τυπικές εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν το μαγνητικό πεδίο της γης είναι :

- Σιδηροδρομικές διαβάσεις (για τραίνα)
- Fast Food που προσεγγίζονται με αυτοκίνητο.
- Αυτόματες πόρτες
- Καταγραφή της κυκλοφορίας οχημάτων
- Επιτήρηση χώρου σε parking.
- Παρκόμετρα.

Μαγνητικοί αισθητήρες που ενεργοποιούνται με χαμηλής εντάσεως μαγνητικά πεδία κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες.

Τους αισθητήρες που αποτελούν μέρος μαγνητικής Γέφυρας (Magnetoresistive Bridges) και τα πηνία. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν πηνία είναι πολύ μεγαλύτεροι σε μέγεθος καθώς απαιτούνται και διάφορα εξαρτήματα (όπως ταλαντωτές ) ώστε να ανιχνευθούν οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου. Η άλλη κατηγορία αισθητήρων (τύπου Γέφυρας) περιλαμβάνει δυο τύπους αισθητήρων τους AMR (Anisotropic Magneto Resistive) και GMR (Giant Magneto Resistive).

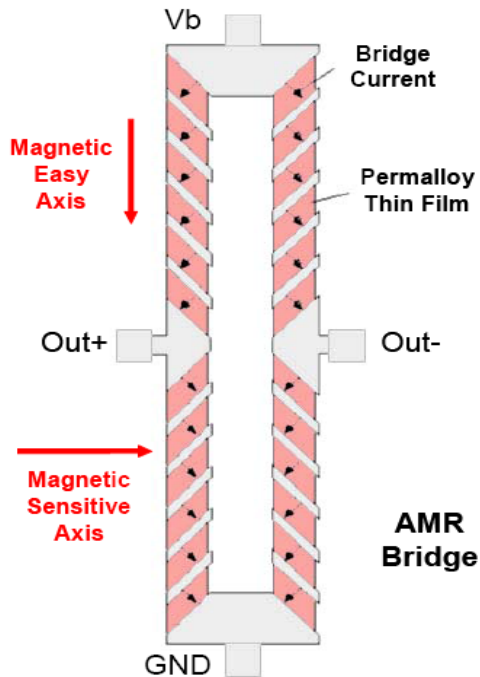
Οι AMR είναι αισθητήρες που είναι μαγνητικά ευαίσθητοι σε μια διεύθυνση έτσι αν συνδυαστούν δύο ή τρεις αισθητήρες μπορούμε να έχουμε μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε τρεις διαστάσεις με εξαιρετική γραμμικότητα.

Οι αισθητήρες GMR μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση χαμηλής εντάσεως μαγνητικών πεδίων έχουν αρκετή ευαισθησία αλλά πολύ μικρή κατευθυντικότητα.

Αυτη η κατηγορία αισθητήρων για να χρησιμοποιηθούν απαιτούν «βοήθεια» από κάποιο μαγνητικό πεδίο (που δημιουργείται είτε από μόνιμο μαγνήτη είτε πηνίο που διαρρέετε από συνεχές ρεύμα) .

Αισθητηρας AMR εμπορίου





**Σχήμα 5.4**

*Σχηματική παράσταση γέφυρας τύπου Anisotropic Magneto Resistive*

Στα επόμενα θα εξεταστούν οι αισθητήρες AMR σε εφαρμογές ανίχνευσης αυτοκινήτων. Στην εικόνα 5.4 δείχνεται ένα μια Γέφυρα Wheatstone που ένας της κλάδος είναι μαγνητικά ευαίσθητος. Κάθε γέφυρα έχει 4 κλάδους που ο κάθε ένας παρουσιάζει αντίσταση περίπου 1000Ω και οι διαφορές μεταξύ τους δεν υπερβαίνουν το 1 Ω. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η γέφυρα είναι ο ακόλουθος:

Εάν δεν υπάρχουν μεταβολές στο χώρο που βρίσκεται ο αισθητήρας τότε η γέφυρα είναι ισοσταθμισμένη και δεν υπάρχει τάση στην έξοδο. Αν υπάρξει μεταβολή τότε ανάλογα με το αν είναι αύξηση του μαγνητικού πεδίου ή ελάττωση η έξοδος θα είναι θετική ή αρνητική.

Η τάση εξόδου για αισθητήρες αυτού του τύπου μετριέται μεταξύ των ακροδεκτών Out+ και Out- και εξαρτάται από την ευαισθησία του αισθητήρα σύμφωνα με την εξίσωση :

$$\text{Out+} - \text{Out-} = S * V_b * B_s$$



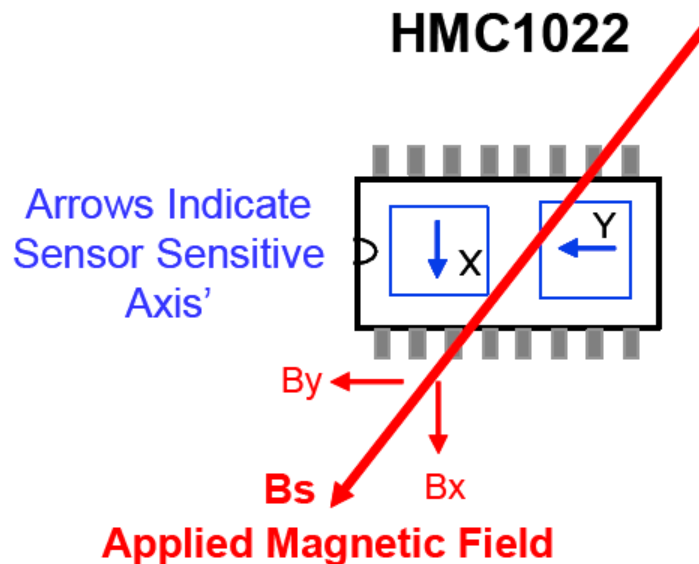
όπου,

$S$  = Sensitivity (που συνήθως εκφράζεται σε  $1\text{mV/V/gauss}$ )

$V_b$  = Bridge Supply Voltage σε volts

$B_s$  = Μαγνητική Ροή που εφαρμόζεται στην γέφυρα σε gauss

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν διατάξεις σε μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν περισσότερους από ένα αισθητήρα ώστε να μπορούν να μετρούν σε όλες τις διαστάσεις X,Y,Z .



**Σχήμα 5.5**

Ολοκληρωμένο τύπου HMC1022 που περιλαμβάνει μαγνητικούς αισθητήρες δύο διευθύνσεων

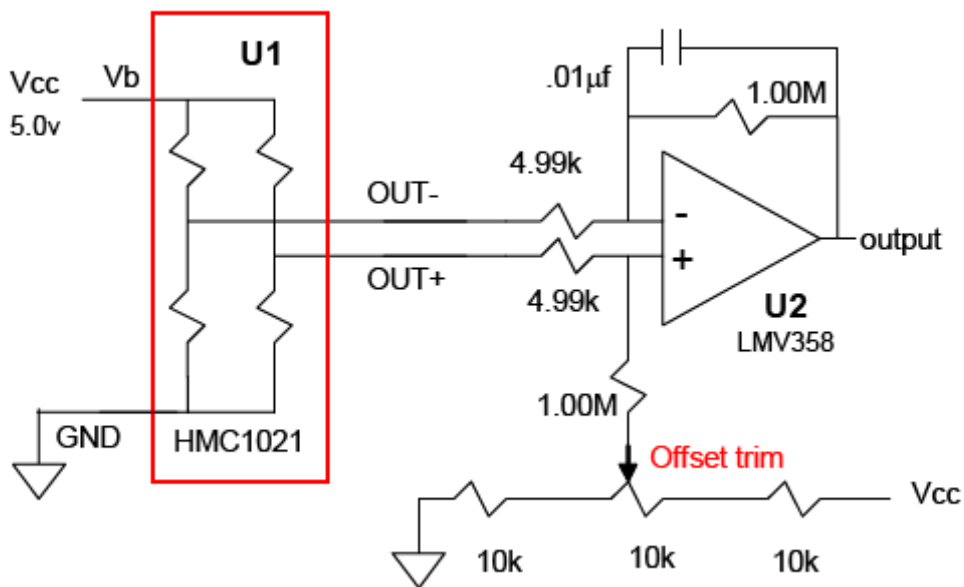
Στην εικόνα 5.5 είναι ένα ολοκληρωμένο το HMC1022 που περιλαμβάνει δύο μαγνητικούς αισθητήρες τους X και Y. Για να εξηγηθεί η λειτουργία του στο σχήμα 5.5 είναι σημειωμένα και η οριζόντια διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης  $B_s$  . Αν ο αισθητήρας HMC1022 τοποθετηθεί οριζόντια τότε οι αισθητήρες μετρούν το πεδίο της γης και το αναλύουν στις συνιστώσες  $B_x$  ,  $B_y$  που μετρούν το μέτρο και την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Για την ανίχνευση αυτοκινήτων η διεύθυνση και η ένταση του Μαγνητικού πεδίου της γης μπορεί να αλλάξει όταν ένα αυτοκίνητο πλησιάζει το μέρος που βρίσκεται ο αισθητήρας και επομένως η μέτρηση που κάνουν οι αισθητήρες X και Y θα αλλάξει. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ανιχνευθεί το πλησίασμα ενός οχήματος.

Όπως είναι προφανές θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένας μόνο αισθητήρας για να ανιχνευθεί το πλησίασμα του αυτοκινήτου αλλά η παραπάνω διάταξη εξασφαλίζει πιο ακριβή και αξιόπιστη ανίχνευση.

Η έξοδος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που περιέχουν τους μαγνητικούς αισθητήρες είναι πολύ μικρή ,της τάξεως των μερικών millivolt γ'αυτό απαιτούνται κυκλώματα τα οποία ενισχύουν αυτές τις εξόδους πριν να ψηφιδωποιηθούν για περαιτέρω επεξεργασία.

Στην εικόνα 5.6 φαίνεται μια τυπική διάταξη που ενισχύει την έξοδο ενός αισθητήρα χρησιμοποιώντας τον τελεστικό ενισχυτή LMV358 .

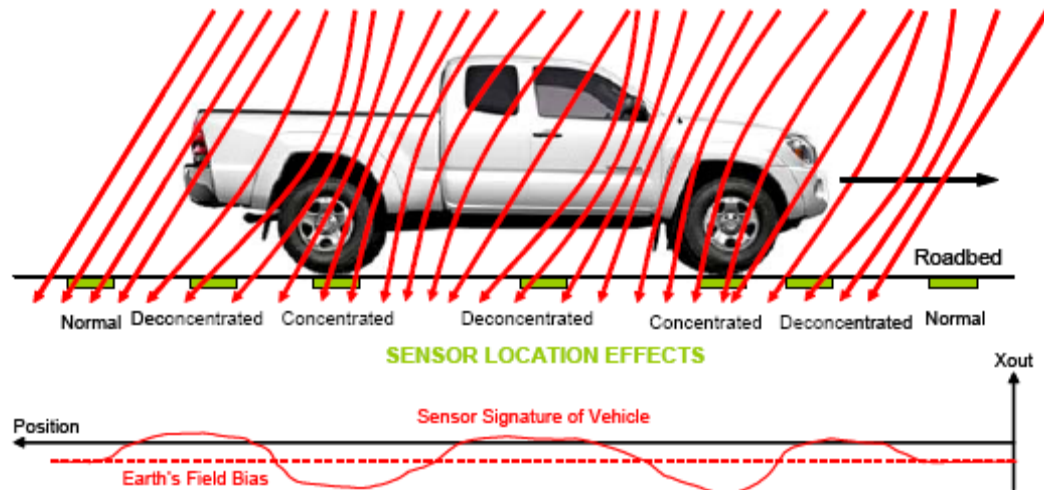


**Σχήμα 5.6**

*Ενισχυτική διάταξη που χρησιμοποιείται με τον μαγνητικό αισθητήρα  
HMC1021*

Στις επόμενες παραγράφους θα εξεταστούν συνοπτικά δύο εφαρμογές των παραπάνω αισθητήρων :

**-Υπογραφές κινουμένων οχημάτων (με τελικό σκοπό την εύρεση του τύπου του οχήματος) VEHICLE DETECTION SIGNATURES**



**Σχήμα 5.7**

*Προτεινόμενος τρόπος ευρέσεως της «υπογραφής» ενός οχήματος με χρήση πολλών μαγνητικών αισθητήρων.*

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται μια διάταξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της υπογραφής του οχήματος (δηλαδή τι τύπος είναι το αυτοκίνητο). Όπως φαίνεται από την εικόνα ένας αριθμός από αισθητήρες έχει τοποθετηθεί στο οδόστρωμα (στην εικόνα απεικονίζονται με πράσινο και είναι 7 σε αριθμό). Οι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε να «βλέπουν» τις μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου όταν το αυτοκίνητο κινείται όπως σημειώνεται στην εικόνα.

Στο κάτω μέρος της εικόνας είναι οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που «βλέπει» ένας αισθητήρας όταν το αυτοκίνητο περνάει από πάνω του. Όπως φαίνεται από την εικόνα το μαγνητικό πεδίο της γης τροποποιείται ανάλογα με το τμήμα του αυτοκινήτου που υπάρχει ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα.

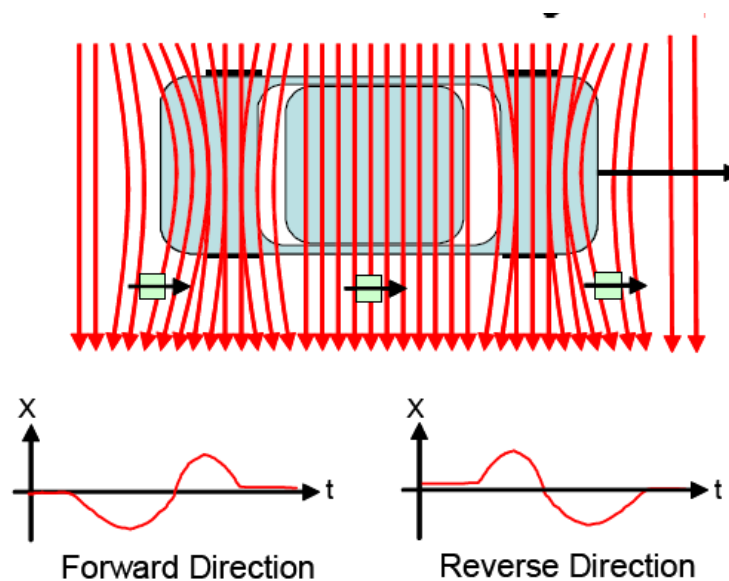
Ο συνδυασμός των εξόδων πολλών αισθητήρων μέσω Ηλεκτρονικού

Υπολογιστή θα οδηγήσει στην αναγνώριση το τύπου του οχήματος.

### Εύρεση της κατεύθυνσης Οχήματος [27][28]

Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα ή σειρά από αισθητήρες που βρίσκεται στην άκρη του δρόμου. Στο Σχήμα 5.8 φαίνονται οι μαγνητικές γραμμές στην περιοχή ενός οχήματος.

Όταν το όχημα πλησιάσει τον αισθητήρα οι μαγνητικές γραμμές λυγίζουν προς το όχημα έτσι η μαγνητική ροή ελαττώνεται και η έξοδος του αισθητήρα παίρνει αρνητικές τιμές . Όταν το αυτοκίνητο φεύγει από τον αισθητήρα η μαγνητική ροή ακολουθεί το όχημα και έχουμε μια αύξηση της τάσεως. Οι παραπάνω έξοδοι του αισθητήρα φαίνονται στο κάτω τμήμα του σχηματος 5.8.

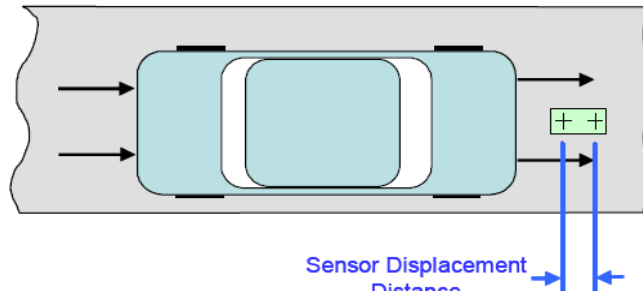


**Σχήμα 5.8**

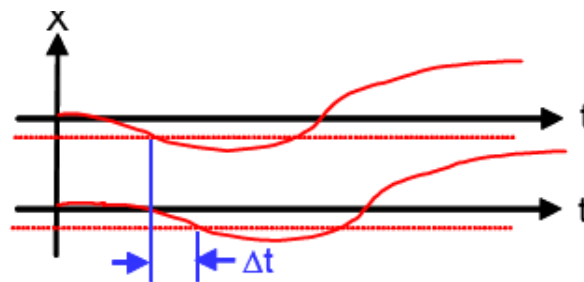
*Αλλαγή της Μαγνητικής ροής από την παρουσία οχήματος.*

Μια πιο αξιόπιστη μέθοδος για την εύρεση περιλαμβάνει την χρήση δύο αισθητήρων οι οποίοι τοποθετούνται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους με τους άξονες τους στην ίδια διεύθυνση. Σε μια τέτοια περίπτωση ο δεύτερος αισθητήρας θα έχει την απόκριση του πρώτου μετατοπισμένου ένα πολύ μικρό

χρονικό διάστημα. Η παραπάνω διατάξει φαίνεται στο Σχήμα 5. 9 ενώ στο σχημα 5.10 φαίνεται η έξοδος των δύο αισθητήρων.



**Σχήμα 5.9**  
Σχετικές θέσεις των δύο αισθητήρων



**Σχήμα 5.10**

Τάση εξόδου των δύο αισθητήρων .Όπως φαίνεται οι τάσεις είναι οι ίδιες αλλά είναι μετατοπισμένες χρονικά

#### 5.4 Εφαρμογές στην ιατρική [29]

Οι εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων στην ιατρική είναι πάρα πολλές βασίζονται στο γεγονός ότι τα διάφορα όργανα του ανθρώπινου σώματος δημιουργούν μαγνητικά πεδία (Biomagnetic Fields) με διάφορες εντάσεις οι οποίες μπορούν να μετρηθούν. Στο σχήμα 5.11 είναι μια χαρακτηριστική απεικόνιση που συσχετίζει την ευαισθησία διαφόρων τύπων αισθητήρων με τα μαγνητικά πεδία των ανθρώπινων οργάνων. Τα όργανα που αναφέρονται στο ανωτέρω σχήμα είναι MCG= Μαγνητοκαρδιογράφημα, MMG = μαγνητομυογράφημα ,MEG = μαγνητοεγκεφαλογράφημα, MOG= magneto-oculogram.

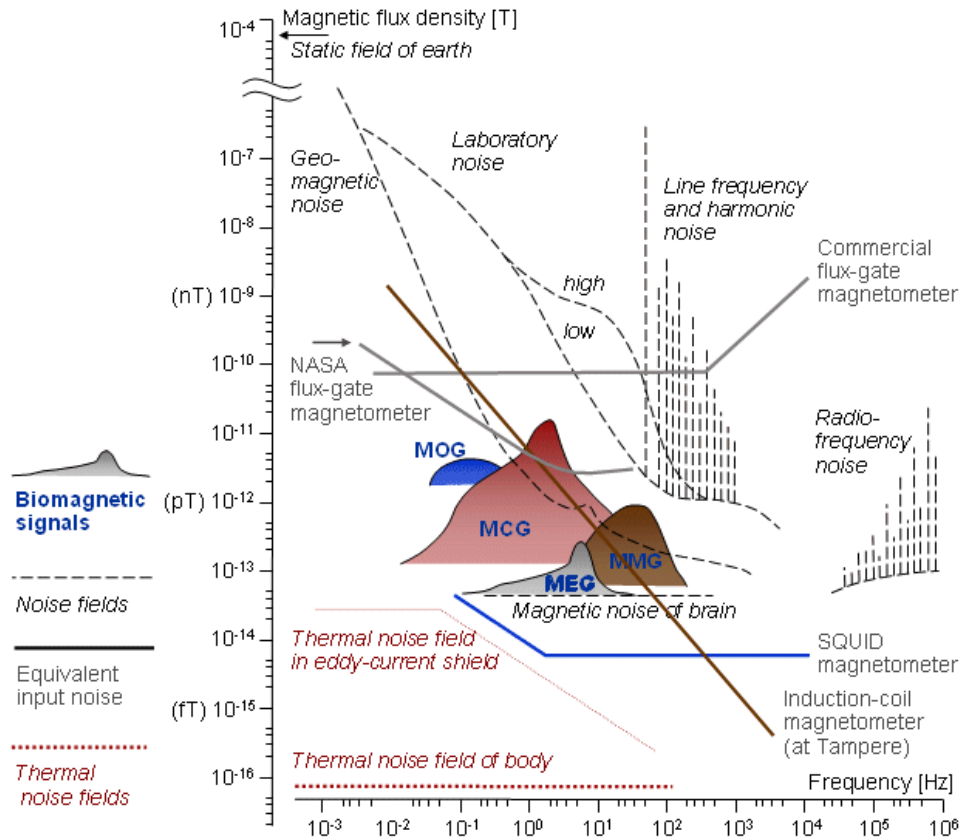
Από το σχήμα βλέπουμε ότι τα μαγνητικά πεδία που παράγουν τα διάφορα όργανα έχουν μαγνητική ροή της τάξεως  $10^{-13}$  έως  $10^{-11}$  Tesla . Αυτά τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μικρότερα σε ένταση από το μαγνητικό πεδίο της γής, και επομένως αν γίνει προσπάθεια μετρήσεως τους αυτό δεν θα είναι δυνατόν. Προς τούτο οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε ειδικά διαμορφωμένα δωμάτια που καλύπτονται από σιδηρομαγνητικά υλικά και αλουμίνια. Νεότερες μέθοδοι για δημιουργία χώρων χωρίς την επίδραση των εξωτερικών πεδίων χρησιμοποιούν κατάλληλα δινορεύματα (eddy currents) για να καταργήσουν τα εξωτερικά πεδία.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.11 το εμπορικού τύπου flux-gate μαγνητόμετρο όπως επίσης το μαγνητόμετρο του ίδιου τύπου της NASA δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις των βιομαγνητικών πεδίων . Αντίθετα ο αισθητήρας τύπου Squid έχει επαρκή ευαισθησία ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις των ανωτέρω οργάνων. Επίσης οριακά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο αισθητήρας τύπου search coil (induction coil).

Τα βιομαγνητικά σήματα χρησιμοποιούνται σαν διαγνωστικό μέσο σε διάφορα πεδία της ιατρικής. Οι κύριες εξετάσεις που χρησιμοποιούνται οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι γίνονται μαγνητοκαρδιογράφημα, μαγνητοεγκεφαλογράφημα και μαγνητομυογράφημα.

### Μαγνητο-καρδιογραφος





**Σχήμα 5.11**

*Η γραφική παράσταση που συσχετίζει την ευαισθησία των διαφόρων τύπων αισθητήρων με τα μαγνητικά πεδία που μπορούν να δημιουργήσουν όργανα του ανθρώπινου σώματος .*

### **ΜαγνητοΕγκεφαλογράφημα [30]**

Μαγνητικά πεδία από ενεργές ηλεκτρικές πηγές στο σώμα μπορούν να μετρηθούν εξωτερικά τοποθετώντας το υπεραγωγίμο SQUID μαγνητόμετρο κοντά στην επιφάνεια του σώματος. Τα βασισμένα σε SQUID πεδίομετρα χρησιμοποιώντας υπεραγωγίμα πηνία ανίχνευσης επιτρέπουν βιομαγνητικές μετρήσεις . Χαρτογραφούν την λειτουργία των νεύρων και είναι πιθανό να ανιχνεύσουν διάφορες νευρολογικές διαταραχές, συμπεριλαμβανομένων των επιληπτικών κρίσεων.

Το πρώτο μαγνητοεγκεφαλογράφημα έγινε το 1968 από τον David Cohen πριν βρεθεί ακόμη ο αισθητήρας τύπου SQUID χρησιμοποιώντας αισθητήρα τύπου Search Coil. Για να μειώσει τον θόρυβο (από το μαγνητικό πεδίο της γής) οι μετρήσεις έγιναν σ'ένα μαγνητικά μονωμένο δωμάτιο. Εν τούτοις η χαμηλή ευαισθησία και ο υπάρχων θόρυβος δεν έδωσε αποτελέσματα ικανοποιητικά.

Αργότερα χρησιμοποιώντας έναν από τους πρώτους αισθητήρες τύπου SQUID και καλύτερα μονωμένο δωμάτιο πήρε αποτελέσματα που ήταν τόσο καθαρά όσο και τα Ηλεκτρικά εγκεφαλογραφήματα.

Στην αρχή οι συσκευές που έκαναν μαγνητικά εγκεφαλογραφήματα χρησιμοποιούσαν μόνο ένα αισθητήρα SQUID που μετρούσε το μαγνητικό πεδίο διαδοχικά σε διάφορα σημεία του κεφαλιού. Αυτή η διαδικασία ήταν δύσκολη και χρονοβόρα ,έτσι από το 1980 οι κατασκευαστές των συσκευών που έκαναν MEG πρόσθετα περισσότερους αισθητήρες για να καλύψουν μεγαλύτερη επιφάνεια του κεφαλιού. Σήμερα οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για μαγνητοεγκεφαλογραφήματα μπορεί να περιέχουν μέχρι και 300 αισθητήρες. Στο σχήμα 5.12 είναι η φωτογραφία ενός Μαγνητικού εγκεφαλογράφου.

**Σχήμα 5.12**

*Μαγνητικός εγκεφαλογράφος*



Τα εγκεφαλογραφήματα χρησιμοποιούνται από χειρουργούς του εγκεφάλου για να εντοπίζουν παθολογικά ευρήματα καθώς και τους ερευνητές για τον προσδιορισμό της λειτουργίας των διαφόρων τμημάτων του εγκεφάλου. Η Μαγνητο-εγκεφαλογραφία (MEG) είναι μια ακίνδυνη τεχνική για τη μελέτη της νευρωνικής δραστηριότητας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Μπορούν να διακριθούν ανωμαλίες που έχουν διαστάσεις κάτω από ευνοϊκές περιστάσεις της τάξεως 2-3



χιλ. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μαγνητοεγκεφαλογραφήματων για σχεδιασμό χειρουργικών επεμβάσεων είναι τα ακόλουθα :

- Μετρούν ακριβώς την λειτουργία του εγκεφάλου
- Βρίσκουν με ακρίβεια χιλιοστού την θέση σημείων με πρόβλημα.
- Μπορούν να καταγράψουν επιληπτικές κρίσεις.
- Για να γίνει δεν απαιτείται επέμβαση με χειρουργικό τρόπο
- Είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί.

### **Μαγνητοκαρδιογράφημα [30]**

Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από την ενεργοποίηση του καρδιακού μυ παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του σώματος και όταν καταγραφεί έχουμε ένα ηλεκτροκαρδιογράφημα. Τα ίδια ρεύματα επίσης εισάγουν ένα μαγνητικό πεδίο μέσα και γύρω από το θώρακα που όταν καταγραφεί είναι το μαγνητοκαρδιογράφημα (MCG). Το κύριο ερώτημα είναι αν το Μαγνητοκαρδιογράφημα περιλαμβάνει νέα διαγνωστική πληροφορία που δεν περιλαμβάνεται στο Ηλεκτροκαρδιογράφημα. Η απάντηση στο ανωτέρω ερώτημα είναι ότι η Ηλεκτρομαγνητογραφία βελτιώνει αρκετά την διαγνωστική αξία του απλού Ηλεκτροκαρδιογραφήματος.

### **6.5 Εφαρμογές στην γεωφυσική [31]**

#### **Χρησιμοποιώντας ανίχνευση με squids**

Η ανάπτυξη πειραματικών τεχνικών για γεωφυσικές εξερευνήσεις έχει παίξει ζωτικό ρόλο στην ταυτοποίηση, αξιολόγηση και χρήση πόρων όπως το πετρέλαιο και οι υδρογονάνθρακες, τα ορυκτά, η γεωθερμική ενέργεια, τα υπόγεια

ύδατα κ.α. . Μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, παράλληλα με άλλες τεχνικές, χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές των ιδιοτήτων του γήινου φλοιού για βάθη από 100m μέχρι 10Km από την επιφάνεια.

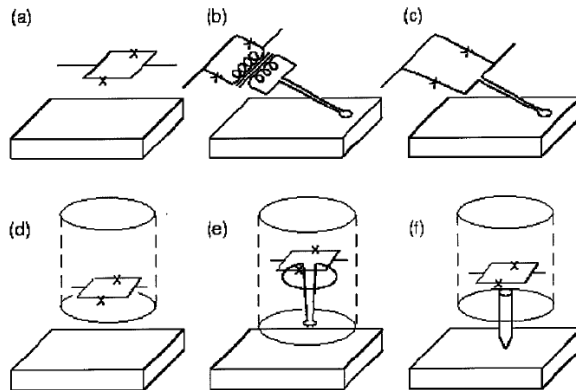
Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί περιλαμβάνουν την μέθοδο της αντίστασης, της επαγόμενης πόλωσης, της μαγνητοαντίστασης ηχητικών συχνοτήτων και την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο ελεγχόμενης πηγής.

## Μαγνητική μικροσκοπία

Το μαγνητικό μικροσκόπιο είναι ένα όργανο που μπορεί να μετρήσει και να καταγράψει μαγνητικά πεδία και να τα μετατρέψει σε εικόνες. Αυτή η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει σάρωση της επιφάνειας που θέλουμε να καταγράψουμε με ένα μαγνητικό αισθητήρα που καταγράφει μικροδιαφορές της έντασης του πεδίου και το οποίο τελικά απεικονιστεί σε μια φωτογραφία γκριζας κλίμακας. Επειδή τα μαγνητικά πεδία δεν είναι ορατά στο μάτι το μαγνητικό μικροσκόπιο επιτρέπει την μελέτη και ιδιότητες της ύλης οι οποίες δεν είναι ορατές με άλλο τρόπο. Εφόσον αποδεικνύεται ότι πολλά πράγματα παράγουν μαγνητικά πεδία υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία δειγμάτων τα οποία μπορούν να μελετηθούν από αυτό τον τύπο των μικροσκοπίων.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα μαγνητικά μικροσκόπια είναι τύπου SQUID και επειδή ο τρόπος που παράγονται οι φωτογραφίες είναι με σάρωση της επιφάνειας του αντικειμένου η ακριβής ονομασία του μικροσκοπίου είναι Scanning Squid Microscope (SSM). Αυτού του τύπου το μικροσκόπιο έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης ευαισθησίας και της δυνατότητας να καταγράψει παρά πολύ γρήγορες εναλλαγές του Μαγνητικού πεδίου. Το μειονέκτημα του είναι ότι δεν έχει μεγάλη διαχωριστική ικανότητα (resolution). Στο σχήμα 5.13 φαίνονται απεικονίζονται οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους χρησιμοποιείται ο αισθητήρας Squid στα Μαγνητικά Μικροσκόπιο. Στα σχήματα (a) και (d) ο αισθητήρας Squid χρησιμοποιείται όπως είναι στο Μαγνητικό μικροσκόπιο , στα σχήματα (b) και (e) χρησιμοποιείται ένα μικρό πηνίο (pick up coil) για να πλησιάσει το δείγμα που θα μετρηθεί και να μεταφέρει στον αισθητήρα την μαγνητική ροή, ενώ στα σχήματα

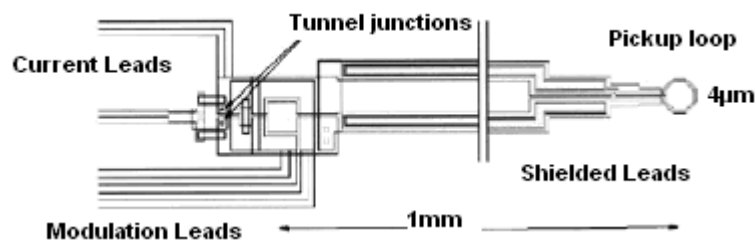
(c) και (f) χρησιμοποιείται ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που πλησιάζει το υλικό που θα μετρηθεί και μεταδίδει στον αισθητήρα την μαγνητική ροή. Από τους έξι τρόπους που δείχνονται στο σχήμα 5.13 οι τρόποι a,b και c το δείγμα και ο αισθητήρας ψύχονται , ενώ στους τρόπους d,e και f μόνο ο αισθητήρας ψύχεται.



**Σχήμα 5.13.**

*Οι διάφοροι τρόποι που χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες SQUID σε  
Μαγνητικά Μικροσκόπια.*

Στο σχήμα 5.14 δείχνεται λεπτομερής τρόπος με τον οποίο ένα pick up coil συνδέεται με τον αισθητήρα Squid .Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί το υλικό  $NbAl_2O_3Nb$ . Το πηνίο όπως φαίνεται από το σχήμα έχει πολύ μικρές διαστάσεις (4 $\mu$ m) και συνδέεται με τον αισθητήρα μέσω πολύ καλά μονωμένων (μαγνητικά ) με τον αισθητήρα.



### Σχήμα 5.14

*Λεπτομέρεια του τρόπου που ο αισθητήρας Squid συνδέεται με το μικρό πηνίο σε Μαγνητικό Μικροσκόπιο.*

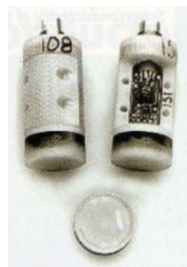
Οι κύριες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται τα μαγνητικά μικροσκοπία είναι στον βιομαγνητισμό ,Παρακάτω σχολιάζονται τις διάφορες εφαρμογές όπως η ανίχνευση βραχυκυκλωμάτων σε ολοκληρωμένα κυκλώματα αλλά και ανίχνευση σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως Fe, Co or Ni διαφόρων ανωμαλιών . Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Μη καταστρεπτικός έλεγχος (non destructive inspection, NDI ή NDT , non destructive testing))

Όταν γίνεται έλεγχος υλικών ή εξαρτημάτων για ύπαρξη ρωγμών ,κοιλοτήτων ή άλλων ανωμαλιών , υπάρχουν διάφοροι τρόποι που μπορούν να ελεγχθούν τα ανωτέρω. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες

- Eddy Current testing
- Ultrasonic testing
- Magnetic testing

Οι δύο πρώτοι τρόποι χρησιμοποιούνται πολύ αλλά έχουν και τους περιορισμούς τους. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται όταν το βάθος του υλικού που ελέγχεται δεν είναι μεγάλο , ενώ όταν πρέπει να ελεγχθούν υλικά για ύπαρξη κοιλοτήτων τότε η μέθοδος με Ultrasonics δεν δίνει αποτελέσματα ικανοποιητικά καθώς η «υπογραφή» των κοιλοτήτων είναι το ίδιο με τον περιβάλλοντα χώρο.Αυτοί οι δύο περιορισμοί μπορούν να ξεπεραστούν με μαγνητόμετρο υψηλής ευαισθησίας με τον όρο ότι δεν υπάρχει υπερβολικός θόρυβος. Αυτή η μέθοδος μπορεί να ελέγξει ογκώδη αντικείμενα.

Μαγνητόμετρα squid εμπορίου





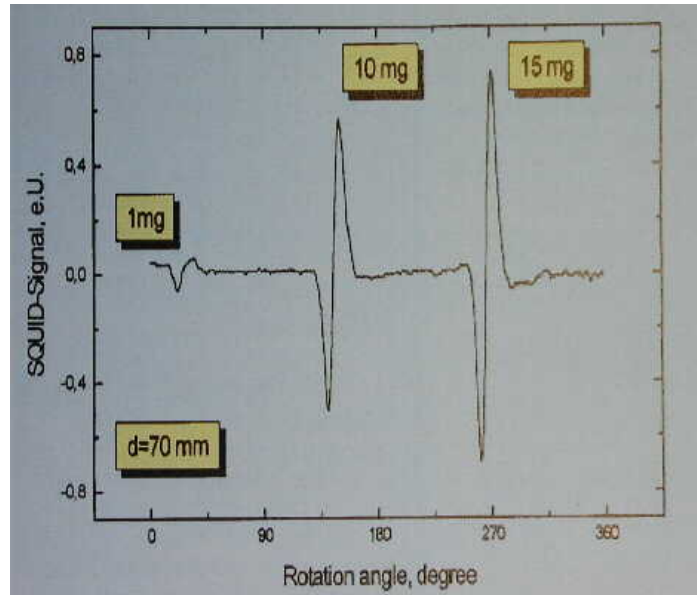
**Σχήμα 5.15**

*Μαγνητικό μικροσκόπιο*

Στην εικόνα 5.15 είναι ένα μαγνητικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιεί ένα Squid αισθητήρα σαν αυτούς που περιγράφηκαν παραπάνω. Το υλικό που εξετάζεται τοποθετείται σε μια επιφάνεια η οποία περιστρέφεται. Ο βραχίονας πάνω από το περιστρεφόμενο τραπέζι περιλαμβάνει τον αισθητήρα που βρίσκεται μέσα σε ειδικό θάλαμο που περιέχει το υγρό άζωτο. Μερικά παραδείγματα μαγνητικής μικροσκοπίας φαίνονται στα σχήματα 5.16 και 5.17. Στο σχήμα 5.16 είναι ένα παράδειγμα μιας μαγνητικής μικροσκοπικής απεικόνισης ενός κράματος που μέσα του έχουν δημιουργηθεί ανομοιογενή δείγματα με μάζες 1mg , 10mg, and 15 mg σε βάθος 70mm. Όπως φαίνεται από το σχήμα οι ανομοιογένειες διακρίνονται πολύ καθαρά.

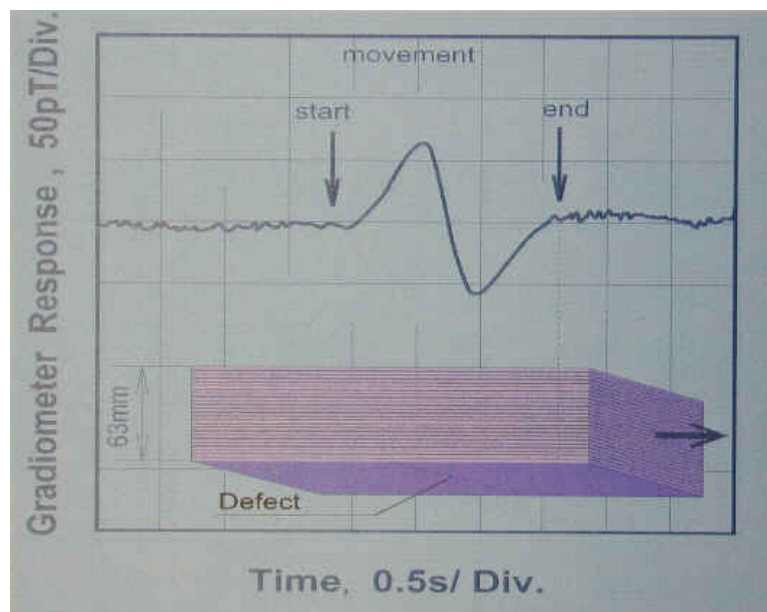
Αυτή η διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών ή ατελειών χρησιμοποιείται από κατασκευαστές μηχανών αυτοκινήτων ή αεροσκαφών για να ελέγχουν την

καθαρότητα ορισμένων υλικών



**Σχήμα 5.16**

Ανίχνευση ανομοιογενειών σε κράμα που έχουν μάζες 1mg , 10mg, and 15 mg σε βάθος 70mm.

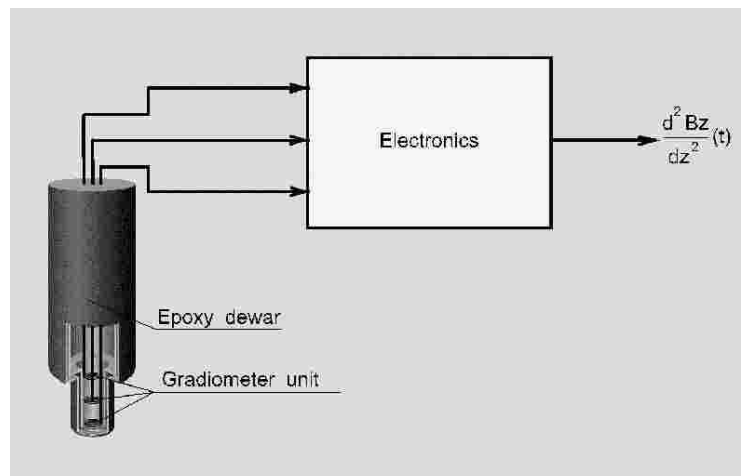


**Σχήμα 5.17**

Ανίχνευση ρωγμής σε μεταλλικές επιφάνειες.

Στο σχήμα 5.17 είναι ένα παράδειγμα ανίχνευσης μιας κατασκευασμένης ρωγμής (που δημιουργήθηκε με την απομάκρυνση δύο πλακών αλουμινίου) που βρίσκεται σε βάθος 63 mm. Το πάχος αυτό δημιουργείται από πολλά φύλλα αλουμινίου τοποθετημένα το ένα πάνω από το άλλο. Το μαγνητικό πεδίο που διέγειρε το Squid είχε συχνότητα περίπου 10Hz και δημιουργείται από μια διάταξη γέφυρας.

Μια σχεδίαση διάταξης μικροσκοπίας χρησιμοποιώντας υπεραγώγιμη ανίχνευση με SQUIDS είναι βασισμένη στο κρίσιμο στοιχείο SQUID, που πρέπει να λειτουργεί σε συγκεκριμένη κρυονική θερμοκρασία για μέγιστη ανάλυση. Αυτό το κρυονικά ψυγμένο όργανο μπορεί να απεικονίσει μαγνητικά πεδία στην επιφάνεια δείγματος με εντυπωσιακή ευαισθησία και ανάλυση. Μπορεί να αισθανθεί μαγνητικά πεδία μικρότερα από 100 picoteslas, και ρεύματα από μερικά nanoamperes. Ακόμη περισσότερο η διάταξη έχει επιδείξει αξιοσημείωτη ανάλυση διαστήματος μικρότερη από 4μm και πολύ υψηλή ευαισθησία από το συνεχές έως σήματα συχνότητας GHz στους 77K, που μπορούν ακόμη περισσότερο να βελτιωθούν εάν η θερμοκρασία λειτουργίας μειωθεί κάτω από τα 4,2K. Η διάταξη πρέπει να καλυφτεί από ένα κρυονικό περιβάλλον για μέγιστη απόδοση. Η ανίχνευση διαστήματος και η ευαισθησία μπορούν να ρυθμιστούν διαλέγοντας κατάλληλο μέγεθος πηνίου , υπεραγώγιμο υλικό , και θερμοκρασία λειτουργίας.



## Μη καταστρεπτική αξιολόγηση υλικών και κατασκευών με την χρήση μαγνητόμετρων

Κάθε μέθοδος NDI με τη χρήση μαγνητόμετρων βασίζεται στην ανίχνευση τοπικών ανωμαλιών στο μαγνητικό ή στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υπό εξέταση αντικειμένου.

Αυτή η εξέταση μπορεί να επιτρέψει την ανίχνευση ρωγμών, διάβρωσης, προσμίξεων και άλλων ατελειών καθώς οι ιδιότητες του υλικού που παρουσιάζει τις ατέλειες διαφέρουν από αυτές του μη ελαττωματικού υλικού βάσης.

Η NDE μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες σε δύο κατηγορίες, στις παθητικές και στις ενεργητικές μεθόδους. Στις ενεργητικές μεθόδους (όπως η PEC) ανιχνεύεται η μαγνητική απόκριση του υπό εξέταση αντικειμένου σε κάποια εξωτερική διέγερση. Αυτή είναι συνήθως ηλεκτρομαγνητική π.χ. εναλλασσόμενα (ac) πεδία που επάγουν ρεύματα δίνης στο υπό δοκιμή αντικείμενο. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς στην αξιολόγηση αγωγίμων μη μαγνητικών υλικών.

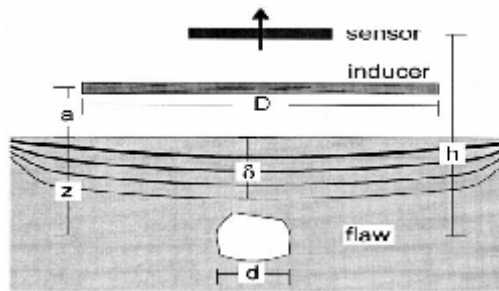
Ο σκοπός της εξέτασης είναι η απόκτηση ποσοτικών πληροφοριών όπως το μέγεθος της ατέλειας και η θέση της, συμπεριλαμβανομένου και του βάθους της και κατά προτίμηση με την μορφή τομογραφικών εικόνων.

Ένας απλός κανόνας είναι ότι η πλευρική ανάλυση των ανωμαλιών στο πεδίο είναι συγκρίσιμη της απόστασης μεταξύ του ανιχνευτή και της πηγής της ανωμαλίας. Όταν χρησιμοποιείται ac διέγερση η απόρριψη του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου μπορεί να γίνει με την χρήση μικρού εύρους συχνοτήτων. Επιπλέον τόσο το εν φάση σήμα όσο και το καθυστερημένο μπορούν να μετρηθούν.

Το τελευταίο δε δίνει την καθυστέρηση φάσης (με αναφορά την διέγερση) έτσι ώστε μπορούμε να εξάγουμε πληροφορία για το βάθος στην περίπτωση αγωγίμων και κανονικοποιημένων ομογενών υλικών. Το επιδερμικό βάθος  $\delta = (\rho/\mu f)^{-1/2}$  όπου  $\rho$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $f$  η συχνότητα διέγερσης και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου, περιορίζει το βάθος στο οποίο μπορεί να βρεθούν η ατέλειες.



Για μια διέγερση τετραγωνικού παλμού το  $\delta_o$  δηλώνει το βάθος του υλικού στο οποίο το πλάτος έχει μειωθεί κατά  $1/e$  και η φάση έχει περιστραφεί κατά  $\pi$ . Σε πολύ αγώγιμα υλικά, η ανίχνευση βαθύτερων ατελειών απαιτεί τη χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων διέγερσης. Επειδή ευαισθησία των επαγωγικών πηνίων μειώνεται με την συχνότητα η χρήση των SQUID προσφέρει μεγαλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση ατελειών μεγάλου βάθους.



**Εικόνα 5.11**

. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την NDE:

$d$  – διάμετρος ατέλειας,  $z$  – βάθος ατέλειας,  $h$  – απόσταση ανιχνευτή ατέλειας,  $D$  – διάμετρος επαγωγού,  $a$  – απόσταση επαγωγού επιφανείας υλικού,  $\delta = \delta_o$  – βάθος επιδερμίδας

Πολύ συχνά οι περιορισμοί που θέτονται στην NDE δεν οφείλονται στον ανιχνευτή αλλά στην ικανότητα να διαχωρίσουμε τα σήματα ανάμεσα σε αυτά που προέρχονται από τις ατέλειες και στα πολύ ισχυρότερα που προέρχονται από την δομή του υλικού. Εδώ μπορούν να συνδράμουν υπολογισμοί μοντέλων ατελειών.

Σ' έναν ρευματοφόρο δίσκο, μαγνητικά πεδία απλών ατελειών με ελλειπτικό, κυλινδρικό (περιορισμένου βάθους) ή σφαιρικού σχήματος έχουν υπολογιστεί αναλυτικά και έχουν επαληθευτεί πειραματικά. Αναλυτικές λύσεις, που είναι δυνατές μόνο για σχετικά απλές γεωμετρίες, συχνά αποδεικνύονται χρησιμότερες από υπολογισμούς για ρεαλιστικότερους τύπους ατελειών.

Μια σημαντική εφαρμογή της NDE με τη χρήση SQUID είναι η μελέτη τμημάτων αεροσκαφών. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί κινητές μονάδες με επίπεδα μαγνητόμετρα αυτόνομης ψύξης με σκοπό την ανίχνευση εσωτερικών ρωγμών και διάβρωσης σε τμήματα αεροσκαφών ενώ έχουν γίνει και εργαστηριακές μελέτες σε σημεία ενώσεων.

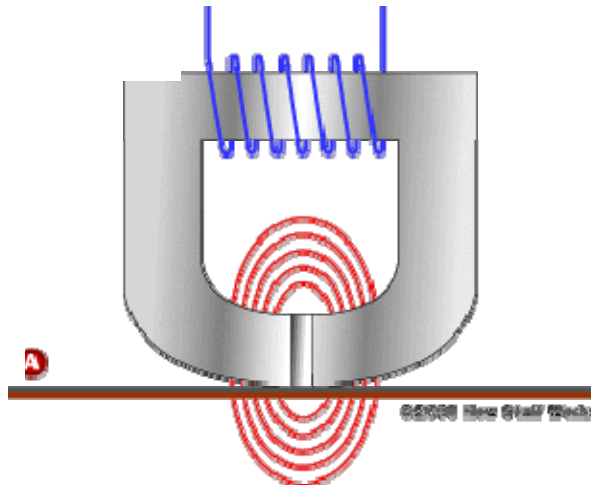
## 5.6 Μαγνητική εγγραφή [32]

Ο μαγνητισμός με την βοήθεια των μαγνητικών αισθητήρων χρησιμοποιείται ευρύτατα για αποθήκευση δεδομένων σε διάφορα μέσα ,αλλά και την ανάγνωση τους . Στις επόμενες παραγράφους θα εξεταστούν διάφορες εφαρμογές

### **Μαγνητόφωνο**

Μια άλλη εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων είναι και τα μαγνητόφωνα. Η κεφαλή του μαγνητοφώνου είναι ένας πολύ μικρός κυκλικός ηλεκτρομαγνήτης με ένα μικρό άνοιγμα σ' ένα σημείο. Μπροστά από την κεφαλή με ειδική διάταξη περνά η ταινία του μαγνητοφώνου πάνω στην οποία γίνεται η «αποτύπωση» αυτών που θέλουμε να μαγνητοφωνήσουμε. Η μαγνητική ταινία είναι μια πλαστική ταινία πάνω στην οποία υπάρχει μια επικάλυψη από οξειδίο ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυτό το οξειδίο συνήθως είναι αναμεμιγμένο με ένα υλικό που εξασφαλίζει την πρόσφυση στην πλαστική ταινία. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις ταινίες είναι  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  που ονομάζονται σιδηρομαγνητικά υλικά που έχουν την ιδιότητα όταν εκτεθούν σε μαγνητικά πεδία μαγνητίζονται μόνιμα . Στο σχήμα 5.18 φαίνεται παραστατικά κεφαλή ενός μαγνητοφώνου. Ο ηλεκτρομαγνήτης αποτελείται από σιδηρομαγνητη που πάνω του έχει περιελιχθεί σύρμα όπως φαίνεται στο σχήμα. Κατά την διάρκεια της μαγνητοφώνησης το ακουστικό σήμα εφαρμόζεται στο πηνίο του ηλεκτρομαγνήτη για να δημιουργήσει μια μαγνητική ροή στον πυρήνα. Στο κενό που υπάρχει στον πυρήνα η μαγνητική ροή δημιουργεί μαγνητικές γραμμές που «ενώνουν» το κενό του ηλεκτρομαγνήτη. Αυτή η ροή είναι που μαγνητίζει τα οξείδια που βρίσκονται πάνω στην ταινία. Όταν παίζεται η ταινία η κίνηση της δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο

κενό του ηλεκτρομαγνήτη. Αυτό το πεδίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα που με την σειρά του δημιουργεί ένα σήμα στο πηνίο του ηλεκτρομαγνήτη. Αυτό το σήμα ενισχύεται και οδηγείται στα μεγάφωνα.



**Σχήμα 5.18**

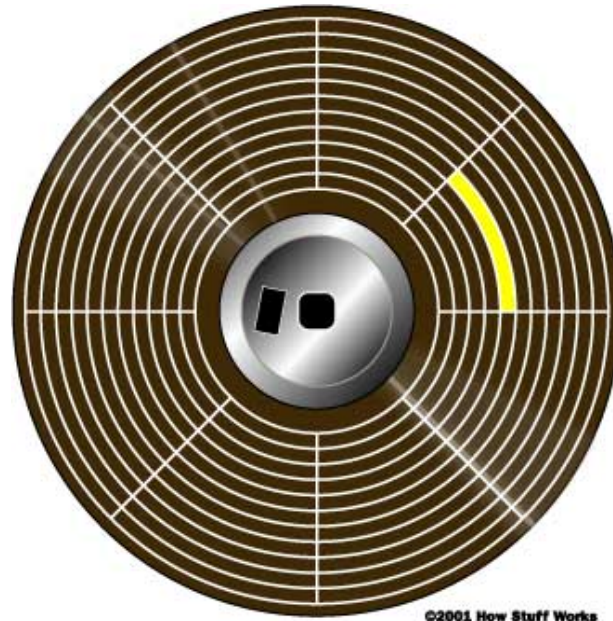
*Σχηματική παράσταση της κεφαλής ενός μαγνητόφωνου.*

### **Μαγνητική εγγραφή – ανάγνωση σε floppy disks**

Οι floppy disks χρησιμοποιούνται στους Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές για να αποθηκεύονται οι πληροφορίες .

Ένας δίσκος αυτής της κατηγορίας είναι καλυμμένος με μαγνητικό υλικό και από τις δύο πλευρές και είναι χωρισμένος σε ομόκεντρους δίσκους που ονομάζονται tracks και τμήματα που ονομάζονται sectors (σημειωμένα στο σχήμα με κίτρινο) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.19. Η δισκέτα όταν είναι στον υπολογιστή γυρίζει συνεχώς πολύ γρήγορα. Οι πληροφορίες βρίσκονται αρκεί να είναι γνωστό το track και sector που βρίσκονται.

Οι αισθητήρες που «γράφουν» και «διαβάζουν» τις πληροφορίες είναι περίπου ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στα μαγνητόφωνα.



**Σχήμα 5.19**

*Παραστατική απεικόνιση ενός floppy disk:*

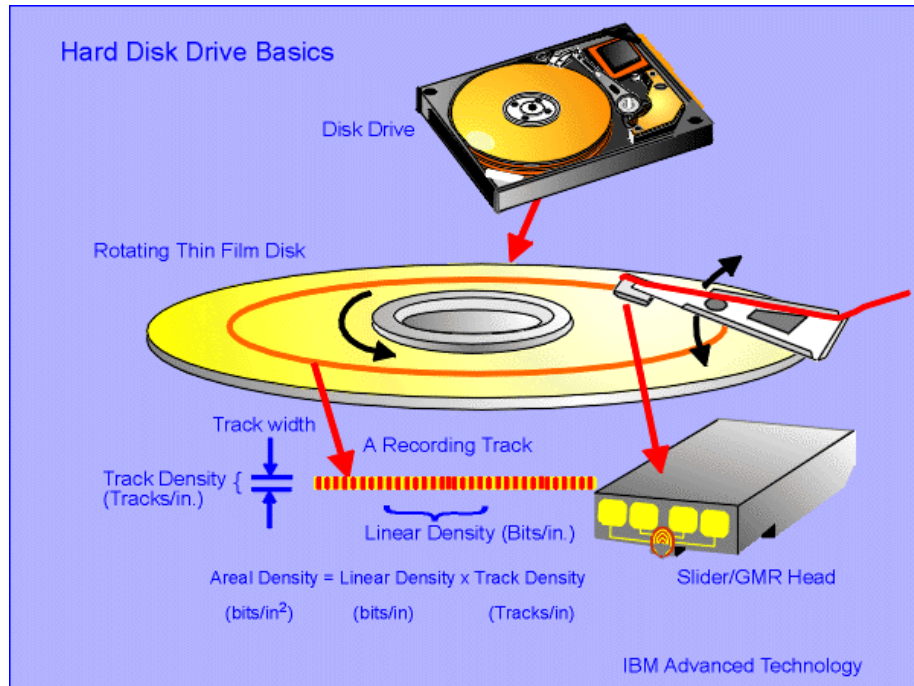
Οι κεφαλές που γράφουν και διαβάζουν είναι δύο και βρίσκονται μια σε κάθε πλευρά της δισκέτας. Και οι δύο κινούνται με τον ίδιο μηχανισμό που τις κινεί κατά μήκος της δισκέτας.

Οι δυο κεφαλές δεν βρίσκονται ακριβώς η μία απέναντι της άλλης και αυτό γίνεται για να μειωθούν τυχών αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των δύο κεφαλών.

### **Μαγνητική εγγραφή – ανάγνωση σε Hard disks**

Οι σκληροί δίσκοι ως γνωστόν χρησιμοποιούνται στους Ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η τεχνολογία μαγνητικής εγγραφής και ανάγνωσης στους δίσκους αυτούς εξελίσσεται μ' έναν εκπληκτικό ρυθμό, όπως και η μηχανική συμπεριφορά του οδηγού (drive) του σκληρού δίσκου.

Στο Σχήμα 5.20 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του δίσκου αποθήκευσης δεδομένων .



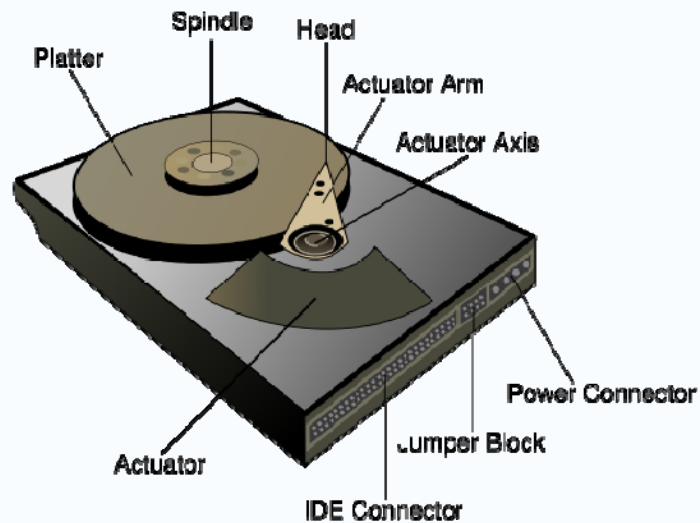
**Σχήμα 5.20:**

*Βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας αποθήκευσης δεδομένων.*

Όπως φαίνεται από το σχήμα οι η μονάδα καταγραφής των δεδομένων αποτελείται από ένα δίσκο που είναι συνήθως από αλουμίνιο ή γυαλί που καλύπτεται από μια λεπτή επικάλυψη από μαγνητικό υλικό. Παλαιότεροι δίσκοι χρησιμοποιούσαν σαν μαγνητικό υλικό Οξειδίο του Σιδήρου σαν το μαγνητικό υλικό , σήμερα σαν μαγνητικό υλικό χρησιμοποιούν ένα υλικό που έχει σαν βάση το Κοβάλτιο. Όπως και οι floppy disks είναι χωρισμένοι σε tracks. Τα tracks είναι χωρισμένα σε bits. Το bit αποτελεί το μικρότερο μέγεθος που μπορεί να αποθηκευθούν δεδομένα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στις θέσεις των bits σαν 0 ή 1. Τα δεδομένα διαβάζονται από τον δίσκο αναγνωρίζοντας σε κάθε bit αν έχει αποθηκευθεί 0 ή 1.

Ο δίσκος (platter) περιστρέφεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και η πληροφορία γράφεται στον δίσκο με κεφαλές που ονομάζονται read and write heads και βρίσκονται πολύ κοντά στην μαγνητική επιφάνεια.

Οι κεφαλές (head) ανιχνεύουν ή τροποποιούν το μαγνητισμό του υλικού που βρίσκεται ακριβώς από κάτω τους. Στο σχήμα 5.21 απεικονίζονται τα διάφορα μέρη ενός σκληρού δίσκου.

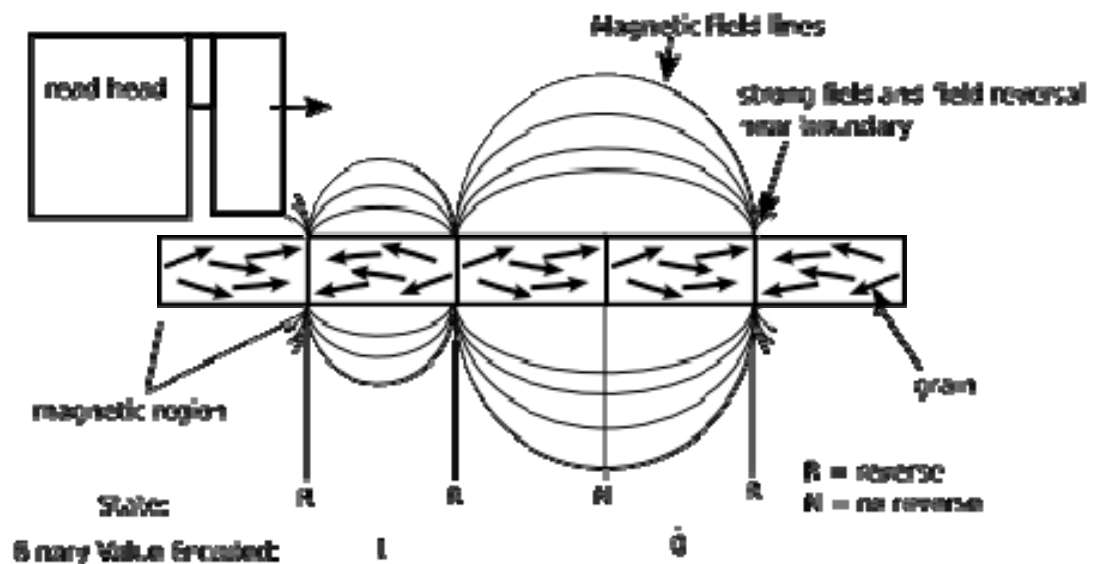


**Σχήμα 5.21**

*Βασικά εξαρτήματα ενός σκληρού δίσκου*

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην πυκνότητα εγγραφής δεδομένων . Αυτό έγινε δυνατό με την χρησιμοποίηση προηγμένης τεχνολογίας κεφαλών όπως την κεφαλή μαγνητοαντίστασης (MR), την προηγμένη κεφαλή μαγνητοαντίστασης(MRx) και την κεφαλή γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR). Λεπτομερής περιγραφή αυτών των τύπων των αισθητήρων έχει δοθεί σε άλλο κεφάλαιο της εργασίας.

Η εφαρμογή τους στους σκληρούς δίσκους περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους.



**Σχήμα 5.22**

*Διαδικασία μαγνητικής εγγραφής*

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται μια επαγωγική κεφαλή ανάγνωσης – εγγραφής να αιωρείται πάνω από έναν περιστρεφόμενο δίσκο.

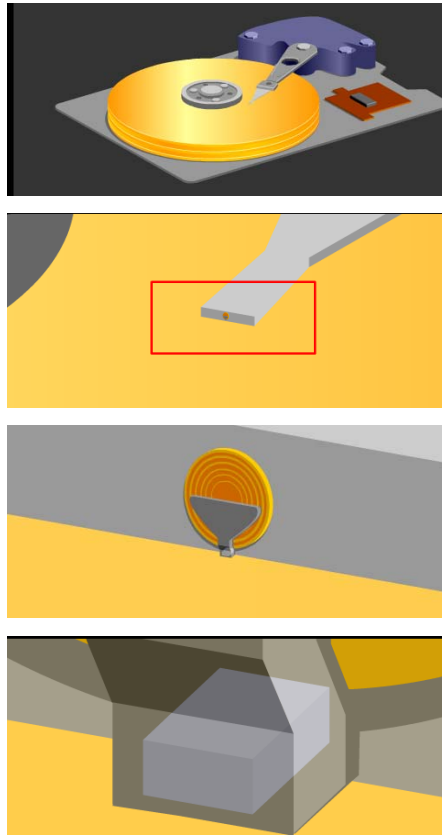
Η επαγωγική κεφαλή εγγραφής, καταγράφει bits πληροφορίας μαγνητίζοντας μικρές περιοχές κατά μήκος ομόκεντρων ιχνών (tracks).

Κατά την ανάγνωση, η παρουσία μιας μαγνητικής μετάπτωσης ή αντίστροφης ροής μεταξύ των bits, προκαλείται μεταβολή στον μαγνητικό προσανατολισμό του αισθητήρα MR. Αυτό προκαλεί αλλαγή στην αντίσταση του MR.

Η τάση εξόδου του αισθητήρα MR είναι το αποτέλεσμα της μεταβολής της αντίστασης και του ρεύματος πόλωσης της ανάγνωσης.

Αυτό το σήμα ενισχύεται με ηλεκτρονική διάταξη για μείωση του θορύβου και στέλνεται στον σκληρό δίσκο (HDD) όπου ανιχνεύεται με κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη.

Στο σχήμα 5.23 είναι 4 φωτογραφίες που δείχνουν πόσο μικρό μέγεθος έχει η κεφαλή ενός σκληρού δίσκου.



**Σχήμα 5.23**

*Μέγεθος κεφαλής σκληρού δίσκου*

### **Συγχωνευμένη κεφαλή ανάγνωσης – εγγραφής**

Η κεφαλή αυτή αποτελείται από ένα λεπτό επαγωγικό υμένιο εγγραφής και ένα στοιχείο ανάγνωσης. Το στοιχείο ανάγνωσης αποτελείται από έναν MR ή GMR αισθητήρα ανάμεσα σε δύο *μαγνητικές ασπίδες*, οι οποίες μειώνουν εξαιρετικά ανεπιθύμητα μαγνητικά πεδία προερχόμενα από τον δίσκο. Ο αισθητήρας MR ή GMR ουσιαστικά 'βλέπει' μόνο το μαγνητικό πεδίο από τα εγγεγραμμένα δεδομένα στα bit.

Σε μια συγχωνευμένη κεφαλή, η δεύτερη μαγνητική ασπίδα λειτουργεί επίσης σαν πόλος της επαγωγικής κεφαλής εγγραφής. Μια συγχωνευμένη κεφαλή

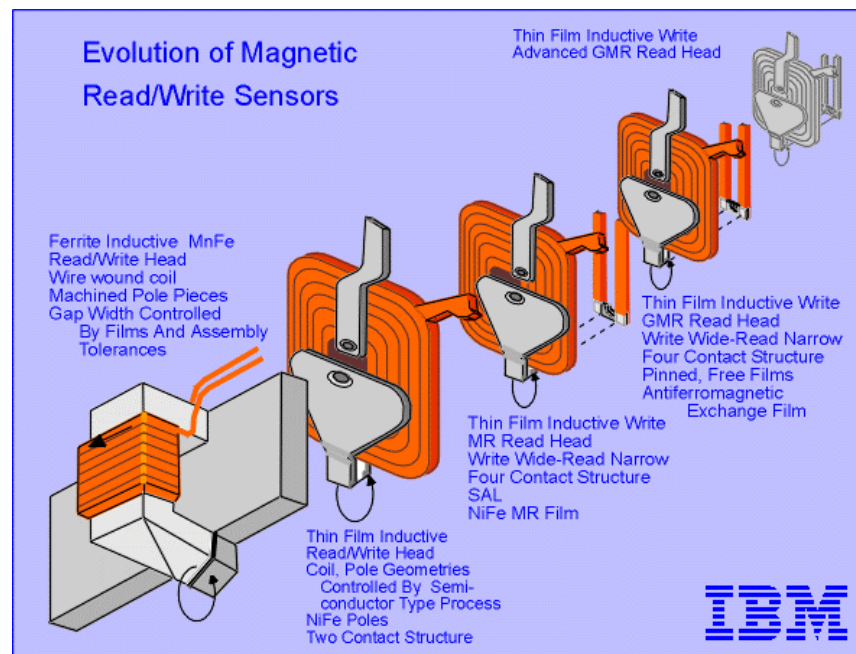


έχει πλεονεκτήματα, όπως πχ το μικρότερο κόστος παραγωγής αφού αποτελεί λιγότερα στάδια στην διαδικασία και συμπεριφέρεται καλύτερα σε ένα drive αφού η απόσταση μεταξύ στοιχείου εγγραφής και ανάγνωσης είναι μικρότερη. Η τεχνολογία των συγχωνευμένων κεφαλών εγγραφής – ανάγνωσης ακολούθησε τα εξής στάδια (Εικόνα 5.13):

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν οι κεφαλές φερρίτη MnFe (MIG heads- metal in gap ferrite). Πρόκειται για επαγωγικές κεφαλές (πηνίο με πυρήνα) με ελεγχόμενο εύρος διακένου.

Έπειτα, η κεφαλή Φερρίτη αντικαταστάθηκε από λεπτό υμένιο μαγνητικού υλικού NiFe (permalloy) δημιουργώντας μια δομή δύο επαφών (TFI-heads).

Στο επόμενο στάδιο αντικαταστάθηκε η κεφαλή ανάγνωσης από κεφαλή μαγνητοαντίστασης (MR). Το στοιχείο εγγραφής ήταν ευρύ ενώ της ανάγνωσης στενό. Τέλος, η μεγάλη ώθηση δόθηκε με την εισαγωγή της GMR κεφαλής ανάγνωσης.

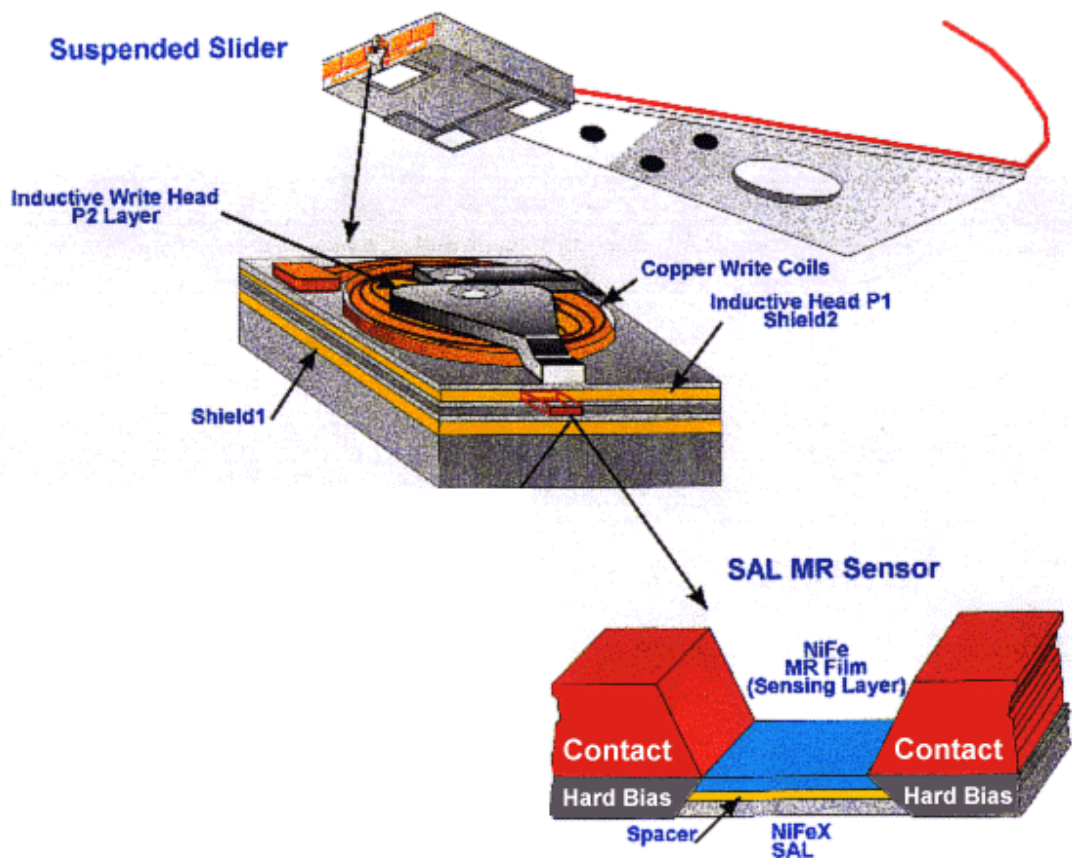


**Εικόνα 5.13**

*Εξέλιξη των μαγνητικών αισθητήρων εγγραφής / ανάγνωσης*

## Κεφαλή Μαγνητοαντίστασης

Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί η εταιρεία IBM για την σχεδίαση MR κεφαλών είναι η SAL (soft adjacent layer). Η δομή αυτή όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.14 , αποτελείται από ξεχωριστά στοιχεία ανάγνωσης και εγγραφής τα οποία μοιράζονται κοινά στρώματα (layers). Το στοιχείο ανάγνωσης ή αισθητήρας MR αποτελείται από ένα υμένιο NiFe το οποίο μεταβάλλει την αντίστασή του με την παρουσία μαγνητικού πεδίου που προσανατολίζεται από τα αποθηκευμένα bits στον δίσκο.

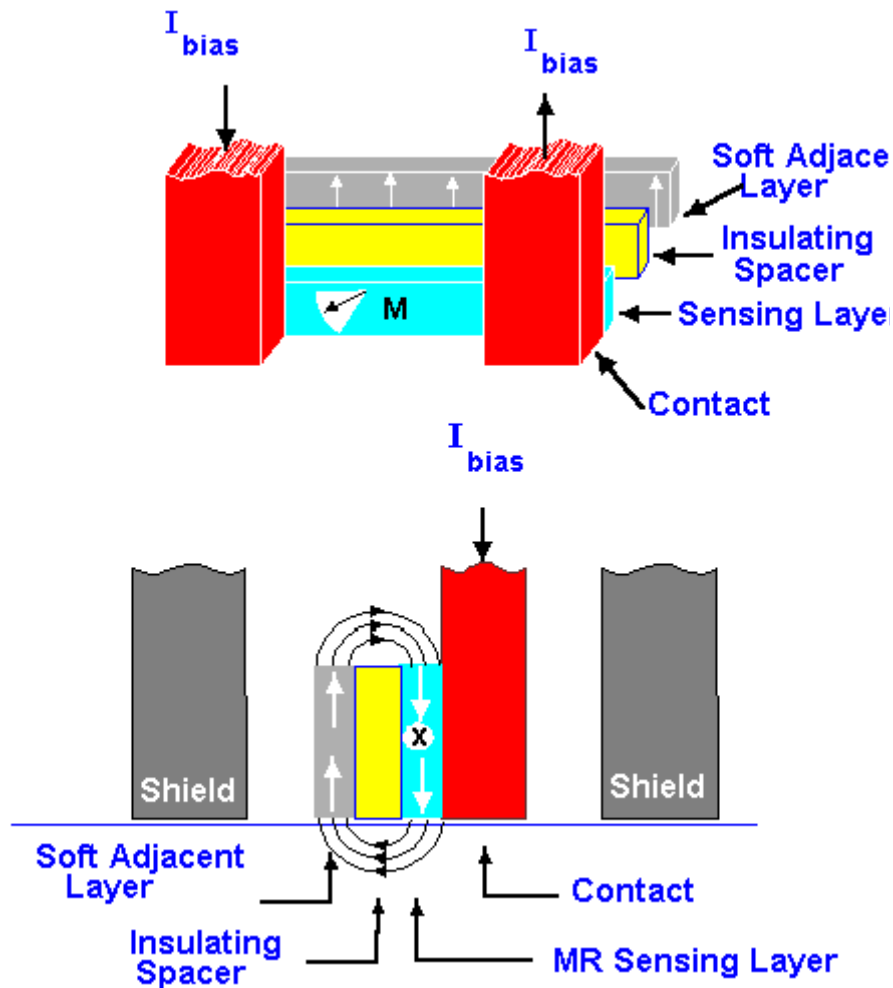


**Εικόνα 5.14**

Δομή αισθητήρα MR

Ο αισθητήρας MR προστατεύεται από γειτονικά μαγνητικά πεδία με στρώματα θωράκισης (shields). Αφού η μία θωράκιση αποτελεί τον ένα πόλο του στοιχείου εγγραφής (επαγωγική κεφαλή), χρησιμοποιείται ο όρος συγχωνευμένη (merged) κεφαλή. Το στοιχείο εγγραφής, ένα λεπτό υμένιο επαγωγικής κεφαλής, μπορεί να κατασκευαστεί πιο εύκολα απ' ότι οι επαγωγικές κεφαλές που αποτελούν συγχρόνως και στοιχείο εγγραφής και ανάγνωσης.

### Λειτουργία MR κεφαλής



**Εικόνα 5.15**

Λειτουργία MR κεφαλής

Ένα ρεύμα πόλωσης περνάει συνεχώς μέσα από τον αισθητήρα και δείχνει την αντίστασή του. Τότε συμβαίνει μη γραμμική μεταβολή στην αντίσταση, καθώς ο αισθητήρας διαπερνάει το μαγνητικό πεδίο του δίσκου. Το ρεύμα πόλωσης δημιουργεί ακόμα ένα μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με την μαγνήτιση του μαλακού υμενίου που υπάρχει από κάτω και το οδηγεί στον κόρο. Αυτά τα αποτελέσματα της εγκάρσιας πόλωσης στην μαγνητική περιστροφή στο υμένιο MR σε μια καθορισμένη γωνία του ρεύματος πόλωσης, οδηγούν τον αισθητήρα MR σε ευθυγράμμιση του σήματος.

Τότε, για να διατηρηθεί η σταθερότητα και για να κατασταλεί ο θόρυβος απ' την μαγνητική περιοχή, εφαρμόζεται μια διαμήκης πόλωση από μια επιπρόσθετη δομή, το hard bias layer.

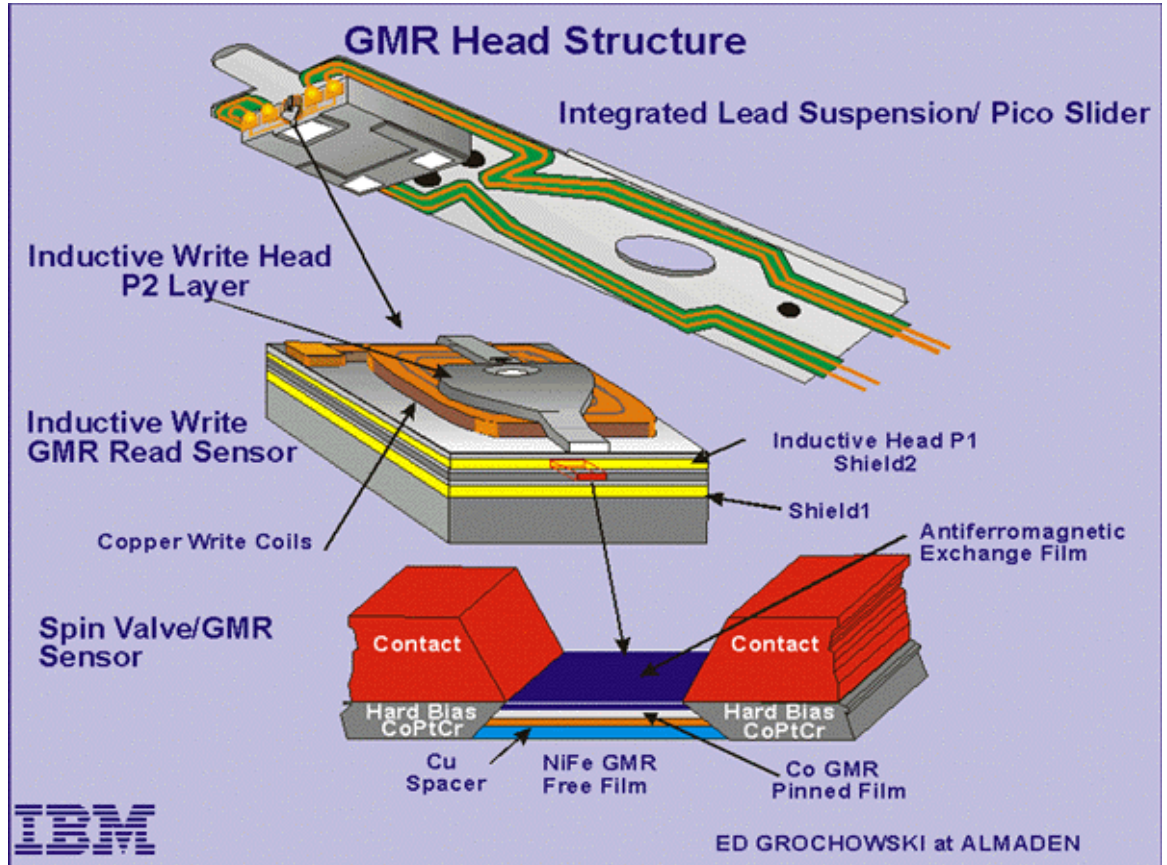
Αυτή μπορεί να διαμορφωθεί στις γειτονικές επαφές του στοιχείου MR. Καθώς η πυκνότητα εγγραφής αυξάνει, οι κεφαλές θα περιέχουν όλο και πιο στενά στοιχεία MR θ' αποτελούνται από συνεχώς λεπτότερα μαγνητικά υμένια.

### **Κεφαλή Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης**

Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetoresistive effect, GMR), ανακαλύφθηκε το 1988 από δύο Ευρωπαίους επιστήμονες , οι οποίοι εργάζονταν ανεξάρτητα. Αυτοί είναι ο Peter Gruenberg του ερευνητικού ινστιτούτου KFA (Γερμανία) και οι Albert Fert και M.N. Baibich του Πανεπιστημίου Sud (Γαλλία). Μελέτησαν τις μαγνητικές ιδιότητες των πολυστρωματικών λεπτών υμενίων (001) Fe / (001)Cr σε υπόστρωμα GaAs, ανεπτυγμένα με τη μέθοδο της επιταξίας μοριακής δέσμης.

Μεταβάλλοντας το πάχος των στρωμάτων του Cr παρατηρήθηκαν διαφορετικές τιμές της μετρούμενης αντίστασης. Το αξιοσημείωτο για εκείνη την εποχή ήταν η μείωση της αντίστασης του πολυστρωματικού λεπτού υμενίου κατά 50%, στους 4.2 K, παρουσία εξωτερικού πεδίου έντασης 20kG. Τα παραπάνω πειράματα εκτελέστηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες με ένα σύστημα εναπόθεσης υψηλού κόστους και υπό την παρουσία υψηλών μαγνητικών πεδίων. Επομένως τα υλικά αυτά μπορούσαν να αναπτυχθούν μόνο στο εργαστήριο και όχι μαζικά σε

κάποια βιομηχανική μονάδα. Στην εικόνα 5.16 παρουσιάζεται η δομή της κεφαλής γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης.



**Εικόνα 6.16**

*Δομή κεφαλής γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης.*

Ο αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) είναι ένα πολυστρωματικό λεπτό υμένιο το οποίο αποτελείται από :

- ένα λεπτό υμένιο NiFe, του οποίου η μαγνητική ροπή είναι ελεύθερη να κινηθεί με την παρουσία μικρού μαγνητικού πεδίου, ελεύθερο σιδηρομαγνητικό στρώμα (πάχους  $\approx 100 \text{ \AA}$ ) (*sensing layer*).

- ένα λεπτό υμένιο Cu, διαμαγνητικό, αγώγιμο στρώμα (πάχους  $\approx 25$  A) (*conducting spacer*).
- ένα λεπτό υμένιο Co, σιδηρομαγνητικό στρώμα με προσανατολισμένη μαγνητική ροπή (πάχους  $\approx 22$  A) (*pinned layer*).
- ένα λεπτό υμένιο FeMn, αντισιδηρομαγνητικό στρώμα προσανατολισμού (πάχους  $\approx 110$  A) (*exchange layer*).

### Λειτουργία της GMR κεφαλής

Η μαγνητική ροπή του λεπτού υμενίου NiFe στρέφεται, όσον αφορά τον σκληρό δίσκο, από παράλληλη σε κάθετη διεύθυνση, όταν εφαρμόζεται ένα αυξανόμενο εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο είναι ο συνδυασμός του εξωτερικού, ποικίλης έντασης, μαγνητικού πεδίου του σκληρού δίσκου και των καθορισμένων εσωτερικών μαγνητικών πεδίων από τα διάφορα σημεία του αισθητήρα.

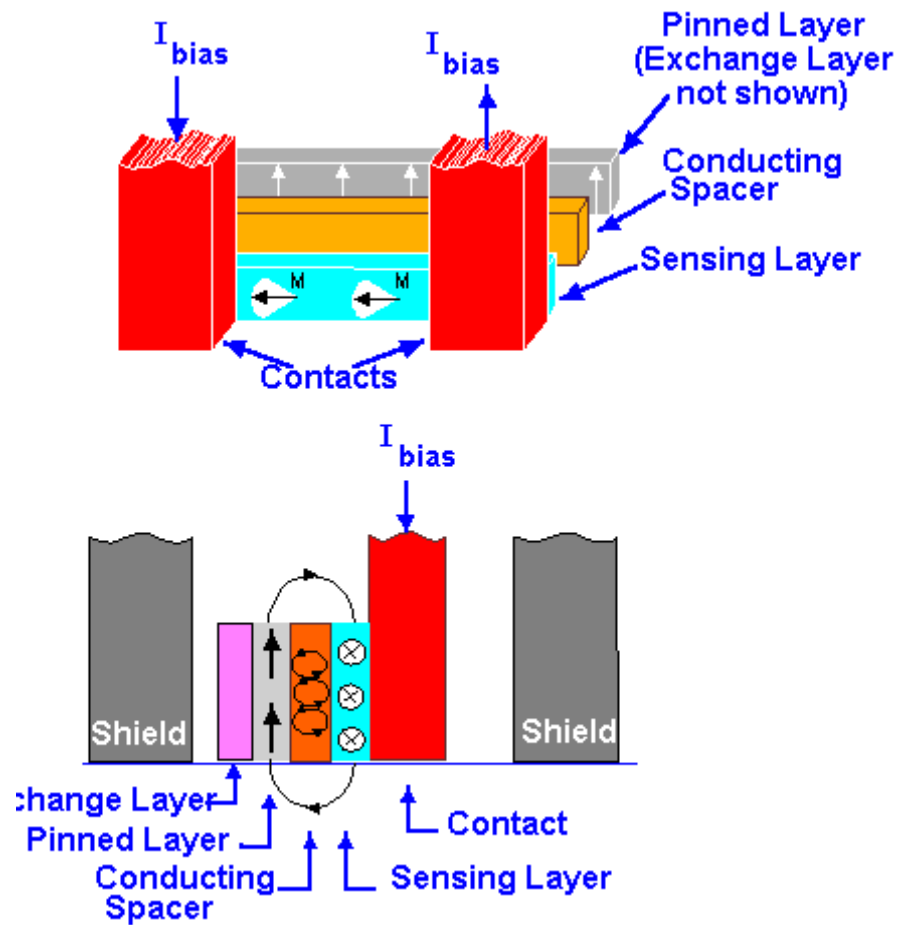
Στην εικόνα 5.17 φαίνεται η ροή του ρεύματος που διαρρέει μία GMR κεφαλή. Οι μεταβολές της έντασής του δίνουν πληροφορίες για τη μαγνήτιση κάθε ίχνους εγγραφής (track) του σκληρού δίσκου.

### Στόχοι

- . Ταχύτερη εγγραφή και ανάγνωση.
- . Ταχύτερη πρόσβαση στα δεδομένα.
- . Μεγαλύτερη πυκνότητα εγγραφής.

. Μεγαλύτερη αντοχή και σταθερότητα.

Μικρότερο κόστος.



**Εικόνα 5.17**  
Λειτουργία GMR κεφαλής

### Σύντομη ιστορική αναδρομή

1897 Μαγνητική εγγραφή σε χαλύβδινο σύρμα.

**1940** Παρουσιάζεται στη Γερμανία από την Telefunken το Μαγνητόφωνο. Μαγνητική ηχογράφηση σε ταινία σωματιδίων  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας του χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα,

**1956** Τεχνολογία περιστρεφόμενων κεφαλών (scanning heads). Επιτρέπει τη βιντεοσκόπηση.

**1957** Τεχνολογία σκληρού δίσκου (rigid disk). Χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων στους Η/Υ και αντικαθιστά εν μέρει τις μαγνητοταινίες.

**1963** Η Philips παρουσιάζει το κασετόφωνο. Συσκευή ηχογράφησης κατάλληλη για οικιακή χρήση λόγω του μικρού της κόστους.

**1974** Τεχνολογία εύκαμπτου δίσκου (floppy disk). Περιορισμένες δυνατότητες, αλλά το χαμηλό κόστος επιτρέπει την χρήση του σε προσωπικούς υπολογιστές.

**1976** Τεχνολογία κεφαλών video ελικοειδούς σάρωσης. Ααπλουστεύει τις συσκευές βιντεοσκόπησης, ελαττώνει σημαντικά το βάρος και το κόστος τους και επιτρέπει την οικιακή τους χρήση.

**1983** Ψηφιακή ηχογράφηση.

**1987** Ψηφιακή βιντεοσκόπηση

## **6.7 Ανιχνευτές μετάλλων [33]**

Οι ανιχνευτές μετάλλων χρησιμοποιούνται όχι μόνο για να βρεθούν



πολύτιμα μέταλλα αλλά και στην ασφάλεια αεροδρομίων , κτιρίων ή και σε μεγάλα γεγονότα όπως ένας αθλητικός αγώνας ή μια συναυλία. Η χρησιμότητα τους όμως είναι μεγάλη και στις αρχαιολογικές ανασκαφές και τις γεωλογικές έρευνες.

Ένας τυπικός ανιχνευτής μετάλλων αποτελείται από :

1. Σταθεροποιητή (stabilizer) , ο οποίος χρησιμοποιείται για να διατηρεί σταθερή τη μονάδα κατά την κίνησή της.

2.Κουτί ελέγχου (control box ) , που περιέχει το κύκλωμα , το ηχείο , μπαταρίες και τον μικροπομπό.

3.Αξονα (shaft) που συνδέει το κουτί ελέγχου και το πηνίο. Συνήθως προσαρμόζεται ώστε να είναι τοποθετημένο σε κατάλληλο , για το ύψος του χρήστη , επίπεδο.

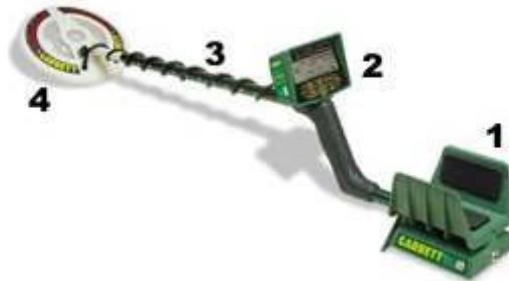
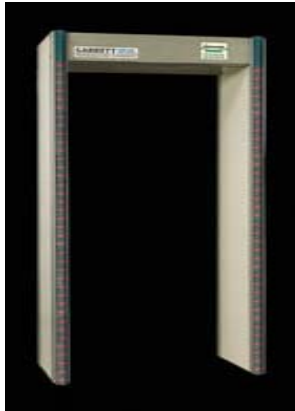
4.Πηνίο έρευνας ή αναζήτησης (search coil).Πρόκειται για το τμήμα που εντοπίζει το μέταλλο , γνωστό επίσης κι ως ‘κεφαλή αναζήτησης’ (search head) , ‘θηλιά’ (loop) ή ‘κεραία’ (antenna).

Μετακινώντας τον ανιχνευτή πάνω από το έδαφος , με αργές κινήσεις εμπρός πίσω , εκπέμπεται ένα ευκρινές σήμα κατά τον εντοπισμό του στόχου. Οι πιο εξελιγμένες μορφές ανιχνευτών δύνανται να δείξουν με απόλυτη ακρίβεια τον τύπο του μετάλλου που ανιχνεύθηκε και το βάθος στο οποίο εντοπίστηκε.

Οι ανιχνευτές μετάλλων χρησιμοποιούν μια από τις τρεις τεχνολογίες:

- A. Χαμηλών συχνοτήτων (Very low frequency , VLF )
- B .Παλμικής επαγωγής (Pulse Induction , PI )

Γ. Ρυθμικής συχνοτικής ταλάντωσης (Beat–frequency oscillation , BFO



**Εικόνα 5.18**

*Δυο διαφορετικές χρήσεις του ανιχνευτή μετάλλων*

Οι ανιχνευτές μετάλλων χρησιμοποιούν μια από τις τρεις τεχνολογίες:

A. Χαμηλών συχνοτήτων (Very low frequency , VLF )

B .Παλμικής επαγωγής (Pulse Induction , PI )

Γ. Ρυθμικής συχνοτικής ταλάντωσης (Beat–frequency oscillation , BFO

)

## 5.8 Αισθητήρας φαινομένου Hall [34]

Οι αισθητήρες φαινομένου Hall χρησιμοποιούνται στους διανομείς πολλών συστημάτων ανάφλεξης για να ενεργοποιήσουν το πρωτεύον κύκλωμα (έναυση σπινθήρα) και για να μετρήσουν τις στροφές/λεπτό του κινητήρα.

Χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλά συστήματα ανάφλεξης χωρίς διανομέα (DIS) για να καθορίσουν τη θέση του στροφαλοφόρου και του εκκεντροφόρου άξονα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο εγκέφαλος του κινητήρα πρέπει να ξέρει που ο αριθμός ένα κύλινδρος είναι μόλις η μηχανή αρχίσει να στροφάρει. Μόλις ο πολύ σημαντικός "συγχρονισμένος παλμός" ανιχνεύεται, η ακολουθία ανάφλεξης μπορεί να αρχίσει να δίνει τάση στους σπινθηριστές στη σωστή ακολουθία.

Αυτό επιτρέπει επίσης το χρόνο έγχυσης να αντιστοιχηθεί με το χρόνο που θα δοθεί ο σπινθήρας στις μηχανές με διαδοχική έγχυση καυσίμων. Οι αισθητήρες Hall αναφέρονται μερικές φορές ως "διακόπτες" λόγω του on-off "ψηφιακού" σήματος τάσης που παράγουν. Αντίθετα από τους μαγνητικούς αισθητήρες που παράγουν ένα σήμα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που ποικίλλει στην τάση με την ταχύτητα, οι αισθητήρες Hall παράγουν ένα σταθερό σήμα τάσης που μπορεί να αλλάξει απότομα από τη μέγιστη τάση σε σχεδόν μηδέν και πάλι πίσω ανεξάρτητα από τις στροφές της μηχανής. Αυτό παράγει σήμα κυματομορφής σχεδόν τετραγωνικής,(βλέπε σχήμα) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα από τον υπολογιστή για λόγους συγχρονισμού.

## **Πως λειτουργεί**

Ένας χαρακτηριστικός αισθητήρας Hall έχει τρία καλώδια ή τερματικά: ένας για τη γείωση, ένας για την τάση μπαταρίας ή αναφοράς και ένας για το σήμα εξόδου. Για να παραγάγει ένα σήμα εξόδου, ένας αισθητήρας Hall πρέπει να τροφοδοτηθεί με μια τάση αναφοράς από τον υπολογιστή του οχήματος (που μπορεί να είναι 5 έως 12 βολτ ανάλογα με την εφαρμογή). Η τάση τροφοδότησης είναι απαραίτητη για να δημιουργήσει το φαινόμενο που πραγματοποιείται μέσα στον αισθητήρα.

Η λειτουργούσα αρχή στην οποία οι αισθητήρες Hall είναι βασισμένοι (και έτσι ονομασμένη) χρονολογείται από 1879 όταν ανακάλυψε ο Edwin H. Hall, ένας αμερικανός επιστήμονας, ένα νέο ηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν εφάρμοσε ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κομμάτι του μετάλλου που παρεμβλήθηκε μεταξύ δύο μαγνητών, δημιούργησε μια δευτεροβάθμια τάση μέσα στο μέταλλο όταν τοποθετήθηκε σε μια σωστή γωνία στην εφαρμοσμένη τάση.

Η ανακάλυψη δεν είχε πολλή πρακτική χρήση τότε, αλλά αποδείχθηκε ότι αυτό ήταν ακριβώς ότι οι μελλοντικοί μηχανικοί χρειάζονται για να δημιουργήσουν μια συσκευή μετατροπής ικανή για ένα αποδοτικό on-off σήμα τάσης τετραγωνικής κυματομορφής. Το φαινόμενο Hall προσαρμόστηκε έτσι ώστε η αλλαγή τάσης να εμφανίζεται σε ένα τσιπ σιλικόνης που τοποθετείται στη σωστή γωνία του μαγνητικού πεδίου.

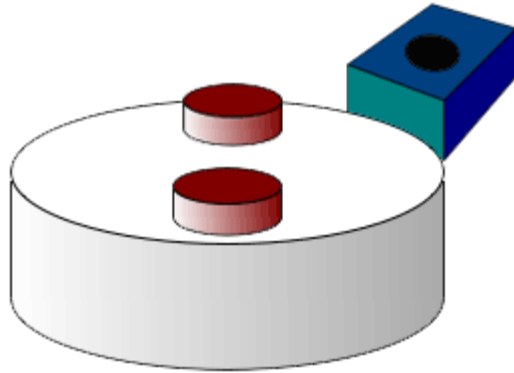
Όταν ένα μεταλλικό έλασμα περνά μέσω του κενού αέρα μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του τσιπ πυριτίου, διακόπτει το μαγνητικό πεδίο και αναγκάζει την τάση παραγωγής του τσιπ για να μειωθεί ξαφνικά στο μηδέν. Με τα πρόσθετα στοιχεία κυκλώματος, ο αισθητήρας μπορεί να κάνει ακριβώς το αντίθετο: να παραγάγει ένα σήμα τάσης όταν περνάει το έλασμα από το μαγνητικό πεδίο. Τα πρόσθετα στοιχεία κυκλώματος ρυθμίζουν την τάση τροφοδότησης στο τσιπ και ενισχύουν την τάση εξόδου του.

Σε ένα σύστημα ανάφλεξης αυτοκινήτου, τα ελάσματα τοποθετούνται στον άξονα του διανομέα, στο ρότορα, στην τροχαλία του στροφαλοφόρου άξονα ή στον εκκεντροφόρο έτσι ο αισθητήρας μπορεί να παραγάγει ένα σήμα σπινθηροδότησης ή θέσης, ή και τα δύο μαζί, καθώς ο στροφαλοφόρος άξονας περιστρέφεται. Σε μερικές εφαρμογές, μια εγκοπή σε μια τροχαλία, ένα δόντι γραναζιού ή ακόμα και ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό κουμπί εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με το μεταλλικό έλασμα για να διακόψει το "μαγνητικό παράθυρο" του αισθητήρα και να κλείσει το διακόπτη.

Ένας αισθητήρας Hall μπορεί να είναι είτε "ανοικτός" είτε "κλειστός" ανάλογα με το πώς τα στοιχεία κυκλώματός του είναι σχεδιασμένα. Όταν είναι "ανοικτός" (όπως οι αισθητήρες θέσης του στροφαλοφόρου της GM) παράγει μια σταθερή τάση εξόδου όταν το μαγνητικό παράθυρο είναι ανεμπόδιστο και κανένα έλασμα δεν περνά.

Η τάση εξόδου μειώνεται για να πλησιάσει σε μηδέν όταν εισάγεται ένα μεταλλικό έλασμα στο μαγνητικό παράθυρο και εμποδίζει το πεδίο. Το σήμα συλλογής του προφίλ ανάφλεξης (PIP) και το σήμα προσδιορισμού του πρώτου κυλίνδρου (CID) που βρίσκονται σε κινητήρες της Ford που έχουν ανάφλεξη χωρίς διανομέα(DIS) λειτουργεί με τον αντίθετο τρόπο. Όταν το έλασμα περνά πέρα και εμποδίζει το μαγνητικό πεδίο, ο εσωτερικός ηλεκτρονικός διακόπτης του

αισθητήρα αλλάζει το σήμα εξόδου του αισθητήρα από πλησίον μηδέν (θέση off) στη μέγιστη τάση (on).



**Εικόνα 5.19**  
*Διάταξη αισθητήρα Hall*

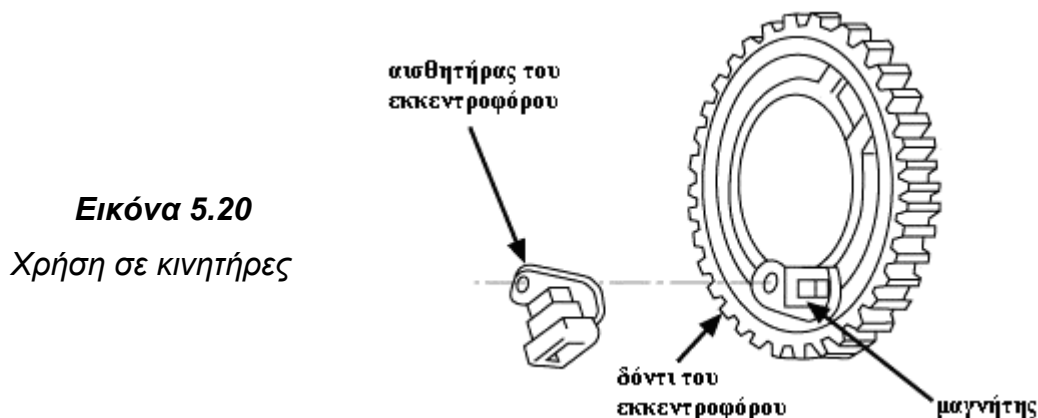
## Εφαρμογές αισθητήρα Hall

Οι περισσότεροι σύγχρονοι κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με αισθητήρα ή διακόπτη HALL για να εντοπίζεται η θέση και οι στροφές του εκκεντροφόρου και του στροφαλοφόρου άξονα. Αυτοί οι αισθητήρες διαφέρουν σε μέγεθος και σε σχεδίαση αλλά είναι όμοιοι στην αρχή και τον τρόπο λειτουργίας. Οι διαφορές αυτές εντοπίζονται κυρίως στην τάση λειτουργίας και τον τρόπο που τοποθετούνται ανάλογα με την σχεδίαση του εκάστοτε κινητήρα. Ο αισθητήρας hall είναι ένας πολύ ακριβής τρόπος για να γνωρίζει ο 'εγκέφαλος' του οχήματος ανά πάσα στιγμή την θέση και τη ταχύτητα των δυο αυτών αξόνων.

Οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν διάκενα και ελάσματα. Το διάκενο αφήνει να περάσει το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από ένα μόνιμο μαγνήτη. Όταν το έλασμα περάσει από το μαγνητικό πεδίο, τότε το

διακόπτει και δημιουργείται μια αλλαγή στην τάση την οποία ο 'εγκέφαλος' την αισθάνεται. Όταν περνάει από το έλασμα τότε η τάση πέφτει πρακτικά στο μηδέν.

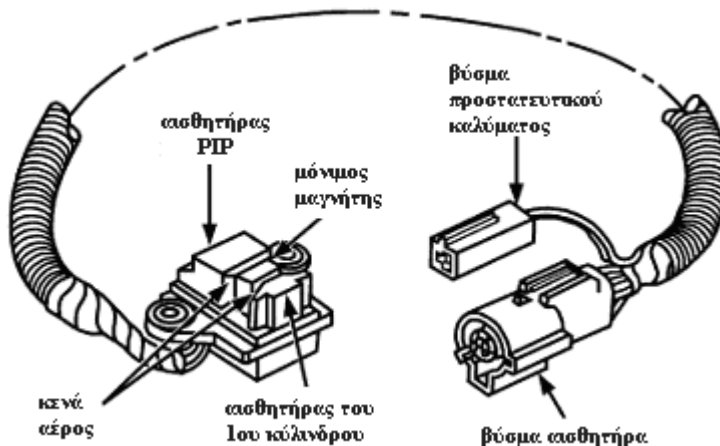
Ενώ όταν παρεμβάλλεται το έλασμα, η τάση ανεβαίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή. Αυτή η τάση είναι συνήθως ίση με την τάση της μπαταρίας σε μοντέλα της GM, της Ford και σε πολλούς κινητήρες της Chrysler. Όμως στους κινητήρες της Chrysler 3.3L, 3.5L, 3.8L, ο Η/Υ δίνει τάση 8 volt, και δέχεται μια των 5 έως 0 volt στο καλώδιο του αισθητήρα. Μερικοί αισθητήρες hall χρησιμοποιούν ένα κινητό μαγνήτη προσκολλημένο σε ένα δόντι για να υπολογίζεται ο χρόνος (General Motors), αλλιώς κόμβους στο στρόφαλο για να δοθεί σήμα (Chrysler).



Η General Motors, η Ford, και η Chrysler έχουν κινητήρες που χρησιμοποιούν διπλούς αισθητήρες hall. Οι κινητήρες της Chrysler που χρησιμοποιούν στροβιλοσυμπιεστή έχουν δυο ξεχωριστούς αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται πάνω στη βάση του διανομέα με τις δικές τους συνδέσεις (3 καλώδια για το καθένα). Η GM καθώς και η Ford χρησιμοποιούν διπλούς αισθητήρες hall σε μια εφαρμογή με 4 συνδετικά καλώδια. Και οι δυο αυτοί αισθητήρες μοιράζονται την ίδια παροχή των 12 volt και την γείωση. Τα αλλά 2 καλώδια είναι για το σήμα της εξόδου τάσης 12 έως 0 volt. Η GM χρησιμοποιεί διαφορετικούς αισθητήρες για τον εκκεντροφόρο και τον στροφαλοφόρο άξονα σε συνδυασμό με Ανάφλεξη χωρίς Διανομέα και αλληπάλληλου χρονισμού έγχυσης καύσιμου.

Στα οχήματα της Ford χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall για να δοθεί σήμα στον υπολογιστή για να βελτιωθεί η αναλογία Ανάφλεξης Χονδρού Φιλμ (Thick Film Ignition). Αυτό ονομάζεται σήμα συλλογής του προφίλ ανάφλεξης (PIP). Το σύστημα ανάφλεξης διπλού σπινθήρα με διανομέα (DIS) της Ford,

εκμεταλλεύεται ένα δεύτερο αισθητήρα, (στην ίδια εγκατάσταση) για να αναγνωρίσει τον πρώτο κύλινδρο. Αυτό ονομάζεται σήμα αναγνώρισης του πρώτου κυλίνδρου (CID).



**Εικόνα 5.21**

*Χρήση σε κινητήρες*

Η Chrysler ξεκίνησε να χρησιμοποιεί αισθητήρες με το ντεμπούτο του κινητήρα Omni/Horizon 1.7L το 1978 και το συνέχισε και σε επερχόμενα μοντέλα. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στον διανομέα και το έλασμα ήταν μέρος της συναρμολόγησης του ρότορα. Αυτός ο τύπος δούλευε με ένα 12βολτο κύκλωμα το οποίο έστελνε σήμα στην Ηλεκτρονική Αναλογία Ανάφλεξης ή στον Υπολογιστή για τον έλεγχο της ανάφλεξης. Αργότερα στην δεκαετία του '80 η Chrysler εισήγαγε το σύστημα DIS και οι αισθητήρες Hall άλλαξαν τοποθεσίες εγκατάστασης και σχεδιασμό.

Ένας αισθητήρας τοποθετημένος στο στρόφαλο, διαβάζει την ταχύτητα του κινητήρα όπως περνάνε οι 3 ομάδες των 4 κόμβων του στρόφαλου από μπροστά του. Ο αισθητήρας του εκκεντροφόρου, που είναι τοποθετημένος στην κεφαλή της μηχανής, βλέπει την θέση του, από τα δόντια του. Αυτοί οι αισθητήρες Hall τροφοδοτούνται από ρεύμα τάσης 8 volt και η έξοδος τους είναι τάσης 5 έως 0 volt στον 'εγκέφαλο' της μηχανής.

Όλοι οι αισθητήρες Hall έχουν 3 καλώδια για να λειτουργήσουν. Το ένα από αυτά μεταφέρει την τάση παροχής και το δεύτερο καλώδιο γειώνει τον αισθητήρα. Και τα δυο τροφοδοτούνται από την Αναλογία Ανάφλεξης ή τον 'εγκέφαλο'. Το

τρίτο καλώδιο είναι η μπαρέτα. Αυτό το καλώδιο είναι η έξοδος του αισθητήρα στον Υπολογιστή. Η τάση αυξάνεται, συνήθως στην τάση της μπαταρίας και μετά μειώνεται σχεδόν στο μηδέν με την κίνηση των διάκενων και των ελασμάτων που εξηγήθηκαν νωρίτερα. Το σήμα είναι σχεδόν τετράγωνο και έτσι δεν χρειάζεται μετατροπέας για να γίνει ψηφιακό για να διαβαστεί από τον υπολογιστή. Αυτός μετράει τον χρόνο μεταξύ των παλμών και υπολογίζει τον απαιτούμενο χρονισμό και τροφοδοσία καύσιμου, ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα.

Για να λειτουργήσει σωστά ένας αισθητήρας Hall, πρέπει να έχει την κατάλληλη τάση και γείωση. Εάν οποιαδήποτε σύνδεση διακοπεί ο αισθητήρας δεν δουλεύει. Επίσης ένα βραχυκύκλωμα στην γείωση ή στην τροφοδοσία ή στο καλώδιο εξόδου μηδενίζει την ένδειξη στο στροφόμετρο.

### **Παλμική γεννήτρια φαινομένου Hall**

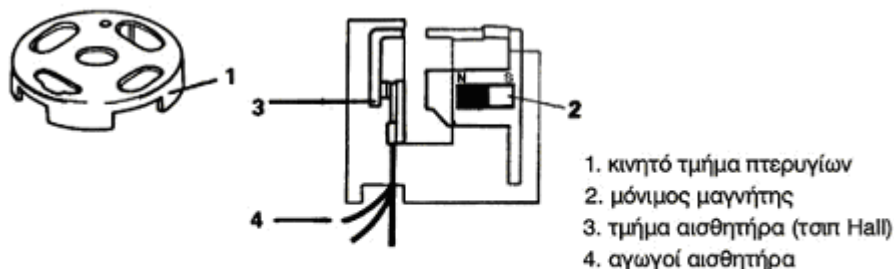
Η συσκευή αυτή αποτελείται από ολοκληρωμένο κύκλωμα (τσιπ) πυριτίου, μέσω των αντίθετων άκρων του οποίου διέρχεται ρεύμα μικρής έντασης. Όταν στην κύρια επιφάνεια του τσιπ δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο, μια διαφορά δυναμικού (τάση) εμφανίζεται μεταξύ των δύο άκρων του. Το δυναμικό αυτό ονομάζεται τάση Hall και χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του σπινθήρα ανάφλεξης όταν το μαγνητικό πεδίο διαφοροποιηθεί – το τελευταίο επιτυγχάνεται μέσω ενός δίσκου με μεταλλικά τμήματα πτερυγίων.

Το μαγνητικό πεδίο συνήθως δημιουργείται μέσω ενός μικρού μόνιμου μαγνήτη στις αντίθετες πλευρές του διακένου από το τσιπ Hall. Σημειώστε ότι τα πτερύγια του δίσκου θα διακόψουν το μαγνητικό πεδίο καθώς περνούν ανάμεσα στο διάκενο μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του στοιχείου Hall.

Τυπικά, το τσιπ λαμβάνει ένα ρεύμα της τάξεως των 30mA περίπου και παρέχει ένα σήμα τάσης Hall των 2mV, που όμως επηρεάζεται από το συντελεστή θερμοκρασίας – η τάση Hall αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το τσιπ είναι συνήθως ενσωματωμένο σε ένα άλλο ολοκληρωμένο κύκλωμα, που παρέχει σήμα, κυματομορφή και ενίσχυση.

Τα τσιπ Hall-IC, έχουν την γεννήτρια Hall προσαρμοσμένη στο κέντρο του τσιπ – σημειώστε ότι το μέγεθός του είναι μόλις 1,5 x 1.6 mm.





**Εικόνα 5.22**

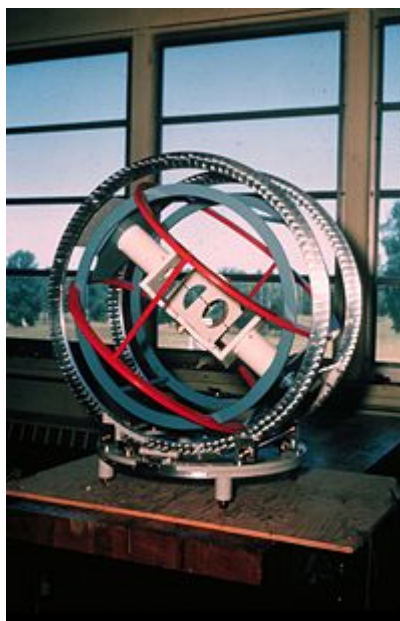
*Μέρη παλμικής γεννήτριας*

## 5.9 Μαγνητόμετρο πρωτονίου [35]

Το **μαγνητόμετρο πρωτονίου** μετρά πολύ μικρές από κλίσεις του μαγνητικού πεδίου της [γης](#), γεγονός που μας επιτρέπει να ανιχνεύουμε σιδηρά αντικείμενα στην ξηρά και τη [θάλασσα](#), διαδικασία που αποκαλείται [γεωφυσική διασκόπηση](#). Η γεωφυσική διασκόπηση έχει ως κύριο στόχο της τη δημιουργία μιας σχετικά ακριβούς αποτύπωσης των θαμμένων «αντικειμένων» στο εσωτερικό του εδάφους μιας συγκεκριμένης περιοχής.

Τα μαγνητόμετρα πρωτονίου χρησιμοποιούνται στην [αρχαιολογία](#) για την ανίχνευση και χαρτογράφηση κατεδαφισμένων τοίχων και κτηρίων. Χρησιμοποιούνται, επίσης, στην υποβρύχια αρχαιολογία για τον εντοπισμό ναυαγίων, πολύ περισσότερο στον τομέα των [αυτόνομων](#) καταδύσεων για συγχρονα ναυάγια με μεγάλη μάζα [σιδήρου](#).

Η βασική δομή του μαγνητομέτρου πρωτονίου συνίσταται σε μια χάλκινη συνήθως ηλεκτραγώγιμη σπείρα που περιβάλλει έναν κύκλινδρο παραφίνης ή κηροζίνης, υλικά δηλαδή που είναι πλούσια σε πρωτόνια. Μετρήσιμο [ηλεκτρικό](#) ρεύμα εισάγεται στη σπείρα εξαιτίας της επαναδιευθέτησης των πρωτονίων της η παραφίνης, καθώς το μαγνητόμετρο περνά πάνω από εναλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.



**Εικόνα 5.22**

*Μαγνητόμετρο πρωτονίου*

### **Εφαρμογές μαγνητόμετρου πρωτονίου**

Σύμφωνα με τον Κρίστοφερ Πιμπλς (Christopher S. Peebles) στο [Γεωφυσική στον αρχαιολογικό τόπο του Angel: Παρελθόν, Παρόν και Μέλλον](#), "το [1958](#), ο Τζ Μπλακ (G. Black) και ο Έλι Λίλυ (Eli Lilly), ακολουθώντας προγενέστερες εργασίες του Μ. Άιτκεν (M. J. Aitken) και των συνεργατών του στο Αρχαιομετρικό Εργαστήριο του πανεπιστημίου της Οξφόρδης χρησιμοποίησαν το μαγνητόμετρο πρωτονίου για να εντοπίσουν και να χαρτογραφήσουν θαμμένα αρχαιολογικά τέχνηρα. Το [1959](#), με την υποστήριξη της Ιστορικής Εταιρείας της Ιντιάνα, ο Τζ. Μπλακ κατασκεύασε ένα βελτιωμένο μαγνητόμετρο για γενικούς σκοπούς. Αποδείχθηκε λίγο καλύτερο από τα προηγούμενα στον εντοπισμό μεγάλων μαζών, Ιαλλά δεν ήταν πραγματικά κατάλληλο για αρχαιολογικές εφαρμογές.

Το 1959 πάλι με την υποστήριξη της Ιστορικής Εταιρείας κατασκευάστηκε ένα μαγνητόμετρο προορισμένο ειδικά για την αρχαιολογική έρευνα. από το

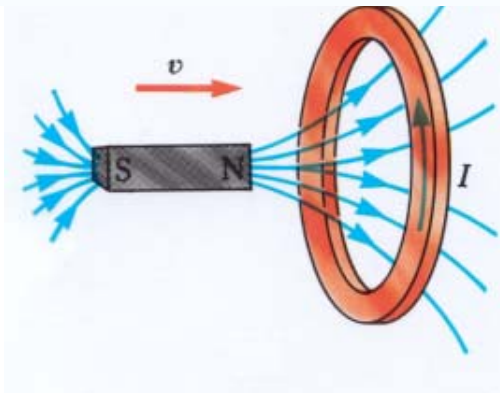
Αρχαιομετρικό Εργαστήριο της Οξφόρδης". "Το [1961](#) και το [1963](#) το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών (National Science Foundation) χρηματοδότησε τον Μπλακ και την Ιστορική Εταιρεία της Ιντιάνα για να διερευνήσουν τη χρησιμότητα του μαγνητόμετρου στην αρχαιολογική έρευνα. Στην περίοδο [1961-1963](#), ερευνήθηκαν πάνω από 30.000 τετρ. μέτρα στον αρχαιολογικό τόπο του Angel και πάνω από 2.000 τετρ. μέτρα ανασκάφθηκαν, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια του οργάνου. Αυτή ήταν η πρώτη συστηματική χρήση του μαγνητομέτρου πρωτονίου για την αρχαιολογική έρευνα και το όλο έργο δημοσιεύθηκε και από τον Μπλακ και από τον συνεργάτη του P. Τζόνστον, (R. B. Johnston)".

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

### ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΤΕΡΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΝΟΜΩΝ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

#### Π1.1 Νόμος Faraday [16]

Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (ή απλώς ηλεκτρική επαγωγή) (Electric Induction) ονομάζεται η εμφάνιση ηλεκτρικής τάσεως εξ αιτίας μαγνητικού πεδίου στα άκρα ενός αγωγού, η οποία δημιουργείται όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την περιοχή που βρίσκεται ο αγωγός . Η ανακάλυψη του φαινομένου αποδίδεται στον Άγγλο φυσικό Μάικλ Φαραντέι(\*) (Michael Faraday), και έγινε το 1831.



**Εικόνα Π1.1**

Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

#### Περιγραφή

Σύμφωνα με τον ορισμό της, η μαγνητική ροή που διέρχεται από μία επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους. Πρώτον, αν μεταβληθεί η

ένταση του μαγνητικού πεδίου εντός του οποίου βρίσκεται η επιφάνεια και δεύτερον, σε ένα μη μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί αν αλλάξει ο προσανατολισμός της επιφάνειας σε σχέση με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Επομένως για να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στα άκρα ενός αγωγού υπάρχουν δύο τρόποι: Είτε μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου στην θέση που βρίσκεται ο αγωγός, είτε μετακινώντας τον αγωγό εντός του μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε περίπτωση, στα άκρα του αγωγού αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στην οποία έχει, λόγω της προέλευσής της, αποδοθεί η ονομασία επαγωγική τάση ή τάση από επαγωγή.

Στην περίπτωση που τα άκρα του αγωγού είναι συνδεδεμένα με αγώγιμο υλικό, οπότε δημιουργείται κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα, το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής εκφράζεται με την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στο κύκλωμα. Σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής (ή νόμο του Φαραντέι), η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

όπου

$\mathcal{E}$  είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη, εκφρασμένη σε volt, και

$\Phi$  είναι η μαγνητική ροή, εκφρασμένη σε Weber

Στην περίπτωση που το φαινόμενο εξελίσσεται σε πηνίο, ο νόμος της επαγωγής έχει τη μορφή

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi}{dt},$$

όπου

$\mathcal{E}$  είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη, εκφρασμένη σε volt,

$\Phi$  είναι η μαγνητική ροή που διέρχεται από μία σπείρα του πηνίου, εκφρασμένη σε Weber και

$N$  είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

Και στις δύο περιπτώσεις, το αρνητικό πρόσημο (-) στη μαθηματική έκφραση του νόμου της επαγωγής δικαιολογείται από τον κανόνα του Λεντς.

**Σημείωση:** Ο Νόμος του Lenz's είναι ένας βασικός Νόμος της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας που ερμηνεύει την διεύθυνση ροής του ρεύματος που δημιουργείται από επαγωγή. Σύμφωνα με τον Νομό του Lenz's όταν ένα ρεύμα που ρέει σ'ένα αγωγό και οφείλεται σε αλλαγή του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται γύρω από τον αγωγό τότε, η διεύθυνση που θα ρέει το ρεύμα είναι τέτοια ώστε να παράγει ένα πεδίο που να αντιτίθεται στην αρχική αλλαγή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.



**Εικόνα Π1.2**

*Πειραματική απόδειξη του Νόμου του Lenz's*

Στο Σχήμα Π1.2 είναι δύο πειραματικές διατάξεις που αποδεικνύουν τον Νόμο του Lenz's. Στην πρώτη διάταξη ένας μαγνήτης πλησιάζει ένα πηνίο που είναι συνδεδεμένο με ένα αμπερόμετρο. Ο πόλος του μαγνήτη που πλησιάζει είναι ο βόρειος (N). Τότε στο πηνίο αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο με βόριο πόλο

προς την μεριά του Βόρειου πόλου του πηνίου. Στην δεύτερη διάταξη ο μαγνήτης απομακρύνεται από το πηνίο τότε στο πηνίο αναπτύσσεται ένα πεδίο που παρουσιάζει το νότιο πόλο προς την μεριά του μαγνήτη.

## Π1.2 Φαινόμενο ZEEEMAN [17]

Κατά τη παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου τα ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων των ατόμων, των ιόντων και των μορίων διαχωρίζονται σε περισσότερα από ένα επίπεδα. Αυτό αναγκάζει τις φασματικές γραμμές εκπομπής να διαχωριστούν επίσης σε περισσότερες από μια γραμμές, με τον αριθμό των διαχωρισμών να είναι ανάλογος με την ισχύ του Μαγνητικού Πεδίου. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο Zeeman, και η αντίστοιχη αύξηση στον αριθμό των φασματικών γραμμών καλείται διαχωρισμός Zeeman.

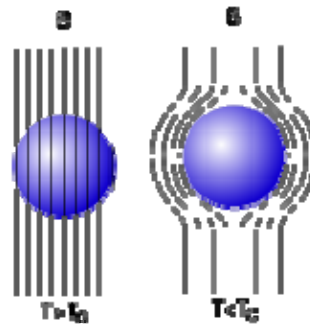
Κατά συνέπεια, μπορούμε να συμπεράνουμε την παρουσία μαγνητικών πεδίων εάν βλέπουμε στο φάσμα το διαχωρισμό Zeeman, και μπορούμε να μετρήσουμε την ισχύ του πεδίου με να μετρήσουμε ποσοτικά τη ποσότητα των γραμμών λόγω φαινομένου Zeeman.

## Π1.3 Υπεραγωγιμότητα (SUPERCONDUCTIVITY) [18]

Υπεραγωγιμότητα είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε μερικά υλικά, σύμφωνα με το οποίο, όταν αυτά ψυχθούν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  εμφανίζουν τις εξής δύο ιδιότητες:

- Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση
- Τέλειο διαμαγνητισμό (φαινόμενο Meissner)

Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σημαίνει ότι δεν δαπανάται καθόλου ενέργεια ως θερμότητα όταν το υλικό διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα Π1.3**

*Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Meissner*

Η δεύτερη από τις ιδιότητες, τέλειος διαμαγνητισμός σημαίνει ότι το υπεραγώγιμο υλικό απωθεί εκτός της μάζας του όλες τις δυναμικές γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου, οι οποίες αν το υλικό ήταν σε κανονική αγώγιμη κατάσταση θα το διαπερνούσαν. Στο σχήμα Π1.3 είναι το διάγραμμα του φαινομένου Meissner. Οι γραμμές του Μαγνητικού πεδίου όταν η θερμοκρασία του υλικού είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  οι μαγνητικές γραμμές περνούν μέσα από το υλικό. Αντίθετα όταν η θερμοκρασία του υλικού γίνει μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία τότε οι μαγνητικές γραμμές απωθούνται από το υλικό.

Πριν την ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας, ήταν ήδη γνωστό ότι η ψύξη ενός μετάλλου αύξανε την αγωγιμότητά του επειδή ελαττώνονταν οι συγκρούσεις μεταξύ ελευθέρων ηλεκτρονίων του μετάλλου και των ιόντων στις πλεγματικές θέσεις που ταλαντώνονταν. Μετά την ανακάλυψη του τρόπου υγροποίησης του ηλίου, που επέτρεψε να ψύχονται αντικείμενα κάτω από τους 4K, ο Kamerlingh Onnes παρατήρησε το 1911 ότι όταν έψυχε τον υδράργυρο στους 4,15K, η αντίστασή του ξαφνικά μηδενιζόταν (γινόταν υπεραγωγός). Το 1913 ανακαλύφθηκε ότι ο μόλυβδος γινόταν υπεραγώγιμος στους 7,2K. Πέρασαν άλλα 17 χρόνια ώσπου βρέθηκε ότι το νιόβιο γινόταν κι αυτό υπεραγώγιμο στους 9,2K. Ο Onnes επίσης παρατήρησε ότι αν εφαρμοζόταν στον υπεραγωγό ένα αρκετά ισχυρό πεδίο, η υπεραγωγιμότητα εξαφανιζόταν και το μέταλλο επέστρεφε στη συνηθισμένη του αγώγιμη κατάσταση. Γενικά τα υπεραγώγιμα υλικά



κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

- Υπεραγωγοί τύπου I - Είναι εκείνοι που απωθούν τελείως από το εσωτερικό τους τα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία. Τα πιο συνηθισμένα και απλά υπεραγώγιμα υλικά είναι αυτού του τύπου .
- Υπεραγωγοί τύπου II - Είναι εκείνοι οι οποίοι αποβάλλουν τελείως από το εσωτερικό τους τα μικρής έντασης μαγνητικά πεδία, αλλά αποβάλλουν μόνον εν μέρει τα εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία μεγάλης έντασης. Ο διαμαγνητισμός τους δεν είναι τέλειος αλλά μερικός στα ισχυρά μαγνητικά πεδία. Το Νιόβιο είναι ένα παράδειγμα ενός στοιχειώδους υπεραγωγού τύπου II.

Ας θεωρήσουμε έναν υπεραγωγό κυλινδρικού σχήματος, λεπτό με τον άξονά του παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές του εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου  $B_a$ . Εφόσον εντός του υπεραγωγού το μαγνητικό πεδίο είναι μηδέν θα πρέπει αυτός να αναπτύσσει μαγνήτιση  $M$ , τέτοια ώστε

$$B_{ol} - B_a + \mu_o \cdot M = 0$$



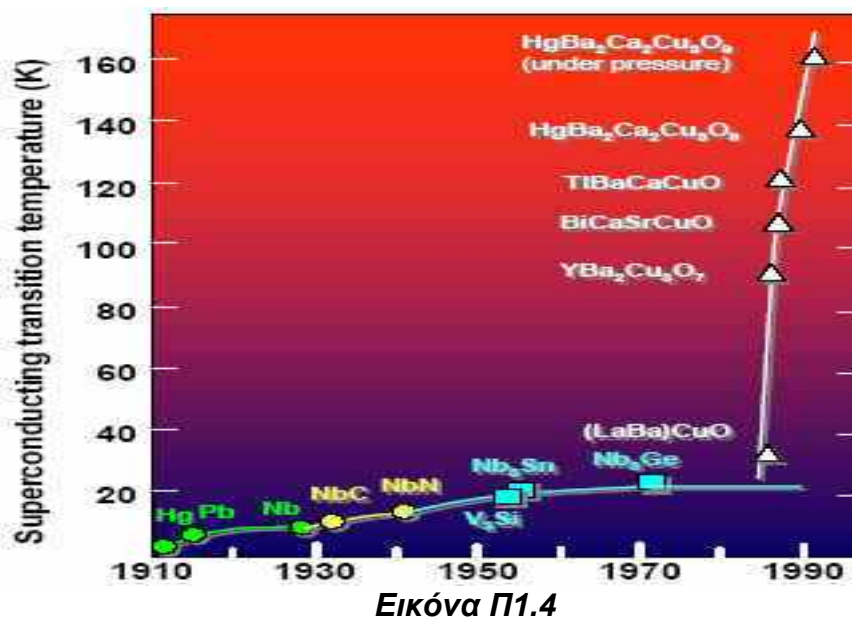
**Εικόνα Π1.4**

*Απωστικές μαγνητικές δυνάμεις*

Θα πρέπει δηλαδή η μαγνήτιση του υπεραγωγού να είναι ανάλογη και

αντίθετης φοράς προς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η συμπεριφορά του ημιαγωγού έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη απωστικών δυνάμεων μεταξύ του υπεραγωγού και ενός μόνιμου μαγνήτη π.χ. που δημιουργεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Στο σχήμα Π1.4 είναι μία εικόνα όπου ένας μαγνήτης «ίπταται» πάνω από ένα υπεραγωγό.

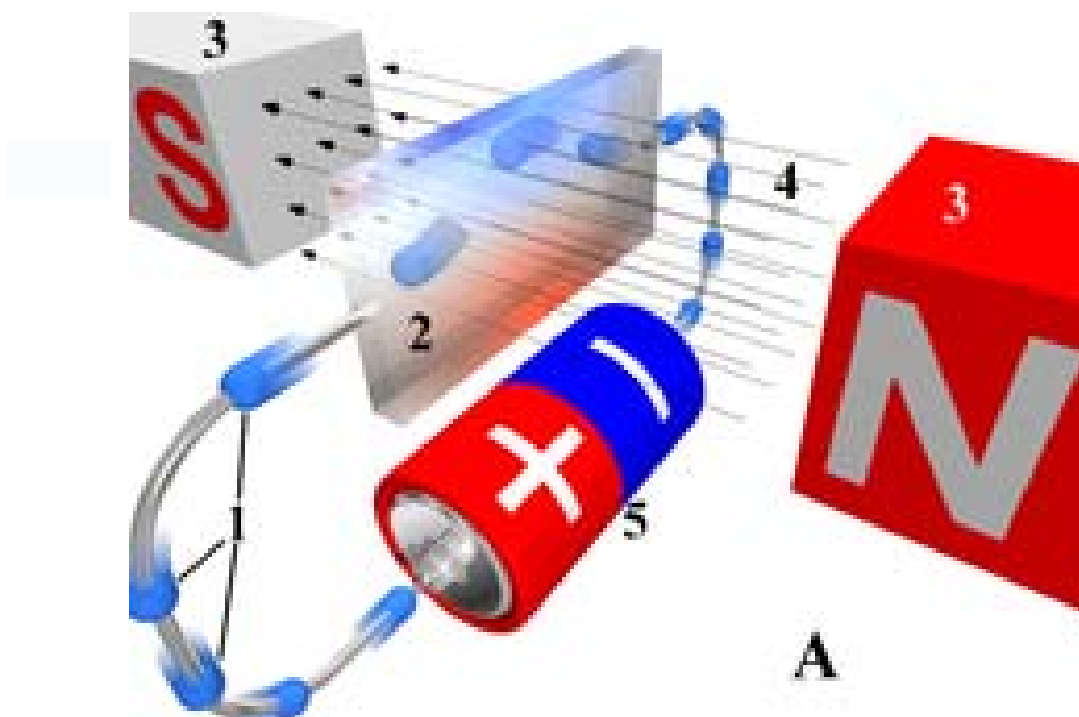
Από την εποχή που παρατηρήθηκε αρχικά η υπεραγωγιμότητα γίνονται προσπάθειες να ανέβει όσο το δυνατόν η θερμοκρασία που ένα υλικό γίνεται υπεραγωγίμο. Το 1986 ανακαλύφθηκε ένα υλικό που περιλαμβάνει τα στοιχεία Ba-La-Cu-O, και έχει κρίσιμη θερμοκρασία 35K, η υψηλότερη που είχε βρεθεί ως τότε. Από το 1986 έως σήμερα έχουν ανακαλυφθεί αρκετά υλικά με κρίσιμες θερμοκρασίες αρκετά ψηλές. Το 1994 ανακαλύφθηκε ένα υλικό που έχει  $T_c$  164K και έχει χημικό τύπο  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ . Αυτό το υλικό έχει αυτήν την  $T_c$  όταν υφίσταται μεγάλη πίεση. Στην εικόνα 5.3 φαίνεται παραστατικά από το 1910 που αρχικά παρατηρήθηκε η υπεραγωγιμότητα μέχρι σήμερα πως τα διάφορα υλικά που έχουν μελετηθεί έχουν αυξήσει την κρίσιμη θερμοκρασία.



Εικόνα Π1.4  
Η επίτευξη όλο και μεγαλύτερων  $T_c$  με την  
πάροδο των ετών.

## Π1.4 Φαινόμενο HALL (HALL EFFECT) [19]

Το φαινόμενο Hall για πρώτη φορά έγινε γνωστό το 1879, και παρατηρείται όταν η επιφάνεια ενός λεπτού φύλλου χρυσού ή άλλου μετάλλου τοποθετηθεί κάθετα σε μαγνητικό πεδίο. Αν το φύλλο διαρρέετε από ρεύμα από τη μια μεριά ως την άλλη, τότε ανάμεσα στις δύο άλλες πλευρές του θα αναπτυχθεί ηλεκτρική τάση. Τα φορτισμένα σωματίδια δέχονται μια δύναμη από το μαγνητικό πεδίο. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλευρές εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται τάση Hall. Στο σχήμα 5.4 είναι σχηματική παράσταση αυτού του φαινομένου.



**Εικόνα Π1.5**  
*Φαινόμενο Hall*

Το φαινόμενο Hall έδωσε την ιδέα για την κατασκευή ενός ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ το οποίο – με βάση την τάση Hall – θα μετράει την ένταση του μαγνητικού πεδίου αλλά θα προσδιορίζει και την κατεύθυνσή του. Τα σύγχρονα μαγνητόμετρα αντί για μεταλλικό πλακίδιο χρησιμοποιούν ημιαγωγούς

## Π1.5 Μαγνητοαντίσταση [20]

Μαγνητοαντίσταση είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού λόγω της εφαρμογής ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Σε συνήθη υλικά ,που διαθέτουν για την ροή ρεύματος ελεύθερα ηλεκτρόνια η μαγνητοαντίσταση είναι μηδέν ή μη μετρήσιμη. Ως μέτρο της μαγνητοαντίστασης λαμβάνεται το μέγεθος  $\Delta R/R$ , όπου  $\Delta R$  είναι η διαφορά της αντίστασης χωρίς και  $R$  με την παρουσία μαγνητικού πεδίου.

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης δεν βρήκε εφαρμογή για πολλές δεκαετίες κυρίως για δύο λόγους. Ο ένας είναι, ότι για την πλειοψηφία των υλικών δεν ξεπερνά την τιμή του 1-2% και ο δεύτερος, ότι απαιτούνται πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία για την εμφάνιση του φαινομένου. Για παράδειγμα ο χαλκός παρουσιάζει στη θερμοκρασία δωματίου μαγνητοαντίσταση μόλις 1% με την εφαρμογή όμως ενός πολύ μεγάλου πεδίου, 20 T.

Το 1988 οι M.N. Beibich et al. ανακάλυψαν, ότι η αντίσταση μιας κατηγορίας υλικών που περιλαμβάνουν Fe και Cr και έχουν μορφή πολυστρωματικών υμενίων μειώνεται κατά 50% με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου μόλις 2 T στη θερμοκρασία των 4 K.

Η ανακάλυψη αυτή προκάλεσε επανάσταση στον τομέα των υλικών που η αντίσταση τους μεταβάλλεται με την εφαρμογή μαγνητικών πεδίων και γρήγορα ανακαλύφθηκαν και άλλα υλικά συστήματα πολυστρωματικών υμενίων, όπως Co/Cu, Co/Ag κλπ, που παρουσιάζουν  $\Delta R/R$  της τάξης του 100% στη θερμοκρασία δωματίου. Τα υλικά αυτού του τύπου ονομάστηκαν υλικά γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (giant magnetoresistance -GMR).

Τα υλικά γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης έχουν ήδη βρει πολλές εφαρμογές κυρίως ως αισθητήρες μαγνητικού πεδίου. Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή τους σήμερα είναι σε κεφαλές ανάγνωσης δεδομένων από υλικά μαγνητικής εγγραφής. Όπως και στα μαγνητοσυστολικά υλικά το συγκριτικό τους πλεονέκτημα είναι η απλοποίηση των συστημάτων λόγω της απευθείας απόκρισής τους σε μαγνητικά πεδία.

## **Π1.6 Μαγνητο – οπτικό φαινόμενο [21]**

Τα δύο κυριότερα μαγνητο-οπτικά φαινόμενα είναι το φαινόμενο Faraday και το φαινόμενο Kerr. Το φαινόμενο Faraday παρουσιάζεται σαν περιστροφή της πόλωσης φωτός, όταν μία δέσμη φωτός διέρχεται μέσα από ένα διαφανές μέσο παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει την ίδια διεύθυνση με αυτήν της διάδοσης της δέσμης, εξ αιτίας της μαγνήτισης στο εσωτερικό του υλικού.

Το φαινόμενο Kerr παρουσιάζεται, όταν μία δέσμη φωτός ανακλάται από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό εξ' αιτίας της μαγνήτισης στην επιφάνεια του υλικού. Και εδώ το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ως στροφή της γωνίας πόλωσης μίας γραμμικά πολωμένης δέσμης φωτός. Το φαινόμενο Kerr εμφανίζεται σε τρεις διαφορετικές παραλλαγές, ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης, το πολικό, το διάμηκες και το εγκάρσιο φαινόμενο Kerr. Στο πολικό φαινόμενο Kerr η διεύθυνση της μαγνήτισης είναι κάθετη στην επιφάνεια ανάκλασης.

Το πολικό φαινόμενο προτιμάται στις εφαρμογές, όπου είναι επιθυμητές μεγάλες τιμές της γωνίας στροφής, όπως π.χ. στις διατάξεις μαγνητο-οπτικής εγγραφής. Η μαγνητική εγγραφή υψηλής πυκνότητας δεδομένων καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών των μαγνητο-οπτικών ιδιοτήτων λεπτών μεταλλικών υμενίων. Σε μικρό βαθμό οι εφαρμογές περιλαμβάνουν εκτύπωση θερμομαγνητικής επαφής, ηλεκτροφωτογραφική εκτύπωση ή θερμομαγνητική φωτογραφία. Τα περισσότερο καθιερωμένα μαγνητο-οπτικά υλικά είναι σήμερα τα κράματα σπανίων γαιών μεταβατικών μετάλλων, π.χ.  $Gd_{24}Tb_{76}Fe_{75}$ . Επίσης χρησιμοποιούνται μαγνητικά οξειδία, όπως κυβικοί σπινέλιοι του Co, εξαγωνικοί φερρίτες του Ba και γρανάτες σιδήρου με υποκατάστατο Bi.

Μεγάλη ώθηση στη μελέτη αλλά και στις εφαρμογές των μαγνητο-οπτικών υλικών έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια με τα πολυστρωματικά υμένια Co/Pd και Co/Pt, τα οποία εμφανίζουν αύξηση της στροφής Kerr σε μικρά μήκη κύματος με αποτέλεσμα μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης δεδομένων.

## **Π1.7 Το φαινόμενο JOSEPHSON [22]**

Το φαινόμενο Josephson είναι ένα φαινόμενο όπου παρατηρείται ροή ρεύματος κατά μήκος δύο ασθενικά συζευγμένων υπεραγωγών. Αυτή η διάταξη (δύο συζευγμένων υπεραγωγών που συνδέονται με ένα μη αγώγιμο υλικό ) είναι γνωστή σαν την ένωση Josephson, το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσα στο μη αγώγιμο υλικό ονομάζεται ρεύμα Josephson. Όλοι οι παραπάνω όροι έχουν αυτά τα ονόματα προς τιμή του Βρετανού Φυσικού **Brian David Josephson**, ο οποίος πρόέβλεψε το φαινόμενο το 1962. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται σε μαγνητικούς αισθητήρες τύπου SQUID.

Οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν εφαρμογή στην Ιατρική. Με SQUID γίνεται η ανίχνευση της διαδρομής μικροσωματιδίων στους πνεύμονες όπως σωματιδίων άνθρακα (C). Η ύπαρξη τους προκαλεί μεταβολή στο μαγνητικό πεδίο λόγω διαφορετικής μαγνητικής διαπερατότητας του C. Με ανάλογο τρόπο ανιχνεύεται και η μεταβολή του όγκου της καρδιάς λόγω της διαφορετικής μαγνητικής διαπερατότητας που έχει η καρδιά από τους περιβάλλοντες ιστούς.

Με αισθητήρες τύπου SQUID γίνονται μαγνητοκαρδιογραφήματα και μαγνητοεγκελογραφήματα.

Αυτού του είδους οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται και στην κατασκευή Η/Υ. Η εταιρία IBM άρχισε να ερευνά υπεραγώγιμα υλικά για χρήση στους computer , χρησιμοποιώντας επαφές Josephson για μνήμες και λογικά κυκλώματα από το 1964. Ο Juri Matisoo της IBM παρουσίασε ένα λογικό κύκλωμα με λειτουργία της τάξης των nanosecond το 1966.

Λόγω των ενθαρρυντικών αποτελεσμάτων , η IBM ξεκίνησε ένα εντατικό πρόγραμμα έρευνας χρησιμοποιώντας ένα πολύ υψηλής επίδοσης υπολογιστή. Μια από τις πιο σημαντικές επιτεύξεις της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας που έκανε εφικτή να αναπτυχθούν επαφές Josephson πάνω σε chip. Η τεχνική περιλαμβάνει κατασκευές επαφών από κράματα μολύβδου, ινδίου και χρυσού. Λογικά κυκλώματα και μνήμες βασισμένα στην τεχνολογία κράματος μολύβδου είχαν μοναδικά χαρακτηριστικά επίδοσης και προσέλκυσε το ενδιαφέρον και την προσοχή παγκοσμίως. Σαν αποτέλεσμα πολλά ινστιτούτα παγκοσμίως και ιδιαίτερα στην Ιαπωνία ξεκίνησαν να δουλεύουν πάνω σε εφαρμογές ψηφιακές που χρησιμοποιούν Josephson επαφές γύρω στο 1980. Η εργασία της Ιαπωνίας σε συσκευές Josephson είναι μέρος της μεγαλύτερης

προσπάθειας για να βρεθούν υποψήφιες τεχνικές για την επόμενη γενιά των τεχνολογιών computer για να αντικαταστήσουν την μέχρι σήμερα βασισμένη στο πυρίτιο τεχνολογία.

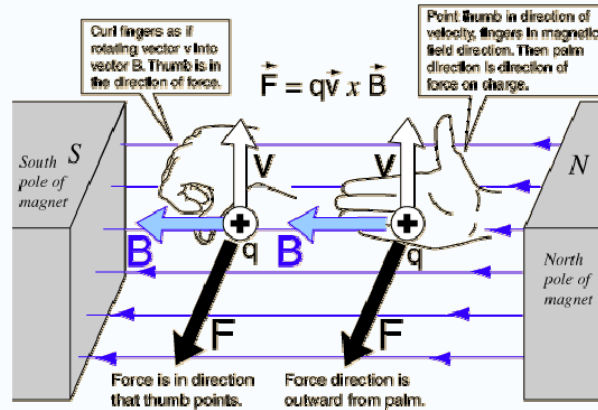
Το 1983 η IBM ανακοίνωσε ότι σταματά η έρευνα για το Josephson-computer. Η ανακοίνωση της IBM είχε μεγάλο αντίκτυπο στην έρευνα ψηφιακών ηλεκτρονικών Josephson, αν και εργαστήρια στην Ιαπωνία συνέχισαν τις προσπάθειες τους στην ανάπτυξη ψηφιακών Josephson συσκευών έχοντας την πεποίθηση ότι παρέχουν μια μοναδική υπεροχή έναντι του πυριτίου για την κατασκευή υψηλής ταχύτητας ψηφιακών συστημάτων. Οι πιο σημαντικοί στόχοι για να αναπτυχθούν συσκευές Josephson είναι η μεγάλη ταχύτητα εναλλαγής και η ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Στην πράξη, λογικές πύλες Josephson που λειτουργούν σε λιγότερο από 10 picosec έχουν παρουσιαστεί σε διάφορες συσκευές. Η γρηγορότερη καθυστέρηση εναλλαγής που έχει αναφερθεί είναι 4.2 picosec/πύλη, και επιτεύχθηκε στην εταιρία Nippon Telephone and Telegraph. Αυτός ο χρόνος εναλλαγής υπερέρχει από αυτόν οποιουδήποτε συστήματος με ημιαγωγούς που βασίζονται στην τεχνολογία του πυριτίου.

Χάρη σε αυτές τις ταχύτητες εναλλαγής και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και, το γεγονός ότι οι συσκευές Josephson βασίζονται σε υπεραγωγούς συνεπάγονται άλλα πλεονεκτήματα για την κατασκευή ψηφιακών συστημάτων. Το σημαντικότερο είναι ότι κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει υπεραγώγιμες μικροκυματικές γραμμές μεταφοράς. Οι μικροκυματικές γραμμές είναι σχεδόν χωρίς απώλειες σε συχνότητες πάνω από 1THz, όταν είναι κατασκευασμένες με υπεραγωγό. Εάν η γραμμή τερματίζεται στην χαρακτηριστική του αντίσταση μπορεί να μεταφέρει σήματα υψηλής συχνότητας χωρίς σκέδαση. Αυτές οι απαλλαγμένες από σκέδαση γραμμές δεν μπορούν να επιτευχθούν με ημιαγωγίμα κυκλώματα που χρησιμοποιούν Πυρίτιο.

## **Π1.8 Η δύναμη Lorentz [23]**

Ο Lorentz διαπίστωσε ότι ένα Μαγνητικό πεδίο εξασκεί μια δύναμη σ'ένα ηλεκτρικό πεδίο μόνον όταν αυτό κινείται. Ανακάλυψε επίσης ότι η δύναμη ενός κινουμένου φορτίου είναι ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου και

την ταχύτητα που κινείται το φορτίο. Η διεύθυνση της δύναμης είναι πάντα κάθετη και στις δύο διευθύνσεις (του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού φορτίου).



**Εικόνα Π1.6**

### Σχηματική παράσταση της δύναμης Lorentz

Στο σχήμα 5.4 είναι ένα παραστατικό διάγραμμα για να βρισκεται η διεύθυνση της δύναμης Lorentz. Όπως φαίνεται από το σχήμα αν χρησιμοποιηθεί το δεξιό χέρι, ο αντίχειρας του δείχνει στη διεύθυνση του  $v$  και ο δείκτης στη διεύθυνση του  $B$ , τότε ο μέσος δείχνει τη διεύθυνση της δύναμης  $F$ . Το μέτρο της δύναμης δίνεται από την σχέση

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

Όπου:

$F$  είναι η [δύναμη](#) (σε Νιούτον)

$E$  είναι το [ηλεκτρικό πεδίο](#) (σε [Βολτς](#) προς [μέτρα](#))

$B$  είναι το μαγνητικό πεδίο (σε  $\text{Weber}/\text{m}^2$ ), ή ισοδύναμα, σε Τέσλα)

$q$  είναι το [ηλεκτρικό φορτίο](#) του σωματιδίου (σε Coulomb)

$v$  είναι η στιγμιαία [ταχύτητα](#) του σωματιδίου (σε  $\text{m}/\text{sec}$ )

το σύμβολο  $\times$  σημαίνει το [εξωτερικό γινόμενο](#).

Η δύναμη Lorentz είναι μία από τις οκτώ αρχικές [εξισώσεις του Μάξγουελ](#)



και είναι η λύση στη διαφορική μορφή του [νόμου του Φαραντέι](#) που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες Hall.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΡΘΡΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

#### **Έξυπνο" σύστημα ελέγχου και επιτήρησης αεροδρομίων [36]**

Ανθρώπινα λάθη, κακές καιρικές συνθήκες, χαμηλή ορατότητα: αυτοί οι τρεις παράγοντες είναι οι βασικότερες αιτίες των αεροπορικών δυστυχημάτων που γίνονται στις πίστες των αεροδρομίων, όταν κάποιο αεροσκάφος προσγειώνεται ή απογειώνεται από το διάδρομο και στην πορεία του βρεθεί κάποιο άλλο αεροπλάνο ή όχημα. Αν και τέτοιου είδους ατυχήματα μπορεί να καταλήξουν σε πολύνεκρες τραγωδίες –όπως η σύγκρουση δύο αεροσκαφών στο αεροδρόμιο Linate του Μιλάνου το 2001, η οποία στοίχισε τη ζωή σε 118 ανθρώπους– τα ραντάρ επιφανείας που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για την επίβλεψη της επίγειας κυκλοφορίας χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος και για το λόγο αυτό εγκαθίστανται κυρίως σε μεγάλους διεθνείς αερολιμένες.

#### **Περιγραφή**

Σύστημα ελέγχου και επιτήρησης της επίγειας κυκλοφορίας στα αεροδρόμια με χρήση χαμηλού κόστους μαγνητικών αισθητήρων.

#### **Εφαρμογές / Καινοτόμα χαρακτηριστικά**

Η τεχνολογία ανίχνευσης που χρησιμοποιείται επιτρέπει τον έλεγχο της επίγειας κίνησης κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες (π.χ. ομίχλη), ενώ σε αντίθεση με άλλα συστήματα, επιτυγχάνεται η ανίχνευση μη-συνεργαζόμενων στόχων, δηλαδή, δεν απαιτείται η εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού στα αεροσκάφη και στα οχήματα που κινούνται στην επιφάνεια του αεροδρομίου.

## Ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα έναντι εναλλακτικών τεχνολογιών

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Ως μια οικονομική εναλλακτική λύση, έναντι του ραντάρ επιφανείας,σε μικρά αεροδρόμια.
- Ως συμπληρωματικό σύστημα για την κάλυψη «τυφλών» σημείων σε ήδη εγκατεστημένα ραντάρ επιφανείας σε μεγάλα διεθνή αεροδρόμια

Ενδεχόμενοι χρήστες: Αεροδρόμια (Εφαρμόζεται στα αεροδρόμια Φρανκφούρτης και Θεσσαλονίκης).



**Εικόνα Π2.1**

*Μαγνητικοί αισθητήρες σε αεροδρόμια*

## Μαγνητική υπογραφή

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε μία χαρακτηριστική ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών, τα οποία αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλοντας τοπικά την έντασή του σε πολύ μικρό αλλά ανιχνεύσιμο ποσοστό.

Ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται αυτές τις μικρές μαγνητικές διαταραχές στις τρεις διαστάσεις, ώστε να δίνει πληροφορίες για τη θέση του οχήματος στο χώρο. Επειδή μάλιστα τα σιδηρομαγνητικά υλικά βρίσκονται κυρίως στους κινητήρες, οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία σε ένα αεροπλάνο απ' ό,τι σε ένα αυτοκίνητο, κάθε τύπος οχήματος έχει διαφορετική «μαγνητική υπογραφή». Έτσι το σύστημα μπορεί να ανιχνεύσει αν ο στόχος που βρίσκεται στο διάδρομο είναι κάποιο αεροσκάφος ή, για παράδειγμα, ένα βυτιοφόρο – και μάλιστα ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να περιορίζουν την ορατότητα σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Από τη θεωρία στην πράξη

Το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης ήταν το πρώτο όπου δοκιμάστηκαν πιλοτικά ο μαγνητικοί αισθητήρες, για την επίβλεψη μιας περιοχής στο άκρο του παράλληλου τροχόδρομου του διαδρόμου 16-34. Ο σκοπός ήταν να δοκιμασθεί το σύστημα σε πραγματικές συνθήκες, στο περιβάλλον ενός αεροδρομίου όπου η επίγεια κυκλοφορία επιβλέπεται μόνο οπτικά από τους ελεγκτές του – «κάτι που, όπως έδειξε η έρευνά μας, ισχύει για το 80% σε περίπου 500 ευρωπαϊκά αεροδρόμια», προσθέτει ο Έλληνας ερευνητής. Η πιλοτική τους λειτουργία βοήθησε την επιστημονική ομάδα να ρυθμίσει τους αισθητήρες όσο και το λογισμικό επεξεργασίας των σημάτων ώστε η ανίχνευση των κινούμενων στόχων να επιτυγχάνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Οι υπεύθυνοι του προγράμματος εκτιμούν ότι σύντομα το σύστημα θα έχει τελειοποιηθεί τόσο ώστε να είναι εμπορεύσιμο – αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή του τόσο στο αεροδρόμιο «Μακεδονία» όσο και στον αερολιμένα της Φρανκφούρτης, όπου έχει ήδη εγκατασταθεί ένα δεύτερο παρόμοιο δίκτυο με σκοπό να συγκριθεί η αξιοπιστία του συγκριτικά με τα επίγεια ραντάρ που διαθέτει το γερμανικό αεροδρόμιο.

Σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα, τα μέχρι τώρα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ασφάλεια στις αερομεταφορές – σε μια εποχή μάλιστα όπου η πυκνότητα των αεροπορικών πτήσεων διπλασιάζεται κάθε 12 περίπου χρόνια. Ανοίγουν επίσης το δρόμο για πολλές ακόμη εφαρμογές οι οποίες θα εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι κάθε

όχημα μεταβάλλει απειροελάχιστα –αλλά σε ανιχνεύσιμο βαθμό– το μαγνητικό πεδίο της Γης. Τα δίκτυα ελέγχου της επίγειας κυκλοφορίας στα αεροδρόμια είναι μόνο η αρχή: φανταστείτε πάρκιγκ που θα καταγράφουν αυτόματα τις ελεύθερες θέσεις τους ή σηματοδότες που θα γνωρίζουν πόσα αυτοκίνητα περιμένουν στην ουρά για να ξεκινήσουν. Η μαγνητική ανίχνευση θα μπορούσε σε λίγα χρόνια να οδηγήσει σε μία σειρά από “έξυπνα” συστήματα που θα μπορούν να κάνουν πιο ασφαλή και άνετα όχι μόνο τα ταξίδια μας αλλά και τις καθημερινές μας μετακινήσεις.

### **Βιομαγνητισμός ποια πλασμάτα αισθάνονται τα μαγνητικά πεδία κατά βιολογικό τρόπο; [37]**

Ο βιομαγνητισμός αναφέρεται είτε στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι ζωντανοί οργανισμοί, είτε στο φαινόμενο της επίδρασης ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, όπως π.χ. της Γης, επάνω σε ζωντανούς οργανισμούς.

Το μαγνητικό πεδίο της Γης ασκεί κάποιες δυνάμεις σε αντικείμενα όπως τα αποδημητικά πουλιά, οι οποίες προέρχονται και από τους δύο μαγνητικούς πόλους της Γης.

Το πεδίο είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους και μεταβάλλεται σταθερά με το γεωγραφικό πλάτος, την ώρα της ημέρας, τις ηλιακές κηλίδες, και διάφορες ανωμαλίες του πεδίου. Μερικά πουλιά, βακτήρια (μαγνητοτακτικά βακτήρια), φάλαινες, μέλισσες, βάτραχοι, σαύρες, ινδικά χοιρίδια, σολομοί και χελώνες, βρίσκουν το δρόμο τους με την αίσθηση του μαγνητικού πεδίου της Γης (μαζί βέβαια με άλλες ενδείξεις).

Όταν οι μέλισσες εκτελούν κάποια ημερήσια καθήκοντα μέσα στο περιβάλλον μιας σκοτεινής κυψέλης, γνωρίζουν την ώρα της ημέρας από τις ημερήσιες μεταβολές του πεδίου. Πράγματι το γήινο μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει έναν ημερήσιο κύκλο στην έντασή του - είναι πιο σταθερό κατά τη νύχτα και πιο δραστήριο την ημέρα, οπότε η ιονόσφαιρα θερμαίνεται και δημιουργούνται ηλεκτρικά ρεύματα.



**Εικόνα Π2.2**

*Τα μικρά της θαλάσσιας χελώνας καθοδηγούνται σε νερά που δεν έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ενδείξεις από το μαγνητικό πεδίο.*

Τα μικρά της θαλάσσιας χελώνας -όχι μεγαλύτερα από μια παιδική παλάμη,- βρίσκουν το δρόμο τους καθώς βγαίνουν κάτω από την άμμο, κατευθύνονται προς τον ωκεανό που δεν έχουν δει ποτέ τους προηγούμενα, και κολυμπούν ακολουθώντας τους μεταναστευτικούς τους δρόμους μέσα στους ωκεανούς. Όταν φτάνουν στα βαθιά νερά όπου οι σχηματισμοί των κυμάτων δεν είναι αξιόπιστοι πλοηγοί, χρησιμοποιούν ως πλοηγό μόνο το μαγνητικό πεδίο. Με τον τρόπο αυτό διασχίζουν κάπου 9.000 μίλια στον Βόρειο Ατλαντικό πριν επιστρέψουν ως νεαρά άτομα στην ακτή όπου μεγαλώνουν με παράκτια διατροφή.

Οι φάλαινες εξοκείλουν σε ακτές όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο διαφέρει από την συνήθη μορφή του, και μπερδεύει τον προσανατολισμό τους.

Οι χήνες του Καναδά προφανώς "βλέπουν" το μαγνητικό πεδίο. Αυτές δεν χρησιμοποιούν μια βιοπυξίδα για να κατευθυνθούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Μάλλον εκδηλώνουν ένα είδος ανάδρασης όταν ξεστρατίζουν από την επιθυμητή πορεία. Ίσως η όρασή τους θολώνει (όπως η οθόνη της τηλεόρασης από τα παράσιτα), και ξεκαθαρίζει μόνον όταν επιστρέψουν στην σωστή διαδρομή τους.

Ακόμη και οι άνθρωποι έχουν ένα μηχανισμό σε μοριακό επίπεδο, για να ανιχνεύουν τα μαγνητικά πεδία, δεν φαίνεται όμως ότι τον χρησιμοποιούν για να βρίσκουν την κατεύθυνσή τους. Τόσο εμείς όσο και άλλα ζώα έχουμε υποδοχείς στα μάτια και τον εγκέφαλο, - δηλαδή πρωτεΐνες που απορροφούν το φως και από την δράση του μαγνητικού πεδίου του φωτός, μας πληροφορούν για το χρώμα και την διάκριση ημέρας και νύχτας. Ο υποδοχέας που μας δημιουργεί το αίσθημα της νύστας κατά την νύχτα, επεξεργάζεται επίσης μαγνητικά σήματα. Τα βιολογικά ρολόγια των ζώων, όχι μόνο τους μετράνε τον χρόνο, αλλά τους κάνουν να αισθάνονται και τα μαγνητικά πεδία

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κύρια πηγή για την συγγραφή αυτής της πτυχιακής εργασίας ήταν τα βιβλία

:

- **ΜΙΚΡΟΑΙΣΘΗΡΗΡΕΣ.ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. JULIAN W. GARRDNER (ΕΚΔΟΤΗΣ :ΤΖΙΟΛΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ)**
- **ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ. ΓΚΙΟΚΑΣ Θ. (ΕΚΔΟΤΗΣ :ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ Α.Ε)**
- **Ο ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ. GRAHAM IAN. (ΕΚΔΟΤΗΣ :ΣΑΒΒΑΛΑ)**

Καθώς και το διαδίκτυο στις παρακάτω διευθύνσεις:

- [1] <http://magnmat.physics.auth.gr/documents/History2001.pdf>
- [2] <http://magnmat.physics.auth.gr/documents/Sensors1999.pdf>
- [3] [http://imel.demokritos.gr/edu/theses/kitsara\\_master.pdf](http://imel.demokritos.gr/edu/theses/kitsara_master.pdf)
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor#Types>
- [5] <http://butler.cc.tut.fi/~malmivuo/bem/bembook/12/12.htm>
- [6] <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/>
- [7] <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/#diamag>
- [8] <http://magnmat.physics.auth.gr/documents/Sensors1999.pdf>
- [9] <http://www.sensorsportal.com/HTML/SENSORS/Magnetic.htm>
- [10] <http://www.pnicorp.com/family?nodeId=c1c>
- [11] <http://www.nationalmagnetic.com/>
- [12] <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/magsens.html>
- [13] <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1658>



- [14] <http://www.gemsys.on.ca/>
- [15] <http://books.google.com/books?id=b7UuZzf9ivlC&pg=PT214&lpg=PT214&dq=magnetic+sensors&source=web&ots=wIPMVfRHW5&sig=liZeHxi59zlhUFFIPVhmCYOZj3s>
- [16] [http://www.northallertoncoll.org.uk/physics/Module%204/Magnetic%20Effects/magnetic\\_effects.htm](http://www.northallertoncoll.org.uk/physics/Module%204/Magnetic%20Effects/magnetic_effects.htm)
- [17] <http://www.assda.asn.au/asp/index.asp?pgid=18535>
- [18] <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Physics/Electromagnetism/Electrostatics/ElectricCurrent/MagneticEffect/MagneticEffect.htm>
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Zeeman\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Zeeman_effect)
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistance>
- [22] <http://www.phys.ufl.edu/~pjh/teaching/phz7427/7427notes/josephson.pdf>
- [23] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/LorentzForce.html>
- [24] [www.ssec.honeywell.com/magnetic](http://www.ssec.honeywell.com/magnetic)
- [25] <http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/products.html>
- [26] <http://www.freepatentsonline.com/7300712.html>
- [27] <http://www.position-sensors.com/>
- [28] <http://magmat.physics.auth.gr/documents/Medicine2003.pdf>
- [29] <http://magmat.physics.auth.gr/documents/MRI2001.pdf>
- [30] <http://www.heritagegeophysics.com/Electromagnetics/promis-10.htm>
- [31] [http://www.gemsys.ca/apps\\_env-eng.htm](http://www.gemsys.ca/apps_env-eng.htm)
- [32] [http://en.wikipedia.org/wiki/Metal\\_detectors](http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_detectors)
- [33] <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/metal-detectors-magnetic-separators-407/magnetic-sensor-70932.html>
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer#Proton\\_precession\\_magnetometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer#Proton_precession_magnetometer)

