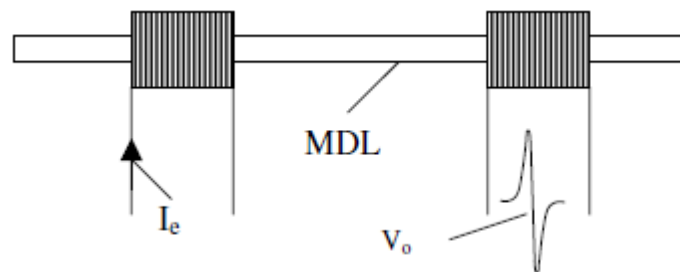




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μεταπτυχιακή εργασία

Τίτλος: Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Χρήστος Κατσίκας

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αθήνα 2010

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για τις γνώσεις που μου προσέφερε, αλλά και για τη συμπαράστασή του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Γιάννη Χαρλαμπίτα και όλους τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνάδελφο Γιώργο Κοκκίνη για την πολύτιμη βοήθεια του αυτό το διάστημα.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία εκπονήθηκε το 2010 στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Έχει ως σκοπό την κατασκευή και μελέτη αισθητήρα μαγνητικού πεδίου βασισμένου στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Για την κατασκευή του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκαν: μαγνητοσυστολικό υλικό, πηνίο διέγερσης, πηνίο λήψης και πηνίο προσομοίωσης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα πηνία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο από χάλκινα σύρματα βάσει των απαιτήσεων του πειράματος. Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτήθηκε με παλμικό ρεύμα συχνότητας 1kHz, ενώ το πηνίο προσομοίωσης του εξωτερικού  $dc$  πεδίου τροφοδοτήθηκε από εξωτερική πηγή με ρεύμα τάξης  $mA$ . Ως μαγνητοσυστολικό υλικό χρησιμοποιήθηκε άμορφο σύρμα Fe.Si.B. Το πείραμα διεξήχθη σε δυο στάδια, ένα με ορθή και ένα με αντίστροφη πολικότητα του πηνίου προσομοίωσης του εξωτερικού πεδίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος γινόταν αλλαγή της τροφοδοσίας του  $dc$  πεδίου και οι αλλαγές στην παλμική τάση εξόδου έχουν καταγραφεί σε πίνακες που ακολουθούν και συνοδεύονται από το αντίστοιχο οπτικό υλικό.

## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	8
1.1	Κατηγορίες αισθητήρων.....	8
1.2	Μαγνητικές επιδράσεις σε επίπεδο αισθητήρων.....	9
1.2.1	Δυναμική των μαγνητικών περιοχών .....	9
1.2.2	Δυναμική περιστροφής των μαγνητικών περιοχών.....	11
1.2.3	Εξαρτώμενοι μηχανισμοί.....	14
1.3	Αισθητήρες από μαγνητικά υλικά βασισμένοι στο μαγνητικό φαινόμενο .....	15
1.3.1	Αισθητήρες θέσης .....	15
1.3.2	Αισθητήρες μάζας.....	16
1.3.3	Αισθητήρες πεδίου .....	17
1.3.4	Αισθητήρες ασφαλείας.....	18
1.3.5	Αισθητήρες πολλαπλών χρήσεων.....	18
1.4	Εφαρμογές αισθητήρων βασισμένοι σε μαγνητικά φαινόμενα και υλικά.....	19
1.4.1	Βιομηχανικές εφαρμογές.....	19
1.4.2	Εφαρμογές στη βιοϊατρική.....	20
1.4.3	Στρατιωτικές εφαρμογές.....	20
1.4.4	Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	21
1.4.5	Εφαρμογές στην αυτοκίνηση.....	21
1.4.6	Εργαστηριακοί αισθητήρες.....	22
1.4.7	Οικιακές εφαρμογές .....	23
2	Θεωρία της μηχανικής για τους MDL .....	24
2.1	Ποιοτική ερμηνεία των βασικών διατάξεων MDL.....	24
2.2	Μοντελοποιώντας τη βασική διάταξη ενός MDL.....	26
2.3	Ιδιότητες των MDL.....	32
2.3.1	Ανομοιομορφία.....	32
2.3.2	Επιδράσεις πολωμένου πεδίου.....	33
2.3.3	Καθυστέρηση απόκρισης.....	33
2.3.4	Υστέρηση.....	33
2.3.5	Διακριτική ικανότητα.....	34
2.3.6	Πλάτος παλμού ή Συχνότητα απόκρισης .....	34
2.3.7	Αντιδράσεις και επακόλουθα φαινόμενα .....	34
2.4	Διαδικασία τυποποίησης του χαρακτηρισμού του MDL.....	34

2.5	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάταξη του MDL.....	38
3	Μέτρηση θέσης χρησιμοποιώντας τεχνικές MDL .....	39
3.1	Ταινίες μέτρησης .....	39
3.2	Αισθητήρες μετατόπισης.....	45
3.3	Διαστολόμετρα.....	48
3.4	Ψηφιοποιητές .....	52
3.5	Επιταχυνσιόμετρα .....	56
4	Αισθητήρες τάσης βασισμένοι στην τεχνική MDL.....	58
4.1	Κελία φορτίου .....	58
4.2	Μετρητές ροπής .....	59
4.3	Μετρητές πίεσης.....	60
4.4	Αισθητήρες εφελκυστικών τάσεων.....	63
4.5	Αισθητήρες λεπτού υμενίου βασισμένοι στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. ....	67
5	MDL αισθητήρες πεδίου και εφαρμογές σε NDT&E .....	70
5.1	Αισθητήρες MAD μονού σημείου για NDT .....	71
5.2	Μιας διάστασης κατανομή MAD αισθητήρων για NDT .....	74
5.3	Ένα νέο υλικό MDL, για MAD σε NDT.....	77
6	Μαγνητικά πεδία .....	79
6.1	Είδη μαγνητικών πεδίων.....	80
6.1.1	Μαγνητικά πεδία ρεύματος .....	80
6.1.2	Μαγνητικό πεδίο από διαρρέοντα βρόγχο .....	80
6.1.3	Σωληνοειδές.....	81
6.1.4	Μαγνήτης σε σχήμα ράβδου .....	82
6.1.5	Το μαγνητικό πεδίο της Γης .....	83
7	Πειραματική διάταξη.....	84
8	Πειραματικές μετρήσεις .....	89
8.1	Ορθή πολικότητα.....	89
8.1.1	Διαγράμματα παλμού.....	89
8.1.2	Εικόνες παλμού .....	93
8.1.3	Μετρήσεις .....	99
8.1.4	Διαγράμματα.....	102
8.2	Αντίστροφη πολικότητα .....	110

8.2.1	Διαγράμματα παλμού.....	110
8.2.2	Εικόνες παλμού .....	113
8.2.3	Μετρήσεις .....	116
8.2.4	Διαγράμματα .....	118
9	Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα .....	123
10	Βιβλιογραφία.....	128

## Σκοπός

Κατά την εξέλιξη αισθητήρων διάφορων εφαρμογών έχουν χρησιμοποιηθεί άμορφα υλικά λόγω των πολύ καλών μαγνητικών, μαγνητοελαστικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων. Μια ειδική κατηγορία τέτοιων εφαρμογών είναι οι αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται στην τεχνική *MDL*. Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η κατασκευή και μελέτη ενός μαγνητικού αισθητήρα πεδίου ο οποίος βασίζεται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Για την κατασκευή του εν λόγω αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε ως μαγνητοσυστολικό υλικό άμορφο σύρμα Fe.Si.B..

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κατηγορίες αισθητήρων

Οι αισθητήρες παρουσιάζουν ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον, λόγω των τεχνολογικών εφαρμογών τους [1]. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες αισθητήρων, οι οποίες χωρίζονται βάση των κριτηρίων εφαρμογών τους [2]. Τρία από αυτά είναι :

1. το αντικείμενο μέτρησης, κυρίως για φυσικούς και χημικούς αισθητήρες
2. τα υλικά και το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η αρχή λειτουργίας τους, όπως αγωγοί, ημιαγωγοί, διηλεκτρικοί, μαγνητικοί και υπεραγωγοί.
3. οι εφαρμογές τους, βιομηχανικές, μεταφορών, αυτοκίνησης, ιατρικές, στρατιωτικές, οικιακές και περιβαλλοντολογικές.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες παίζουν βασικό ρόλο στα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές [3,4]. Στην εποχή μας οι πιο ευρέως γνωστοί χρησιμοποιούμενοι μαγνητικοί αισθητήρες είναι :

1. Μαγνητοαντίσταση [5]
2. Σύνθετης μαγνητοαντίσταση [6]
3. Μαγνητοσυστολής [7]
4. Ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής [8]
5. Φαινομένου Hall [9]

Η δυναμική του μαγνητικού πεδίου είναι ο κύριος μηχανισμός στον οποίο οφείλονται οι μαγνητικές επιδράσεις στις εφαρμογές των αισθητήρων [10]. Κάθε πιθανή χρήση της δυναμικής απόκρισης του προαναφερθέντος μηχανισμού μπορεί να έχει επίδραση σε κάθε στοιχείο αισθητήρα.

Υπάρχουν δυο περιπτώσεις δυναμικής πεδίου, η δυναμική του τείχους μαγνητικών περιοχών και η δυναμική της περιστροφής μαγνητικών περιοχών. Από τη δυναμική αυτή προέρχονται εξαρτώμενες επιδράσεις, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά.

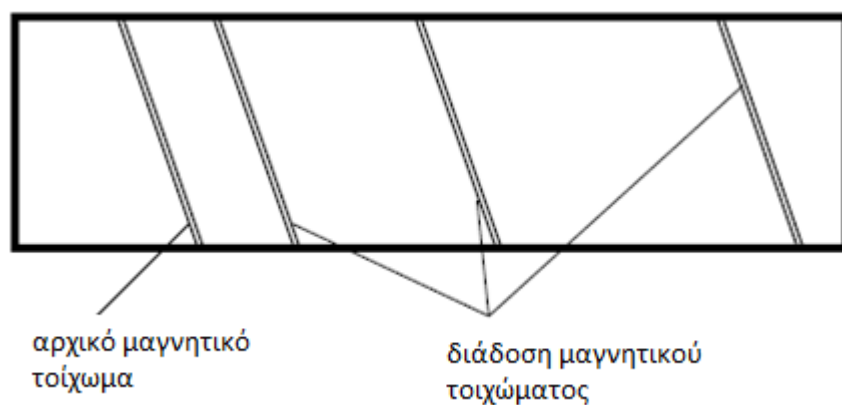
Μια ιδιαίτερη επίδραση στα μαγνητικά υλικά είναι το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, το οποίο ερευνάται τόσο σε επίπεδο θεωρητικό σε μοντέλα, όσο και σε επίπεδο εφαρμογών σε πειραματικές διατάξεις [11-16]. Η κύρια θεωρητική βάση του φαινομένου βασίζεται στις αρχές της μικρομαγνητικής [17].

Η λειτουργία αφορά αισθητήρες και ενεργοποιητές που περιλαμβάνουν υλικά με σταθερή μηχανική συμπεριφορά, δηλαδή το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής να είναι της τάξης των 30 έως 1000ppm.

Μια τεχνική η οποία αξιοποιεί το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη αισθητήρων μετατόπισης, τάσης και πεδίου, βασίζεται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης [18]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η θεωρία της μηχανικής και της



αίσθησης σε εφαρμογές που βασίζονται στην τεχνική MDL. Τα χαμηλά επίπεδα αστάθειας και τα όρια ευαισθησίας που παρουσιάζουν αυτού του τύπου αισθητήρες, τους κάνουν δημοφιλείς στον τομέα της βιομηχανίας, της αυτοκίνησης και των στρατιωτικών εφαρμογών.



Εικόνα 1

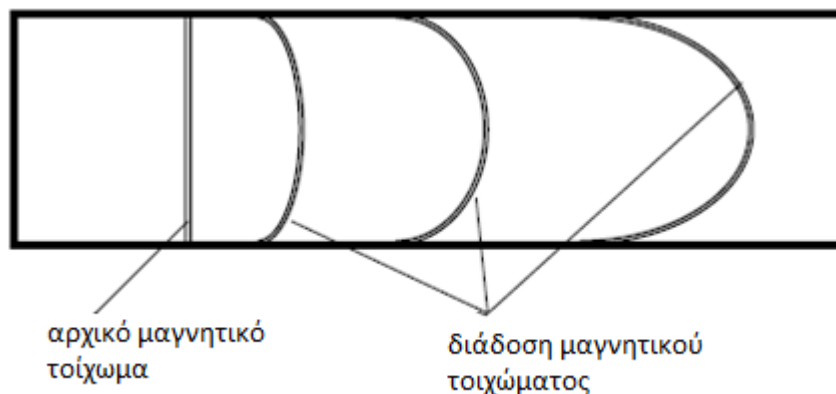
## 1.2 Μαγνητικές επιδράσεις σε επίπεδο αισθητήρων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μακροσκοπικοί και μικροσκοπικοί μηχανισμοί εξάρτησης του τείχους μαγνητικών περιοχών και της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Η επίδραση των παραπάνω ιδιοτήτων θα πρέπει να μελετηθεί, έχοντας λάβει υπόψη την υστέρηση στην αντίδραση των μαγνητικών αισθητήρων. Η υστέρηση πρέπει να γίνει αμελητέα σε εφαρμογές μηχανικών αισθητήρων και αισθητήρων πεδίου ώστε να βελτιωθεί το επίπεδο αβεβαιότητας των αισθητήρων. Πρέπει όμως να εξαιρεθεί από εφαρμογές αισθητήρων ασφαλείας, ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητα των καταγεγραμμένων πληροφοριών.

### 1.2.1 Δυναμική των μαγνητικών περιοχών

Η επίδραση της δυναμικής του τείχους μαγνητικών περιοχών και η απόκρισή τους, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αισθητήρων, αφορά στο σχηματισμό και την κινητικότητα ή τη διάδοση στο μαγνητικό υλικό.[19]

Υπάρχουν δυο είδη διάδοσης της δυναμικής των μαγνητικών περιοχών: η κύρτωση και η παράλληλη κίνηση των μαγνητικών περιοχών. Η λειτουργία της διάδοσης εξαρτάται από την ενέργεια που αποθηκεύεται στα τείχη. Τείχη χαμηλής ενέργειας διαδίδονται μέσω της πρώτης διαδικασίας, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα1.



Εικόνα 2

Ενώ τείχη υψηλής ενέργειας διαδίδονται με τη δεύτερη μέθοδο η οποία απεικονίζεται στην εικόνα2.

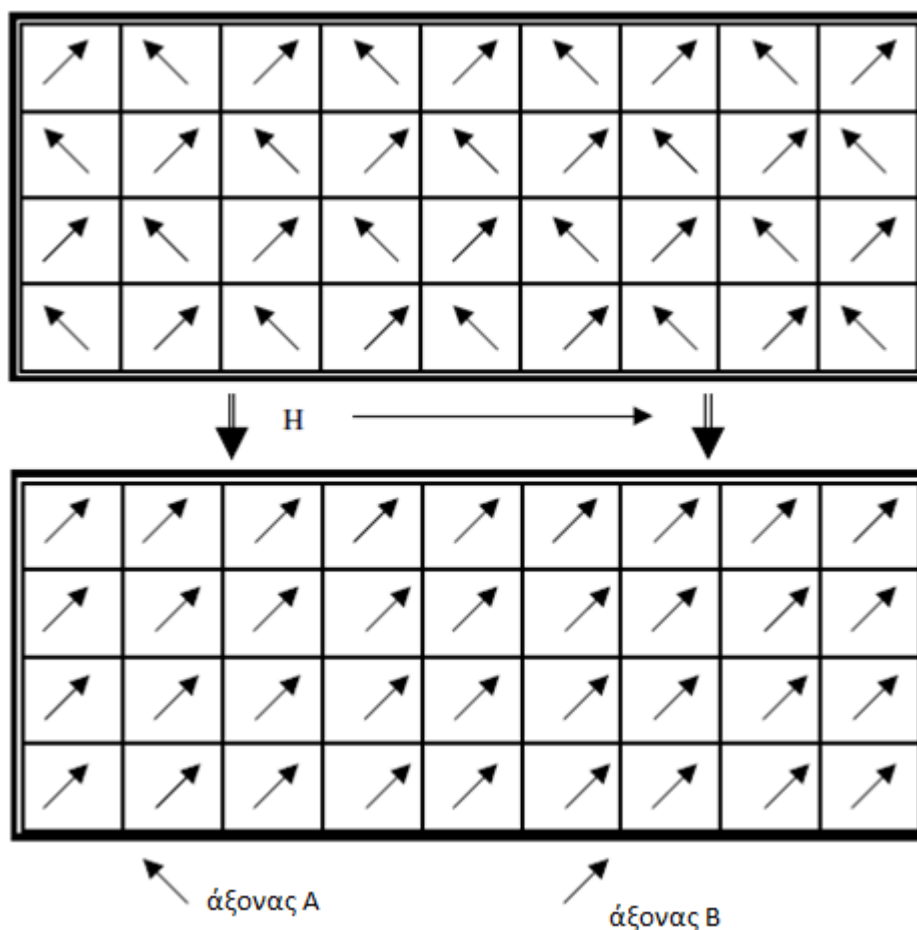
Η πρώτη μέθοδος, παρουσιάζεται σε μαλακά μαγνητικά υλικά, ενώ η πιο δύσκαμπτη κίνηση συναντάται σε πιο σκληρά υλικά. Η αντιστρεψιμότητα του μαγνητικού τοιχώματος καθορίζει την ύπαρξη ή μη της υστέρησης του φαινομένου που χρησιμοποιείται στον αισθητήρα και εξαρτάται κυρίως από τις ατέλειες στο μαγνητικό υλικό και από το φαινόμενο της αγκύρωσης των μαγνητικών δίπολων. Η δυναμική του μαγνητικού τοιχώματος χρησιμοποιείται σε χαμηλών μεγεθών μαγνητικά πεδία [20], όπως αυτά των μηχανικών αισθητήρων.

Ο σχεδιαστής των αισθητήρων που χρησιμοποιεί τη δυναμική του μαγνητικού τοιχώματος, πρέπει να προσαρμόσει το μαγνητικό υλικό με βάση τη λειτουργία η οποία εξετάζεται. Για παράδειγμα αν ένας αισθητήρας βασίζεται στη διάδοση του μαγνητικού τοιχώματος με την ελάχιστη υστέρηση, τότε το υλικό πρέπει να περιέχει όσο το δυνατόν λιγότερες ατέλειες και να είναι όσο πιο μαλακό γίνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κατά τη σύνθεση του υλικού, στοχεύοντας σε επιβαλλόμενα πεδία περίπου  $1 \text{ Am}^{-1}$ , όπως μέσω της ανόπτησης του υλικού με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι εσωτερικές τάσεις, οι οποίες σχηματίζονται από τις προαναφερθείσες ατέλειες [21]. Σε αυτή την περίπτωση το υλικό πρέπει να έχει χαμηλή μαγνητοσυστολική αντίδραση, ώστε να αποφευχθούν οι παρεμβολές με πιθανά ανεξέλεγκτα σποραδικά μαγνητοελαστικά κύματα. Μια λύση που μπορεί να καλύψει και τις δυο απαιτήσεις είναι η χρήση συρμάτων Fe.Co.Si.B με επίπεδα μαγνητοσυστολής τάξης  $0,1 \text{ ppm}$ , ύστερα από θερμική ανόπτηση ή από ανόπτηση παρουσία πεδίου [22]. Η χρήση μαγνητοσυστολικών υλικών μπορεί να είναι αποτελεσματική σε υψηλά επίπεδα θορύβου *Barkhausen*. Συνήθεις θερμοκρασιακές συνθήκες κυμαίνονται μεταξύ  $30-60^\circ\text{C min}^{-1}$  για το στάδιο ανόδου της θερμοκρασίας, σταθερές συνθήκες  $300-750^\circ\text{C}$  για  $10-60 \text{ min}$  και τέλος χαμηλός ρυθμός ψύξης στον ατμοσφαιρικό αέρα για περίπου  $12-24 \text{ h}$ . Οι συνθήκες ενός τυπικού πεδίου κατά τη διάρκεια της ανόπτησης είναι  $800-8000 \text{ A m}^{-1}$ . Μια άλλη τεχνική η οποία χρησιμοποιείται,

είναι η ανόπτηση με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικής τάσης, με συνήθεις τιμές εφελκυστικών τάσεων 100-500 MPa και τροφοδοσία ρεύματος εύρους 100-300 mA [23]. Αντιθέτως στους αισθητήρες ασφαλείας οι ατέλειες της αγκύρωσης ή η ελέγξιμη εισαγωγή ατελειών στην επιφάνεια του υλικού μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της σταθερότητας του αισθητήρα.

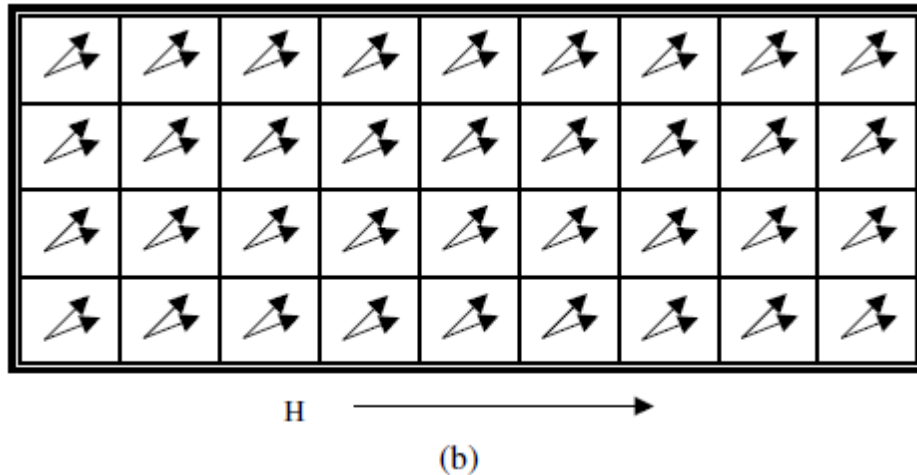
### 1.2.2 Δυναμική περιστροφής των μαγνητικών περιοχών.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο έχει δυο περιοχές λειτουργίας: την αντιστρεπτή και τη μη αντιστρεπτή περιοχή [24]. Η μη αντιστρεπτή περιοχή εμφανίζεται όταν η μαγνητική επίδραση προσανατολίζεται κατά μήκος ενός δεδομένου άξονα  $A$ , και αναπροσανατολίζεται κατά μήκος ενός άξονα  $B$  κοντά στο εξωτερικό πεδίο  $H$  λόγω της παρουσίας του πεδίου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα3



Εικόνα 3

Η αντιστρεπτή περιοχή εμφανίζεται αφού έχει προηγηθεί η μη αντιστρεπτή διαδικασία. Από τη στιγμή που ο νέος άξονας  $B$  δεν είναι ίδιος με τον άξονα του εξωτερικού πεδίου  $H$ , τα μαγνητικά δίπολα περιστρέφονται αντιστρεπτά προς τον άξονα του εξωτερικού πεδίου  $H$ , όπως φαίνεται στην εικόνα4.



Εικόνα 4

Μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές περιστρέφονται ξανά προς τον άξονα  $B$ , κατά μήκος του οποίου αρχικά και μη αντιστρεπτά είχαν αναπροσανατολιστεί. Γενικά οι μαγνητικές περιοχές δεν επανέρχονται στον αρχικό άξονα  $A$ . Και οι δυο διαδικασίες, αντιστρεπτή και μη αντιστρεπτή, σχετίζονται με την εμφάνιση της μαγνητοσυστολής. Στη μη αντιστρεπτή διαδικασία οφείλεται η εμφάνιση των μικρών ή μεγάλων σε έκταση φαινομένων *Barkhausen*, που εισάγουν το μαγνητικό θόρυβο στο αισθητήριο. Η χρήση της μη αντιστρεπτής διαδικασίας οδηγεί στην υστέρηση της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών καθώς και σε υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε σχέση με την αντιστρεπτή διαδικασία. Η υστέρηση και ο θόρυβος εμφανίζουν την αβεβαιότητα σε κάθε μαγνητική συσκευή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας. Βέβαια αν ο σκοπός είναι η εξέλιξη ενός αισθητήρα, όπου η υστέρηση και ο θόρυβος πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο το αντιστρεπτό μέρος της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Αντιθέτως, αν ο σκοπός είναι η υψηλή υστέρηση, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μη αντιστρεπτό μέρος της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Το φαινόμενο της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών έχει βρει εφαρμογή στο πεδίο των μηχανικών αισθητήρων [25]. Η δυναμική συμπεριφορά αυτών των διαδικασιών είναι αποτελεσματική στη διάδοση των ελαστικών κυμάτων κατά μήκος του μαγνητικού υλικού. Αυτή ακριβώς είναι η αρχή στην οποία στηρίζεται η τεχνική *MDL* [26-29]. Η τεχνική *MDL* έχει μελετηθεί εκτεταμένως με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεών της [30-33] με χρήση διαφορετικών μεθόδων [34-39].

Μέχρι σήμερα έχει εξελιχτεί μια μεγάλη ποικιλία μαγνητοσυστολικών υλικών. Αυτή τη στιγμή τα υλικά που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα μαγνητοσυστολής είναι τα εξελιγμένα υλικά με μνήμη σχήματος (*MSM*) [40], που παρουσιάζουν από 1 έως 10% αλλαγή των διαστάσεών τους. Η λειτουργία τους βασίζεται στον μαρτενσιτικό-ωστενιτικό μετασχηματισμό ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου λόγω της αλλαγής του πολωμένου πεδίου.

Πριν την εξέλιξη των *MSM* υλικών, τα υλικά που εμφάνιζαν τη μεγαλύτερη μαγνητοσυστολή ήταν τα μεταλλικά που προέρχονταν από την επεξεργασία πετρωμάτων, με μαγνητοσυστολικό κορεσμό από 800 έως 2000ppm [41-43]. Ο συνδυασμός από σπάνια πετρώματα και από

μαγνητικά υλικά, όπως σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο, συμμετείχαν στην εξέλιξη υλικών όπως το τερφενόλ και άλλα συγγενή υλικά, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές της μηχανικής.

Ήπια μαγνητοσυστολικά υλικά, που έχουν ως βάση το σίδηρο, το νικέλιο, το κοβάλτιο παρουσιάζουν μια χαμηλή μαγνητοσυστολική συμπεριφορά, από 30 έως 100 rpm και γενικά χρησιμοποιούνται στην τεχνική *MDL*. Οι ανάγκες στον τομέα της εξέλιξης των μοντέρνων αισθητήρων δεν επιτρέπουν τη χρήση των κλασικών πολυκρυσταλλικών υλικών, αλλά οδηγούν στη χρήση και εξέλιξη των άμορφων μαγνητοσυστολικών υλικών, όπως ταινίες, σύρματα, σύρματα επικαλυμμένα με γυαλί, που προετοιμάζονται με τεχνικές ταχείας πήξης [44-49].

Η άμορφη δομή των μαγνητοσυστολικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν βοηθά στην ελαχιστοποίηση της μη αντιστρεπτής περιστροφικής διαδικασίας, λόγω της ελαχιστοποίησης του επιβαλλόμενου πεδίου και της έκτασης του πεδίου στο οποίο οφείλονται οι μη αντιστρεπτές περιστροφές των μαγνητικών περιοχών. Η ανάγκη για την προαναφερθείσα ελαχιστοποίηση οδήγησε τις ερευνητικές ομάδες να εξελίξουν τη διάταξη του *MDL* σε λεπτότερες κατασκευές και κατά συνέπεια ενέτειναν την πιθανότητα εξέλιξης ολοκληρωμένων συστημάτων [50-52]. Επιπροσθέτως, η απαίτηση για αισθητήρες με καλύτερα χαρακτηριστικά οδήγησε στην εξέλιξη νανοκρυσταλλικών μαγνητοσυστολικών ταινιών και συρμάτων [53-55] με ακόμη μικρότερη υστέρηση, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του *MDL*, υπό την προϋπόθεση ότι παρουσιάζουν το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Ένα σύνθετο υλικό, στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής σε μια μη μαγνητική μήτρα, έχει προταθεί σε μαγνητοελαστικές εφαρμογές [56].

Κατά τη σχεδίαση ενός αισθητήρα, χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, στην αρχή πρέπει να προσαρμοστεί το μαγνητικό υλικό ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος του εξωτερικού πεδίου το οποίο ευθύνεται για τη διαδικασία της μη αντιστρεπτής περιστροφής και αντίστοιχα να μεγιστοποιεί το εύρος του εξωτερικού πεδίου στο οποίο οφείλεται η αντιστρεπτή περιστροφή. Οι μέθοδοι ανόπτησης έχουν υιοθετηθεί στοχεύοντας στην κατάλληλη προσαρμογή των μαγνητοσυστολικών στοιχείων [57-63]. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν κυρίως θερμική ανόπτηση, ανόπτηση παρουσία πεδίου, ανόπτηση με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικού φορτίου, πρόκληση ερπυσμού, οι οποίες όχι μόνο περιορίζουν τις ατέλειες του υλικού, αλλά και αναπροσανατολίζουν το μαγνητικό άξονα ώστε να απομακρύνει τη μη αντιστρεπτή διαδικασία της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Η απομάκρυνση της μη αντιστρεπτής διαδικασίας παρουσιάζεται απλή, λόγω της απουσίας ενός προσβάσιμου άξονα διεύθυνσης κοντά στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου *H*. Στην περίπτωση αυτή το μαγνητικό πεδίο στο πεδίο ανόπτησης πρέπει να είναι κάθετο στον άξονα του υλικού. Τα μεγέθη της θερμοκρασίας και του πεδίου είναι όμοια με εκείνα στην περίπτωση της δυναμικής των μαγνητικών τοιχωμάτων.

Η  $\lambda(H)$  συνάρτηση μαγνητοσυστολής είναι η πιο χαρακτηριστική αναφερόμενη στη λειτουργία του *MDL*, από τη στιγμή που μπορεί να μοντελοποιήσει τις ρυθμίσεις ενός *MDL*, και συνεπώς μια διάταξη αισθητήρα βασισμένη στην τεχνική του *MDL*. Η κατάλληλη προσαρμογή είναι

βασισμένη στη δυναμική απόκριση  $\lambda(H)$  λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα και όχι μόνο τη σταθερά μαγνητοσυστολικού κορεσμού  $\lambda_s$  ή τη συνάρτηση στατικής μαγνητοσυστολής. Έχει εξελιχθεί ένας αριθμός οργάνων με σκοπό να μετρήσουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά αυτής της συνάρτησης όπως και τη μηχανική μαγνητοσυστολική σταθερά  $\lambda_s$  [64-71]. Στη βιβλιογραφία υπάρχει μια εξαιρετική ανασκόπηση τέτοιων τεχνικών μέτρησης [72].

### 1.2.3 Εξαρτώμενοι μηχανισμοί

Εκτός από το τείχος των μαγνητικών περιοχών και της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, υπάρχουν άλλες εξαρτώμενες μαγνητικές επιδράσεις οι οποίες μπορούν να μετρηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως μακροσκοπικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

Το πιο γνωστό και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο φαινόμενο, είναι η μαγνητοαντίσταση ( $MR$ ) [73-78], η οποία παρουσιάζεται σε μαγνητικά πεδία πολύ λεπτών στρωμάτων. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, η  $dc$  μαγνητική αντίσταση ενός λεπτού φιλμ αλλάζει περίπου 2-3% με βάση το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αναφοράς, λόγω της δυναμικής της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών και σε μερικές περιπτώσεις λόγω του σχηματισμού μαγνητικών τοιχωμάτων. Το πιο συχνό φαινόμενο μαγνητοαντίστασης, η  $GMR$ (giant magnetoresistive), εμφανίζεται σε λεπτά μαγνητικά πεδία πολυαξονικών λεπτών φιλμ όπου η αλλαγή στην αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ 50-80% σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό το γιγαντιαίο φαινόμενο οφείλεται στην κάθετη ανιστροπία των μαγνητικών στρώσεων που δημιουργούν κάθετες περιστροφές μαγνητικών περιοχών. Έχει παρατηρηθεί ότι το κολοσσιαίο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης σε μαγνητικά οξειδία προσφέρει ακόμα μεγαλύτερες αλλαγές στην αντίσταση, αλλά σε κρυογονικά περιβάλλοντα. Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης χρησιμοποιείται κυρίως σε αισθητήρες πεδίου και σε εφαρμογές καταγραφής εικόνας.

Ένα άλλο φαινόμενο το οποίο επίσης βρίσκει εφαρμογή είναι το  $ac$   $MR$  και το  $MI$  [79-85]. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο η  $ac$  αντίσταση ή σύνθετη αντίσταση της μαγνητικής ύπαρξης, ποικίλλει ανάλογα με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό το φαινόμενο συναντάται και σε μη φερομαγνητικά υλικά λόγω του επιφανειακού φαινομένου, μολονότι το εύρος είναι πολύ μικρό σε σχέση με αυτό των φερομαγνητικών υλικών.

Σε κάποια σύρματα μηδενικής μαγνητοσυστολής, με περιφερειακή μαγνητική ανισοτροπία, το  $MI$  αλλάζει περισσότερο από 100% με βάση το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Μολονότι το φαινόμενο έχει μελετηθεί πολύ πρόσφατα, έχει ήδη βρει εφαρμογή στην βιομηχανία και στην αυτοκίνηση λόγω της μεγάλης ευαισθησίας που παρουσιάζει στο μαγνητικό πεδίο.

Ένα άλλο φαινόμενο έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον στην αγορά αισθητήρων πεδίου και ακόμη περισσότερο στην εγγραφή ήχου και εικόνας. Αυτό είναι το μαγνητοηλεκτρονικό φαινόμενο [86-90], σύμφωνα με το οποίο μια ειδικά σχεδιασμένη διάταξη επιδεικνύει μη συμμετρική απόκριση  $B-H$ . Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει πολύ καλά εντοπισμένες μετρήσεις πεδίου, με αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας. Το μαγνητοηλεκτρονικό φαινόμενο σήραγγας

χρησιμοποιείται επίσης στην καταγραφή οπτικοακουστικού υλικού, και σε υψηλής ακρίβειας μετρήσεις πεδίου [91,92].

Εκτός από αυτά, τα πιο κλασσικά επαγωγικά φαινόμενα [93], έχουν εφαρμοστεί σε διατάξεις μαγνητομέτρων πύλης ροής [94], για ακριβείς ανιχνεύσεις πεδίων και σε γραμμικά μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή για ανίχνευση μετατόπισης [95]. Όπως τα μαγνητικά φαινόμενα, έτσι και τα ηλεκτρομαγνητικά, όπως τα φαινόμενα *Hall* και *SQUID*, είναι σε θέση να ανιχνεύσουν πεδία.

Με εξαίρεση την μαγνητοελαστικότητα, η οποία χρησιμοποιείται για απευθείας εντοπισμό των μηχανικών μεγεθών, η κύρια εφαρμογή των αισθητήρων, μαγνητικών υλικών, είναι ο εντοπισμός των μαγνητικών πεδίων. Εάν μετρηθεί το πεδίο ή η αλλαγή του πεδίου, δίνεται η δυνατότητα να χαρτογραφηθούν οι μετρήσεις σε ένα άλλο φυσικό μέγεθος, όπως η τάση, η ροή, η μετατόπιση κτλ.

### 1.3 Αισθητήρες από μαγνητικά υλικά βασισμένοι στο μαγνητικό φαινόμενο

Τα μαγνητικά φαινόμενα και υλικά που αναφέρθηκαν νωρίτερα, έχουν χρησιμοποιηθεί ως πυρήνες σε αισθητήρια στοιχεία [96-98]. Αυτά τα αισθητήρια στοιχεία είναι χωρισμένα σε διαφορετικές οικογένειες: αισθητήρες θέσης, μάζας, πεδίου, αισθητήρες ασφαλείας και έξυπνοι αισθητήρες.

#### 1.3.1 Αισθητήρες θέσης

Οι αισθητήρες θέσης καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό στη γενική αγορά αισθητήρων. Η κατηγορία των αισθητήρων θέσης μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε τρεις υποκατηγορίες:

1. Διακόπτες τερματισμού λειτουργίας
2. Απόλυτοι, διαφορικοί και γωνιακοί αισθητήρες
3. Αισθητήρες ταχύτητας και επιτάχυνσης.

Οι διακόπτες τερματισμού λειτουργίας είναι απλοί αισθητήρες πεδίου με ελεγκτή διακοπής λειτουργίας και λειτουργούν όπως οι διακόπτες ενεργοποίησης-απενεργοποίησης συσκευών. Αυτό κυρίως αφορά τις συσκευές μαγνητοαντίστασης, αφού το κόστος μαζικής παραγωγής για χαμηλής ποιότητας στοιχεία είναι περιορισμένο. Ο κύριος ανταγωνιστής τους είναι οι χωρητικοί διακόπτες, οι οποίοι βασίζονται στην αλλαγή χωρητικότητας.

Η δεύτερη υποκατηγορία περιλαμβάνει απόλυτους, διαφορικούς και γωνιακούς αισθητήρες. Οι απόλυτοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν την απόλυτη απόσταση μεταξύ δυο σημείων [99-102]. Συνήθως αυτά τα δυο σημεία είναι η διέγερση και η λήψη. Περιπτώσεις απόλυτου αισθητήρα θέσης είναι ο *MDL* [103-104], ο *LVDT* και ο γραμμικός επαγωγικός αισθητήρας που χρησιμοποιεί κλειστά μαγνητικά πεδία. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητά τους μπορεί να φτάσει τα  $10\mu m^{-1}$  ή τα  $10\text{ ppm}$  και  $100\mu m\text{ m}^{-1}$  ή  $100\text{ ppm}$ . αντίστοιχα .

Ο διαφορικός αισθητήρας θέσης ανιχνεύει την απόσταση που διάνυσε η κεφαλή του αισθητήρα και όχι την απόλυτη θέση. Οι πιο σημαντικοί διαφορικοί αισθητήρες θέσης που βασίζονται σε μαγνητικά φαινόμενα είναι οι μαγνητικές ταινίες. Μια μαγνητική κεφαλή διαβάζει την κίνηση όταν περνάει η αλλαγή από την κορυφή της μαγνητικής ταινίας. Αυτή η ταινία είναι μια συσκευή σαν σχοινί και κατασκευάζεται από μια σειρά από ισχυρούς μαγνήτες, διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν πάνω και κάτω μαγνητικό προσανατολισμό. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα αυτών των αισθητήρων κυμαίνεται από 1 έως και  $10 \mu m m^{-1}$ .

Οι γωνιακοί αισθητήρες μπορεί να είναι είτε απόλυτοι, είτε διαφορικοί. Κλασσικό παράδειγμα διαφορικού γωνιακού αισθητήρα είναι το περιστρεφόμενο δόντι, που χρησιμοποιείται σε πολλές σημαντικές πρακτικές εφαρμογές, όπως το ABS που χρησιμοποιείται στο σύστημα πέδησης των οχημάτων. Ενώ ο δίσκος συγκρατείται και τα μαγνητικά δόντια περιστρέφονται ταυτόχρονα με τον τροχό, μια μαγνητική κεφαλή τα μετράει διαβάζοντάς τα σαν μια σειρά από παλμούς. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν μαγνητικοί αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται σε μαγνητικές και επαγωγικές τεχνικές [105,106].

Οι αισθητήρες ταχύτητας και επιτάχυνσης βασίζονται είτε στον υπολογισμό της απόκρισης διαφορικών ή απόλυτων αισθητήρων θέσης, είτε στην απ' ευθείας ανίχνευση της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης [107]. Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι αισθητήρες ταχύτητας και τα επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στους αισθητήρες θέσης, αφού η εξέλιξη των απλών επιταχυνσιόμετρων δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Ένας απλός μετρητής ταχύτητας ή μετρητής επιτάχυνσης, μπορεί να είναι ένας επαγωγικός αισθητήρας που χρησιμοποιεί την αδράνεια της μαγνητικής μάζας, μετακινούμενος πάνω από το πηνίο. Η κίνηση της μαγνητικής μάζας εισάγει μια αλλαγή στη μαγνητική ροή του πηνίου. Στο παρελθόν έχουν προταθεί επιταχυνσιόμετρα που βασίζονται στα μαγνητοσυστολικά υλικά χρησιμοποιώντας τη δυναμική κίνηση ενός μόνιμου μαγνήτη [108,109].

Τα διαστολόμετρα είναι μια ειδική κατηγορία αισθητήρων θέσης με μεγάλη ευαισθησία δεκάδων νανομέτρων και πολύ χαμηλό εύρος μέτρησης της τάξης του ενός εκατομμυριοστού. Τυπικά παραδείγματα διαστολομέτρων που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά είναι ειδικά σχεδιασμένα LVDT, τα οποία έχουν ως κύριο ανταγωνιστή τα χωρητικά διαστολόμετρα. Όλες αυτές τις συσκευές τις συναντά κανείς με ή χωρίς καλώδια.

### 1.3.2 Αισθητήρες μάζας.

Οι αισθητήρες μάζας μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Δυναμοκυψέλες
2. Αισθητήρες πίεσης
3. Μετρητές ροπής

Τα παροχόμετρα και οι αισθητήρες παροχής μάζας είναι μια υποκατηγορία εφαρμογής αισθητήρων. Όλες αυτές οι συσκευές μπορούν να βασιστούν στους αισθητήρες θέσης και παραμόρφωσης, οι οποίοι ανιχνεύουν έμμεσα την εφαρμοζόμενη τάση. Οι πιο ευρέως γνωστοί αισθητήρες αυτού του τύπου είναι τα μηκυνσιόμετρα (*strain gauge*). Παρ' όλα αυτά



υπάρχουν μαγνητικά υλικά και διατάξεις απόκρισης, που μπορούν να ανιχνεύσουν απευθείας την εφαρμοζόμενη τάση και το φορτίο, την πίεση και τη ροπή που ασκούνται σε αυτά, χρησιμοποιώντας τις αλλαγές της μαγνήτισης οι οποίες προκαλούνται από τις τάσεις λόγω ανισοτροπίας.

Οι δυναμοκυψέλες που μετρούν απευθείας εφελκυστικές τάσεις βασίζονται κυρίως σε επαγωγικές διατάξεις που χρησιμοποιούν ως φερομαγνητικό πυρήνα υλικά ευαίσθητα σε εφελκυστικές τάσεις [110-114]. Τέτοιος πυρήνας μπορεί να είναι ένα θετικό μαγνητοσυστολικό υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα μειώνεται δραστικά με την εφαρμογή τάσης, με αντίστοιχη μείωση της εξόδου του πηνίου. Σε τέτοιες διατάξεις μπορούν να βασιστούν τα επιταχυνσιόμετρα. Η τεχνική του *MDL*, έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε απευθείας μέτρηση τάσης. Τυπικές τιμές της ευαισθησίας και της αβεβαιότητας αυτών των συσκευών είναι: 10-100 και 100-300 *ppm* αντίστοιχα. Μετρητές πίεσης οι οποίοι έχουν προταθεί, βασίζονται κυρίως σε διατάξεις λεπτών φιλμ, χρησιμοποιώντας το πιεζομαγνητικό φαινόμενο [115-118].

Η κύρια ποικιλία αισθητήρων ροπής εξελίσσεται σωνεχώς [119-129]. Ως αρχή μπορεί να θεωρηθεί η χρήση προ ανοπτημένων(*pre annealed*) μαγνητικών υλικών υπό στρεπτική φόρτιση. Το φαινόμενο *MI* και η διάταξη του *MDL* έχουν προταθεί στο παρελθόν ως μετρητές ροπής. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα αυτών των συσκευών είναι συγκρίσιμες και όμοιες με 100 έως 1000 *ppm* αντίστοιχα. Οι αισθητήρες ροής βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές, οι οποίες είναι γνωστές στον τομέα της βιομηχανίας. Οι μετρητές ροής, που έχουν προταθεί, χρησιμοποιούν την επίδραση των καμπτικών τάσεων σε ένα άμορφο σύρμα [130].

### 1.3.3 Αισθητήρες πεδίου

Αυτή η κατηγορία είναι πιθανώς η μεγαλύτερη στην αγορά μαγνητικών αισθητήρων. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες πεδίου είναι αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μικρών πεδίων ή διαβαθμισμένων πεδίων ή για την ανίχνευση μαγνητικών ανωμαλιών, *MAD*(*magnetic anomaly detection*)[131]. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως ως μαγνητόμετρα [132-136]. Ιστορικά τα μαγνητόμετρα πύλης ροής έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση χαμηλών και κλιμακωτών πεδίων [137-138]. Οι πιο σημαντικές τεχνικές και τα πιο σημαντικά φαινόμενα που χρησιμοποιούνται στην εξέλιξη των αισθητήρων πεδίου και βασίζονται σε μαγνητικά υλικά είναι το φαινόμενο του *MR*, το φαινόμενο του *MI* και οι επαγωγικές τεχνικές, όπως τα μαγνητόμετρα πύλης ροής [139-143]. Οι *MR* Αισθητήρες πεδίου χρησιμοποιώντας την πολυαξονική κατασκευή, παρουσιάζουν διανυσματική μαγνητική ανισοτροπία των φερομαγνητικών αξόνων. Αισθητήρες αυτού του είδους κατασκευάζονται μαζικά με τεχνικές λεπτών στρώσεων(φιλμ). Η ευαισθησία και η ακρίβειά τους κυμαίνονται από 1 έως 10 *nT*.

Το εξελιγμένο φαινόμενο *MI*, σε άμορφα νάνοκρυσταλλικά σύρματα, προσφέρει καλύτερα επίπεδα ακρίβειας και ευαισθησίας περίπου 1-10 και 100 *pT*. Παρ'όλο που το κόστος τους είναι υψηλό σε σχέση με τους αισθητήρες *MR*, οι παραπάνω καλές τους ιδιότητες τους

καθιστούν απαραίτητους σε εφαρμογές στη βιομηχανία και στην αυτοκίνηση. Έχει γίνει προσπάθεια να εξελιχθούν πιο ισχυροί αισθητήρες *MI* σε λεπτές ταινίες, ώστε να μπορέσουν να βγουν σε μαζική παραγωγή [144-147]. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται σε μαγνητικούς αισθητήρες λεπτών φιλμ, είναι τα λιγότερο ελκυστικά χαρακτηριστικά τους σε σχέση με τα στοιχεία των τρισδιάστατων αισθητήρων. Με το σχεδιασμό ενός πολλά υποσχόμενου αισθητήρα λεπτού φιλμ *MI* και του φαινομένου των μαγνητόμετρων πύλης ροής, λόγω των αποτελεσμάτων που έδειξαν οι μετρήσεις πεδίου δυο διαστάσεων χρησιμοποιώντας όλο το εύρος και τον παλμό με τεχνικές διαμόρφωσης επετεύχθη ευαισθησία που αγγίζει το  $1\rho T$  [148]. Για τη μέτρηση πεδίων έχουν εξελιχθεί και χρησιμοποιηθεί και άλλες μαγνητικές αρχές, όπως η αρχή *Wideman* [149].

Για την ανίχνευση πεδίων έχουν χρησιμοποιηθεί και εξελιχθεί και άλλες τεχνικές, όπως αυτή του *MDL*, περιγραφή του οποίου γίνεται στη συνέχεια. Όλοι αυτοί οι αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται σε μαγνητικά φαινόμενα και υλικά όσον αφορά τις επιδόσεις τους, έχουν έναν κύριο ανταγωνιστή, τον αισθητήρα *SQUID*, ο οποίος βασίζεται στο φαινόμενο *Josephson*, και επιτρέπει τη μέτρηση κβαντικής μαγνητικής ροπής με ευαισθησία περίπου  $1 fT$ .

#### 1.3.4 Αισθητήρες ασφαλείας.

Οι αισθητήρες ανάγνωσης και εγγραφής χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες:

1. Αισθητήρες εγγραφής οπτικοακουστικού υλικού
2. Αισθητήρες ασφαλείας

Τα μέσα εγγραφής περιλαμβάνουν και τις ταινίες εγγραφής αλλά και τις κεφαλές ανάγνωσης. Οι κεφαλές ανάγνωσης βασίζονται σε μαγνητικά φαινόμενα και κυρίως στους αισθητήρες *GMR*. Οι δε αισθητήρες ασφαλείας [150] βασίζονται σε ένα συνδυασμό διαφορετικών μαγνητικών ιδιοτήτων. Η κατηγορία αυτών των αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οπτικές εφαρμογές όπου είναι δυνατή η χρήση *barcode*.

#### 1.3.5 Αισθητήρες πολλαπλών χρήσεων

Είναι οι αποκαλούμενοι έξυπνοι αισθητήρες [151], στους οποίους περιλαμβάνονται τρεις υποκατηγορίες:

1. Πολυπαραμετρικοί αισθητήρες
2. Αυτοδίδακτοι αισθητήρες
3. Αισθητήρες αντίδρασης

Οι πολυπαραμετρικοί αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν πάνω από ένα φυσικό μέγεθος. Ένα παράδειγμα είναι οι μαγνητοελαστικές διατάξεις βασισμένες σε αρνητικά φορτισμένες μαγνητοσυστολικές ταινίες, οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν ταυτόχρονα πεδία και τάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παλμική έξοδος του αισθητήρα διαμορφώνεται μόνο από το

εύρος, λόγω του περιβάλλοντος πεδίου, ενώ το πλάτος του παλμού διαμορφώνεται μόνο από τις εφελκυστικές τάσεις.

Οι αυτοδίδακτοι αισθητήρες έχουν την ιδιότητα να βαθμονομούνται αυτόματα και να κλιμακώνουν αυτόματα το εύρος της μέτρησης.

Οι αισθητήρες αντίδρασης είναι πλήρη ηλεκτρομηχανικά συστήματα, τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν και να αντιδράσουν ανάλογα με τη μέτρηση. Ένα παράδειγμα είναι τα πυραυλικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν έναν αισθητήρα οδήγησης ορισμένου μαγνητικού πεδίου ο οποίος μετρά τη διεύθυνση της κίνησης του πυραύλου και του συστήματος αντίδρασης, αλλάζοντας τη διεύθυνση του με βάση την προκαταχωρημένη εντολή

## 1.4 Εφαρμογές αισθητήρων βασισμένοι σε μαγνητικά φαινόμενα και υλικά.

### 1.4.1 Βιομηχανικές εφαρμογές

Τα κύρια πεδία βιομηχανικών εφαρμογών είναι ο μη καταστροφικός έλεγχος και αξιολόγηση (*NDT&E*). Όταν τα μαγνητικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε στοιχεία αισθητήρων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των δινορρευμάτων (*ECT, eddy current technique*) και η δοκιμή *MAD* [151-155]. Και οι δυο τεχνικές προϋποθέτουν τη χρήση αισθητήρων μικρού πεδίου. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για αυτό το σκοπό είναι οι αισθητήρες *Hall*, οι οποίοι προσφέρουν ακρίβεια της τάξης των  $1\text{ mT}$ . Τα στοιχεία *GMR* προσφέρουν βελτιωμένη ευαισθησία που αγγίζει το  $1\ \mu\text{T}$ . Τα εξελιγμένα στοιχεία *MI*, προσφέρουν ευαισθησία 10-100  $\rho\text{T}$ . Η τιμή της ευαισθησίας, αντανακλά την δυνατότητα των αισθητήρων να ανιχνεύουν μια ποικιλία μικρών πεδίων, ανταποκρινόμενα στο μέγεθος μιας υπάρχουσας ρωγμής ή ατέλειας.

Τα στοιχεία *MDL* διακρίνονται λόγω των καλών επιδόσεών τους σε διαφορετικές μετρήσεις, παρά το μειονέκτημα της χαμηλής ευαισθησίας. Άλλες βιομηχανικές εφαρμογές έχουν να κάνουν με την ανίχνευση αλλαγής θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης (έλεγχος κραδασμών) [160].

Κύρια κατηγορία αποτελούν οι διακόπτες θέσης, οι οποίοι βασίζονται στο φαινόμενο *GMR*, με δυνατότητα επανάληψης μεγαλύτερη από  $10^{12}$ . Για πιο ακριβή έλεγχο της τάξης του  $1\ \mu\text{m}$ , μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί αισθητήρες θέσης οι οποίοι αποτελούνται από διατάξεις μαγνητικών ταινιών. Οι *MDL* επίσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο υδραυλικών πιστονιών, οι βιομηχανικοί έλεγχοι προϋποθέτουν τη χρήση αισθητήρων μάζας, όπως τα κελιά φορτίου, μετρητές ροπής και μετρητές πίεσης. Οι κυρίως χρησιμοποιούμενοι βιομηχανικοί αισθητήρες *MDL* βασίζονται σε αγώγιμα και ημιαγώγιμα υλικά. Για τη μέτρηση φορτίων χρησιμοποιούνται τα μηκυνσιόμετρα. Σήμερα οι αισθητήρες φορτίου βασίζονται σε μικροσκοπικές διατάξεις οι οποίες παράγονται με τεχνικές λιθογραφίας, επιτρέποντας καλύτερες επιδόσεις. Η τεχνική *MDL* έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποιες ενδιαφέρουσες εφαρμογές φορτίων και παράγωγων μεγεθών μέτρησης, με ευαισθησία καλύτερη από αυτή

των μηκυνσιόμετρων. Επίσης στη βιβλιογραφία αναφέρονται ενδιαφέρουσες μελέτες για τη χρήση μαγνητοσυστολικών υλικών σαν στοιχεία ενεργοποίησης [161-163].

#### 1.4.2 Εφαρμογές στη βιοϊατρική

Άλλες σημαντικές εφαρμογές των αισθητήρων που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά και φαινόμενα σχετίζονται με τον τομέα της βιοϊατρικής [164-169]. Τα πιο παραδοσιακά συστήματα που χρησιμοποιούν αισθητήρες, είναι το εγκεφαλογράφημα, μια διάταξη αισθητήρων πεδίου ικανή να ανιχνεύσει πεδία εύρους τάξης των 10  $pT$ .

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διάταξη αισθητήρων είναι οι αισθητήρες *SQUID*, με ευαισθησία από 1 έως 10  $fT$ . Σε τέτοιες εφαρμογές έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αισθητήρες *MI*, οι οποίοι όμως μειονεκτούν στον τομέα της ευαισθησίας, η οποία είναι της τάξης των 10 -100 $pT$ . Στην ίδια οικογένεια ιατρικών μηχανημάτων, που βασίζονται στα μαγνητικά φαινόμενα, ανήκει και ο καρδιογράφος, ο οποίος είναι εύκολος στη χρήση και κοστίζει λιγότερο από έναν κλασικό ηλεκτροκαρδιογράφο, παρόλα αυτά δεν έχει τις απαιτούμενες επιδόσεις σε όλων των ειδών τις μετρήσεις. Αυτό προϋποθέτει ένα σύστημα *MI*, ένα για κάθε καρπό.

Λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ερευνών που αφορούν το *DNA*, έχουν εξελιχθεί μικροσκοπικές διατάξεις αισθητήρων πεδίου με σταθερότητα της τάξης του 1 $mm$ . Αυτού του είδους οι συσκευές βασίζονται κυρίως στο φαινόμενο *GMR*, ενώ σε παρόμοιες εφαρμογές δοκιμάζονται οι αισθητήρες *MI*.

#### 1.4.3 Στρατιωτικές εφαρμογές

Οι αισθητήρες που προορίζονται για στρατιωτικές εφαρμογές, περιλαμβάνουν συσκευές που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά και καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας αγοράς αισθητήρων και από πλευράς κόστους και από πλευράς σπουδαιότητας.

Μια ενδεικτική εφαρμογή αφορά στα συστήματα ελέγχου μετάλλων (ανίχνευση ναρκών). Μέχρι σήμερα τα χαμηλά πεδία, τα διαβαθμισμένα πεδία ή τα συστήματα *MAD*, ήταν τα μόνα συστήματα που μπορούσαν να ανιχνεύσουν μέταλλα - νάρκες. Όσο περισσότερο εξελίσσονται οι νάρκες, τόσο μικρότερες ποσότητες σιδήρου χρησιμοποιούνται οπότε για την ανίχνευσή τους απαιτούνται αισθητήρες με μεγαλύτερη ευαισθησία και ακρίβεια. Πολλοί τύποι αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό, από διατάξεις μαγνητομέτρων πύλης ροής μέχρι αισθητήρες τύπου *MI* και *MR*.

Η ευαισθησία των σημερινών αισθητήρων είναι της τάξης των 10-100  $pT$ . Μια άλλη στρατιωτική εφαρμογή η οποία είναι κατάλληλη και για οικιακή χρήση, είναι η μαγνητική υπογραφή. Τα οχήματα εξοπλίζονται με πηνία των οποίων η κυματομορφή είναι κωδικοποιημένη. Έτσι με την ανίχνευση και ταυτοποίηση του πεδίου γίνεται η αναγνώριση του οχήματος. Η χρήση τέτοιων εφαρμογών γίνεται κυρίως σε σκάφη.

Μια άλλη εφαρμογή είναι η πλοήγηση βλήματος. Οι τρέχουσες παρόμοιες εφαρμογές χρησιμοποιούν γυροσκόπια βασισμένα στην ανίχνευση αδρανειακής μάζας ή στο σύστημα παγκόσμιου εντοπισμού θέσης(*GPS*), αλλά οι έρευνες έχουν ως σκοπό τη χρήση αισθητήρων πεδίου. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην ποικιλία μετρήσεων πεδίου και στην απόκριση λόγω της επίδρασης του πεδίου της γης. Γι αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται αισθητήρες *GMR* και γιγαντιαίοι αισθητήρες μαγνητοεπαγωγής.

#### 1.4.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Τις τελευταίες δεκαετίες, σε παγκόσμιο επίπεδο, η προστασία του περιβάλλοντος έχει προαχθεί σε θέμα ζωτικής σημασίας. Συνεπώς η μέτρηση πολλών παραγόντων που επηρεάζουν την περιβαλλοντική σταθερότητα είναι τεράστιας σημασίας. Η παρακολούθηση και καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι αυτής της διαδικασίας [170]. Το εύρος των μετρήσεων με βάση τη συχνότητα ξεφεύγει από το *dc* πάνω από 30 *GHz*. Μια από τις επιβαρύνσεις την οποία συναντάμε καθημερινά είναι η ακτινοβολία της κινητής τηλεφωνίας, όπου οι μετρήσεις της ακτινοβολίας είναι εύρους 1-2 *GHz* και καθορίζουν τον ορθό έλεγχο και χρήση των κινητών τηλεφώνων.

Η ευαισθησία των μετρήσεων αυτού του εύρους κυμαίνεται από *nT* έως μερικά *mT*. Οι αισθητήρες που βασίζονται σε μαγνητικά πεδία, όπως τα μαγνητόμετρα πύλης ροής, κυριαρχούν κυρίως στην αγορά αισθητήρων χαμηλής συχνότητας. Για παρόμοιες εφαρμογές έχουν μελετηθεί αισθητήρες *GMI*, παρ'όλο που προορίζονται για τη μέτρηση υψηλών συχνοτήτων.

Μια άλλη εφαρμογή που αφορά το περιβάλλον, είναι η μέτρηση του πεδίου του διαστήματος. Κάθε δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με αισθητήρες πεδίου ώστε να δίνει εκτός από πληροφορίες πλοήγησης, και μετεωρολογικές μετρήσεις. Το πιο συνηθισμένο είδος τέτοιων αισθητήρων είναι τύπου πύλης ροής, οι οποίοι λόγω του μεγέθους και της περίπλοκης λειτουργίας τους έχουν υψηλό κόστος. Για το λόγο αυτό τους αισθητήρες πύλης ροής τους ανταγωνίζονται οι αισθητήρες *GMR* και *GMI*, προσφέροντας αποτελέσματα πολλά υποσχόμενα.

Μια άλλη περιβαλλοντική εφαρμογή είναι οι διαδικασίες μέτρησης των κατοικημένων περιοχών. Σε μεγάλες περιοχές είναι θέμα μείζονος σημασίας η μέτρηση των οχημάτων που βρίσκονται στις οδικές αρτηρίες, ώστε να δοθούν οι κατάλληλες πληροφορίες για την αποτελεσματικότερη ρύθμιση και ανταπόκριση της κυκλοφοριακής σήμανσης.

#### 1.4.5 Εφαρμογές στην αυτοκίνηση

Στη σημερινή εποχή οι αισθητήρες έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών στον τομέα της αυτοκίνησης, ενώ η καλή λειτουργία τους στον τομέα της ενεργητικής και παθητικής ασφάλειας τους καθιστά απαραίτητους.

Τα περισσότερα αυτοκινητιστικά ατυχήματα, οφείλονται στις αρνητικές επιδράσεις της κίνησης, γεγονός που οδηγεί στην ολοένα και αυξανόμενη χρήση αισθητήρων. Για παράδειγμα ένα σύγχρονο αυτοκίνητο μπορεί να φέρει μέχρι και 1500 αισθητήρες. Σε κάποιες από αυτές τις εφαρμογές κυριαρχούν διατάξεις αισθητήρων οι οποίες βασίζονται στο μαγνητικό πεδίο [171]. Η πιο γνωστή κατηγορία είναι οι μαγνητικοί γωνιακοί αισθητήρες θέσης, στους οποίους βασίζεται η λειτουργία του συστήματος αντιμπλοκαρίσματος τροχών (*ABS*), με το οποίο είναι εφοδιασμένα όλα τα σύγχρονα συστήματα πέδησης. Ένα οδοντωτό δαχτυλίδι από μόνιμα μαγνητικά υλικά περιστρέφεται μαζί με τον τροχό, και ένας αισθητήρας πεδίου καταγράφει την περιστροφική κίνησή του. Οποιοδήποτε ξαφνικό ή απροσδόκητο μπλοκάρισμα του τροχού κατά τη διάρκεια της πέδησης ενεργοποιεί το *ABS*, το οποίο με τη σειρά του χαλαρώνει και πιέζει το μηχανισμό πέδησης ανεξάρτητα σε κάθε τροχό μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου. Μια άλλη εφαρμογή στον τομέα της αυτοκίνησης είναι οι αισθητήρες ροπής στο σύστημα διεύθυνσης.

Οι αισθητήρες *GMI* έχουν χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό και τον έλεγχο της θέσης του οχήματος [172,173] κατά τη διάρκεια παρκαρίσματος και κατά τη χρήση της αυτόματης πλοήγησης. Τέτοια συστήματα ελέγχου μπορούν να βοηθήσουν τον οδηγό, παρέχοντάς του πληροφορίες για την πορεία του αυτοκινήτου και προειδοποιήσεις ώστε να αντιδρά έγκαιρα σε πιθανά λάθη. Επίσης έχουν προταθεί αισθητήρες με πεδίο εφαρμογής τη μηχανή του αυτοκινήτου, για την ανίχνευση και μέτρηση της ροπής [174].

#### 1.4.6 Εργαστηριακοί αισθητήρες

Στον τομέα των εργαστηριακών μαγνητικών αισθητήρων κυριαρχεί η επιστήμη της μετρολογίας. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι η διακρίβωση δευτερευόντων προτύπων που βασίζονται σε ακριβείς αισθητήρες πεδίου. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη οικογένεια αισθητήρων είναι μαγνητόμετρα πύλης ροής. Άλλες εφαρμογές είναι το ατομικό μικροσκόπιο (*Atomic Force Microscope-AFM*), το μαγνητικό μικροσκόπιο (*Magnetic Force Microscope-MFM*) και το μικροσκόπιο διέλευσης σήραγγας (*Scanning Tunneling Microscope-STM*). Οι παραπάνω διατάξεις μπορούν να εξασφαλίσουν τη δημιουργία μιας λεπτομερούς τοπογραφίας μιας επίπεδης επιφάνειας, χρησιμοποιώντας τεχνολογία επιπέδου ατόμου. Μια ακίδα ανίχνευσης δονείται στην κορυφή της επιφάνειας παράγοντας δυνάμεις (*Van der Waals* για το *AFM*, *MFM*, *MTM* και ηλεκτρικές δυνάμεις για το *STM*) αναφορικά με την τοπογραφία της επιφάνειας που ερευνάται. Επίσης έχει παρουσιαστεί ένα σύστημα, *MFM*, το οποίο φέρει μαγνητικά νανο-σύρματα ως ακίδα και υπόσχεται ευαισθησία της τάξης του  $0,1\text{nm}$  [175]. Εκτός από αυτά τα όργανα αισθητήρων, στη μετρολογία έγινε ένα μεγάλο πείραμα, μια νέα τεχνική η οποία βασίζεται σε μαγνητικά υλικά και έχει ως σκοπό να καταγράψει την κατασκευή του χιλιόγραμμου.

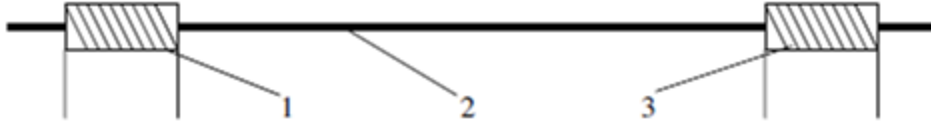
Για τον καθορισμό του χιλιόγραμμου, χρησιμοποιήθηκε μια εγκατάσταση των *Volt* και *Ohm*, βάση των νόμων των *Lorenz* και *Ampere*, σε μια πειραματική διάταξη βασισμένη στο φαινόμενο *Hall* [176].

#### 1.4.7 Οικιακές εφαρμογές

Οι οικιακές εφαρμογές των αισθητήρων που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά περιλαμβάνουν αισθητήρες πλοήγησης, αισθητήρες ασφαλείας, όπως εγγραφής οπτικοακουστικού υλικού και αναπαραγωγής αυτού. Η ηλεκτρονική πυξίδα είναι ένας αισθητήρας μικρού διανυσματικού πεδίου, το οποίο αποτελεί σημείο αναφοράς για τις σύγχρονες υπηρεσίες πλοήγησης. Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται όταν τα οπτικά συστήματα *barcode* δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, λόγω έντονων περιβαλλοντολογικών συνθηκών ή αδυναμίας οπτικής παρακολούθησης.

## 2 Θεωρία της μηχανικής για τους MDL

Η λειτουργία των MDL έχει ήδη περιγραφεί επικεντρώνοντας στις βασικές ρυθμίσεις και στη μηχανική μοντελοποίηση, όπως οι παράμετροι και οι διατάξεις που επηρεάζουν την απόκριση. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται μια βασική διάταξη της γραμμής καθυστέρησης.



Σχήμα 1 διάταξη MDL. (1)κινούμενο πηνίο διέγερσης, (2)μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, (3)κινούμενο πηνίο ανίχνευσης

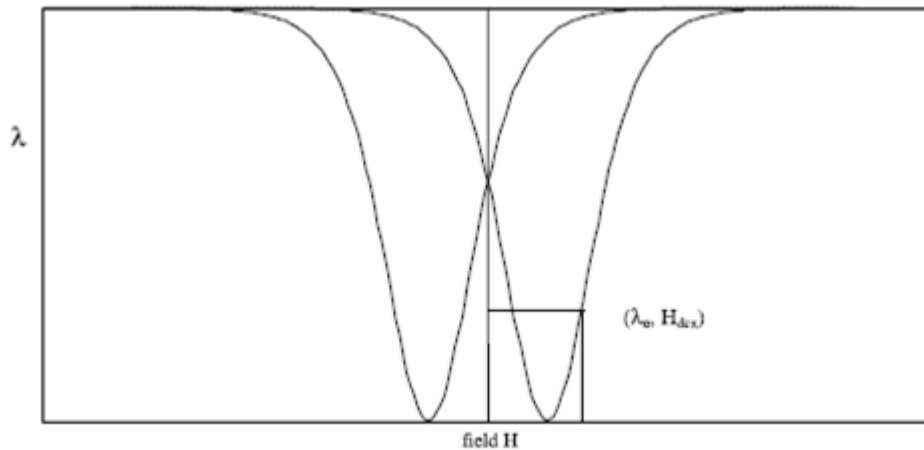
Γύρω από τα δυο άκρα του MDL είναι τοποθετημένα ένα μικρό πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο ανίχνευσης. Στο τελείωμα της γραμμής καθυστέρησης χρησιμοποιείται κολλώδες εύκαμπτο πλαστικό για να εξαλειφτούν οι ακουστικές αντανακλάσεις. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται λεπτομέρειες από διαφορετικές εκδόσεις τέτοιων διατάξεων [177-180] .

### 2.1 Ποιοτική ερμηνεία των βασικών διατάξεων MDL

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα τα μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν την τάση να προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα των μεμονωμένων περιοχών επιρροής προς την κατεύθυνση των εξωτερικά επιβαλλόμενων πεδίων. Για το λόγο αυτό, αναφερόμενοι σε εξωτερικές δυνάμεις ή το παλμικό πεδίο κατά το μήκος του άξονα του MDL, έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση των αλμάτων *Barkhausen*. Τα άλματα *Barkhausen* εμφανίζονται στο στερητικό και μη αντιστρεπτό μέρος της συνάρτησης μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  και συνεπώς σε περιστροφές μικρών γωνιών, το οποίες αποτελούν το μη στερητικό και αντιστρεπτό μέρος της αποκαλούμενης  $\lambda(H)$  συνάρτησης μαγνητοσυστολής.

Η πόλωση του MDL, με *dc* πεδίο  $H_{dcx}$  έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση  $\delta l_0$  του υλικού και εμφανίζεται ως το σημείο  $(\delta l_0, H_{dcx})$  στη συνάρτηση μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  , όπως φαίνεται στην εικόνα5.





Εικόνα 5 η συνάρτηση μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  δείχνει την εξάρτηση των μικροπαραμορφώσεων στο επιβαλλόμενο πεδίο.

Όταν ένα παλμικό πεδίο  $H_e(t)$ , εφαρμόζεται κατάλληλα στην περιοχή που εφαρμόστηκε το πεδίο, εμφανίζεται μια όμοια αλλά δυναμική επιμήκυνση  $\delta\lambda(t)$ , αποκρινόμενη στη διάδοση ενός ελαστικού κύματος κατά μήκος του  $MDL$ , ακολουθώντας την κλασική κυματική εξίσωση.

Σε κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά, το κατάλληλο εύρος παλμικού πεδίου είναι της τάξης του  $msec$ . Για το λόγο αυτό το μήκος του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος είναι της τάξης αρκετών χιλιοστών. Στα πιο συνηθισμένα στοιχεία  $MDL$ , όπου η διατομή του  $MDL$  είναι ένα δέκατο του τετραγωνικού χιλιοστού, διαδίδεται ένα ελαστικό κύμα διέγερσης πλήρους διατομής.

Η χρήση υλικών τα οποία αποκρίνονται σε μεγαλύτερες συχνότητες ή μεγαλύτερης διατομής, έχουν ως αποτέλεσμα τη διάδοση επιφανειακών ακουστικών κυμάτων. Κυρίαρχο ρόλο στη μοντελοποίηση και στην προσαρμογή της συμπεριφοράς κατά τη δημιουργία και διάδοση των μικροπαραμορφώσεων (microstrain), παίζει το επιφανειακό φαινόμενο (skin effect).

Το παλμικό πεδίο κατά μήκος του  $MDL$ , το οποίο ευθύνεται για τη δημιουργία ελαστικών κυμάτων, παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία η οποία εξελίσσεται από το πλήρως μαγνητισμένο κέντρο μέχρι ένα όριο το οποίο πρακτικά είναι της τάξης της διαμέτρου του πηνίου διέγερσης, υποδεικνύοντας μια ενεργή περιοχή του μαγνητοσυστολικού υλικού που συμμετέχει στην παραγωγή μικροπαραμορφώσεων.

Το ελαστικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος του  $MDL$  κυρίως ως διάμηκες ελαστικό κύμα, λόγω της μορφής του ακουστικού κύματος οδηγού. Η μικρή διατομή ανάλογα με το μήκος κύματος και τις διαστάσεις του  $MDL$ , εξαλείφει οποιοδήποτε εγκάρσιο και οιονεί-εγκάρσιο κύμα.

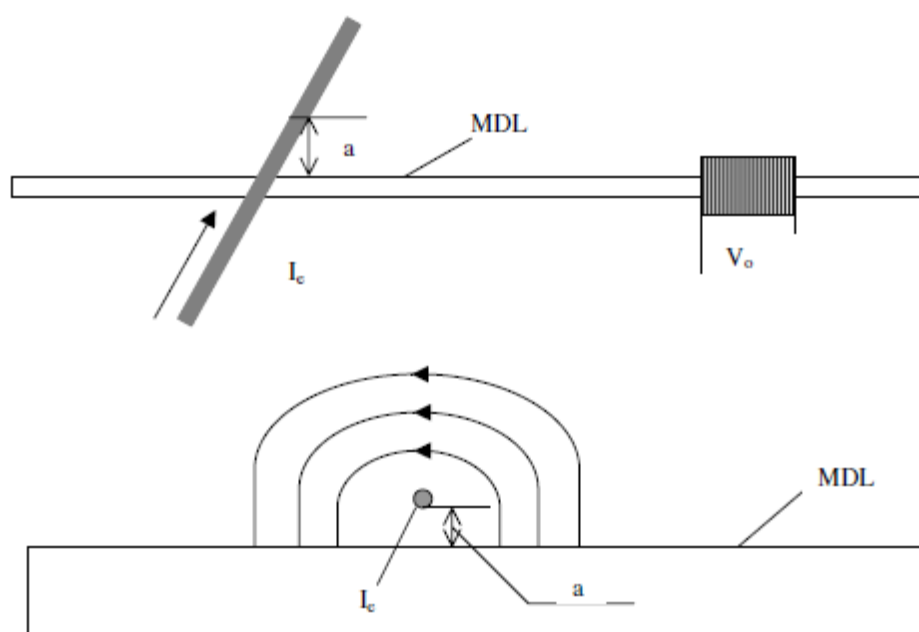
Το διαδιδόμενο ελαστικό κύμα, στον τομέα του αλλάζει το τοπικό μαγνητικό στοιχείο, κατά μήκος του άξονα του  $MDL$ , παρέχοντας τοπικά μαγνήτιση στον  $MDL$ . Η κύρια μακροσκοπική αλλαγή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του άξονα του σύρματος είναι το αποτέλεσμα του στατιστικού αθροίσματος της τοπικής απειροστής αλλαγής στην οριοθέτηση των μαγνητικών δίπολων στην περιοχή της διάδοσης του ελαστικού κύματος. Για αυτό το λόγο η μαγνήτιση του πολωμένου πεδίου καθορίζει την αλλαγή της τοπικής μαγνήτισης κατά μήκος του άξονα

του MDL. Στην πραγματικότητα αυτό είναι το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο. Σε μερικά υλικά το πεδίο της γης μπορεί να είναι αρκετό για να πολώσει και συνεπώς να προκαλέσει την παρουσία τέτοιων φαινομένων. Για το λόγο αυτό εάν μια επαγωγική συσκευή, όπως ένα πηνίο ανίχνευσης, τοποθετηθεί γύρω από τον MDL, προκαλείται μια παλμική τάση ανάλογη της πρώτης παραγώγου της ροής κατά μήκος των άκρων του.

Το πηνίο ανίχνευσης θα πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση  $x$  από το σημείο αφετηρίας του ελαστικού κύματος, το οποίο θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να προκαλέσει αμελητέα εξασθένιση και αρκετά μακρύ ώστε να αποφευχθεί ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ του μέσου διέγερσης και ανίχνευσης.

## 2.2 Μοντελοποιώντας τη βασική διάταξη ενός MDL.

Με σκοπό να παρουσιαστεί η μοντελοποίηση της διάταξης ενός MDL, θεωρήθηκε η όσο το δυνατόν πιο απλή διάταξη διέγερσης, ένας αγωγός παλμικού ρεύματος κάθετος στον MDL, όπως φαίνεται στο σχήμα 2 :



Σχήμα 2

Το παλμικό πεδίο  $H(x,t)$  κατά μήκος του MDL, το οποίο προκαλείται από παλμικό ρεύμα  $I(t)$ , υπολογίζεται από τον τύπο :

$$H(x,t) = f(x)I(t) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} I(t)$$

Όπου το  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού παλμικού ρεύματος και του MDL.

θεωρείται ένα παλμικό ρεύμα ώστε να εξασφαλιστεί μια σταθερή κατάσταση του ρεύματος  $I_0$  για  $n_1 T < t < n_2 T$ , από μια ράμπα ανόδου από το 0 έως το  $I_0$  για  $0 < t < n_1 T$  και από μια ράμπα καθόδου από  $I_0$  έως το 0 για  $n_2 T < t < n_3 T$ , όπου  $T$  είναι αύξηση του χρόνου και  $n_i$  ένας ακέραιος αριθμός.

Στην περίπτωση της ανυστερητικής συμπεριφοράς, οι μικροπαραμορφώσεις προκαλούνται από το παλμικό πεδίο  $H(x,t)$ , το οποίο δίνεται από τον επόμενο τύπο, ο οποίος βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα [181].

$$\lambda(H) = \lambda_s(1 - e^{-\alpha H^2}), \quad \alpha > 0.$$

όπου ο θετικός αριθμός  $c$  είναι μια προσαρμοστική παράμετρος.

Στην περίπτωση εμφάνισης της υστέρησης, χρησιμοποιείται ο επόμενο τύπος:

$$\lambda(H) = \lambda_s(1 - e^{-\alpha(H \pm H_c)^2}).$$

Χάριν ευκολίας, μόνο οι ανυστερητικές αντιδράσεις λαμβάνονται υπόψη.

Οι μικροπαραμορφώσεις  $\lambda(\chi, t)$  προκαλούνται από αυξανόμενα περιοδικά ρεύματα και υπολογίζονται σαν ομάδα παραμορφώσεων:

$$\begin{aligned} Gr(x, t) \\ = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s \left( 1 - \exp \left( -\alpha \frac{\left( \frac{nI_0}{n_1} \right)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2} \right) \right) \end{aligned}$$

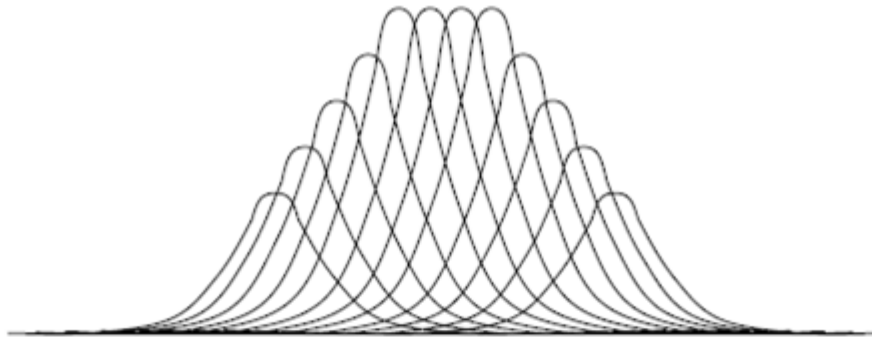
Όπου  $u$  η διαμήκης ταχύτητα του ήχου του  $MDL$ , ενώ οι μικροπαραμορφώσεις  $\lambda(\chi, t)$  που προκαλούνται από σταθερές μεταβατικές καταστάσεις υπολογίζονται σαν ένα σύνολο παραμορφώσεων σύμφωνα με τον τύπο:

$$\begin{aligned} Gs(x, t) \\ = \sum_{n=n_1}^{n_2} \lambda_s \left( 1 - \exp \left( -\alpha \frac{(I_0)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 - n)Tv)^2} \right) \right). \end{aligned}$$

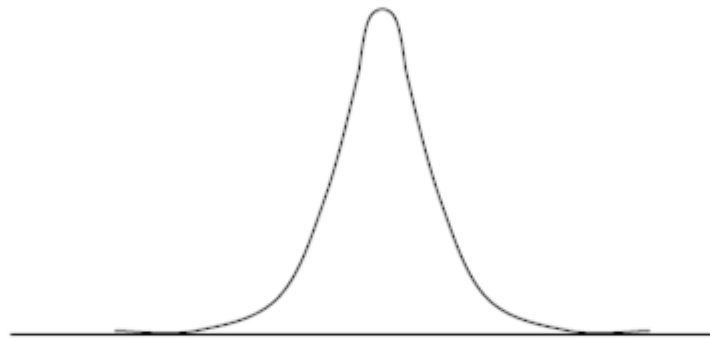
Τέλος οι μικροπαραμορφώσεις  $\lambda(\chi, t)$  προκαλούνται από φθίνουσες μεταβαλλόμενες δυνάμεις, και υπολογίζονται από τον τύπο :

$$Gf(x, t) = \sum_{n=n_2}^{n_3} \lambda_s \left( 1 - \exp \left( -\alpha \frac{\left( \frac{(n-n_3)I_0}{n_3} \right)^2}{a^2 + (x - (n_3 - n)Tv)^2} \right) \right).$$

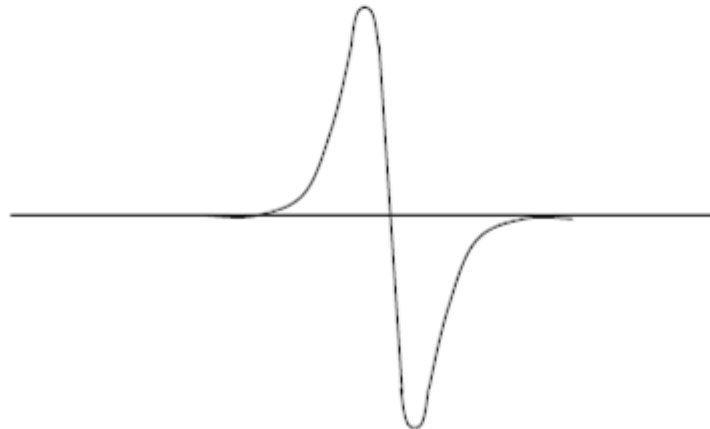
Αυτές οι ομάδες των μικροπαραμορφώσεων διαδίδονται κατά μήκος των μαγνητοσυστολικών συρμάτων σαν ένας ελαστικός παλμός. Ο ελαστικός παλμός προκαλεί μια ροή αλλαγών κατά μήκος του όγκου του υλικού που διαδίδεται, οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν από ένα πηνίο ανίχνευσης τοποθετημένο γύρω από το σύρμα. Υποθέτοντας ότι το διαρρέον παλμικό ρεύμα είναι σύντομο, η αλλαγή της ροής στο σύρμα θα δώσει σαν έξοδο μια παλμική τάση εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 6



ομάδα παραγόμενων μικροπαραμορφώσεων



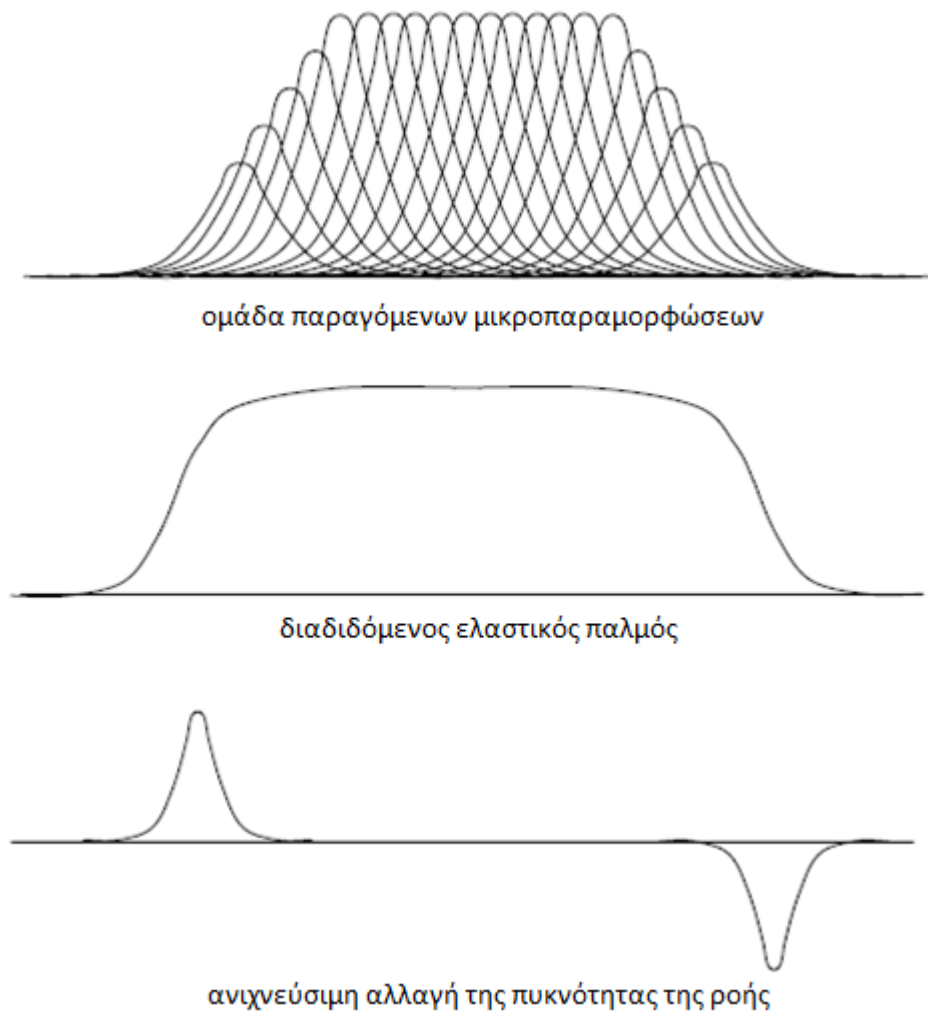
διαδιδόμενος ελαστικός παλμός



ανιχνεύσιμη αλλαγή πυκνότητας της ροής

Εικόνα 6 παραγωγή, διάδοση και ανίχνευση των μικροπαραμορφώσεων λόγω του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου

Εάν το παλμικό ρεύμα είναι σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε η πρώτη παράγωγος του ελαστικού παλμού, η οποία αποκρίνεται στην παλμική τάση εξόδου, σπάει σε δυο παλμούς αντίθετου πρόσημου, οι οποίοι ανιχνεύονται από το πηνίο ανίχνευσης όπως φαίνεται στην εικόνα7:



Εικόνα 7 παραγωγή, διάδοση και ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων λόγω του μακράς διάρκειας μαγνητικού παλμικού πεδίου

Σε επίπεδο ατομικό, η μαγνητοσυστολή είναι συνολικό αποτέλεσμα της παραμόρφωσης του κρυσταλλικού πλέγματος μέσα στις περιοχές που έχουν την τάση να ευθυγραμμίζονται με τη μαγνητική περιοχή.

Η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος προκαλείται από τις αλληλεπιδράσεις των ατομικών μονάδων οι οποίες αλληλεπιδρούν στις πλευρές τους και έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του μήκους του σώματος. Όταν το σώμα έχει κλίση, γωνία  $\varphi$  προς το μαγνητισμένο μέρος, η μαγνητοελαστική ενέργεια έχει την τάση να ευθυγραμμίζει τα σώματα με τη μαγνητισμένη περιοχή, αλλά αντισταθμίζεται από την ελαστική ενέργειά τους. Από τον παρακάτω τύπο μπορεί να υπολογιστεί σε μακροσκοπικό επίπεδο η ενέργεια,  $\Delta E_m$ , που προστίθεται στο σύστημα λόγω των εξωτερικών ασκούμενων πεδίων, όπως έχουν

αντισταθμιστεί από την αλλαγή της ελαστικής ενέργειας σώματος,  $\Delta E_{el}$ , κατά μήκος του άξονα του  $MDL$ .

$$\begin{aligned}\Delta E_m = \Delta E_{el} &\Leftrightarrow \Delta M \cdot \Delta H = \frac{1}{2}k\Delta\lambda^2 \Leftrightarrow \frac{\Delta M}{\Delta H} \\ &= \frac{1}{2}k\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta H}\right)^2\end{aligned}$$

Όπου  $k$  είναι η μακροσκοπική ελαστική σταθερά του υλικού σχετιζόμενο με το μέτρο ελαστικότητας  $E_\gamma$ , και  $\Delta\lambda$  είναι η επιμήκυνση που προκαλείται από την αλλαγή της μαγνήτισης  $\Delta M$

Για:

$$\Delta H \rightarrow 0, \quad \frac{d\lambda}{dH} \propto \sqrt{\frac{dM}{dH}}.$$

Η παράγωγος  $dM/dH$  αποκρίνεται σε διαφορετική ευαισθησία  $\chi_{diff}$  του μαγνητικού υλικού, η οποία μπορεί να περιγραφεί από τον τύπο:

$$\chi_{diff} = \frac{dM}{dH} = \frac{H}{c}e^{-H/c}$$

Όπου  $c$  είναι μια σταθερά προσαρμογής με διαστάσεις πεδίου σχετικές με το  $K_1$  και το  $M_s$  [182]. Η εξίσωση που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι η λύση μιας δευτερογενούς γραμμικής διαφορικής εξίσωσης της οποίας χαρακτηριστική εξίσωση είναι η

$$x^2 + 2cx + c = 0$$

Όπως στην περίπτωση της κρίσιμης ταλάντωσης, συντονισμός:

$$\frac{d\lambda}{dH} = \lambda_s \sqrt{\frac{|H|}{c}} e^{-|H|/c} = \lambda_s \sqrt{\frac{|H|}{c}} e^{-|H|/2c}$$

Όπου  $\lambda_s$  είναι η σταθερά μαγνητοσυστολικού κορεσμού. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται η συσχέτιση της προσαρμοστικής παραμέτρου  $c$  με τις μικροσκοπικές παραμέτρους των υλικών [183]. Για αδύναμα πεδία η σταθερά  $c$  υπολογίζεται από τον τύπο :

$$c = \left(\frac{M_s}{\chi_0}\right)^2 = \left(\frac{qk}{\mu_0 M_s}\right)^2 = \left(\frac{c_q K_1}{\mu_0 M_s}\right)^2$$

Ενώ για πιο ισχυρά πεδία :

$$c = \frac{2gH_s^2}{g + \sqrt{2 - 4g + g^2}} \approx H_s^2 = \left( \frac{c'_g K_1}{\mu_0 M_s} \right)^2$$

Όπου τα  $g, h, k, q$  είναι παράμετροι του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου και υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$g = \left( c_g \frac{\mu M_s^2}{K_1} \right)^2, \quad h = \frac{H_s}{\exp(g \ln 2)},$$

$$k = c_k E_Y \lambda_s^2, \quad q = \frac{c_q}{c_k} \frac{K_1}{E_Y \lambda_s^2}$$

Όπου  $c_g, c_h, c_k$  και  $c_q$  είναι σταθερές του αδιάστατου μοντέλου. Με πεδίο ανιστροπίας  $H_K = 2K_1/\mu_0 M_s$ , το πεδίο κορεσμού υπολογίζεται από τη σχέση  $H_s = c'_g H_K / 2$  ( $c'_g$  είναι μια αναλογική σταθερά) και τα  $c_q, c'_g$  είναι για την ίδια μαγνήτιση, μια μέση τιμή για το  $c$  και για το ασθενές και για το ισχυρό πεδίο, και καθορίζεται από τον τύπο:

$$c = \frac{2c_q c'_g}{c_q + c'_g} \left( \frac{K_1}{\mu_0 M_s} \right)^2 = \left( \frac{H_s}{c'} \right)^2.$$

Η επιβεβαίωση που περιγράφηκε νωρίτερα μοντελοποιήθηκε και είχε απόδοση ομοιότητας περίπου 97% με τα πειραματικά δεδομένα [182]. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των άμορφων συρμάτων Fe.Si.B, μετά από ανόπτηση με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικής τάσης, η σταθερά  $c$  βρέθηκε ίση με  $15 \text{ Am}^{-1}$ .

## 2.3 Ιδιότητες των MDL

Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός των ήπιων μαγνητικών υλικών, είναι το κλειδί στο να κατανοήσει κανείς τη φυσική και χρηστική τους σημασία στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται [184-185]. Η προσαρμογή των ιδιοτήτων τους, βασίζεται κυρίως στην ανισοτροπία που εισάγεται κατά τη διάρκεια σημαντικών διαδικασιών ανόπτησης. Οι ιδιότητες μαγνητοσυστολικών υλικών, καλύπτοντας το σχεδιασμό του αισθητήρα που βασίζεται στις αρχές του MDL, είναι οι ακόλουθες:

### 2.3.1 Ανομοιομορφία

Ως ανομοιομορφία καθορίζεται η διακύμανση της συνάρτησης ομοιομορφίας. Η συνάρτηση ομοιομορφίας  $V_0(x)$ , καθορίζεται ως η εξάρτηση της μέγιστης τιμής  $V_0$  στην απόσταση μεταξύ



του αγωγού παλμικού ρεύματος και του πηνίου λήψης, κάτω από τις ίδιες συνθήκες παλμικού και  $dc$  πολωμένου μαγνητικού παλμικού πεδίου. Η έρευνα πάνω στην ανομοιομορφία οδήγησε στο συμπέρασμα ότι οι βασικές διαδικασίες προσαρμογής είναι η ανόπτωση με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικής τάσης και οι διαδικασίες κανονικοποίησης [186]. Οι παραπάνω μέθοδοι ελαχιστοποιούν τη συγκέντρωση τάσεων που δημιουργείται κατά τη διάρκεια παραγωγής του υλικού και το φαινόμενο των περιοχών που παρεκκλίνουν από την ευθυγράμμιση. Επίσης έχει προταθεί μια τεχνική γρήγορης μαγνητοελαστικής ομοιομορφίας για βιομηχανικά περιβάλλοντα [187].

### 2.3.2 Επιδράσεις πολωμένου πεδίου

Ως επίδραση πολωμένου πεδίου ορίζεται η εξάρτηση της τάσης εξόδου του  $MDL$  στο στοιχείο του  $dc$  πεδίου κατά μήκος του άξονά του. Αυτή ίσως είναι και η πιο σημαντική ιδιότητα του  $MDL$ . Η παρουσία μη αναμενόμενων πεδίων κυρίως επηρεάζει την απόκριση του  $MDL$ , γι αυτό και καταστρέφονται τα σήματα ανάγνωσης του αισθητήρα. Η εξάρτηση του  $MDL$  από τα πεδία πόλωσης έχει μελετηθεί εκτεταμένα στο παρελθόν [188]. Υπάρχουν μόνο δυο τρόποι για να αποφευχθούν τέτοιου είδους φαινόμενα:

1. Η μαγνητική προστασία του πομπού
2. Η καταμέτρηση και η συμπερίληψη της παρέκκλισης λόγω της παρουσίας του πεδίου.

### 2.3.3 Καθυστέρηση απόκρισης

Ως καθυστέρηση απόκρισης καθορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται ένας ελαστικός παλμός για να ανιχνευτεί και να αποθηκευθεί. Η καθυστέρηση μιας τέτοιας αντίδρασης ελέγχεται κυρίως από τη σταθερότητα της ταχύτητας του ήχου του μαγνητοσυστολικού στοιχείου. Οι μέθοδοι για τον καθορισμό και τη σταθεροποίηση της ταχύτητας του ήχου έχουν ήδη αναλυθεί [189] και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η κατάλληλη μέθοδος ανόπτωσης και πόλωσης πεδίου μπορεί να οδηγήσει στη σταθεροποίηση της απόκρισης της καθυστέρησης.

### 2.3.4 Υστέρηση

Η υστέρηση ενός  $MDL$ , είναι κυρίως μη γραμμικό φαινόμενο και καθορίζεται από τη διαφορά της συνάρτησης  $V_o(I_e)$  όταν αυξάνεται η τιμή του παλμικού ρεύματος  $I_e$  μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια φθίνει μέχρι να μηδενιστεί. Τα μαγνητοσυστολικά υλικά κυρίως χρησιμοποιούνται ως γραμμές καθυστέρησης. Συνήθως είναι άμορφες ταινίες, σύρματα και σύρματα επικαλυμμένα με γυαλί και παρουσιάζουν μηδενική υστέρηση στην απόκριση του  $MDL$  [190]. Γενικά πλήρης ελαχιστοποίηση της υστέρησης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τον  $MDL$  κοντά στον κορεσμό ώστε να αποφευχθούν τα άλματα *Barkhausen*.

### 2.3.5 Διακριτική ικανότητα

Έχει καθοριστεί ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών  $PO$  (σημείων διέγερσης) ενός  $MDL$ , ικανά να προκαλέσουν δυο ανεξάρτητες διαδόσεις ελαστικών κυμάτων και συνεπώς δυο ανιχνεύσεις ανεξάρτητων παλμικών τάσεων εξόδου. Έρευνες έχουν δείξει ότι διακριτική ικανότητα  $80mm$  μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κλασσικά μαγνητοσυστολικά υλικά, τα οποία μπορεί να εξελιχθούν έως  $1mm$  σε άμορφο σύρμα με προσεκτική ανόπτηση παρουσία πεδίου η οποία προκαλεί κατάλληλη ανόπτηση της συνάρτησης μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  [191].

### 2.3.6 Πλάτος παλμού ή Συχνότητα απόκρισης

Ως πλάτος παλμού ή συχνότητα απόκρισης έχουν καθοριστεί η εξάρτηση της παλμικής τάσης εξόδου του  $MDL$  στο εύρος συχνοτήτων του παλμικού ρεύματος διέγερσης. Έχει παρατηρηθεί ότι η απόκριση της συχνότητας μπορεί να αυξηθεί πάνω από  $10 MHz$  χρησιμοποιώντας κατάλληλο φίλτρο τεχνικών ανόπτησης και προσαρμόζοντας τη χρήσιμη περιοχή της μαγνητοσυστολικής συνάρτησης κοντά στο πεδίο κορεσμού [192]

### 2.3.7 Αντιδράσεις και επακόλουθα φαινόμενα

Η ελαχιστοποίηση των αντιδράσεων και των επακόλουθων φαινομένων βελτιώνει την ευαισθησία και τη διακριτική ικανότητα του  $MDL$ . Μια μείωση των αντιδράσεων μπορεί να ληφθεί από ένα υψηλής ενδόσεως φινίρισμα των μαγνητοσυστολικών υλικών όπως και με τον κατάλληλο γεωμετρικό σχεδιασμό της διάταξης του  $MDL$ . Η εξασθένηση μετά από το φαινόμενο μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλες συχνότητες της απόκρισης του  $MDL$ , ύστερα από κατάλληλη ανόπτηση παρουσία πεδίου [193].

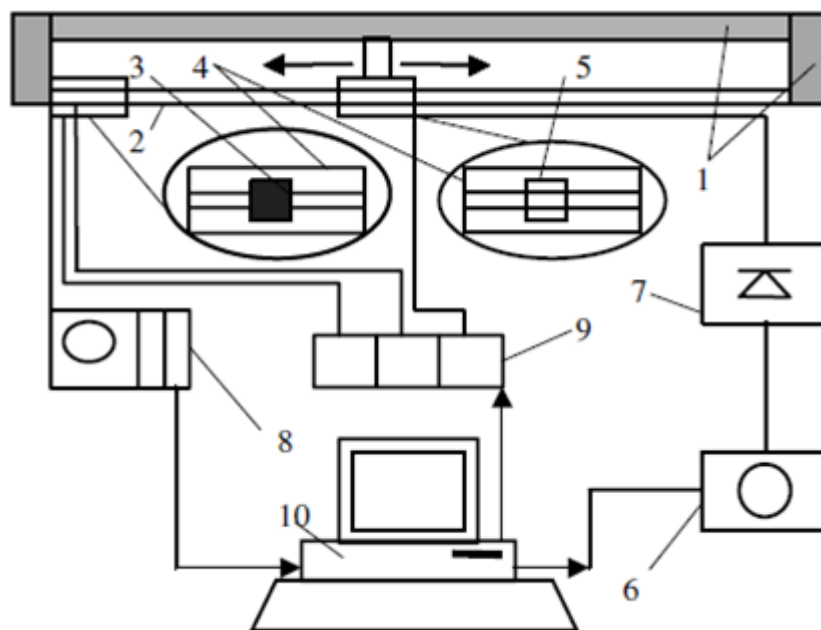
Είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν νωρίτερα μπορεί να πραγματοποιηθεί προσαρμόζοντας τη συνάρτηση μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  και την παραμετρική της εξάρτηση κυρίως από τη συχνότητα, την τάση και τη θερμοκρασία. Έχει συλληφθεί μια τεχνική που καθορίζει τέτοιες εφαρμογές, επιτρέποντας γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις και διαδικασίες προσαρμογής των υπό έρευνα υλικών [194].

## 2.4 Διαδικασία τυποποίησης του χαρακτηρισμού του MDL

Παρόλο που ο καθορισμός των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τον  $MDL$ , όπως οι διαδικασίες προσαρμογής με βάση κάποιες παραμέτρους και εφαρμογές που έχουν ερευνηθεί καλά και έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές σε ερευνητικό επίπεδο, κάποιοι άλλοι χαρακτηρισμοί της μηχανικής δεν έχουν καθοριστεί ακόμη. Η αναπαραγωγή, η ομοιομορφία, η διακριτική ικανότητα και τελικά η αβεβαιότητα της μαγνητοελαστικής συμπεριφοράς αυτών των υλικών, δεν έχει διεκπεραιωθεί με γενικές διαδικασίες από μέσα τυποποίησης. Με τον όρο μαγνητοελαστική συμπεριφορά νοείται η εξάρτηση της παραγωγής

μικροπαραμορφώσεων από τις φυσικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητές τους.

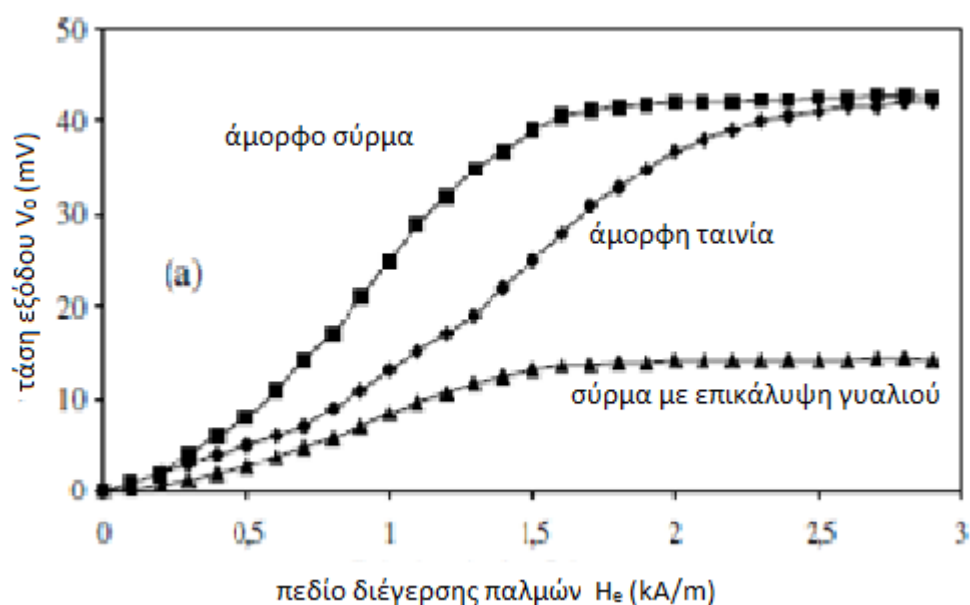
Έχει προταθεί ένα υπολογιστικό σύστημα σαν εργαλείο μελέτης της συμπεριφοράς των ήπιων μαγνητικών υλικών, σε μορφή ταινιών και συρμάτων, και να εξελιχτεί μια τεχνική για πλήρη μαγνητοελαστικό χαρακτηρισμό. Επιπλέον στην ίδια διάταξη υπό της ίδιες συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές προσαρμογής, οι οποίες χρησιμοποιούν διαδικασίες ανόπτωσης με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικής τάσης. Η απλότητα αυτών των συστημάτων και ο καθοριστικός σχεδιασμός των μαγνητοελαστικών ιδιοτήτων μπορούν να το κάνουν βασική πειραματική διάταξη για τη βελτιστοποίηση ενός νέου προτύπου. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα8 [195].



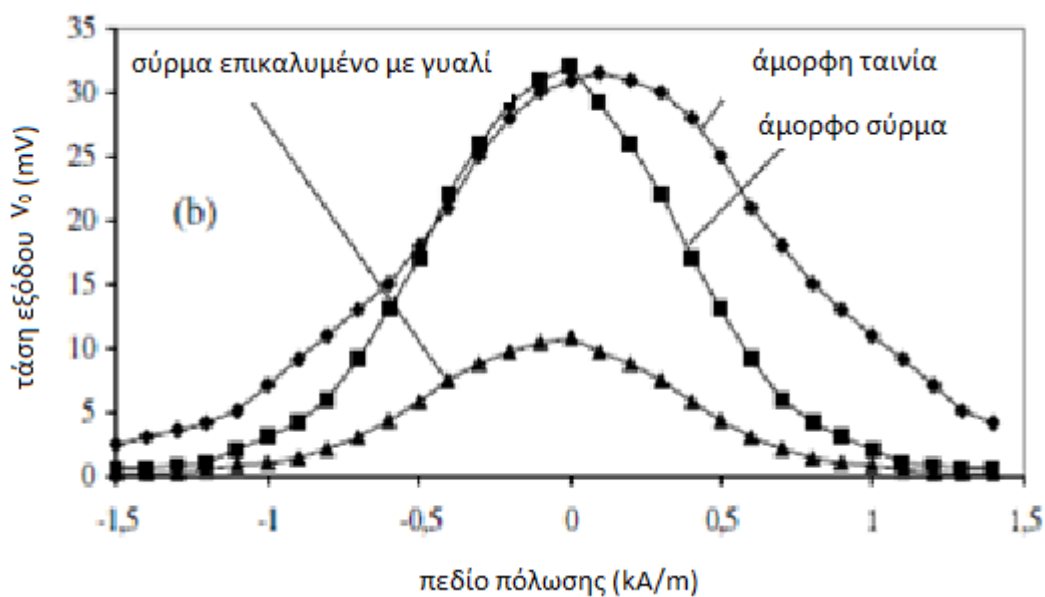
Εικόνα 8 η υπολογιστική διάταξη για το χαρακτηρισμό μαγνητοσυστολικών συρμάτων . (1)σχεδιογράφος (2)κεραμικός σωλήνας, (3)πηνίο λήψης, (4)πηνίο προσομοίωσης πεδίου, (5)πηνίο διέγερσης, (6)γεννήτρια κυματομορφών, (7)RF ενισχυτής, (8)ψηφιακός παλμογράφος, (9)πηγή ρεύματος, (10)Η/Υ

Όλο το σύστημα μπορεί επίσης να δουλέψει σε κενό. Δοκιμάζοντας μαγνητοσυστολικά υλικά στο κενό, η θερμοκρασία ελέγχου μπορεί να καθοριστεί από το σχεδιασμό. Για αυτό δείγματα των συνθηκών ανόπτωσης μπορούν να καθοριστούν με ένα μεγαλύτερο βαθμό ακρίβειας, επιτυγχάνοντας καλύτερα επίπεδα αβεβαιότητας. Η διαδικασία διάδοσης σήματος χρησιμοποιώντας τεχνικές διάδοσης σημάτων μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω τις συνολικές επιδόσεις του συστήματος με μέσα που μειώνουν το θόρυβο της τάσης εξόδου και βελτιώνουν τις διαδικασίες ολοκλήρωσης.

Τυπικές αποκρίσεις της τάσης εξόδου  $V_0$  του MDL, σε παλμικά πεδία και σε πολωμένα πεδία, που αφορούν τις ταινίες Fe.Si.B. , τα σύρματα και τα σύρματα με επικάλυψη γυαλιού, παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1 και 2

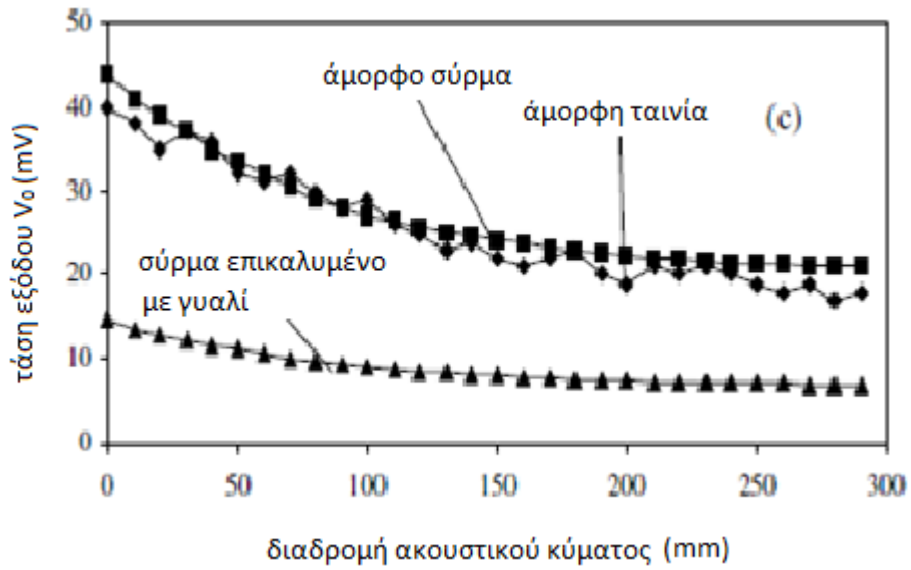


Διάγραμμα 1 εξάρτηση της τάσης εξόδου από το εφαρμοζόμενο παλμικό πεδίο σε μαγνητοσυστολικό υλικό από Fe.Si.B. σε μορφή ταινίας, σύρματος και σύρματος με επικάλυψη γυαλιού ,



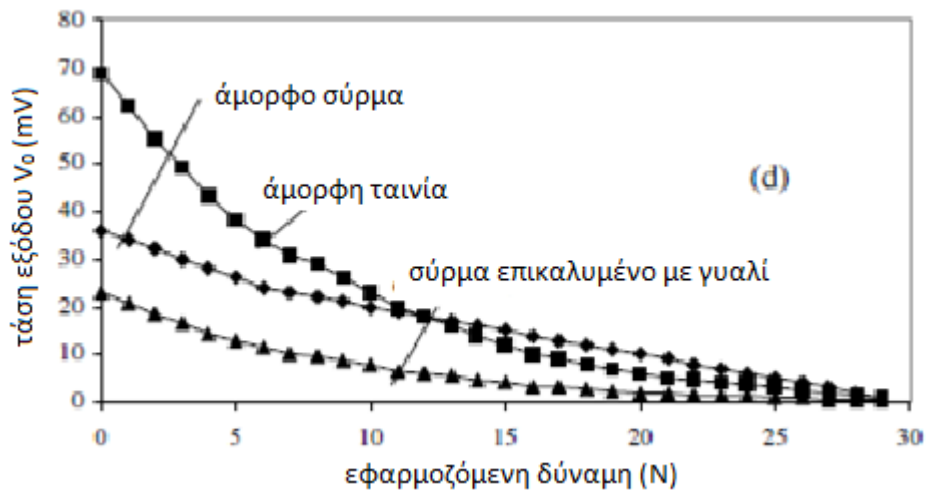
Διάγραμμα 2 εξάρτηση της τάσης εξόδου από το πολωμένο παλμικό πεδίο σε μαγνητοσυστολικό υλικό από Fe.Si.B. σε μορφή ταινίας, σύρματος και σύρματος με επικάλυψη γυαλιού, μετά από διαδικασία θερμικής ανόπτησης

Μια τυπική ομοιομορφία της λειτουργίας των ταινιών, των συρμάτων και των συρμάτων με επικάλυψη γυαλιού, φαίνεται στο διάγραμμα 3

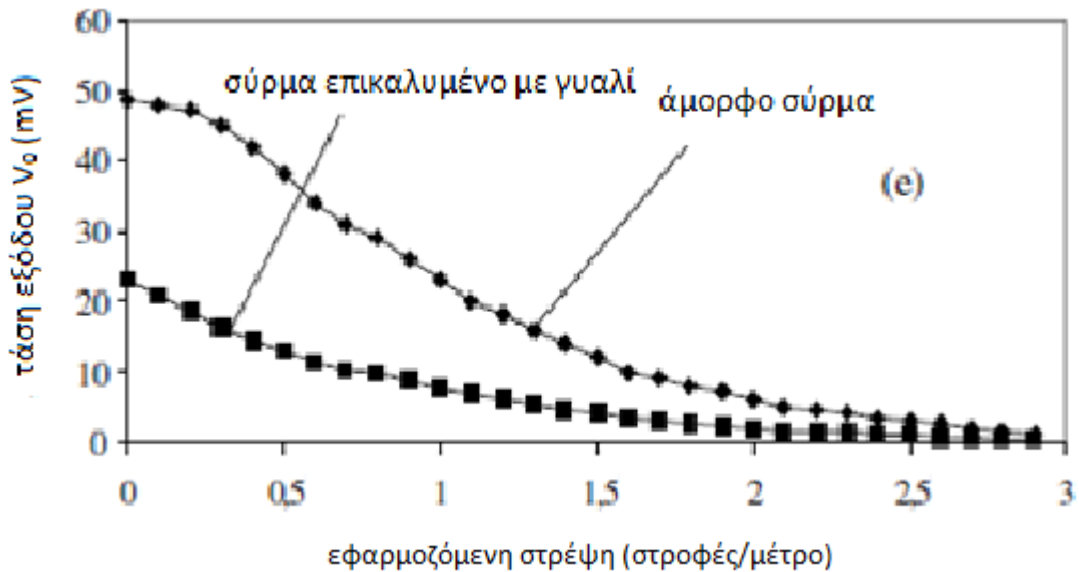


Διάγραμμα 3 εξάρτηση της τάσης εξόδου σε από την απόσταση μεταξύ των πηνίων διέγερσης και λήψης για μαγνητοσυστολικό υλικό από Fe.Si.B. σε μορφή ταινίας, σύρματος και σύρματος με επικάλυψη γυαλιού

Μια τυπική απόκριση εφαρμοζόμενης τάσης εφελκυσμού και στρέψης για υλικά που έχουν υποστεί θερμική ανόπτηση παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 4 εξάρτηση της τάσης εξόδου από την εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση για μαγνητοσυστολικό υλικό από Fe.Si.B. σε μορφή ταινίας, σύρματος και σύρματος με επικάλυψη γυαλιού, που έχουν υποστεί θερμική ανόπτηση



Διάγραμμα 5 η απόκριση της τάσης εξόδου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης περιστροφικής δύναμης σε μαγνητοσυστολικό υλικό από Fe.Si.B. σε μορφή ταινίας, σύρματος και σύρματος με επικάλυψη γυαλιού

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων εισάγεται λόγω της αστάθειας των ηλεκτρικών ενεργοποιητών και των υποσυστημάτων μέτρησης, όπως ο μαγνητικός θόρυβος της εξόδου του πηνίου ανίχνευσης. Η χρήση τεχνικών παρεμβολής συμβάλει στη μείωση των μαγνητικού θορύβου αποφέροντας στο συνολικό σύστημα αβεβαιότητα μικρότερη των 10 ppm.

## 2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάταξη του MDL

Οι παράμετροι που είναι δυνατό να επηρεάσουν τη λειτουργία του MDL, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αισθητήρων, είναι οι εξής:

1. Το μαγνητικό παλμικό πεδίο  $H_e$
2. Το πολωμένο πεδίο στα σημεία διέγερσης  $PO$  και το σημείο ανίχνευσης
3. Οι μηχανικές ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών υλικών.

Η αλλαγή μόνο των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, από ένα δοσμένο φυσικό μέγεθος, μπορεί να επιφέρει αλλαγές στο εύρος της παλμικής τάσης εξόδου του πηνίου λήψης.

### 3 Μέτρηση θέσης χρησιμοποιώντας τεχνικές MDL

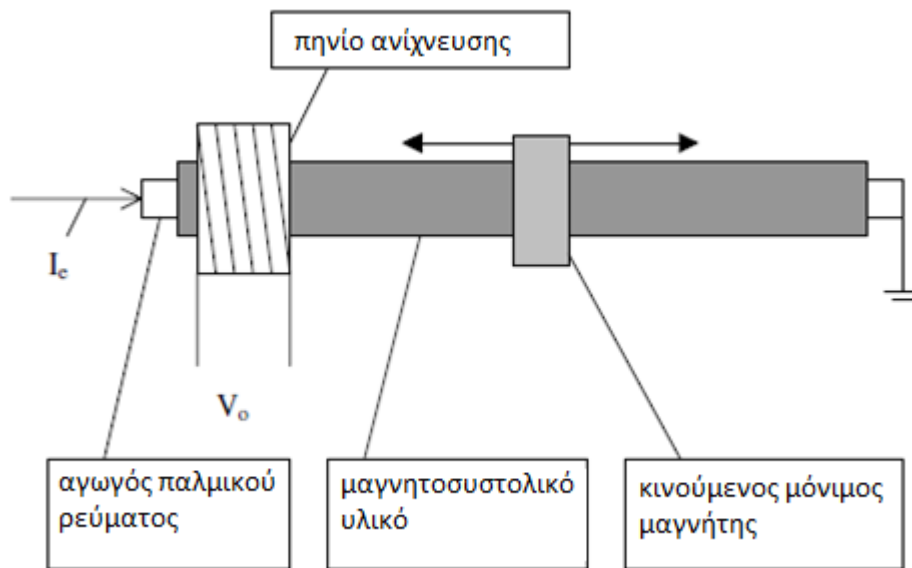
Οι αισθητήρες MDL βρίσκουν εφαρμογή στις βιομηχανίες και στα εργαστηριακά όργανα, για αυτό και υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον. Στον τομέα αυτό κυριαρχούν τα συμβαλλόμετρα laser, τα οποία χρησιμοποιούνται σε σημαντικές διατάξεις και συσκευές, όπως οι διαφοριστές, τα διαστολόμετρα, συσκευές μέτρησης όγκου και επιφάνειας, ενώ παρουσιάζουν τυπική ευαισθησία και αβεβαιότητα της τάξης του  $1\mu m$  και  $10ppm$  αντίστοιχα. Για το λόγω αυτό θα πρέπει κάθε προσπάθεια στην εξέλιξη των αισθητήρων να παραπέμπει σε αυτές τις τιμές, έχοντας βέβαια υπόψη ότι θα υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις τιμών από τις επιδόσεις του εργαστηριακού πρωτοτύπου στις επιδόσεις των αισθητηρίων στοιχείων παραγωγής. Στην αγορά των αισθητήρων οι μαγνητικές τεχνικές χρησιμοποιούν δευτερεύοντα στάνταρ [196]. Στον τομέα αυτό οι πιο σημαντικές εφαρμογές αισθητήρων θέσης βασίζονται στις τεχνικές MDL. Έτσι οι αισθητήρες χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

1. Ονομαστικές ταινίες μέτρησης
2. Αισθητήρες μετατόπισης
3. Διαστολόμετρα
4. Ψηφιοποιητές
5. Επιταχυνσιόμετρα

#### 3.1 Ταινίες μέτρησης

Οι αισθητήρες που κυκλοφορούν στην αγορά βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ δυο σημάτων, όπου το ένα σήμα είναι σταθερό ενώ το άλλο εξαρτάται από τη θέση του πηνίου του αισθητήρα. Ένα τέτοιο παράδειγμα αισθητήριων οργάνων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια τυπική διάταξη MDL. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα πηνίο διέγερσης για την παραγωγή ελαστικού παλμού και ένα πηνίο ανίχνευσης για την ανίχνευση των διαδιδόμενων ελαστικών παλμών. Γνωρίζοντας ότι το ένα από τα δυο πηνία είναι σταθερό και το άλλο κινείται, η έξοδος της συσκευής ορίζεται ως ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ των δυο σημάτων. Σε μια τέτοια διάταξη η ευαισθησία και η αβεβαιότητα του αισθητήρα εξαρτώνται κυρίως από την ταχύτητα του ήχου και την ομοιομορφία της ταχύτητας του ήχου ως προς τον MDL, η οποία πρέπει να είναι της τάξης των  $5\text{ kms}^{-1}$ , όπως και από τη γεωμετρική αστάθεια του μετακινούμενου πηνίου.

Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η ευαισθησία του αισθητήρα σε καλά προετοιμασμένα μαγνητοσυστολικά σύρματα μπορεί να είναι από  $0,3\text{ mm m}^{-1}$  ή  $300\text{ ppm}$ . Εναλλακτικά η χρήση πεδίου διέγερσης  $ac$ , έχει σαν αποτέλεσμα όμοιες αποκρίσεις [197-200]. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται το καλύτερα εξελεγμένο παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα.



Σχήμα 3 τυπική διάταξη ταινίας μέτρησης η οποία βασίζεται στην τεχνική MDL

Ο αισθητήρας αποτελείται από δυο κυλινδρικά μέρη: ένα εσωτερικό επαγωγικό πηνίο, κατασκευασμένο από χαλκό ή αλουμίνιο, και μια εξωτερική λεπτή μαγνητική στρώση η οποία προσαρμόζεται για να εξασφαλίσει περιστασιακή μαγνήτιση και μαγνητική ανισοτροπία.

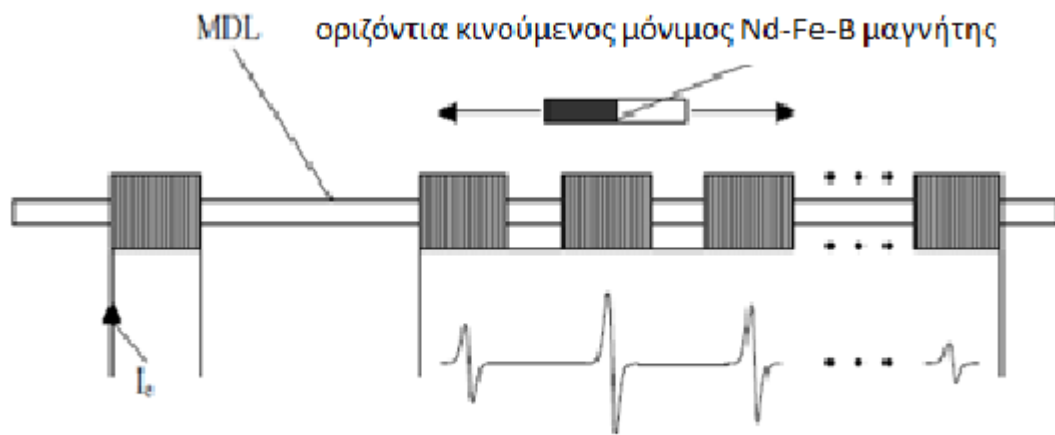
Καθώς διαδίδεται ο παλμός, από το επαγωγικό στοιχείο, παράγεται περιστασιακά μαγνητικός παλμός στη λεπτή στρώση. Τέτοιο μαγνητικό πεδίο, λόγω της περιστασιακής μαγνητικής ανισοτροπίας, είναι ικανό να προκαλέσει εγκάρσιο ελαστικό κύμα κατά το μήκος όλης της επιφάνειας της μαγνητικής στρώσης. Υπό την προϋπόθεση ότι η μαγνητική στρώση είναι μαγνητοελαστικά ομοιόμορφη, και ότι δεν υπάρχουν τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες στο περιβάλλον πεδίο, τα τοπικά εγκάρσια ελαστικά κύματα εξουδετερώνουν το ένα το άλλο έχοντας σαν αποτέλεσμα τη διάδοση μη ελαστικού κύματος, εκτός από τα ελαστικά κύματα που παράχθηκαν από τα άκρα των δυο κυλινδρικών στοιχείων .

Λόγω της επίδρασης του πολωμένου πεδίου, η χρήση κινούμενου μαγνητικού δαχτυλιδιού γύρω από τον κύλινδρο οδηγεί στο τοπικό σπάσιμο της συμμετρίας των ελαστικών κυμάτων, το οποίο με τη σειρά του επιφέρει τη διάδοση ελαστικού κύματος. Στη συνέχεια το ελαστικό κύμα ανιχνεύεται από το πηνίο ανίχνευσης, που είναι τοποθετημένο στη μια άκρη της διάταξης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της αρχής είναι ότι η εγκάρσια ταχύτητα του ήχου είναι περίπου η μισή από τη διαμήκη. Επιπλέον η παρατηρούμενη ευαισθησία και αβεβαιότητα μπορούν να είναι της τάξης του  $0,1\text{ mm}-50\mu\text{m}$  και  $50-200\text{ ppm}$  αντίστοιχα.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ο αισθητήρας είναι ασύρματος, πράγμα που σημαίνει ότι το μετακινούμενο πηνίο δεν περιλαμβάνει καμία κίνηση ηλεκτρικών καλωδίων, που αποτελεί σημαντικό γεγονός αν λάβει κανείς υπόψη ότι η παρουσία καλωδίων θα εισήγαγε θόρυβο και θα προκαλούσε πρόβλημα συμβατότητας σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

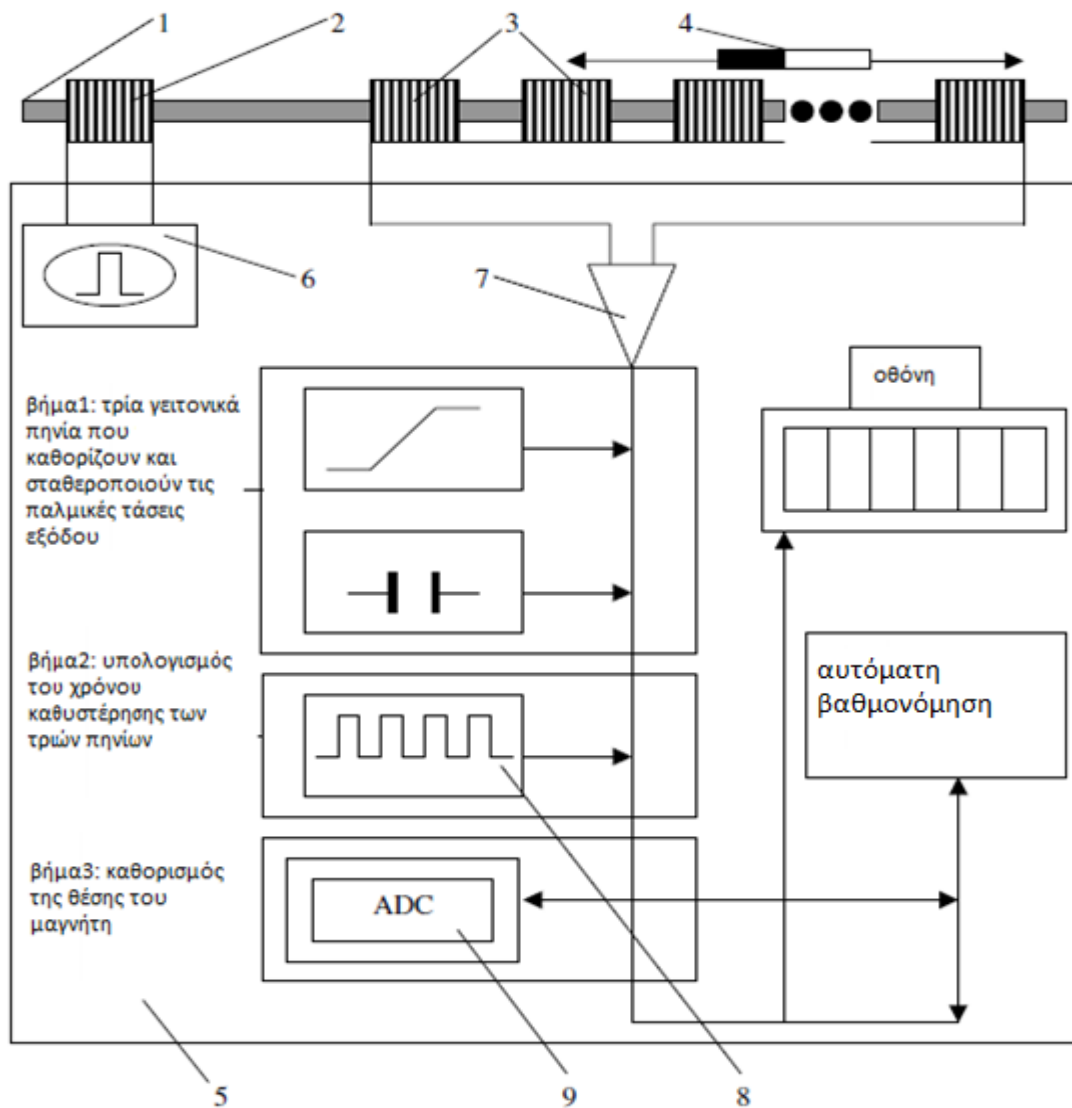


Με σκοπό να καθοριστούν τα πλεονεκτήματα της απουσίας καλωδίων, και να βελτιωθούν τα επίπεδα ευαισθησίας και αβεβαιότητας των ταινιών μέτρησης που βασίζονται στην τεχνική *MDL*, στο σχήμα 4 παρουσιάζεται ένας αισθητήρας ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



έξοδος διαδοχικών παλμικών τάσεων των σε σειρά συνδεδεμένων πηνίων ανίχνευσης

Σχήμα 4



Σχήμα 5 (1)γραμμή καθυστέρησης, (2)πηνίο διέγερσης, (3)πηνίο ανίχνευσης, (4)κινούμενος μαγνήτης, (5)ηλεκτρονικό κύκλωμα ρύθμισης συνθηκών, (6)γεννήτρια παλμικού ρεύματος, (7)ενισχυτής σήματος, (8)ηλεκτρονικός μετρητής, (9)ADC για έλεγχο ανίχνευσης θέσης

Το αισθητήριο στοιχείο είναι ένας *MDL*(1) σε μορφή ταινίας ή σύρματος. Ένα κοντό πηνίο διέγερσης(2) έχει τοποθετηθεί γύρω από τη μια άκρη του *MDL* ενώ στη συνέχεια γύρω από τον *MDL* κατά μήκος του άξονά του είναι παρατεταγμένα μια σειρά από κοντά πηνία λεπτής στρώσης(3), τα οποία χρησιμοποιούνται σαν έξοδος.

Ένας ισχυρός εξωτερικός μαγνήτης(4) ο οποίος είναι σε θέση να κινείται παράλληλα στο αισθητήριο, αποτελεί τον ενεργό πυρήνα του αισθητήρα. Χωρίς καμία παρέμβαση, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, ο κινούμενος μαγνήτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν τελικό κομμάτι υδραυλικού πιστονιού [201]. Ο αισθητήρας λειτουργεί ως εξής: το παλμικό ρεύμα διαρρέει το πηνίο διέγερσης παράγοντας ένα ελαστικό παλμό ο οποίος διαδίδεται κατά μήκος του *MDL*. Ο διαδιδόμενος ελαστικός παλμός προκαλεί μια παλμική τάση στα πηνία ανίχνευσης, τα οποία είναι παρατεταγμένα σε σειρά, με τα διαστήματα του παλμού να αποκρίνονται στην απόσταση μεταξύ των συμμετεχόντων πηνίων. Αυτές οι παλμικές τάσεις

διαδίδονται στο περιβάλλον πεδίο κατά μήκος του άξονα των πηνίων ανίχνευσης. Με την απουσία του κινούμενου μαγνήτη και χαμηλού πεδιακού περιβάλλοντος κατά μήκος της παράταξης των πηνίων ανίχνευσης, το εύρος των παλμικών τάσεων είναι περιορισμένο. Κατά την παρουσία του κινούμενου μαγνήτη οι παλμικές τάσεις των γειτονικών πηνίων γίνονται μεγαλύτερες. Όσο πιο κοντά έρχεται ο κινούμενος μαγνήτης στο πηνίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποκρινόμενη παλμική τάση, ακολουθώντας την κλασσική εξάρτηση μαγνητοσυστολής και της αντίστροφης μαγνητοσυστολής από το περιβάλλον πεδίο. Για το λόγο αυτό, αν ο πυρήνας του κινούμενου μαγνήτη προσεγγίσει τρία γειτονικά πεδία ανίχνευσης, η τάση εξόδου των πηνίων ανίχνευσης υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι και υποδεικνύει ότι ο μαγνήτης πλησιάζει την περιοχή αυτών των πηνίων.

Έχοντας προσαρμόσει τα μαγνητοσυστολικά στοιχεία, με τέτοιο τρόπο ώστε να επανακαθοριστεί η μορφή και η μονοτονική απόκριση της εξόδου, με βάση το περιβάλλον πεδίο κατά το μήκος του, το εύρος των τάσεων των παλμών μπορεί να αποτελέσει ένδειξη της απόστασης του μαγνήτη σε σχέση με τα τρία πηνία.

Ένας αλγόριθμος ο οποίος μπορεί να καθορίσει την απόλυτη θέση του μετακινούμενου μαγνήτη, περιλαμβάνει τα εξής τρία βήματα:

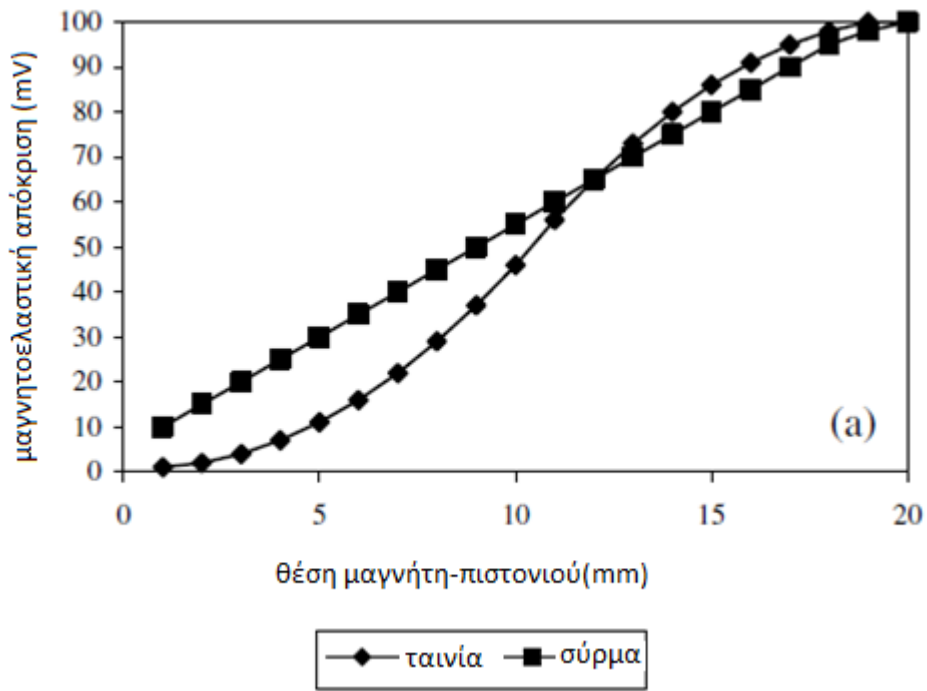
**Βήμα1ο:** η τάση κατωφλιού του συγκριτή, καθορίζει την απόλυτη σχέση των τριών γειτονικών πηνίων, λόγω του χρόνου καθυστέρησης των παλμών εξόδου.

**Βήμα2ο:** μια γρήγορη μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό ανιχνεύει το εύρος των τριών γειτονικών παλμών.

**Βήμα3ο:** χρησιμοποιείται πίνακας διακρίβωσης (*look up table*), υποδεικνύοντας την πραγματική θέση του μαγνήτη με χρήση τεχνικών συσχέτισης.

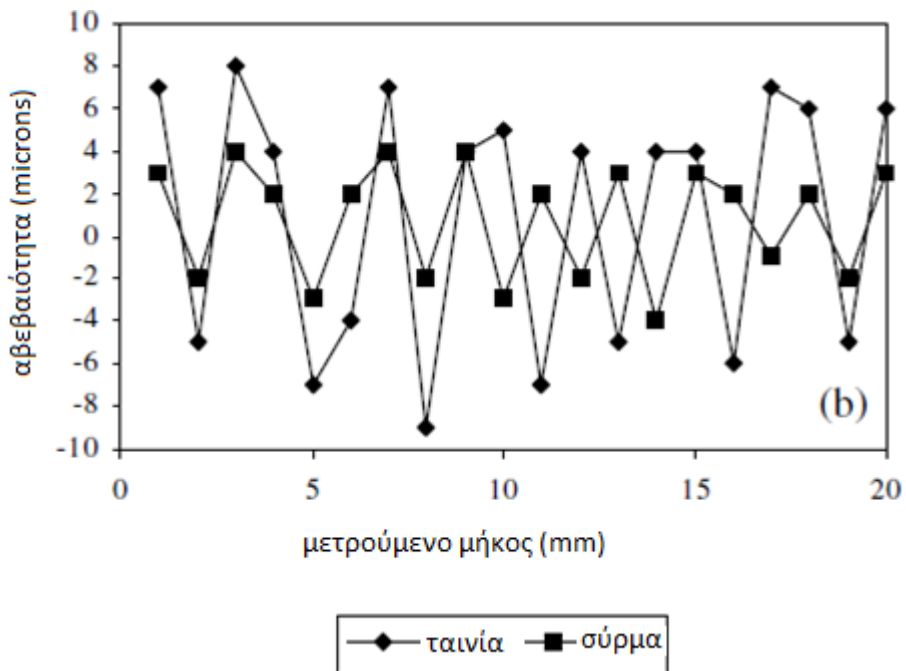
Έτσι μπορεί να καθοριστεί η θέση του μαγνήτη σε σχέση με το πηνίο διέγερσης. Τέτοιες μετρήσεις μπορούν να εξηγήσουν και τις αρχές της διαδικασίας αυτόματης βαθμονόμησης.

Ο αισθητήρας θέσης που περιγράφηκε παραπάνω έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ταινίες και σύρματα άμορφου Fe.Si.B..Η εξάρτηση της παλμικής τάσης εξόδου ενός μονού πηνίου ανίχνευσης κατά τη μετατόπιση ενός κινούμενου μαγνήτη ο οποίος αποκρίνεται από τη θέση ενός κινούμενου πιστονιού φαίνεται στο διάγραμμα 6.



Διάγραμμα 6

Η αβεβαιότητα της μέτρησης η οποία αφορά όλα τα πηνία ανίχνευσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα 7



Διάγραμμα 7

Με βάση αυτές τις μετρήσεις, στην περίπτωση άμορφου σύρματος που έχει υποστεί ανόπτηση προσεκτικά, έχουν καθοριστεί οι τιμές  $1\mu m$  και  $10\mu m^{-1}$  ευαισθησίας και αβεβαιότητας αντίστοιχα. Αυτές οι ταινίες και τα σύρματα ύστερα από προσεκτική επεξεργασία μπορούν να προσφέρουν καλά επίπεδα όσον αφορά τη μορφή, την εφαρμογή,

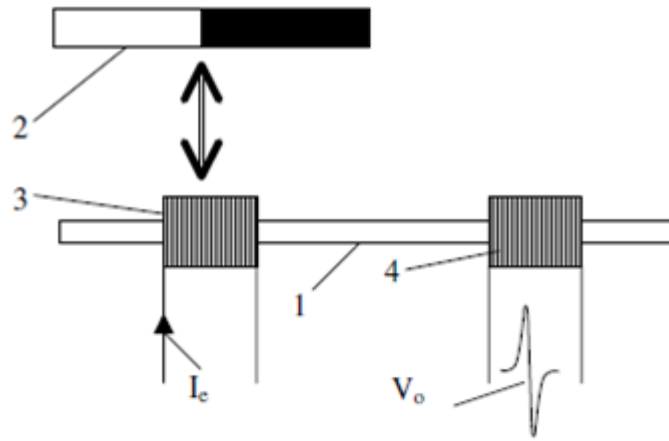
την ευαισθησία και τις μαγνητοελαστικές τους επιδόσεις κατά μήκος του *MDL*, ώστε να επιτρέπεται η χρήση ενός πίνακα διακρίβωσης για όλα τα πηνία ανίχνευσης. Χωρίς έναν τέτοιο πίνακα, ο αισθητήρας δεν είναι σε θέση να μετρήσει τη θέση και τη μετατόπιση σε συνθήκες πραγματικού χρόνου.

Κατά την εκβιομηχάνιση ενός τέτοιου αισθητήρα απαιτείται προσοχή ως προς τον έλεγχο και την ομοιομορφία της συνάρτησης μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$ .

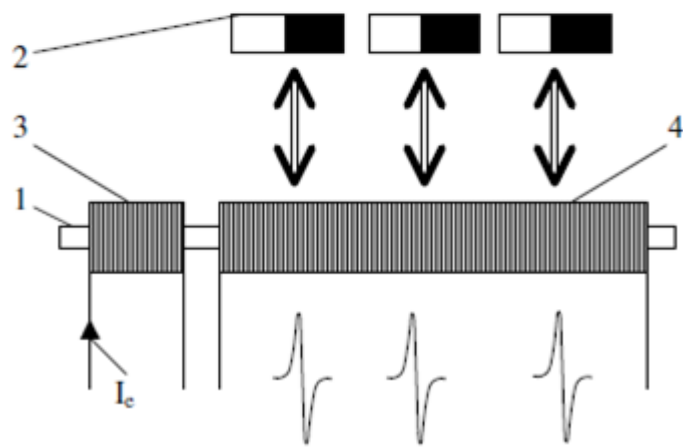
Τα πειραματικά αποτελέσματα επίσης δείχνουν ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών *MDL* πρέπει να είναι *5cm*, ώστε να αποφευχθούν μαγνητικές αλληλεπιδράσεις σε περιοχές δυο διαστάσεων για μαγνητικά χαρτογραφημένες επίπεδες επιφάνειες, εργαστηριακούς πίνακες και γραμμές παραγωγής που εξαρτώνται από το πεδίο της γης.

### 3.2 Αισθητήρες μετατόπισης

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου χρειάζονται μακριές συστοιχίες αισθητήρων ώστε να μετρηθεί η κατανομή της μετατόπισης αντικειμένων κατά μήκος μιας επιφάνειας. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου πρέπει να μετρηθεί η απόλυτη σταθερή θέση ενός αντικειμένου ή η δυναμική αλλαγή της θέσης του. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αρχές της τεχνικής στην οποία βασίζεται η ταινία μέτρησης, που αφορά μονοσήμαντες εξόδους, ή εξόδους συστοιχιών, όπου επικρατεί ως γενική αρχή η μετατροπή του πολωμένου πεδίου γύρω από το σημείο δημιουργίας ελαστικού παλμού ή το σημείο ανίχνευσης. Αυτού του είδους οι αισθητήρες λειτουργούν με τη μετατόπιση του κινούμενου μαγνήτη είτε στο σημείο παραγωγής ελαστικών κυμάτων είτε στο σημείο ανίχνευσης. Στο παρελθόν έχουν προταθεί αισθητήρες μετατόπισης βασισμένοι στην τεχνική *MDL* [202,203]. Επίσης έχουν εξελιχθεί αισθητήρες μονού σημείου και διανομής οι οποίοι βασίζονται στην προαναφερθείσα αρχή [204].



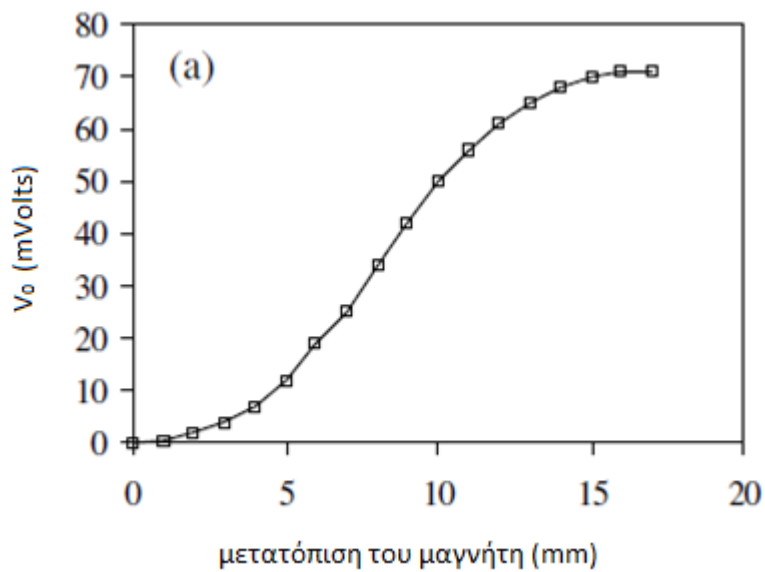
(a)



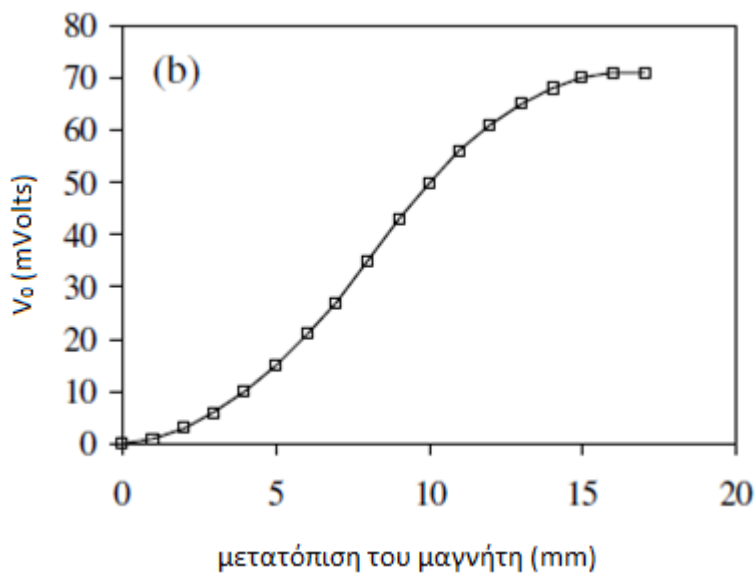
(b)

Σχήμα 6 αισθητήρες μετατόπισης οι οποίοι βασίζονται στην τεχνική του κινούμενου μαγνήτη. (α)ο μαγνήτης μετατοπίζεται κατά μήκος του πηνίου διέγερσης (β)ο μαγνήτης μετατοπίζεται κατά μήκος του πηνίου ανίχνευσης. (1)αγωγός παλμικού ρεύματος, (2)κινούμενος μαγνήτης, (3)πηνίο διέγερσης, (4)πηνίο ανίχνευσης.

Μια τυπική απόκριση τέτοιων κυμάτων παρουσιάζεται στα διαγράμματα 8 και 9.



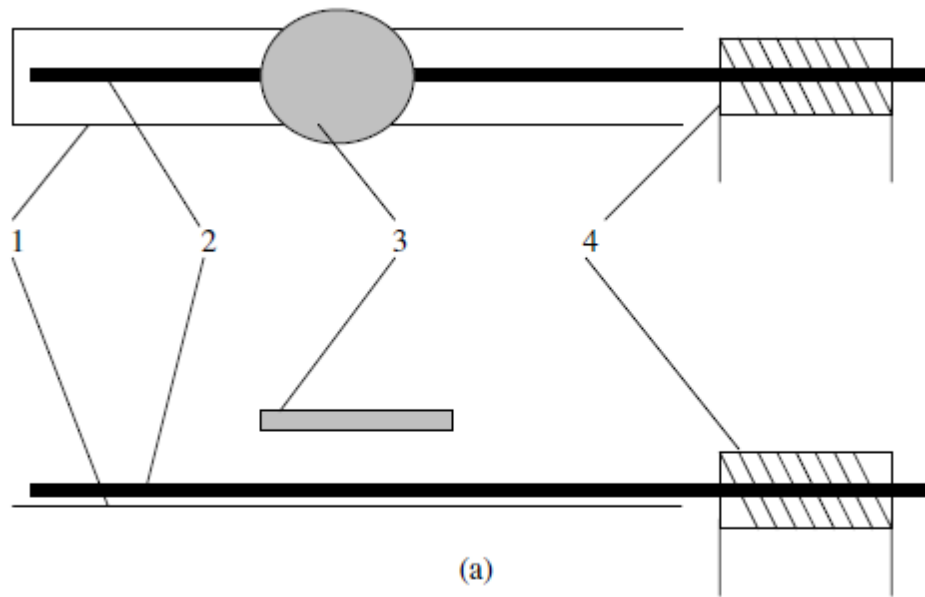
Διάγραμμα 8



Διάγραμμα 9

Το όριο αυτών των αισθητήρων είναι η μη γραμμική απόκριση και η αβεβαιότητα που εισάγονται από το μετακινούμενο μαγνήτη.

Στοχεύοντας σε αισθητήρα γραμμικής μετατόπισης, εξελίσσεται ένα νέο αισθητήριο στοιχείο το οποίο βασίζεται στο συνδυασμό δινορρευμάτων και της τεχνικής *MDL*. Η διάταξη ενός τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στο σχήμα 7.



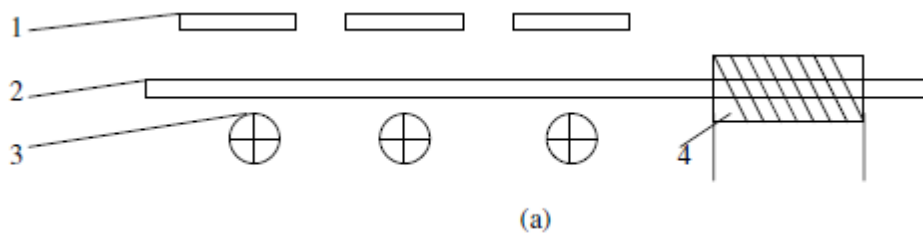
Σχήμα 7

Ένα πηνίο ανίχνευσης έχει τοποθετηθεί γύρω από τη μια άκρη του *MDL*, ο οποίος έχει φινιριστεί στο τελείωμά του με κολλώδες εύκαμπτο πλαστικό. Μια μπάρα μικρού μαγνητικού πεδίου τοποθετείται κοντά στον *MDL*, ώστε να μεγιστοποιηθεί η έξοδος του πηνίου ανίχνευσης. Ένας πολωμένος αγωγός τοποθετείται παράλληλα στον *MDL* ώστε κατά την απουσία του μετακινούμενου δίσκου η έξοδος του πηνίου ανίχνευσης να μηδενιστεί. Μετακινώντας τον αγωγίμο δίσκο κοντά στη διάταξη του *MDL*, τα δινορρεύματα εισέρχονται κρατώντας αμετάβλητο το παλμικό ρεύμα και το πολωμένο πεδίο κατά μήκος του *MDL*, και παρατηρείται ότι το εύρος των δινορρευμάτων στο δίσκο αυξάνει όσο η απόσταση μεταξύ δίσκου και *MDL* μειώνεται. Τέτοια δινορρεύματα προκαλούν ένα μαγνητικό παλμικό πεδίο κατά μήκος του *MDL*, στην περιοχή του *MDL* που καλείται αισθητήριο σημείο, το οποίο σε λειτουργία προκαλεί ως έξοδο μια παλμική τάση, η οποία εισάγεται στο πηνίο ανίχνευσης. Το εύρος των παλμικών τάσεων αποτελεί και την έξοδο του αισθητήρα. Ο χρόνος καθυστέρησης μεταξύ τάσης εξόδου και δημιουργίας του ελαστικού παλμού, καθορίζει τη θέση των δίσκων. Όσο πιο ψηλά είναι τα δινορρεύματα, τόσο πιο ψηλά θα είναι και η μαγνήτιση της τάσης εξόδου του ανιχνευτή. Η μετακίνηση των δίσκων κατά μήκος του *MDL* έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του διεγερόμενου παλμού και της ανιχνευόμενης τάσης. Τέτοιου είδους διατάξεις αναφέρονται στη βιβλιογραφία [205].

### 3.3 Διαστολόμετρα

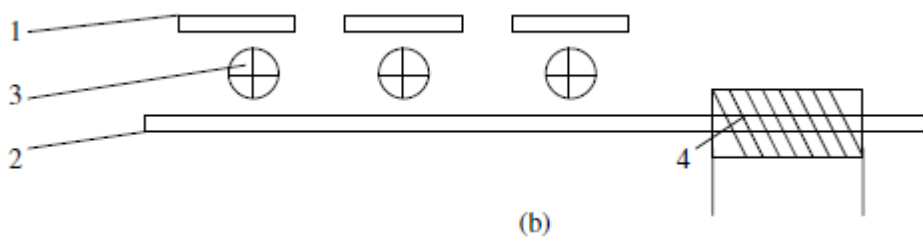
Η λειτουργία τέτοιων αισθητήρων βασίζεται στην αλλαγή του μαγνητικού κυκλώματος στο σημείο διέγερσης *PO*. Έχει σημειωθεί ότι το εύρος των ακουστικών παλμών είναι ποιοτικά συσχετισμένο με την αλλαγή της πυκνότητας μαγνητικής ροής από την περιοχή της γραμμής καθυστέρησης στο σημείο δημιουργίας ελαστικού παλμού.



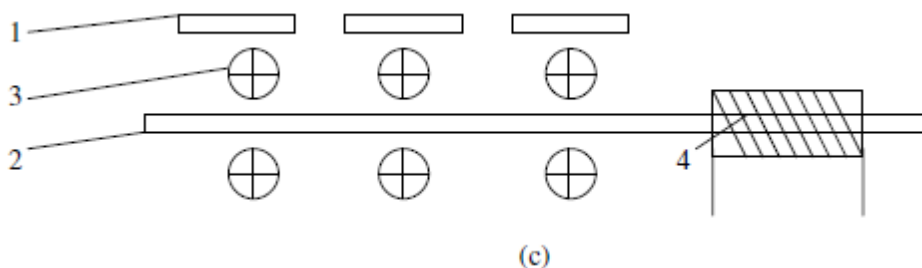


Σχήμα 8

Σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 8, πλησιάζοντας ένα ήπιο μαγνητικό υλικό, ονομαζόμενο πυρήνας *S*, κατά τη βασική διάταξη του αγωγού *MDL*, μειώνεται η μαγνητική ροή στον *MDL* και το εύρος παραγωγής ελαστικών κυμάτων.



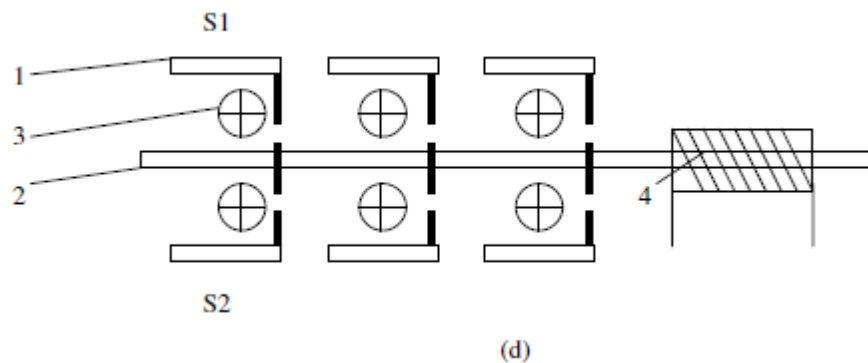
Σχήμα 9



Σχήμα 10

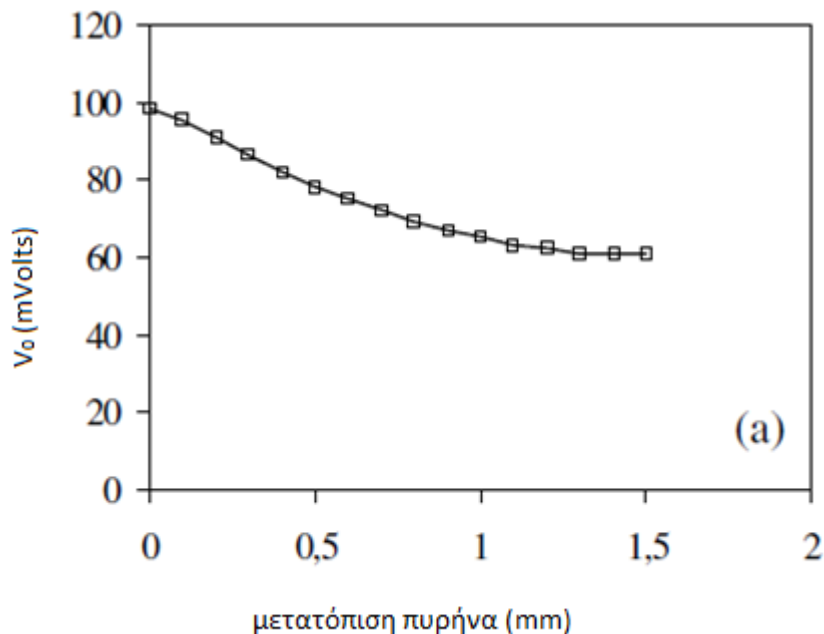
Στη διάταξη του σχήματος 9 παίρνει μέρος το αντίθετο φαινόμενο. Σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 10 η κατασκευή του αγωγού σε ισορροπία, έχει σαν αποτέλεσμα τη συμπληρωματική χρήση των δυο αρχών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτοί οι αγωγοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους στα άκρα, ώστε το εύρος και η κατεύθυνση του παλμικού ρεύματος και στους δυο να είναι ίδια. Κατά την απουσία του πυρήνα *S* δεν υπάρχουν ελαστικοί παλμοί. Πλησιάζοντας τον πυρήνα *S* πιο κοντά από  $1\text{mm}$ , η ροή του *MDL* αρχίζει και αυξάνεται, λόγω της επίδρασης του ελαστικού παλμού.

Άλλοι αισθητήρες μετατόπισης απεικονίζονται στο σχήμα 11

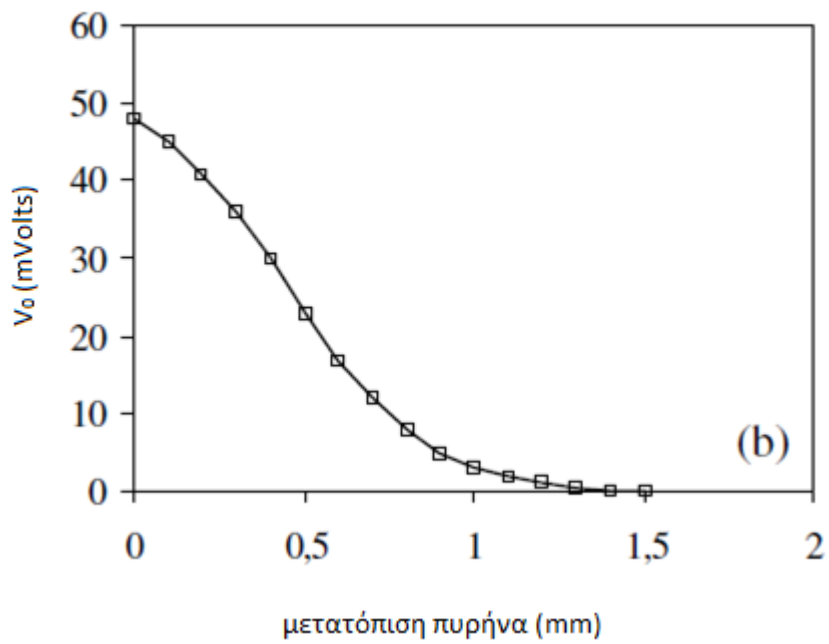


Σχήμα 11

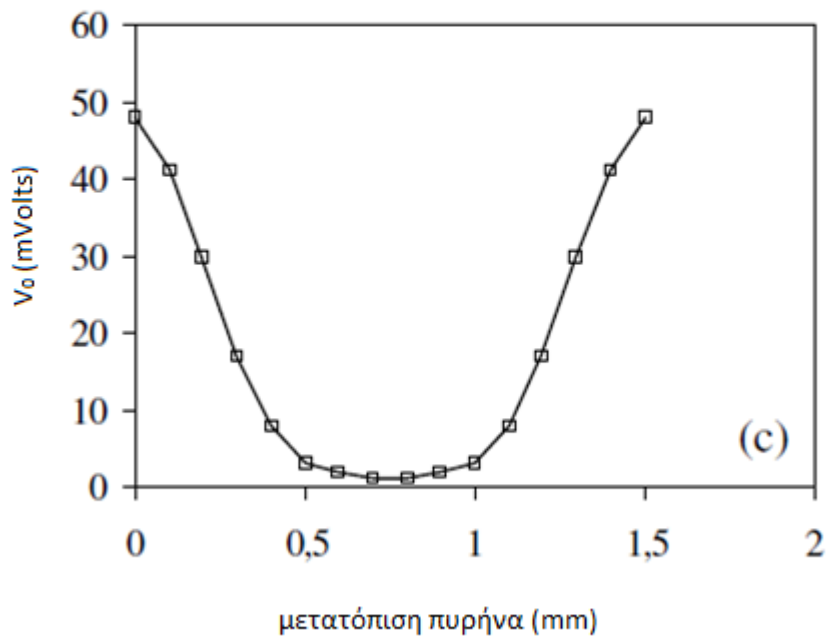
Σε αυτή την περίπτωση οι ενεργοί πυρήνες  $S_1$  και  $S_2$  είναι πάνω και κάτω από τον  $MDL$  αντίστοιχα και είναι συνδεδεμένοι μαζί ώστε να έχουν σταθερή απόσταση. Όταν δεν υπάρχει μετατόπιση, οι πυρήνες  $S_1$  και  $S_2$  είναι στη μέγιστη και ελάχιστη απόσταση από τον  $MDL$  αντίστοιχα. Και οι δυο αυτοί μαγνητικοί πυρήνες επιδρούν στη μεταβολή των αποτελεσμάτων  $V_0$ . Κατά τη χρήση της κατασκευής το  $V_0$  μηδενίζεται όταν η απόσταση μεταξύ των δυο πυρήνων και της γραμμής καθυστέρησης είναι όμοιες. Μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το διάκενο μεταξύ των δυο πυρήνων θα έπρεπε να επηρεάζει την απόδοση των αισθητήρων. Περιγραφή τέτοιων διατάξεων αναφέρεται στη βιβλιογραφία [206]. Η διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω έχει χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την τυπική εξάρτηση του  $V_0$  από την απόσταση  $a$  του πυρήνα από τη γραμμή καθυστέρησης, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 10



Διάγραμμα 11



Διάγραμμα 12

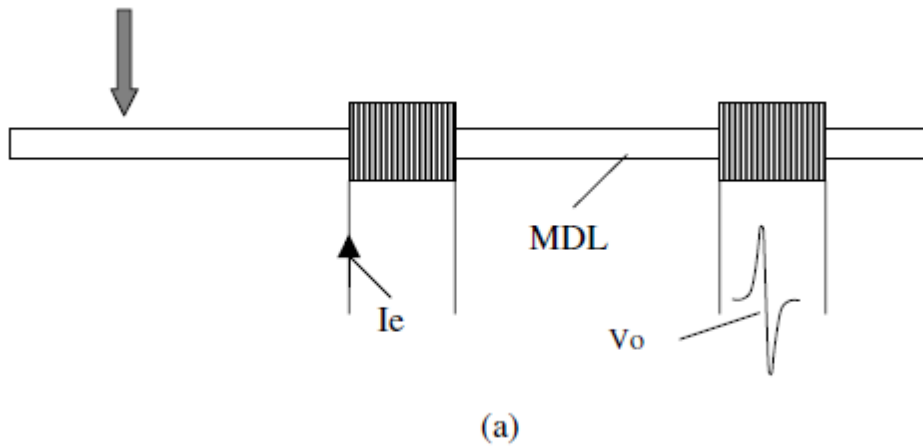
Με βάση τις πειραματικές διατάξεις οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω, πάρθηκαν πειραματικά αποτελέσματα από τη μείωση και τη συνεχή αύξηση της μετατόπισης  $a$ . Η αναφερόμενη έξοδος είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις. Η απόκριση αυτών των αισθητήρων είναι αρκετά γραμμική, μεταξύ 0,5 και 1,5 mm.

### 3.4 Ψηφιοποιητές

Στο παρελθόν έχουν προταθεί ψηφιοποιητές, δυο και τριών διαστάσεων βασιζόμενοι στην τεχνική *MDL*. Ο πρωταρχικός ψηφιοποιητής προτάθηκε από τον Mujarami et al [207,208], χρησιμοποιώντας μια μαγνητική γραφίδα χωρίς καλωδίωση. Τέτοιος ψηφιοποιητής ρυθμίζει κοντά πηνία για την παραγωγή ενός μαγνητικού παλμού στον *MDL* και ένα μακρύ πηνίο ως συσκευή λήψης. Κατά την απουσία μαγνητικών υλικών ή τοπικών μαγνητικών ανωμαλιών κατά μήκος του μακριού πηνίου και προϋποθέτοντας ότι οι μαγνητοσυστολικές ταινίες ή σύρματα εφαρμόζουν μαγνητοελαστικά, τα σήματα εξόδου κατά μήκος του μακριού πηνίου είναι μηδέν, εκτός από το τελείωμά τους όπου μπορούν να ανιχνευτούν δυο μικρού εύρους παλμικές τάσεις. Κατά την προσέγγιση της κινούμενης μαγνητικής γραφίδας κατά μήκος του μακριού πηνίου, διαπιστώνεται ότι η μαγνητική συμμετρία στην αποκρινόμενη περιοχή του *MDL* έχει σπάσει, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας παλμικής τάσης εξόδου, σε μια χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ γραφίδας και του πηνίου διέγερσης. Η διακριτική ικανότητα που παρατηρήθηκε ήταν 0,1mm, καθώς η μέγιστη μετρήσιμη απόσταση μεταξύ γραφίδας και μακριού πηνίου είναι 12mm. Αυτά τα μακριά πηνία μπορούν να διαταχθούν σε παράλληλες και διανυσματικές διατάξεις, έτσι επιτρέπεται η ψηφιοποίηση δυο διαστάσεων. Ο Meydan [209] εξέλιξε έναν όμοιο ψηφιοποιητή με βελτιωμένη διακριτική ικανότητα (85μm) και βελτίωσε τη μέγιστη μετρήσιμη απόσταση μεταξύ κινούμενης γραφίδας και μακριού πηνίου (15mm). Επιπλέον πραγματοποιήθηκε έρευνα με σκοπό την εύρεση του κατάλληλου υλικού, γεωμετρίας και κλίσης της γραφίδας κατά τη χρήση της διάταξης.

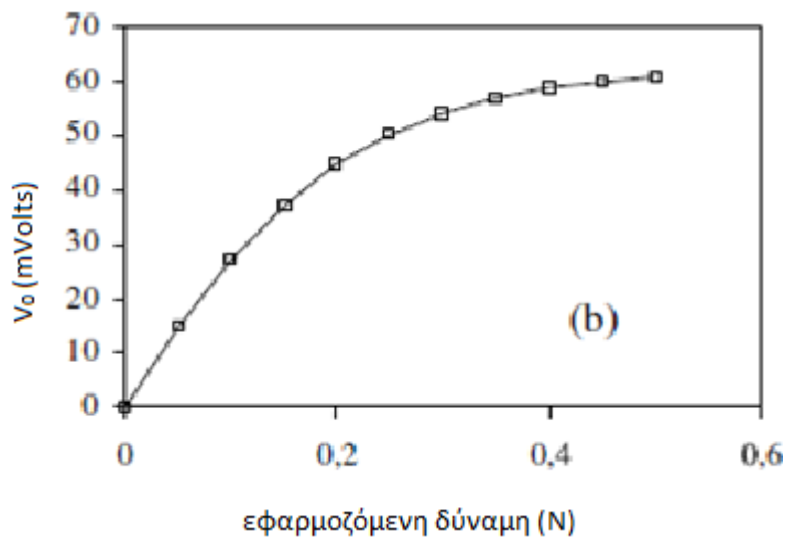
Επίσης έχουν εξελιχθεί και άλλοι ψηφιοποιητές χρησιμοποιώντας τις αρχές του *MDL*, θέλοντας να βελτιώσουν την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία. Έχει προταθεί ένας δυναμικός ψηφιοποιητής, ο οποίος μπορεί να ανιχνεύσει τη θέση και τη μαγνήτιση της δύναμης που ασκείται κατά μήκος του μαγνητοσυστολικού στοιχείου [210]. Αυτή η συσκευή βασίζεται στις αλλαγές της κυματομορφής του ελαστικού παλμού λόγω της μηχανικής δράσης που εφαρμόζεται στον *MDL*. Για αυτή τη λειτουργία η γραμμή καθυστέρησης απλά αναφέρεται σαν οδηγός ακουστικού κύματος. Η αρχή των αισθητήρων βασίζεται στην παραγωγή της αντανάκλασης των διαδιδόμενων ελαστικών παλμών στο σημείο της γραμμής καθυστέρησης όταν επιδρά μια δύναμη. Έτσι η μαγνήτιση και ο χρόνος καθυστέρησης της αντανάκλασης, ανάλογα με τον κύριο ακουστικό παλμό, καθορίζουν τη μαγνήτιση και τη θέση της αντίστοιχης εφαρμοζόμενης πίεσης. Η εφαρμοζόμενη πίεση μπορεί να μετρηθεί σε ένα οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας. Μια συνθήκη για τη διάταξη αυτή είναι ότι ο αγωγός παλμικού ρεύματος είναι μεταξύ του πηνίου λήψης και κάθε πιθανού σημείου αίσθησης

. Η βασική αρχή τέτοιων δυναμικών ψηφιοποιητών απεικονίζεται στη συνέχεια:



Σχήμα 12

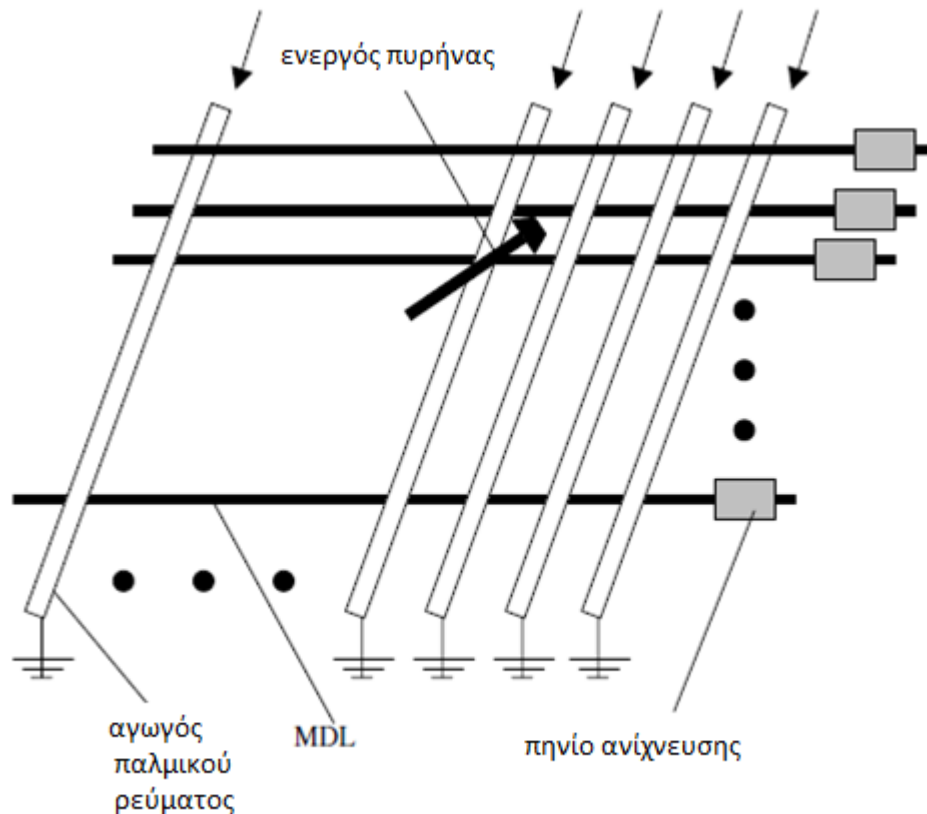
Η εξάρτηση του  $V_o$  από μια ασκούμενη δύναμη σε ένα σημείο του *MDL* εκτός του σημείου διέγερσης *PO* και της περιοχής του πηνίου λήψης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 13

Για τις δεδομένες διατάξεις, η μικρότερη ανιχνεύσιμη δύναμη ήταν 10 *mN*. Το πείραμα διεξήχθη με αυξανόμενη και μειούμενη μαγνήτιση της επιβαλλόμενης δύναμης.

Παίρνοντας την απόκριση του αισθητήρα παρατηρείται ότι το αποτέλεσμα της εξόδου ήταν το ίδιο και για τους δυο τρόπους, ενώ η υστέρηση του αισθητήρα ήταν μικρή. Το πλεονέκτημα τέτοιου ψηφιοποιητή, αντίστοιχου με αυτόν που προαναφέρθηκε, είναι το γεγονός ότι μπορεί να ανιχνεύσει τη μαγνήτιση και τη θέση της επιβαλλόμενης δύναμης ταυτόχρονα.

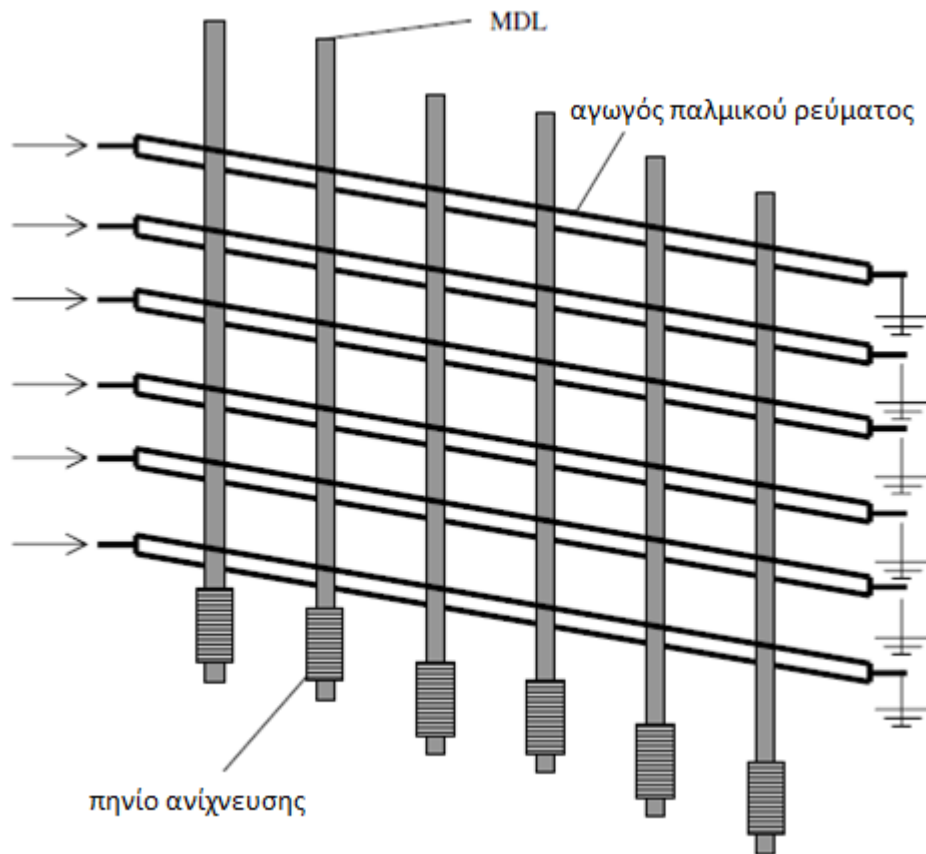


Σχήμα 13 αρχή λειτουργίας ψηφιοποιητή, βασισμένο στην τεχνική του κινούμενου μαγνήτη

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένας τριών διαστάσεων ψηφιοποιητής βασισμένος στις αρχές της ταινίας μέτρησης.

Σε αυτή την περίπτωση μια διάταξη  $n$  παράλληλων αγωγών είναι τοποθετημένοι ορθογωνικά σε μια διάταξη από  $m$  MDL ώστε να παράγουν μια μήτρα  $n \times m$  στοιχείων που προκαλούν τον ελαστικό παλμό. Μια διάταξη από  $m$  πηνία ανίχνευσης είναι τοποθετημένα στη μια άκρη των MDL με σκοπό την ανίχνευση.

Μια ασύρματη γραφίδα με μόνιμη μαγνήτιση στα άκρα της, χρησιμοποιείται σαν ενεργός πυρήνας του ψηφιοποιητή. Υπό την προϋπόθεση ότι οι MDL θα έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα, το ελαστικό κύμα κατά την απουσία του κινούμενου μαγνήτη θα έχει ελάχιστη μαγνήτιση. Κατά την παρουσία του κινούμενου μαγνήτη της γραφίδας στην διατομή του σημείου δημιουργίας του ελαστικού παλμού, το σήμα εξόδου της απόκρισης του παλμού αυξάνει ανάλογα με το μέγεθος του πεδίου σε κάθε ένα από αυτά. Συγκρίνοντας τις τέσσερις παλμικές εξόδους με τους πίνακες διακρίβωσης, δίνεται η απόλυτη θέση της γραφίδας σε σχέση με τα δοσμένα σημεία της πηγής. Ένα πλεονέκτημα του ψηφιοποιητή είναι η ικανότητά του να διαβάζει κατά την τρίτη διάσταση πάνω από  $50\text{mm}$ . Ένα κύριο μειονέκτημα είναι οι πιθανές αβεβαιότητες που εισάγονται από την κρίσιμη κλίση της ασύρματης κινούμενης γραφίδας.



Σχήμα 14 αρχή λειτουργίας ψηφιοποιητή βασισμένου σε διαστολόμετρα

Οι ψηφιοποιητές δυο διαστάσεων που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, αξιοποιούν την αρχή που παρουσιάστηκε προηγουμένα στα διαστολόμετρα. Ακολουθώντας τη διάταξη του σχήματος 10, δυο παρατάξεις από  $n$  παράλληλους αγωγούς παλμικού ρεύματος, έχουν τοποθετηθεί ορθογωνικά πάνω και κάτω από τους παρατεταγμένους  $m$  MDL, ώστε να δημιουργείται μια μήτρα από  $m \times n$  σημεία της πηγής του ελαστικού παλμού. Μια παράταξη από  $m$  πηνία ανίχνευσης είναι τοποθετημένη στη μια άκρη του MDL με σκοπό την ανίχνευση. Μια ασύρματη γραφίδα, της οποίας τα άκρα είναι από ήπιο μαγνητικό υλικό, χρησιμοποιείται ως ενεργός πυρήνας του ψηφιοποιητή. Κατά την απουσία της γραφίδας η διάταξη προϋποθέτει την παραγωγή ελαστικών παλμών. Με την προσέγγιση ήπιων μαγνητικών υλικών του ενεργού πυρήνα, κοντά στην διατομή του σημείου δημιουργίας του ελαστικού παλμού, το αποκρινόμενο σήμα εξόδου του παλμού αυξάνει. Όπως και στην προηγούμενη υπόθεση ένας πίνακας διακρίβωσης (*look up table*) δίνει την απόλυτη θέση της γραφίδας σε σχέση με τα σημεία της πηγής. Αυτός ο ψηφιοποιητής είναι μια συσκευή δυο διαστάσεων, από τη στιγμή που η ικανότητά του σε μετρήσεις τριών διαστάσεων είναι ενισχυμένη με μέγιστη κάθετη μέτρηση  $1mm$ . Ένα πλεονέκτημα του ψηφιοποιητή ανάλογου με τον προηγούμενο είναι η απουσία της εισερχόμενης αβεβαιότητας λόγω της διαφοράς της κλίσης του ενεργού πυρήνα.

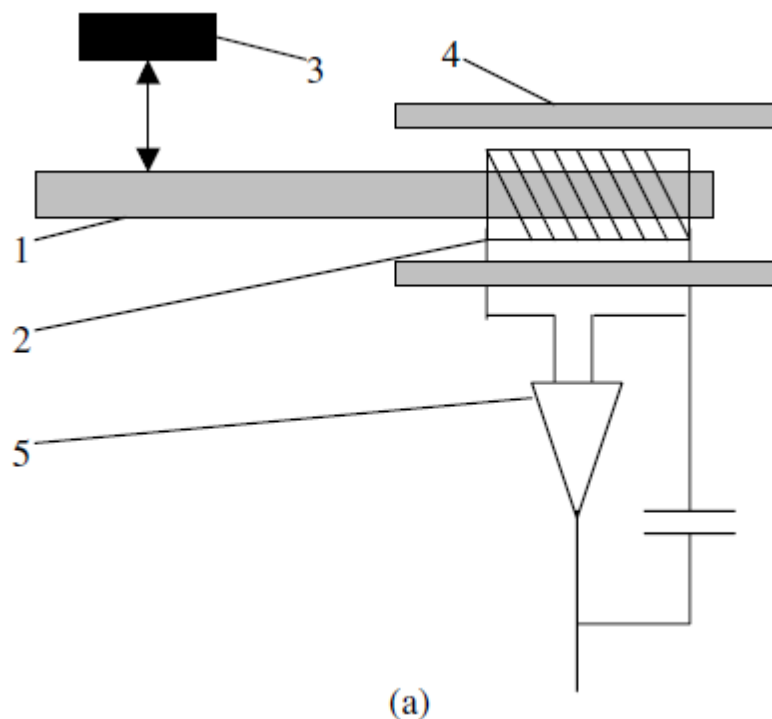
Ο αισθητήρας σχήματος 7 έχει επίσης σχεδιαστεί για ψηφιοποιητή δυο διαστάσεων. Τέτοιος αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει τη θέση κινούμενου αγωγίμου δίσκου σε τρεις διαστάσεις.

Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτός έχει σαν πλεονέκτημα την εμφάνιση ιστροπικής συμπεριφοράς σε τρεις διαστάσεις, ώστε να ανταγωνιστεί τους ψηφιοποιητές οι οποίοι χρησιμοποιούν γραφίδες από ισχυρά μαγνητικά υλικά, όπου η ανιστροπία του μαγνητικού πεδίου παράγει αβεβαιότητα στις μετρήσεις θέσης. Αλλά το μειονέκτημα είναι ότι ο ψηφιοποιητής δεν μπορεί να έχει ευαισθησία καλύτερη από  $0,1\text{mm}$  απ' τη στιγμή που βασίζεται στη διαμήκη ταχύτητα του ήχου σε υλικά που έχουν  $Fe$  ως βάση. Όλοι αυτοί ψηφιοποιητές χωρίς καλώδια, που βασίζονται στην τεχνική *MDL*, μπορούν να εξελιχθούν σε μεγέθη της τάξης των  $m^2$ , λόγω της ιδιότητάς των μαγνητοσυστολικών ταινιών και συρμάτων να παρουσιάζουν ελάχιστη ακουστική εξασθένιση.

### 3.5 Επιταχυνσιόμετρα

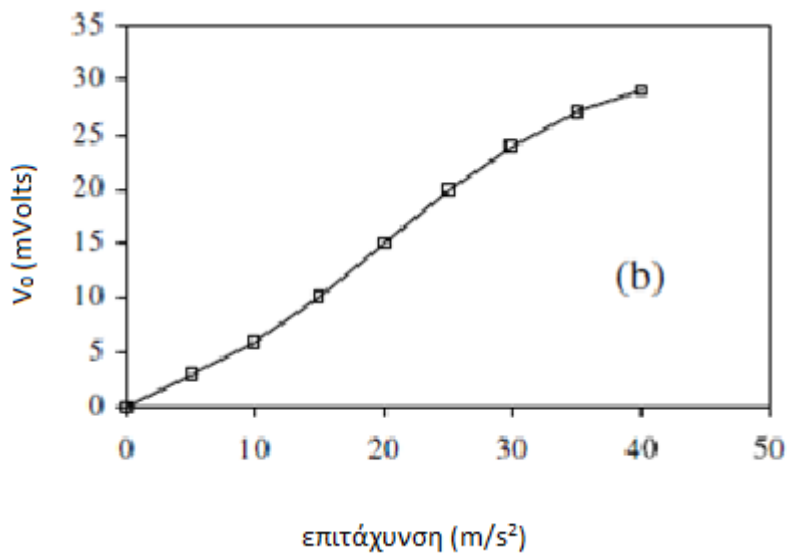
Ο Meydan et al, έχει εξελίξει επιταχυνσιόμετρα βασισμένα πάνω στο αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο, προσφέροντας ικανοποιητική σταθερότητα και χαρακτηριστικά υστέρησης. Στο σχήμα 15 παρουσιάζεται ένα σχέδιο αισθητήρα επιτάχυνσης βασισμένο στην τεχνική *MDL*, το οποίο δεν απαιτεί ρεύμα διέγερσης για την παραγωγή ελαστομαγνητικών κυμάτων. Μια μακριά ελαστομαγνητική ταινία λειτουργώντας σαν *MDL*, είναι τοποθετημένη σε ένα γυάλινο υπόστρωμα. Ένα κοντό πολλών τυλιγμάτων πηνίο ανίχνευσης είναι τοποθετημένο στη μια άκρη του *MDL*. Ένας μόνιμος μαγνήτης είναι τοποθετημένος στην κορυφή του *MDL*, έχοντας σχηματίσει μια οριοθέτηση πόλων ανάλογη με τον *MDL*, και έχοντας μαγνητική μόνωση από το πηνίο λήψης. Ένας ηλεκτρονικός ολοκληρωτής ανιχνεύει και ολοκληρώνει τα σήματα του πηνίου ανίχνευσης. Η δυναμική μετατόπιση του μόνιμου μαγνήτη αποκρίνεται στην αλλαγή της μαγνητικής ροής στην αντιστοιχούσα συμβολή του *MDL*. Τέτοια αλλαγή δυναμικής ροής μεταφράζεται σε έναν ελαστικό παλμό διαδιδόμενο κατά μήκος του υλικού ανιχνεύοντάς τον σαν ένα μονό παλμό στο πηνίο ανίχνευσης. Υπό την προϋπόθεση ότι μια μικροπαραμόρφωση έχει απόκριση στο εύρος ζώνης του *MDL*, το επίπεδο της ολοκλήρωσης της εξόδου θα είναι ανάλογο με την πρώτη παράγωγο της μετατόπισης του μαγνήτη. Η απόκριση της συχνότητας του επιταχυνσιόμετρου επιδρά στο εύρος ζώνης του *MDL* το οποίο κυμαίνεται από  $10\text{ kHz}$  ως τα  $10\text{ MHz}$ . Στο [211] γίνεται αναφορά για της λεπτομέρειες της διάταξης και για την ανάλυση του σήματος εξόδου.





Σχήμα 15 διάταξη αυτό-διεγερόμενου επιταχυνσιόμετρου (1)γραμμή καθυστέρησης, (2) πηνίο ανίχνευσης, (3)κινούμενος μαγνήτης, (4)υλικό προστασίας, (5) ενισχυτής και ολοκληρωτής,

Η απόκριση του αισθητήρα απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 14

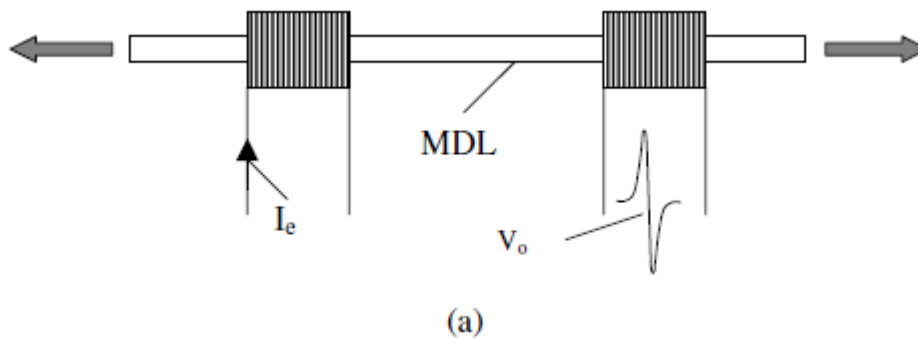
Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η απόκριση είναι μονοτονική για μεγάλη κλίμακα επιτάχυνσης.

## 4 Αισθητήρες τάσης βασισμένοι στην τεχνική MDL

Η έμφυτη ιδιότητα των μαγνητοελαστικών υλικών να αλλάζουν την μαγνήτισή τους με εισαγωγή ανισοτροπικής τάσης, βρίσκει εφαρμογή στην εξέλιξη πολλών συσκευών τάσεων. Παρουσιάζονται οι τέσσερις πιο σημαντικές οικογένειες τέτοιων αισθητήρων όπως: κελία φορτίου, μετρητές ροπής, μετρητές πίεσης και αισθητήρες εφελκυστικών τάσεων, καθώς και η σύνθετη εφαρμογή αισθητήρων πολλών στρώσεων. Η εμφάνιση της μαγνητοσυστολής σ' αυτή την ομάδα αισθητήρων καθορίζει την απόκρισή τους. Η ενδεικτική απόκριση όλων των αισθητήρων που παρουσιάζεται στο μέρος αυτό, αναφέρεται σε θετικά μαγνητοσυστολικά στοιχεία.

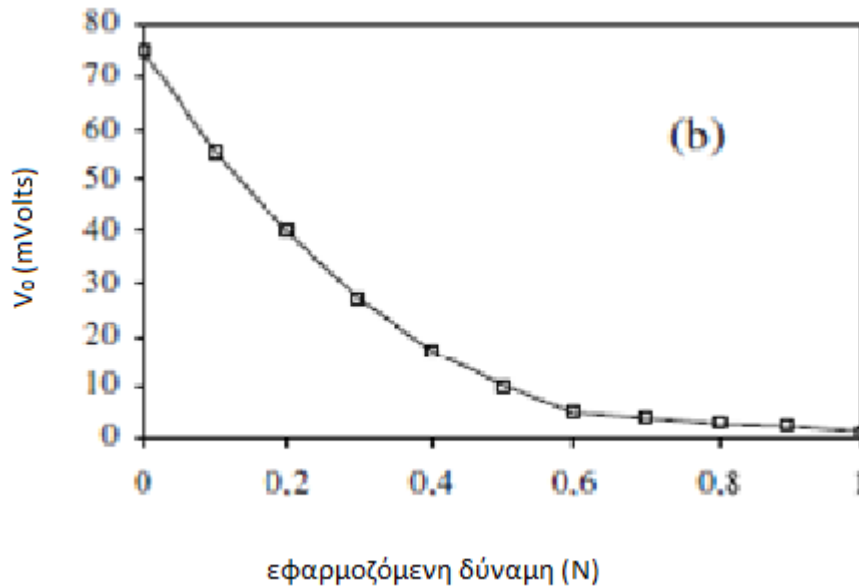
### 4.1 Κελία φορτίου

Στο παρελθόν εξελίχθηκαν κελία φορτίου βασισμένα στις αρχές του MDL [212]. Η βασική λειτουργία τέτοιων αισθητήρων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 16

Στην περίπτωση αυτή ο ίδιος ο MDL γίνεται αντικείμενο φόρτισης. Η εφαρμογή τάσεων στον MDL, έχει σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση της συνάρτησης μαγνητοσυστολής  $\lambda(H)$  και συνεπώς μια μείωση στην παλμική τάση εξόδου. Μια τυπική απόκριση παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:

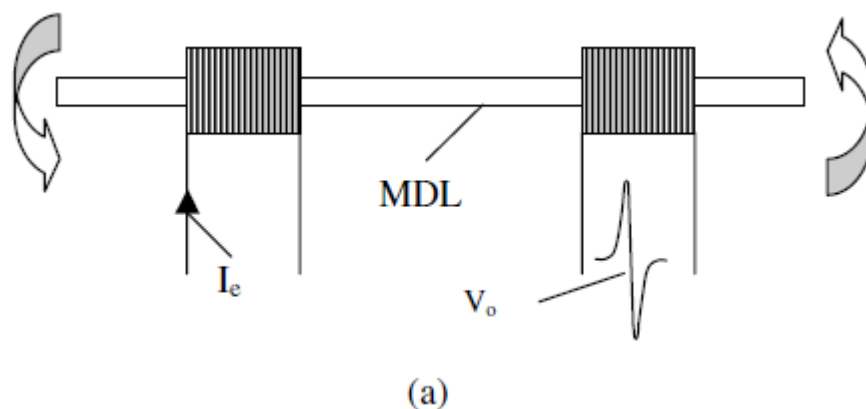


Διάγραμμα 15

Η παρουσία μιας μονοτονικής και πολύ ευαίσθητης απόκρισης των προεφαρμοζόμενων τάσεων στον *MDL*, πριν την τοποθέτηση στη θέση του, επιτρέπει τη μέτρηση εφελκυστικών και θλιπτικών φορτίων στα κελιά φορτίου. Η απουσία της υστέρησης υποδεικνύει καλό επίπεδο αβεβαιότητας, το οποίο υπόσχεται ότι ο τύπος κελίου φορτίων μπορεί να γίνει ανταγωνιστικός.

#### 4.2 Μετρητές ροπής

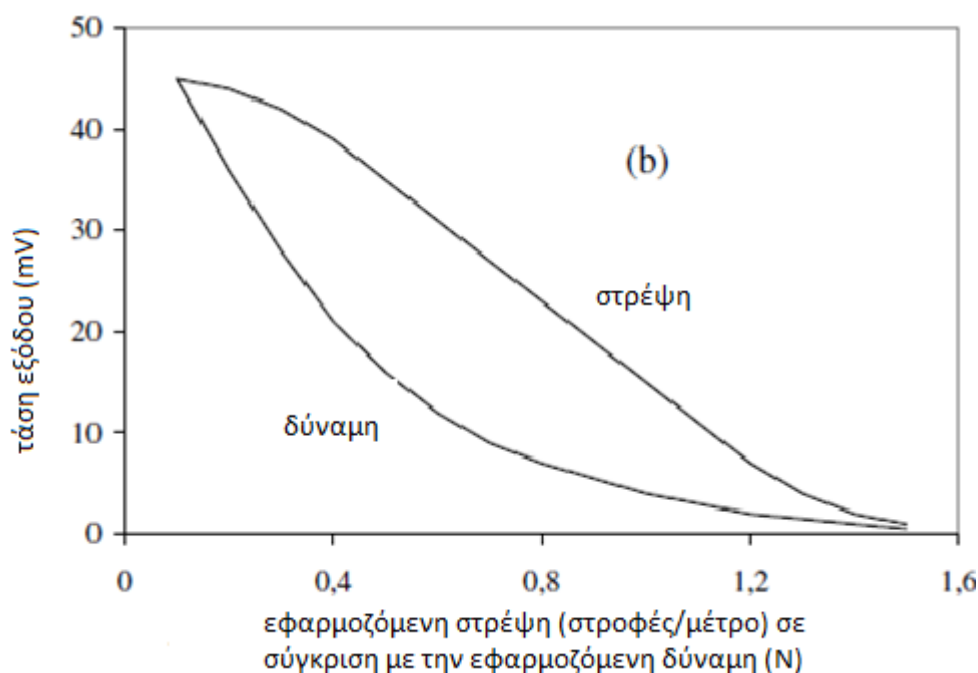
Οι μετρητές ροπής που βασίζονται στον *MDL*, μπορούν να εξελιχθούν όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 17

Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζονται στρεπτικές τάσεις στον *MDL*, αποκρινόμενες στην αλλαγή της συνάρτησης μαγνητοστολής  $\lambda(H)$  και συνεπώς στην αλλαγή της παλμικής τάσης εξόδου. Κατάλληλη προσαρμογή του μαγνητοσυστολικού υλικού μπορεί να έχει ως

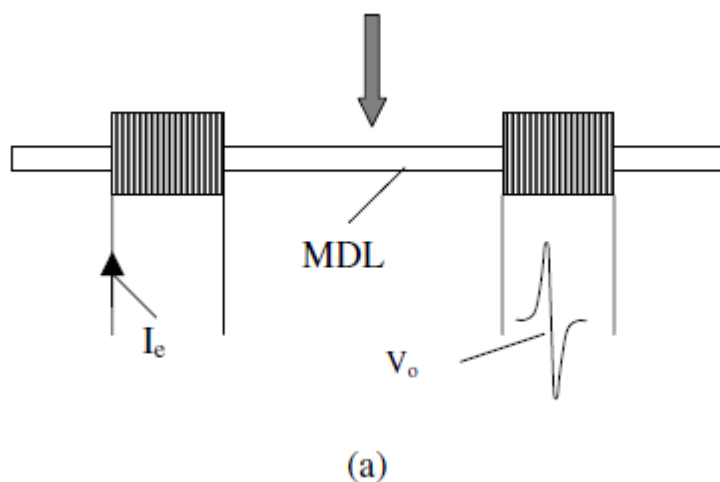
αποτέλεσμα τη μονοτονική μείωση της συνάρτησης μαγνητοσυστολής, επιτρέποντας τη μονοτονική απόκριση του αισθητήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια τυπική απόκριση, ενώ μέσα στα πειραματικά όρια παρατηρήθηκε η απουσία της υστέρησης .



Διάγραμμα 16

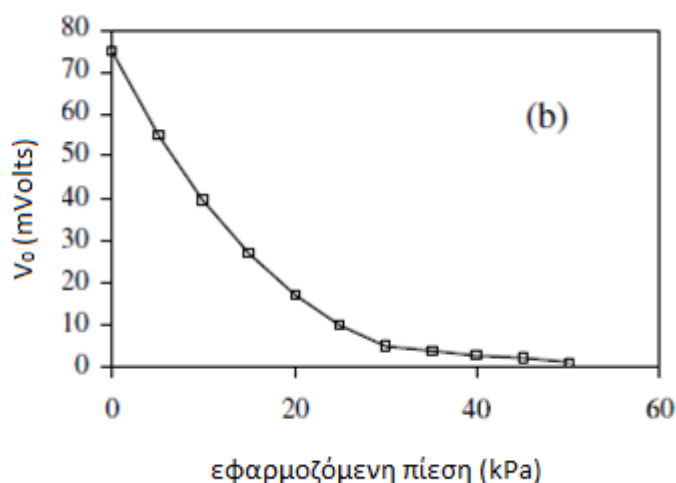
### 4.3 Μετρητές πίεσης

Η εξέλιξη των μετρητών πίεσης είναι βασισμένη στην παραμόρφωση του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος. Όταν εφαρμόζεται πίεση σε ένα σημείο της γραμμής καθυστέρησης η ανιχνευόμενη κορυφή τάσης  $V_0$  καθορίζει τη μαγνήτιση της πίεσης αυτής. Η κυρίαρχη ιδέα ενός τέτοιου πιεστικού-δυναμικού στοιχείου, φαίνεται στο σχήμα 18. Στο [213] γίνεται αναφορά λεπτομερειών για την απόκριση τέτοιων διατάξεων.



Σχήμα 18

όπου η πίεση εφαρμόζεται μεταξύ σημείων διέγερσης και ανίχνευσης. Μια τυπική εξάρτηση της  $V_o$  της εφαρμοζόμενης πίεσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

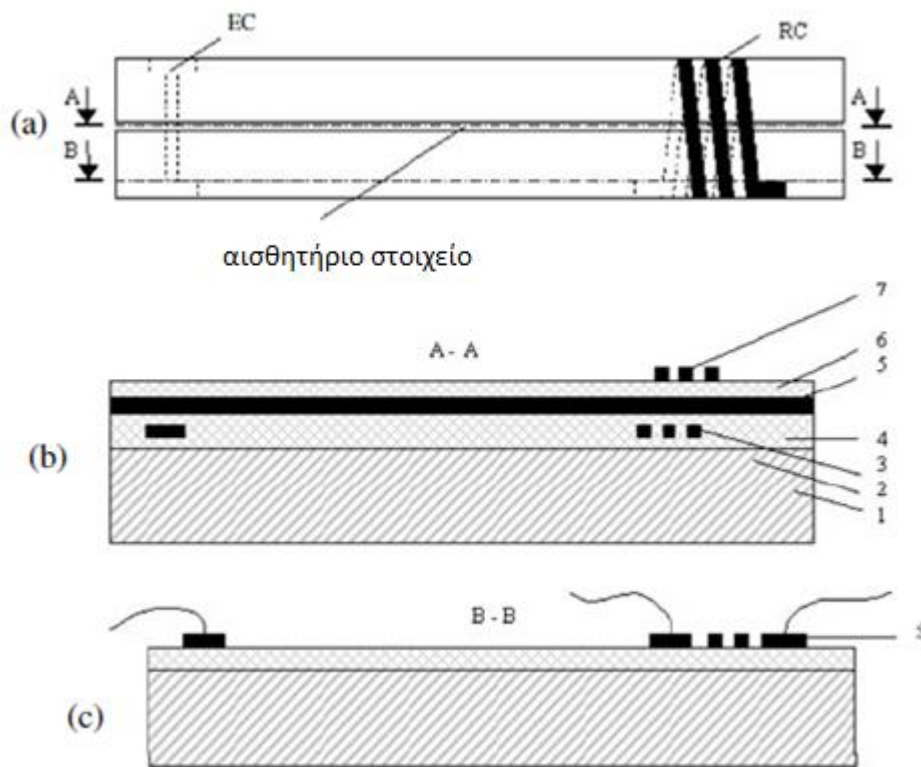


Διάγραμμα 17

Για τις δοσμένες διατάξεις η μικρότερη ανιχνεύσιμη πίεση ήταν  $10 Pa$ . Το πείραμα έγινε με αυξανόμενη και μειούμενη μαγνήτιση της εφαρμοζόμενης πίεσης. Η απόκριση της εξόδου ήταν ίδια και για τους δυο τρόπους και έδειξε μικρή υστέρηση του αισθητήρα.

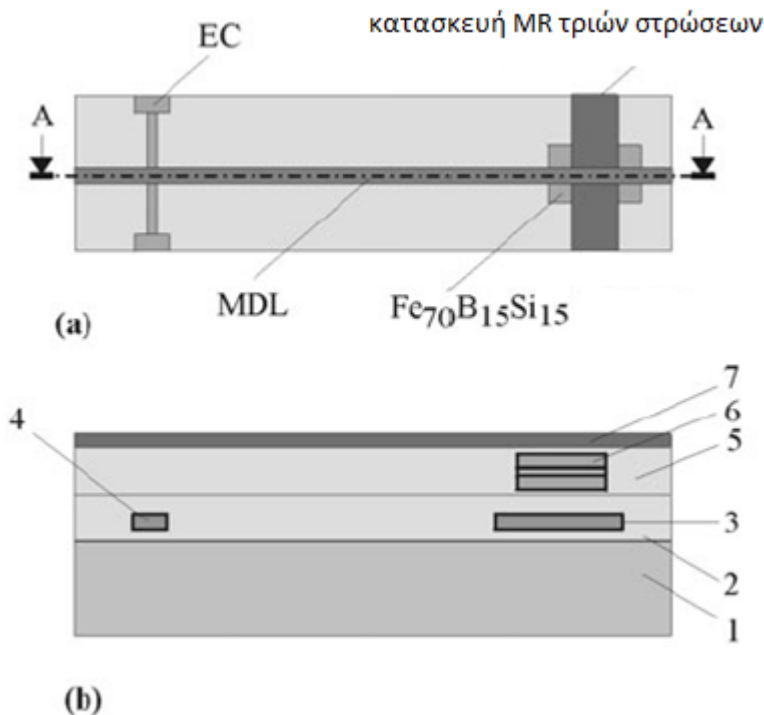
Σμικρύνσεις διατάξεων λεπτών στρώσεων, βασισμένες στους *MDL*, έχουν βελτιωθεί και είναι ικανές να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μετρητών πίεσης. Με σκοπό να επικρατήσει υψηλή απόδοση της σμίκρυνσης της διάταξης *MDL*, χρησιμοποιήθηκαν λεπτές στρώσεις από άμορφο  $Fe_{70}B_{20}Si_6C_4$ , λόγω των αξιοσημείωτων μαγνητοελαστικών χαρακτηριστικών τους. Μια ειδική τεχνολογική λύση για να βελτιωθεί η απόδοση και να απλουστευθεί η παραγωγική διαδικασία της σμίκρυνσης του *MDL*, επετεύχθη χρησιμοποιώντας τεχνολογία λεπτών στρώσεων. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν στοιχεία για την παραγωγή λεπτόστρωτων κατασκευών [214].

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη της μικρογραφίας του MDL κατασκευασμένη σε υπόστρωμα πυριτίου, χρησιμοποιώντας πολύστρωτη κατασκευή X/Y/X. Όπου στον X είναι η πόλυστρωτη κατασκευή τύπου  $\text{SiO}_2/\text{Cu}/\text{SiO}_2$ , και στον Y είναι ένα μαγνητοσυστολικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως μέσο καθυστέρησης.



Εικόνα 9 (α)πάνω όψη του ολοκληρωμένου πακέτου μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης λεπτής στρώσης (β)όψη διατομής A-A: (1)υπόστρωμα λεπτής στρώσης, (2)πάνω μέρος του υποστρώματος, το οποίο παρέχει μονωτική προστασία, (3)πρώτη στρώση Cu, (4)μονωτικό στρώμα, (5)  $\text{Fe}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_6\text{C}_4$  λεπτή στρώση η οποία λειτουργεί ως μέσο MDL, (6)μονωτικό στρώμα, (7)τελευταία στρώση Cu, (c)όψη διατομής B-B: (8)επαφές του αγωγού διέγερσης και του πηνίου λήψης.

Η κατασκευή της προαναφερθείσας διάταξη χρησιμοποιεί λεπτές στρώσεις από  $\text{Fe}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_6\text{C}_4$  πάχους  $9500\text{\AA}$ , ως αισθητήριο στοιχείο, οι οποίες παράχθηκαν σε υποστρώματα πυριτίου χρησιμοποιώντας πυροβόλο ή διαδικασία εκβολής. Η εναπόθεση του άμορφου υλικού μετά την τοποθέτηση μάσκας σε μορφή στοιχείου,  $0,5 \times 33 \text{ mm}$ , αποτελεί ένα μέσο της γραμμής καθυστέρησης. Το στοιχείο διέγερσης είναι μια χάλκινη ή αλουμινένια ευθεία γραμμή, κάθετη στο άμορφο υλικό, τοποθετημένη στο ένα άκρο του και χωρισμένη από μια στρώση διοξειδίου που βρίσκεται κάτω από τη συνολική κατασκευή. Επιπλέον το στοιχείο λήψης μπορεί να είναι αντιληπτό από μια διάταξη δυο παρατεταγμένων αγωγών τοποθετημένων πάνω και κάτω από  $\text{Fe}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_6\text{C}_4$ , ώστε να σχηματιστεί ένα πηνίο λήψης γύρω του. Οι μονωτικές στρώσεις και οι άμορφες λεπτές στρώσεις είναι τοποθετημένες με μια υψηλής συχνότητας μέθοδο εκβολής. Για τη διαμόρφωση του πηνίου διέγερσης και του πηνίου λήψης χρησιμοποιήθηκε η λιθογραφική διαδικασία. Το πρωτότυπο είναι καθορισμένο με υγρή χημική μεταλλογραφία. Μια μεταλλική διάταξη απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:

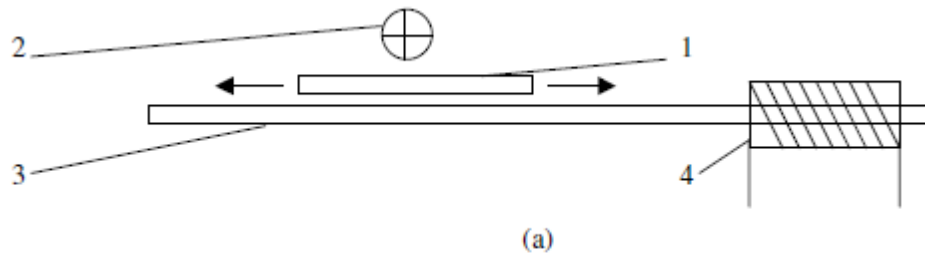


Εικόνα 10 μικρογραφία διάταξης MDL πολύστρωτης δομής, (α)πάνω όψη πλήρους πολύστρωτης κατασκευής,(β)όψη διατομής A-A, (1)υπόστρωμα λεπτής στρώσης, (2)μονωτική στρώση, (3) άμορφη λεπτή στρώση  $Fe_{70}Si_{15}B_{15}$ , (4)λεπτή στρώση CU, (5)μονωτική στρώση, (6)αισθητήριο στοιχείο MR τριών στρώσεων, (7) άμορφη λεπτή στρώση  $Fe_{70}Si_{15}B_{15}$  η οποία λειτουργεί ως μέσο MDL.

Σχετικά με την τριπλής στρώσης κατασκευή *MR*, από  $Ni_{81}Fe_{19}/SiO_2/Ni_{81}Fe_{19}$ , έχει τοποθετηθεί κάτω από τον  $Fe_{70}Si_{15}B_{15}$  για την ανίχνευση ροής. Αυτές οι λεπτόστρωτες διατάξεις είναι πολλά υποσχόμενες, όσον αφορά τα επίπεδα ευαισθησίας, κυρίως σε μαγνητομηχανικούς αισθητήρες.

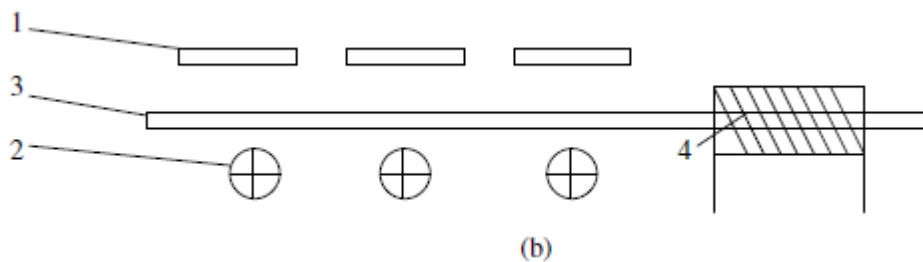
#### 4.4 Αισθητήρες εφελκυστικών τάσεων

Αυτού του είδους οι αισθητήρες βασίζονται στις μαγνητοελαστικές ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών μεταλλικών υάλων. Σε τέτοια υλικά που κατασκευάζονται με διαδικασία ταχείας στερεοποίησης η συγγενής διαπερατότητα εξαρτάται από τις εφελκυστικές τάσεις οι οποίες εφαρμόζονται στην επιφάνεια τους. Μια παρόμοια επίδραση παρατηρήθηκε σε υλικά κατά τη θλίψη στην ίδια διεύθυνση. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται σαν αρχή πάνω στην οποία βασίζονται όλοι οι αισθητήρες αυτού του είδους. Σε αυτή την ομάδα αισθητήρων οι *MDL*, πρέπει να παραμείνουν χωρίς τάσεις, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες. Ο πρώτος τύπος φαίνεται στην επόμενη εικόνα :



Εικόνα 11

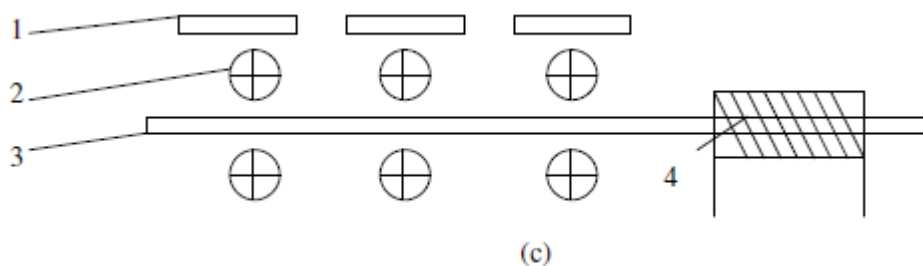
Ο ενεργός πυρήνας  $S$  είναι φτιαγμένος από μεταλλικό γυαλί και είναι τοποθετημένος σε μια σταθερή απόσταση μεταξύ του αγωγού παλμικού ρεύματος και της γραμμής. Η μετάδοση παλμών μέσω του αγωγού, βρίσκει ανταπόκριση σε ένα μεγάλο ποσοστό παλμών μαγνητικού πεδίου στον  $MDL$ , ενώ ένα κανονικό ποσοστό μαγνητικής ροής παγιδεύεται στον ενεργό πυρήνα  $S$ , λόγω της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Εφαρμόζοντας εφελκυστικές τάσεις στον πυρήνα  $S$ , η συγγενής διαπερατότητα μειώνεται και επιτρέπει να περάσει περισσότερη ροή και να εισέλθει στον  $MDL$ , οπότε ο ελαστικός παλμός και η παλμική τάση εξόδου του  $MDL$  είναι μεγαλύτερη.



Εικόνα 12

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ένας άλλος τύπος αισθητήρα. Σ αυτή την περίπτωση ο ενεργός πυρήνας  $S$  λειτουργεί με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Με την παρουσία του το μαγνητικό κύκλωμα, και συνεπώς η μαγνητική ροή στο σημείο αίσθησης, αλλάζει γιατί ο πυρήνας ελκύει μερικές από τις μαγνητικές γραμμές. Παρ' όλα αυτά ο  $MDL$  λειτουργεί πλέον σαν μαγνητική οθόνη. Οπότε η σύζευξη, μεταξύ πυρήνα και  $MDL$ , έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μαγνητικής ροής στην γραμμή καθυστέρησης με την αύξηση των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος του ενεργού πυρήνα δημιουργώντας έτσι έναν άλλου τύπου αισθητήρα εφελκυστικής τάσης.

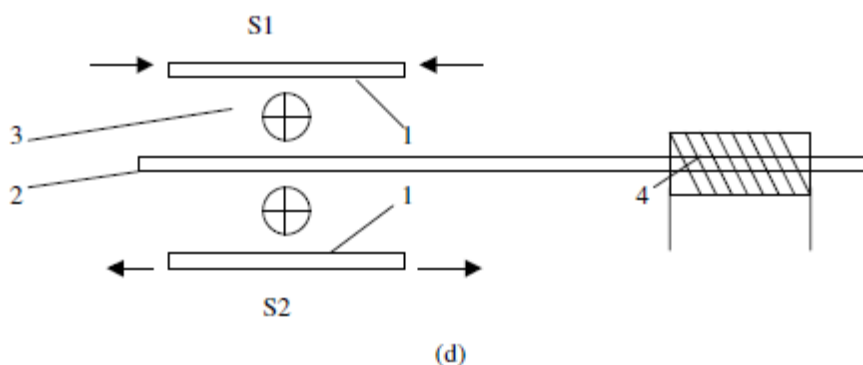




Εικόνα 13

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένας συνδυασμός των προαναφερθέντων διατάξεων. Καθώς το διαρρέον ρεύμα του παλμού  $I_e$  διαδίδεται στην ίδια διεύθυνση στους δυο αγωγούς, και κατά την απουσία του πυρήνα  $S$ , δεν υπάρχει μαγνητική ροή στη γραμμή καθυστέρησης, συνεπώς ανιχνεύεται μηδενική παλμική τάση εξόδου.

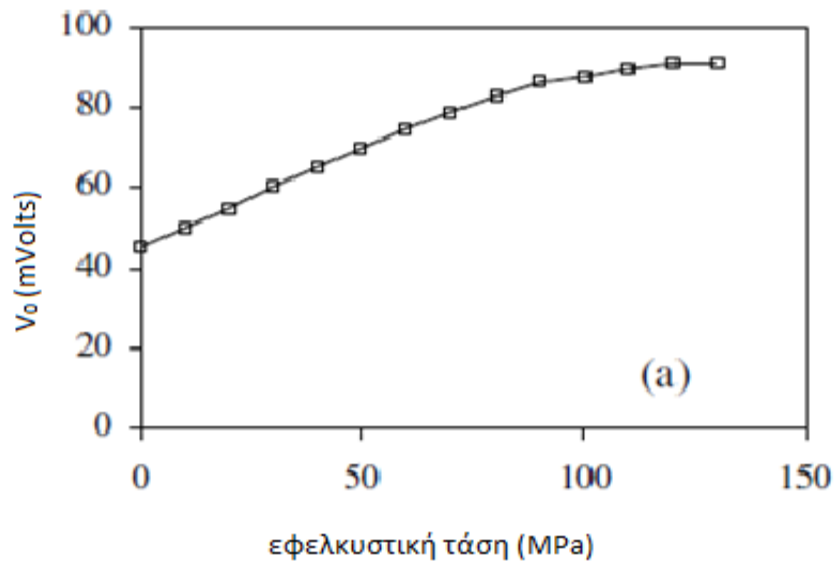
Όταν ο πυρήνας  $S$  είναι τοποθετημένος χωρίς εφαρμογή τάσεων και κοντά στον  $MDL$ , η παλμική τάση εξόδου μεγιστοποιείται. Η εφαρμοζόμενη τάση στον πυρήνα  $S$  έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας κάτω από το ένα και έτσι το σήμα εξασθενεί μέχρι το μηδέν, κάνοντας τον πυρήνα  $S$  μαγνητικά διαφανή. Ο αισθητήρας της παρακάτω εικόνας αποτελείται επίσης από μια ισορροπημένη διάταξη.



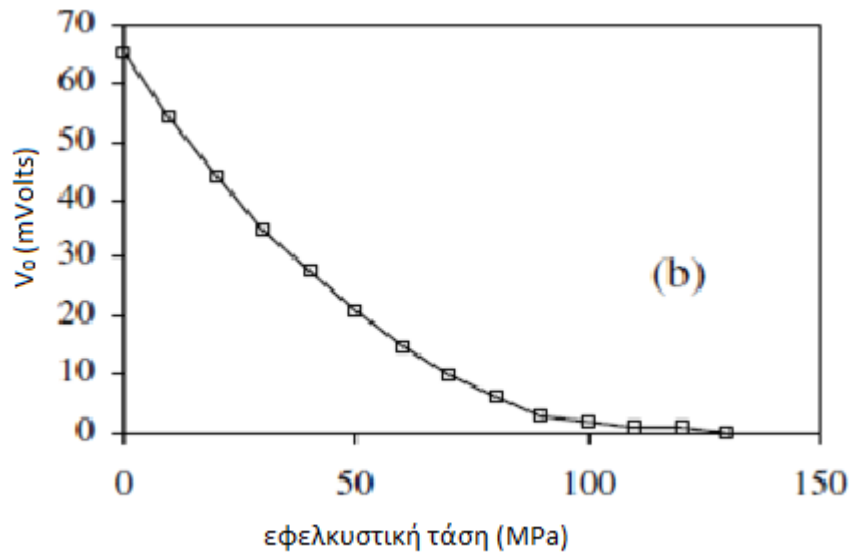
Εικόνα 14

Οι δυο πυρήνες  $S_1$  και  $S_2$  από πάνω και από κάτω από τη γραμμή καθυστέρησης αντίστοιχα, είναι τοποθετημένοι σε όμοιες αποστάσεις από τον  $MDL$ .

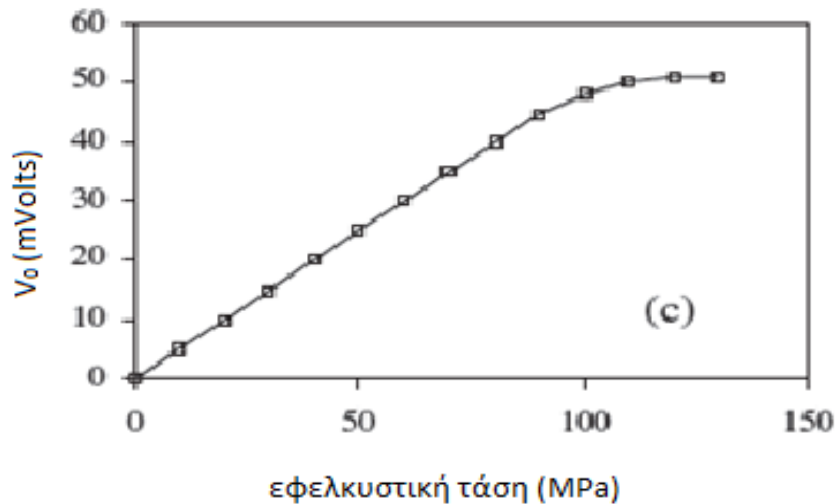
Με την εφαρμογή φορτίου σε μια τέτοια κατασκευή, ο ένας πυρήνας εφελκύεται ενώ ο άλλος θλίβεται. Ως εκ τούτου, ένα μεγάλο ποσό της μαγνητικής ροής προστίθεται στον  $MDL$ , λόγω των εφελκυστικών τάσεων που ασκούνται στον ένα πυρήνα, ενώ ένα σχετικά μικρό ποσό της ροής αφαιρείται από τον  $MDL$  λόγω των θλιπτικών τάσεων που ασκούνται στον άλλο πυρήνα. Λεπτομέρειες λειτουργίας τέτοιων αισθητήριων διατάξεων αναφέρονται στο [215]. Μια τυπική απόκριση αισθητήρων όπως των διατάξεων των εικόνων 11,13,14 αντίστοιχα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 18,19,20.



Διάγραμμα 18



Διάγραμμα 19



Διάγραμμα 20

Όλα αυτά τα αποτελέσματα πάρθηκαν αυξάνοντας και μειώνοντας την εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση. Η έξοδος που παρατηρήθηκε ήταν η ίδια και για τις δυο περιπτώσεις ώστε η αποκρινόμενη υστέρηση να εμφανίζεται πολύ μικρή. Οι αισθητήρες των εικόνων 11 και 12 μπορούν να παρουσιαστούν όμοιοι με έναν απλό μετρητή παραμόρφωσης ενώ οι υπόλοιποι αισθητήρες μπορούν να φανούν όμοιοι με κατασκευές γεφυρών. Έχει παρατηρηθεί ότι για την απόκριση που φαίνεται στο διάγραμμα 13 το κέρδος από την πλήρη στην μηδενική εφαρμοζόμενη τάση έχει εύρος από 2,5 έως 1. Αυτό το γεγονός κάνει αυτόν τον τύπο αισθητήρα πιο ελκυστικό από τους κλασσικούς μετρητές παραμόρφωσης με κριτήριο την ευαισθησία. Η απόκριση των αισθητήρων αυτών των διαγραμμάτων 19, 20 παρουσιάζει πολύ καλή ευαισθησία έτσι επιτρέπεται η χρήση τους σε κύρια είδη εφαρμογών. Αυτός ο τύπος αισθητήρων είναι ιδανικός σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών και μηχανικών μεταλλείων, όπου ο πυρήνας των αισθητήρων, κατά προτίμηση σε μορφή ταινίας, μπορεί να συνδεθεί με στοιχεία υπό παρακολούθηση, με σκοπό να αποδώσει καταγραφή τάσεων χωρίς να έρθει σε επαφή. Υπολογίζοντας ότι τέτοιοι πυρήνες αισθητήρων δεν συμπεριλαμβάνουν περιστρεμμένα πηνία, μπορεί να κολληθεί στην άκρη του τσιμέντου ή της μεταλλικής κατασκευής η οποία μελετάται. Κατά την προσέγγιση του *MDL* στο σημείο διασταύρωσης με τους αγωγούς παλμικού ρεύματος και τα μαγνητοσυστολικά στοιχεία κοντά στον πυρήνα του αισθητήριου, η παλμική τάση εξόδου είναι μονοτονικά εξαρτημένη από την εφαρμοζόμενη τάση στην πυρήνα του αισθητήρα.

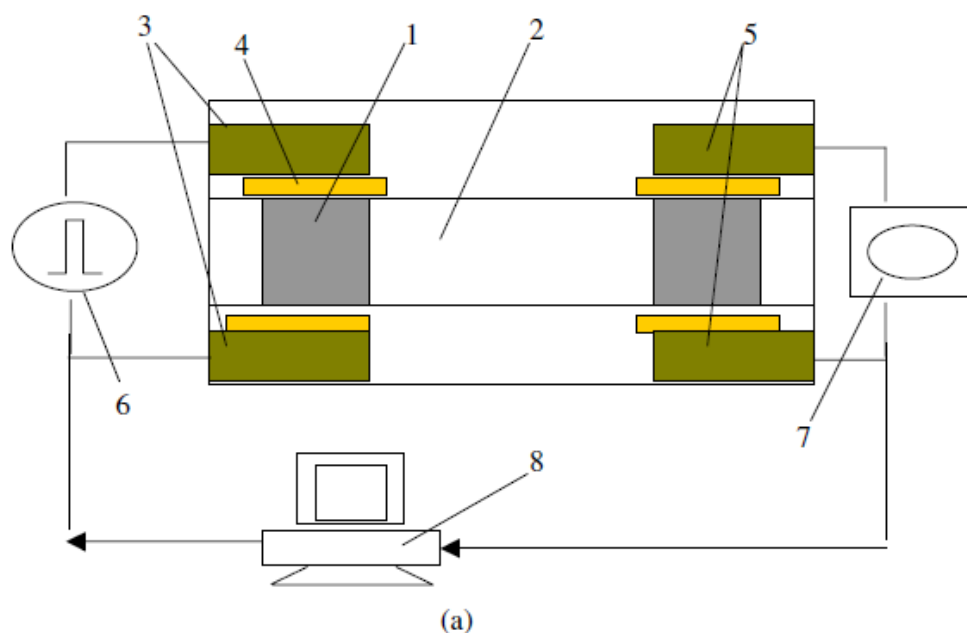
#### 4.5 Αισθητήρες λεπτού υμενίου βασισμένοι στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης.

Οι μετρήσεις των λεπτών υμενίων κατά την κατασκευαστική διαδικασία είναι σημαντικές για πολλούς λόγους και εφαρμογές. Ο ταλλαντούμενος κρύσταλλος που χρησιμοποιείται in-situ (δηλαδή εντός του χώρου παρασκευής του υμενίου) έχει συχνότητα συντονισμού που εξαρτάται από το πάχος του υμενίου [216].

Η τεχνική *MDL* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξελιχτεί ένας αισθητήρας λεπτού πάχους με μια περισσότερο ευαίσθητη εξάρτηση στο χρόνο παραμονής και μια μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Η πίεση ή δύναμη που εφαρμόζεται στον *MDL*, κατά τη διάρκεια της

εναπόθεσης του λεπτού υμενίου, μπορεί να έχει επίδραση στην εξασθένιση του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος, ώστε η έξοδος του ανιχνευόμενου κύματος να μειωθεί ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Κανονικά η εναπόθεση των ατόμων στην μαγνητοσυστολική επιφάνεια επηρεάζει την εφαρμοζόμενη στατική δύναμη και συνεπώς τη στατική παραμόρφωση στο διαδιδόμενο ελαστικό κύμα. Τέτοια παραμόρφωση επηρεάζει τη μείωση της παλμικής τάσης εξόδου του *MDL*. Το ποσοστό των ατόμων και της δύναμης είναι ανάλογο του πάχους της στρώσης που εναποτέθηκε στο μαγνητοσυστολικό στοιχείο. Έτσι τέτοιες διατάξεις μπορούν να οδηγήσουν σε λεπτού υμενίου αισθητήρες ανιχνεύοντας το πάχος του υμενίου κατά την εναπόθεση.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται διατάξεις αισθητήρων τέτοιων αρχών ώστε να παρουσιάζουν ικανοποιητικά επίπεδα αντοχής και διάρκειας για βιομηχανική χρήση:

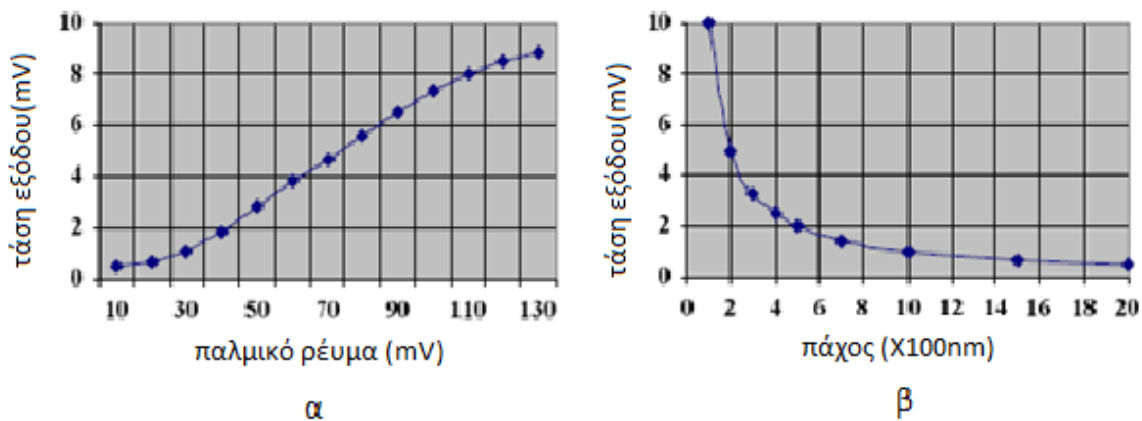


Εικόνα 15

Σε μια τέτοια περίπτωση δυο ορθογώνια μαγνητοσυστολικά στοιχεία (1) είναι τοποθετημένα στις άκρες των δυο γυάλινων υποστρωμάτων (2), τα οποία έχουν δυο μακριά παράλληλα κοψίματα, ώστε να είναι ικανά να δράσουν σαν μακριοί ακουστικοί οδηγοί με ορθογώνιο προφίλ. Δυο κομμάτια χάλκινων ταινιών (3) είναι συνδεδεμένα με ασημί βαφή (4) σε κάθε πλευρά του μαγνητοσυστολικού υλικού. Ο εφοδιασμός με παλμική τάση των άκρων του ενός ζεύγους χάλκινων ταινιών, διαμέσου των μαγνητοσυστολικών υλικών, έχει επίδραση στο παλμικό πεδίο και συνεπώς στην παραγωγή ελαστικών παλμών. Αυτός ο ελαστικός παλμός, είναι συνδεδεμένος με το γυάλινο υπόστρωμα, διαδίδεται μέσω αυτού και συνδέεται πάλι με ένα δεύτερο μαγνητοσυστολικό υλικό επάγοντας μια παλμική τάση εξόδου λόγω του αντίστροφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου. Όταν η διαδικασία της βελτίωσης του λεπτού υμενίου ξεκινά, άτομα του στόχου χτυπούν το εναποτιθέμενο υπόστρωμα του αισθητήρα, ενώ η πρόσκρουση στα μαγνητοσυστολικά στοιχεία είναι απαγορευμένη με τη χρήση μεταλλικών

μασκών. Πειραματικά αποτελέσματα και λεπτομέρειες για τη λειτουργία αναφέρονται στη βιβλιογραφία [217]

Η εξάρτηση του εύρους τάσης της εξόδου του αισθητήρα από την είσοδο του παλμικού ρεύματος διέγερσης και από το πάχος του εναποτιθέμενου φιλμ φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα :



Διάγραμμα 21 α και β

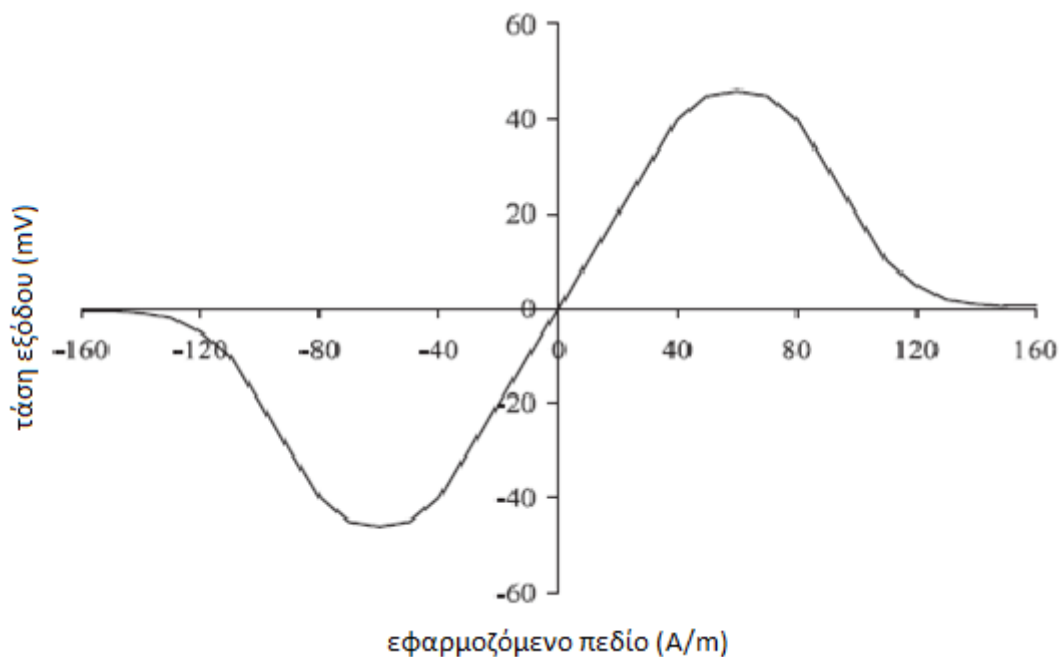
Μια σχεδόν ακριβής τιμή του πάχους μπορεί να δώσει η απόκριση ενός τύπου quartz ταλαντωτή. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια καλή συμφωνία με την πρόβλεψη της εκθετικής απόκρισης. Αλλά μπορεί να παρατηρηθούν διαφορές στην απόκριση διαφορετικών εναποτιθέμενων υλικών οι οποίες καθιστούν απαραίτητη τη χρήση πινάκων διακρίβωσης όταν απαιτούνται ακριβείς μετρήσεις.

Πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μια διαφορετική ζώνη εύρους όσον αφορά τις επιδράσεις του πεδίου και των τάσεων σε όλη τη διάταξη. Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γρήγορης μετατροπής *Fourier*, μπορεί να παρατηρηθεί ο διαχωρισμός των δυο μετρήσεων, επιτρέποντας έτσι τη διαχείριση των ανεπιθύμητων επιδράσεων των περιβαλλόντων πεδίων στην περιοχή του αισθητήρα. Αναλογιζόμενοι τη διαδικασία προστασίας των περιβαλλόντων πεδίων, η χρήση μιας ταινίας μόνιμης μαγνήτισης κάτω από το μαγνητοσυστολικό στοιχείο, μπορεί να δυναμίσει πολύ ισχυρά τη διάταξη του *MDL*, ελαχιστοποιώντας την επίδραση της παρεμβολής του εμφανιζόμενου πεδίου.

## 5 MDL αισθητήρες πεδίου και εφαρμογές σε NDT&E

Στο παρελθόν έχουν παρουσιαστεί διάφοροι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, περιλαμβανομένων των κύριων τεχνικών αισθητήρων. Οι πιο συνηθισμένες συσκευές είναι βασισμένες σε τεχνικές *Hall*. Αυτές οι συσκευές προκαλούν ελάχιστη αλλαγή των μετρούμενων μαγνητικών πεδίων από τη στιγμή που δεν περιλαμβάνουν φερομαγνητικά υλικά.[218]. Όλες οι γνωστές συσκευές αυτού του είδους έχουν καλά καθορισμένα χαρακτηριστικά όπως ακρίβεια ευαισθησία, υστέρηση, κτλ. Ένα συχνό μειονέκτημα των περισσότερων από αυτούς, περιλαμβανομένων των αισθητήρων μαγνητικού πεδίου βασισμένων στο φαινόμενο *Hall*, είναι η αδυναμία τους να μορφοποιηθούν σε ολοκληρωμένες διατάξεις.

Η τεχνική *MDL* έχει χρησιμοποιηθεί για την εξέλιξη των αισθητήρων πεδίου και την κατανομή των αισθητηρίων στοιχείων πεδίου [219] Ακολουθώντας τη διάρθρωση της πιο απλής διάταξης, η εξάρτηση της τάσης εξόδου του *MDL* στο εφαρμοζόμενο πεδίο, είτε το σημείο διέγερσης *PO* είτε στην περιοχή του πηνίου ανίχνευσης, για ένα λεπτομερώς ανοπτημένο μαγνητοσυστολικό σύρμα παρουσία πεδίου, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



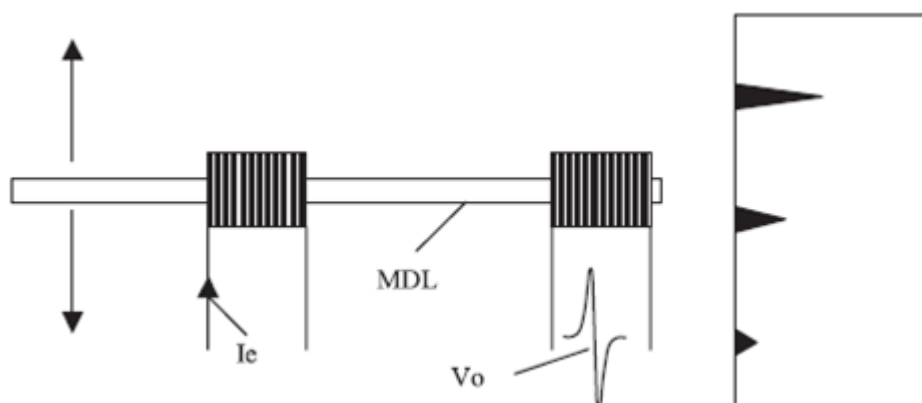
Διάγραμμα 22 τυπική εξάρτηση της παλμικής τάσης του MDL που χρησιμοποιείται σε εφαρμοζόμενα πολωμένα πεδία κατά το μήκος τους.

Τέτοιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαγνητικές τεχνικές ή σε μη καταστροφικές τεχνικές. Στο παρελθόν έχουν εξελιχθεί και παρουσιαστεί μη καταστροφικές τεχνικές ελέγχου από τις εργαστηριακές έρευνες μέχρι και τις βιομηχανικές εφαρμογές [220]. Ο κύριος ρόλος όλων αυτών των τεχνικών είναι ο καθορισμός των ρωγμών και των ατελειών στην επιφάνεια και στον όγκο ενός δοσμένου αντικειμένου. Οι πιο ευρέως εφαρμόσιμες και σημαντικές *NDE* τεχνικές, μαγνητικές ή μη μαγνητικές, είναι αυτές που αναφέρονται σε μεταλλικές επιφάνειες και υποστρώματα. Μεταξύ των κύριων *NDE* τεχνικών είναι η τεχνική της ραδιογραφίας, με χωρικούς μετασχηματισμούς σε μικρές περιοχές, η υπερηχητική χαρτογράφηση, η οποία είναι

σε θέση να χαρτογραφήσει τριών διαστάσεων επιδράσεις κυρίως με γρήγορη διακριτική ικανότητα με μια λύση μικρότερου βαθμού και η τεχνική διεισδυτικών υγρών η οποία με χρήση  $UV$  φωτισμού φθορισμού έχει  $10\mu m$  χωρική διακριτική ικανότητα. Άλλες ακουστικές τεχνικές, που έχουν εξελιχθεί χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικούς ακουστικούς μεταδότες και τεχνικές λέιζερ. Η μαγνητική μοριακή τεχνική είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος, που σχετίζεται με μικρά μαγνητικά μόρια τα οποία διαλυόμενα σε υγρό με καλά καθορισμένη δυσρευστότητα, συγκεντρώνονται σε μια περιοχή μαγνητικών ατελειών και ρωγμών και χωρίζουν τη μαγνητισμένη επιφάνεια, λόγω της εμφάνισης του μαγνητικού πεδίου σε αυτές τις περιοχές. Οι λύσεις αυτών των μεθόδων εξαρτώνται από το μέγεθος των μαγνητικών στοιχείων τα οποία είναι της τάξης των  $0,1\mu m$ . Η διαρροή της μαγνητικής ροής ( $MAD$ ) μπορεί να θεωρηθεί σαν επαναστατική εξέλιξη της τεχνικής μαγνητικών στοιχείων, από τη στιγμή που τα μαγνητικά πεδία μεγαλώνουν στις μαγνητικές περιοχές όπου οι ρωγμές και οι ατέλειες μπορούν να ανιχνευθούν και να καταγραφούν από ηλεκτρονικό υπολογιστή ύστερα από διαδικασία επιφανειακής μαγνήτισης περίπου  $4\text{ kAm}^{-1}$ . Το  $ECT$  βασίζεται σε άνευ επαφής μετάδοση των μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες προκαλώντας τη δημιουργία δινορρευμάτων στην περιοχή των ρωγμών και των ανωμαλιών σε μικρά βάθη του υλικού. Η παρουσία των ρωγμών και των ατελειών συγκεντρώνει τα δινορρεύματα γύρω από τέτοιες ρωγμές, τα οποία μπορούν ανιχνευτούν σαν τάσεις σημάτων κατά μήκος των πηνίων ανίχνευσης, υποδεικνύοντας το μέγεθος των ατελειών. Το βάθος των μετρήσιμων ρωγμών και ατελειών είναι αυστηρά καθορισμένο από το βάθος της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου, το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα των μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων. Μια λύση μπορεί να είναι της τάξης των  $10\mu m$ .

### 5.1 Αισθητήρες $MAD$ μονού σημείου για $NDT$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται αισθητήρες πεδίου τύπου  $MDL$  που προορίζονται για χρήση  $NDT$ .

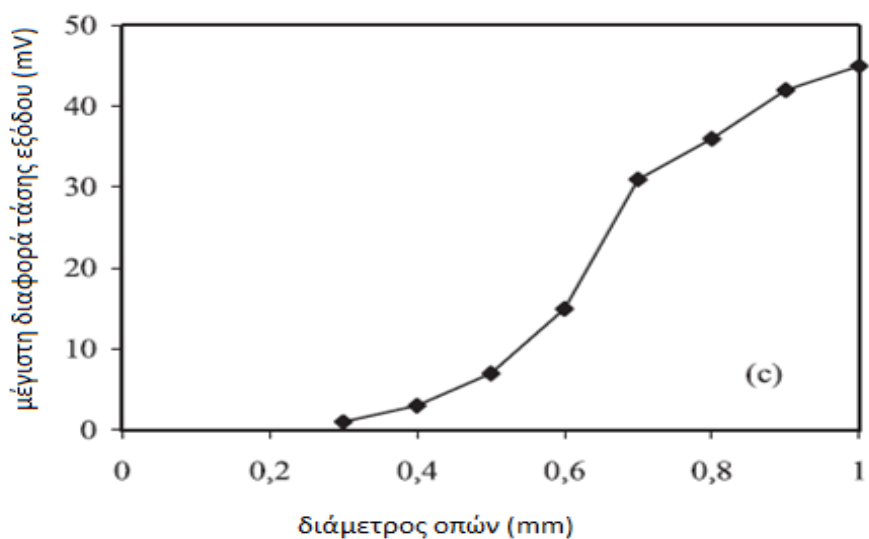
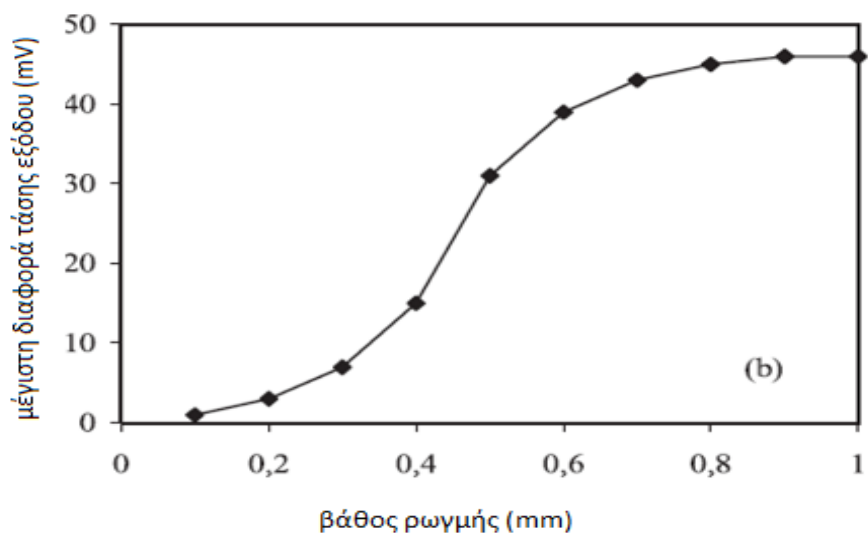
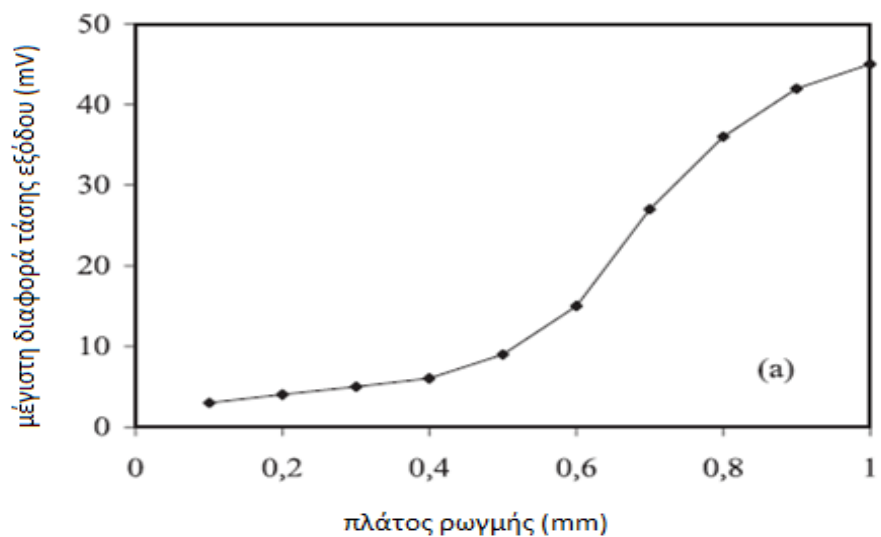


Σχήμα 19 αισθητήρας μονού σημείου βασισμένος στην τεχνική  $MDL$

Η απόκριση ενός αισθητήρα  $MDL$ , ο οποίος χρησιμοποιεί για πυρήνα ένα  $Fe.Si.B.$  σύρμα ανοπτημένο στους  $380^{\circ}$  για  $15min$  σε ατμόσφαιρα  $Ar$ , έχει μετρηθεί για μια μαγνητική επιφάνεια μαγνητισμένη σε  $2\text{ kAm}^{-1}$ , με κοψίματα αναφοράς και οπές. Ο αισθητήριος πυρήνας

κινείται κάθετα προς την υπό εξέταση επιφάνεια. Όταν ο αισθητήρας περνάει από τις ρωγμές, η παλμική τάση εξόδου του *MDL* μειώνεται. Πλησιάζοντας τη ρωγμή το σήμα αρχίζει και μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη *reac to reac* απόκριση. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η εξάρτηση της μέγιστης αλλαγής τάσης στο πλάτος και το βάθος της ρωγμής, όπως και της διαμέτρου της οπής.



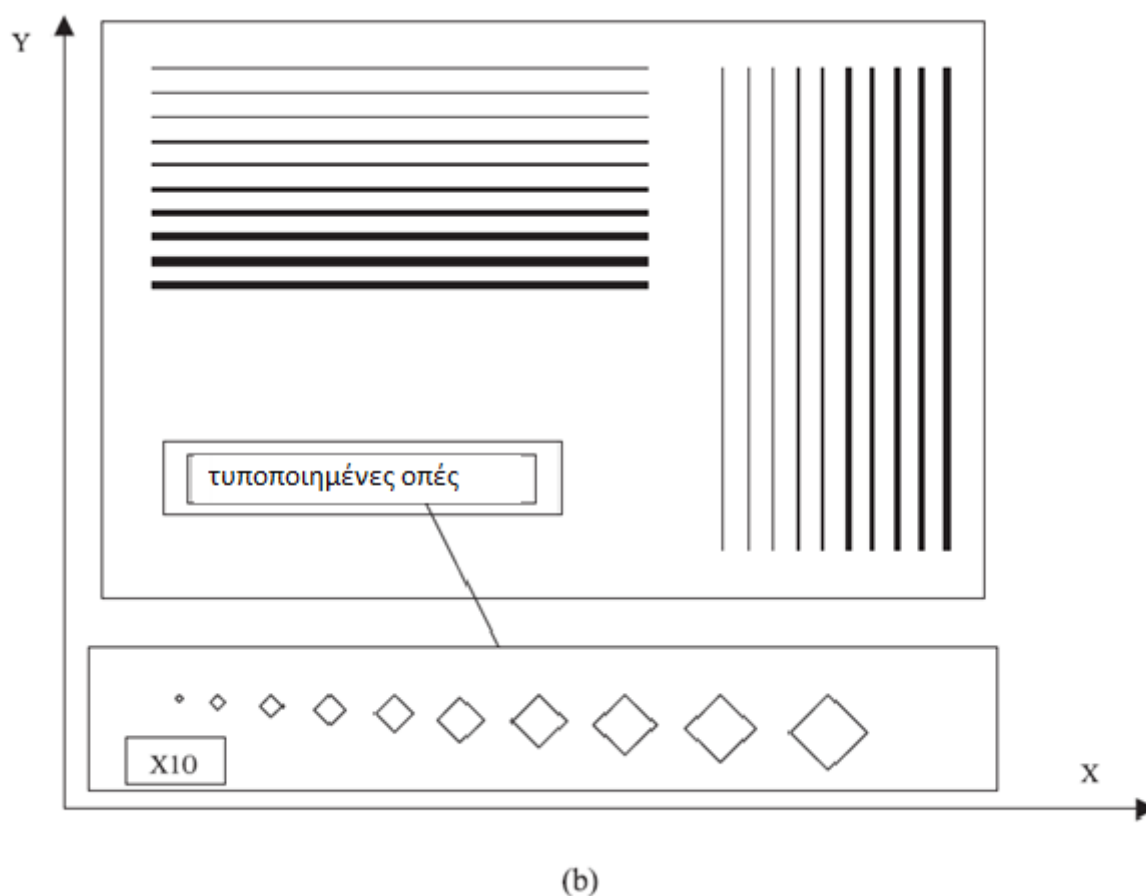


Διάγραμμα 23 εξάρτηση του μονού αισθητήρα MDL NDT από (a)το πλάτος της ρωγμής, (b)το βάθος της ρωγμής, (c)τη διάμετρο των οπών της πρότυπης επιφάνειας Fe-C.

Η μέγιστη απόκριση για αυτούς τους αισθητήρες *NDT* μιας διάστασης, εκδηλώνεται σε άμορφα Fe.Si.B. σύρματα τα οποία χρησιμοποιούνται ως αισθητήρια στοιχεία, τοποθετημένα κάθετα στην υπό εξέταση επιφάνεια. Η δυνατότητα επανάληψης αυτών των αποτελεσμάτων αυξάνεται όταν το πηνίο ανίχνευσης αντί για το πηνίο διέγερσης, είναι κοντά στην υπό εξέταση επιφάνεια.

## 5.2 Μιας διάστασης κατανομή MAD αισθητήρων για *NDT*

Ο προτεινόμενος αισθητήρας για αυτή τη χρήση παρουσιάζεται στο επόμενο σκαρίφημα:

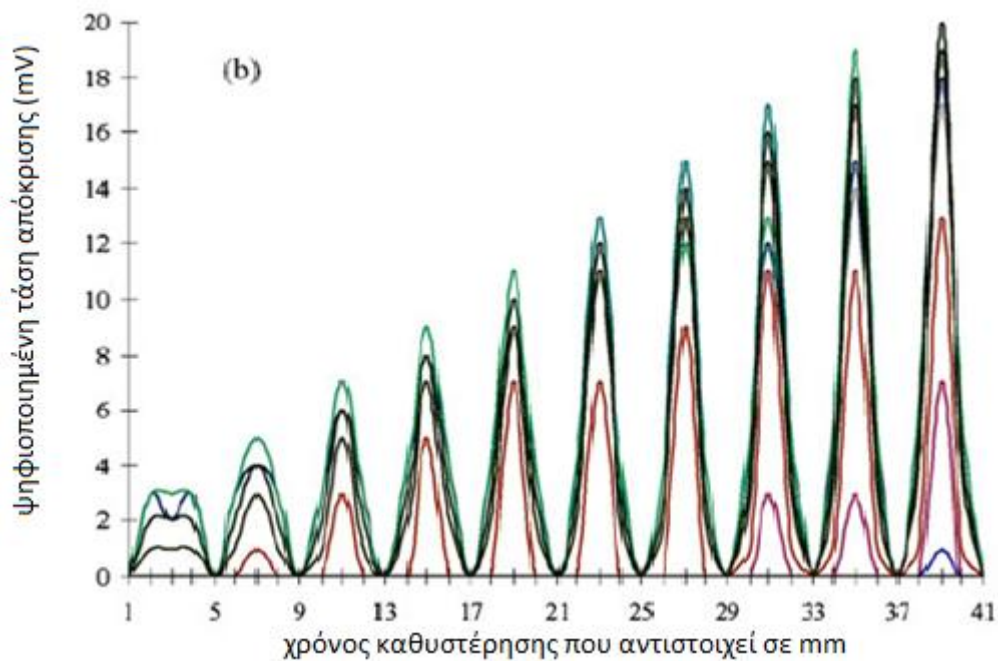
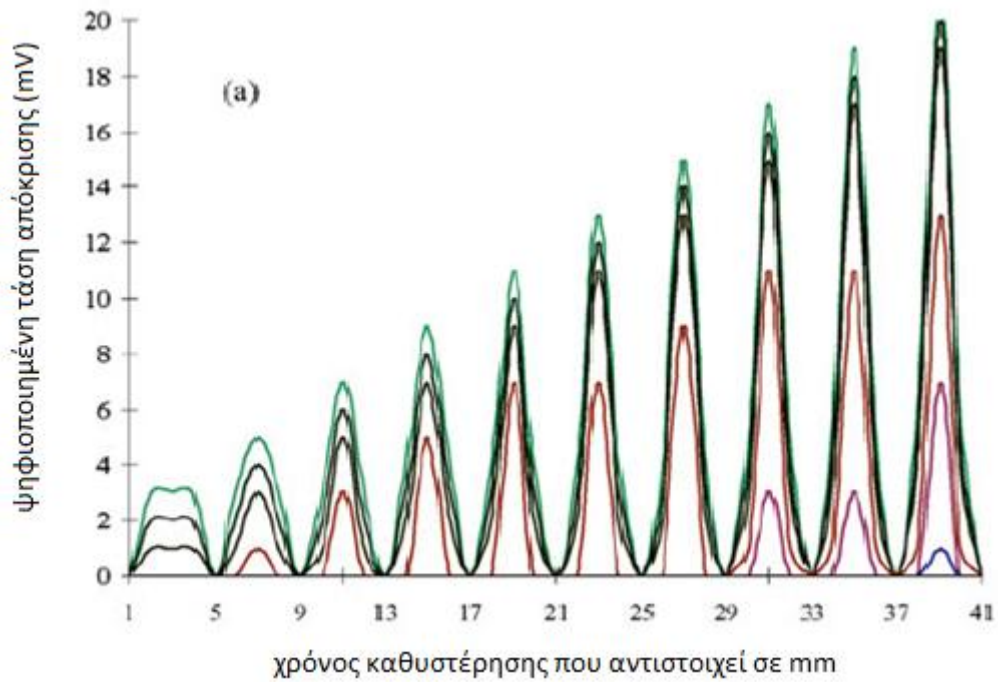


Σχήμα 20 [221]

Ένα μακρύ μαγνητοσυστολικό στοιχείο, κατά προτίμηση σε μορφή σύρματος, χρησιμοποιείται ως *MDL*. Ένα κοινό πηνίο τοποθετείται γύρω από τη μια άκρη του *MDL*, το οποίο χρησιμοποιείται για να μεταδώσει τον παλμό που δημιουργείται από το διαρρέον ρεύμα  $I_e$ , διάρκειας  $1\mu s$ ,  $1\mu s$  περίοδο και  $15A$  μέγιστη επίδραση. Ένα μακρύ πηνίο ανίχνευσης μιας στρώσης είναι τοποθετημένο γύρω από τον *MDL*, ώστε να ανιχνεύει οποιαδήποτε διακύμανση της μαγνητικής ροής. Η διαρροή ενός παλμικού ρεύματος διαμέσου ενός κοντού πηνίου, οδηγεί στη δημιουργία μικροπαραμορφώσεων και τη διάδοση ενός ελαστικού παλμού κατά μήκος του *MDL*. Προϋποθέτοντας ότι το περιβάλλον πεδίο γύρω από τον *MDL*, είναι ομοιόμορφο, και το στοιχείο του *MDL* είναι ελαστικά ομοιόμορφο, το πηνίο ανίχνευσης μπορεί

να ανιχνεύσει μόνο δυο χαμηλής τάσης κορυφές, μια για κάθε άκρη του μακριού πηνίου ανίχνευσης. Κατά την προσέγγιση της αισθητήριας διάταξης σε μια μεταλλική επιφάνεια, άνευ ρωγμών ή ατελειών, η λειτουργία του *MDL* δεν επηρεάζεται σημαντικά, οδηγώντας πάλι σε δυο κορυφές τάσης αποκρινόμενη στα άκρα του μακριού πηνίου ανίχνευσης.

Σε μια πειραματική διάταξη είναι σαν αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 20, αυτές οι ατέλειες εισάγουν ένα συμπληρωματικό πεδίο, το οποίο επηρεάζει την ομοιομορφία του πεδίου που παρουσιάζεται κατά μήκος του *MDL*. Ως εκ τούτου το εύρος της παλμικής τάσης εξόδου, ανταποκρινόμενο σε δοσμένες επιρροές, καθορίζει το μέγεθος της ρωγμής, ενώ ο χρόνος καθυστέρησης καθορίζει τη θέση της ρωγμής. Αν οι προαναφερθείσες ατέλειες, είναι συγκρίσιμες ή μικρότερες σε μέγεθος από τη διατομή της γραμμής καθυστέρησης, μια μονή παλμική τάση εξόδου, θα ανιχνευτεί από το πηνίο ανίχνευσης. Ειδάλλως στο πηνίο ανίχνευσης εμφανίζονται δυο ασυνεχείς και μικρότερου εύρους παλμικές τάσεις οι οποίες έχουν σχέση μόνο με τα άκρα της ρωγμής. Η ύπαρξη τέτοιων ατελειών κατά μήκος του άξονα του *MDL*, έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ασυνεχών ελαστικών παραμορφώσεων στον *MDL*, στα σημεία διασταύρωσης του *MDL* με τις ατέλειες, οι οποίες μπορούν ανταποκρινόμενες να ανιχνευθούν σαν ακολουθία παλμικών τάσεων στο πηνίο ανίχνευσης. Η μετακίνηση του *MDL* κατά μήκος του δοκιμίου, έχει σαν αποτέλεσμα την χαρτογράφηση αυτών των ατελειών. Αν αυτές οι ατέλειες είναι παράλληλες με τον άξονα του *MDL*, ή μεγαλύτερες από τη διατομή του *MDL*, μόνο τα όρια των ατελειών συμβάλλουν στην παραγωγή ελαστικών παραμορφώσεων. Έτσι μια δεύτερη διαδικασία χαρτογράφησης, ορθογωνική στην πρώτη, απαιτείται για να καθοριστούν μέσω συμπερασμάτων οι τοπογραφίες των ατελειών. Η ανάλυση τέτοιων διαδικασιών αίσθησης και η ανταπόκριση τέτοιων πειραματικών διαδικασιών χαρακτηρισμού, παρουσιάστηκαν παραπάνω. Μετακινώντας τον *MDL* παράλληλα με τον *Y* άξονα, μπορούν να ανιχνευτούν οι οπές ως τα παράλληλα κοψίματα στον άξονα *X*. Μετακινώντας το σύρμα του *MDL* παράλληλα στον *X* άξονα, οι οπές ανιχνεύονται ως τα παράλληλα κοψίματα στον *Y* άξονα. Ο συνδυασμός αυτών των δυο αποκρίσεων δίνει τη χαρτογράφηση των ρωγμών και των ατελειών της υπό εξέταση επιφάνειας. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των διατάξεων που προαναφέρθηκαν

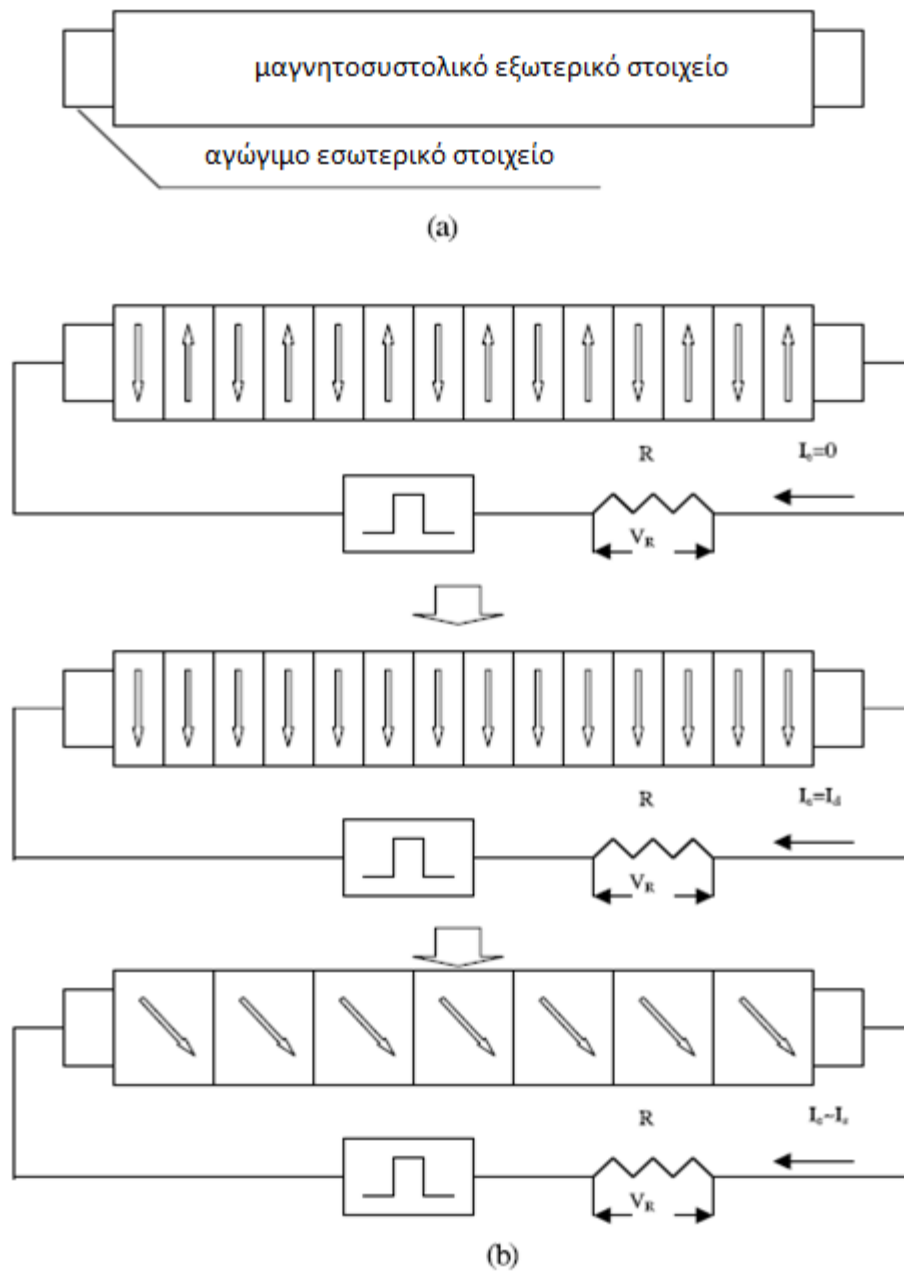


Διάγραμμα 24(a)ψηφιοποιημένη έξοδος του αισθητήρα για τη χαρτογράφηση των οπών παράλληλα με τον  $\gamma$  άξονα και (b) ψηφιοποιημένη έξοδος του αισθητήρα για τη χαρτογράφηση των οπών κάθετα στον  $\gamma$  άξονα

Παρά τα αξιόπιστα και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα το πρόβλημα της χωρικής διακριτικής ικανότητας (*spatial resolution*) παραμένει και πρέπει να αντιμετωπιστεί. Η διάσπαση των ρωγμών που παρατηρήθηκαν ήταν της τάξης των 5 mm.

### 5.3 Ένα νέο υλικό MDL, για MAD σε NDT

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα νέο υλικό το οποίο προσφέρει βελτιωμένη χωρική διακριτική ικανότητα για εφαρμογές NDT.



Σχήμα 21 η νέα μαγνητοελαστική συσκευή. (α)η συσκευή, (β)η λειτουργία της συσκευής. Χωρίς τη μετάδοση ρεύματος μέσω των αγωγών, δεν υπάρχει μακροσκοπική μαγνήτιση. Το διαρρέον ρεύμα είναι πάνω από μια κρίσιμη τιμή ικανή να προκαλέσει κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος, επιδρά στη μαγνήτιση του σύρματος. Η τροφοδοσία με παλμικό ρεύμα κοντά στα επίπεδα κορεσμού, έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μικροπαραμορφώσεων.

Ένας αγωγίμος κύλινδρος χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα ενός λεπτού μαγνητοσυστολικού σωλήνα. Κατά τη διαρροή παλμικού ρεύματος μέσα από τον αγωγό, ο μαγνητοσυστολικός λεπτός σωλήνας διεγείρεται περιφερειακά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροπαραμορφώσεων κατά το μήκος του. Ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία για την εξασφάλιση μαγνητοελαστικής ομοιομορφίας, και υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν

μαγνητικές ανωμαλίες κατά το μήκος του μαγνητοσυστολικού σωλήνα, στα άκρα του παράγονται οι διαδιδόμενες μικροπαραμορφώσεις. Κατά την παρουσία μαγνητικών ανωμαλιών, τα οποία δημιουργούνται από τις ρωγμές στη μαγνητική επιφάνεια, σπάει η μαγνητική συμμετρία με αποτέλεσμα την ασυνεχή διάδοση των μαγνητικών παλμών κατά μήκος του υλικού. Τέτοια μαγνητοσυστολικά σύρματα έχουν εξελιχθεί με τη χρήση  $1\text{mm}$  σύρματος  $\text{Cu}$  (άνευ οξυγόνου) ως αγώγιμο υποστρώματος, ενώ δυο κυλινδρικά φιλμ  $\text{Ni}$  και  $\text{Fe}$ , πάχους  $500\text{nm}$ , διαδοχικά έχουν εναποτεθεί με ηλεκτροαπόθεση πάνω στο σύρμα χαλκού. Ύστερα από τη διαδικασία ανόπτησης με θέρμανση ρεύματος παρουσία μηχανικού φορτίου, η συσκευή παρουσιάζει αποδεκτή μαγνητοσυστολική απόκριση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζεται κατά την εφαρμογή τάσης στο σύρμα, όπου αυξάνεται το σήμα του  $MDL$ , γεγονός που υποδηλώνει τον αρνητικό χαρακτήρα του συντελεστή μαγνητοσυστολής των στρώσεων  $\text{Ni-Fe}$ .

Ο αισθητήρας που βασίζεται σε αυτή τη νέα συσκευή, μπορεί να ανιχνεύσει ρωγμές πλάτους  $0,2\text{mm}$  και βάθους  $0,2\text{mm}$ , με διακριτική ικανότητα μέτρησης  $1\text{mm}$ . Η απόκριση του αισθητήρα μεγιστοποιείται με εφαρμογή τάσης πριν τη χρήση.

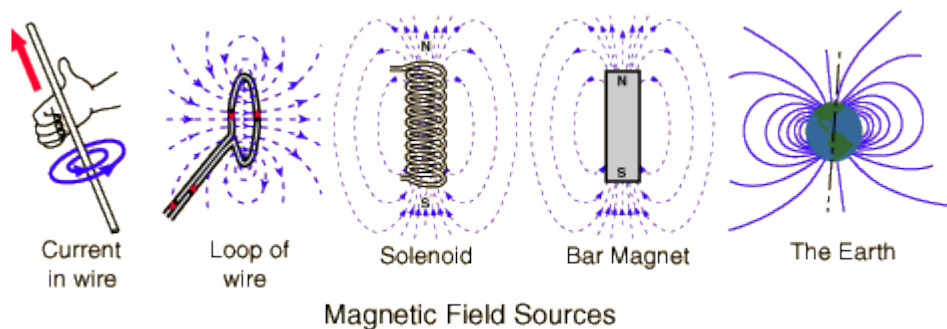
Μια διαδικασία βαθμονόμησης του αισθητήρα, είναι η ρύθμιση των συνθηκών εφαρμογής τάσης πριν τη χρήση, παρατηρώντας τη βελτίωση της απόκρισης του αισθητήρα. Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρήση εξελιγμένων μικροσυρμάτων με επικάλυψη υάλου. Αυτά τα σύρματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μαγνητοσυστολικά υλικά ύστερα από προσαρμογή των ιδιοτήτων τους με χρήση υψηλής συχνότητας ( $10\text{MHz}$ ) ανόπτηση θέρμανσης με ρεύμα παρουσία μαγνητικού πεδίου. Από τη στιγμή που η διάμετρός τους είναι της τάξης των  $5-7\mu\text{m}$  και η ομοιομορφία της διατομής τους είναι της τάξης των  $100\text{ppm}$ , είναι εφικτό η αναμενόμενη διακριτική ικανότητα και η αβεβαιότητα να είναι τόσο καλή όσο  $10\mu\text{m}$  και  $200\text{ppm}$  αντίστοιχα.

## 6 Μαγνητικά πεδία

Τα μαγνητικά πεδία παράγονται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία μακροσκοπικά διαρρέουν καλώδια, ή μικροσκοπικά συνεργάζονται με τα ηλεκτρόνια σε ατομικές τροχιές. Το μαγνητικό πεδίο καθορίζεται με όρους της δύναμης της κινούμενης φόρτισης με βάση τη δύναμη του νόμου του Lorentz. Οι πηγές των μαγνητικών πεδίων είναι κατά βάση διπολικές, έχοντας ένα βόρειο και ένα νότιο μαγνητικό πόλο. Στο διεθνές σύστημα ως μονάδα μαγνητικού πεδίου έχει καθοριστεί το Tesla.

$$F_{\text{magnetic}} = qVB \text{ (Newton X second)/(Coulomb X meter)}$$

$$1 \text{ Tesla} = 10000 \text{ Gauss}$$

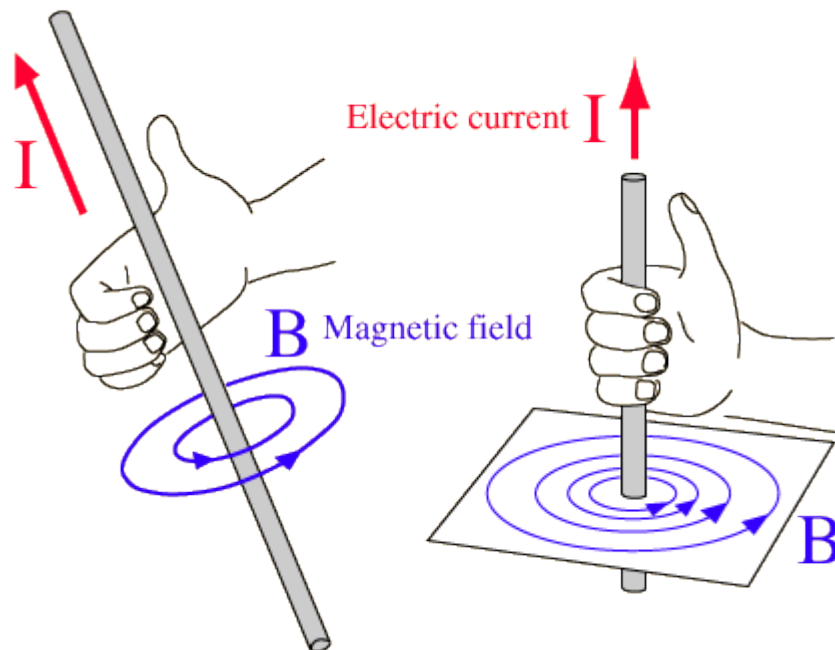


Εικόνα 16 πηγές μαγνητικών πεδίων[227]

## 6.1 Είδη μαγνητικών πεδίων

### 6.1.1 Μαγνητικά πεδία ρεύματος

Οι γραμμές των μαγνητικών πεδίων που σχηματίζονται από τη διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μακρύ καλώδιο, σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους γύρω από το καλώδιο. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετη στο καλώδιο και καθορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

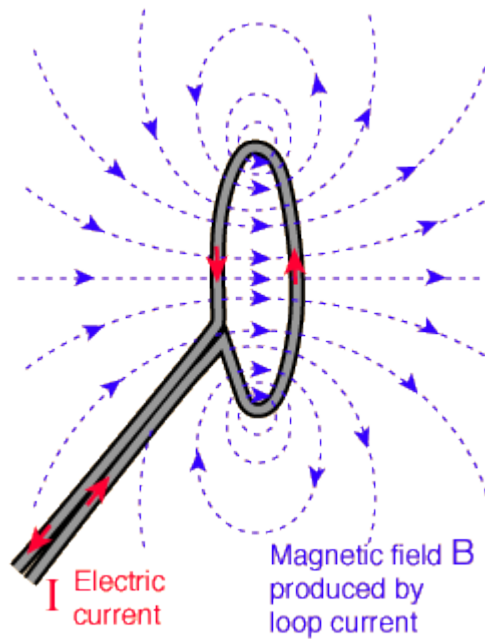


Εικόνα 17

### 6.1.2 Μαγνητικό πεδίο από διαρρέοντα βρόγχο

Όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα καλώδιο σε σχήμα βρόγχου, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι περισσότερο συγκεντρωμένο-ισχυρό στο κέντρο του βρόγχου, σε σχέση με το εξωτερικό του βρόγχου. Με τη χρήση πολλών ομόκεντρων κύκλων, δημιουργείται ένα πιο ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το σωληνοειδές.

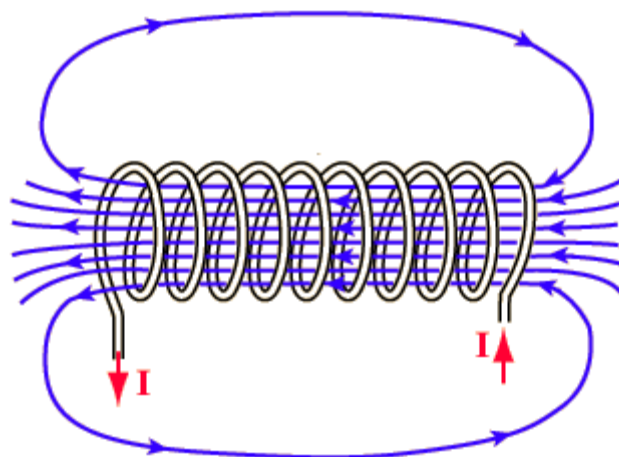




Εικόνα 18

### 6.1.3 Σωληνοειδές

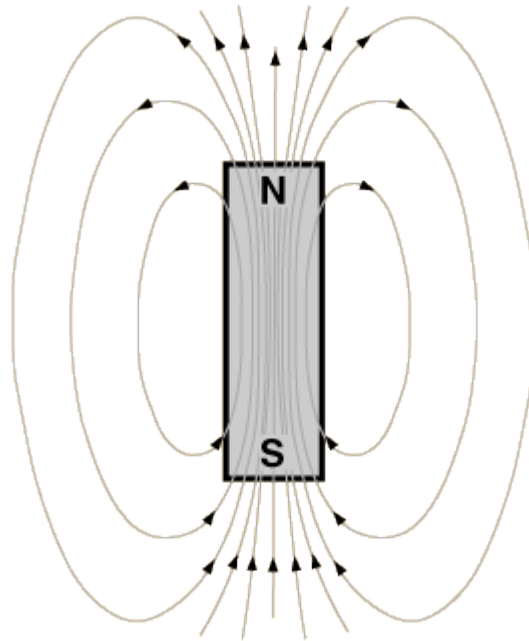
Ένα μακρύ πηνίο από καλώδιο-σύρμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο αντίστοιχο με αυτό του μαγνήτη σε σχήμα ράβδου. Τέτοια πηνία ονομάζονται σωληνοειδή και έχουν τεράστιο εύρος πρακτικών εφαρμογών. Το πεδίο μπορεί να ισχυροποιηθεί με την προσθήκη πυρήνα σιδήρου. Τέτοιοι πυρήνες είναι τυπικοί ηλεκτρομαγνήτες.



Εικόνα 19

#### 6.1.4 Μαγνήτης σε σχήμα ράβδου

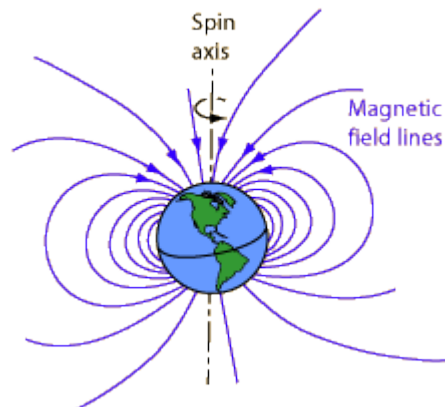
Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου της ράβδου, σχηματίζουν κλειστές γραμμές. Με τη συνθήκη, οι γραμμές του πεδίου έχουν διεύθυνση από το βόρειο στο νότιο πόλο του μαγνήτη. Μόνιμοι μαγνήτες μπορούν να κατασκευαστούν από φερομαγνητικά υλικά.



Εικόνα 20

### 6.1.5 Το μαγνητικό πεδίο της Γης

Το μαγνητικό πεδίο της γης είναι παρόμοιο με αυτό της μαγνητικής ράβδου, με κλίση  $11^\circ$  από τον άξονα περιστροφής της. Μαγνητικά πεδία περικυκλώνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα, οπότε γίνεται η υπόθεση ότι επαναλαμβανόμενα ηλεκτρικά ρεύματα στον μεταλλικό πυρήνα της γης είναι η πηγή του μαγνητικού πεδίου της. Ένας διαρρεόμενος βρόχος δίνει ένα πεδίο όμοιο με αυτό της γης. Το μαγνητικό πεδίο μετράται στην επιφάνεια της, είναι περίπου μισό Gauss και διαγράφοντας ελλειπτική τροχιά ως προς τη γη, καταλήγει στο βόρειο ημισφαίριο. Η τιμή της μαγνήτισης ποικίλει στην επιφάνεια της γης, έχοντας ένα εύρος από 0,3 έως 0,6 Gauss.

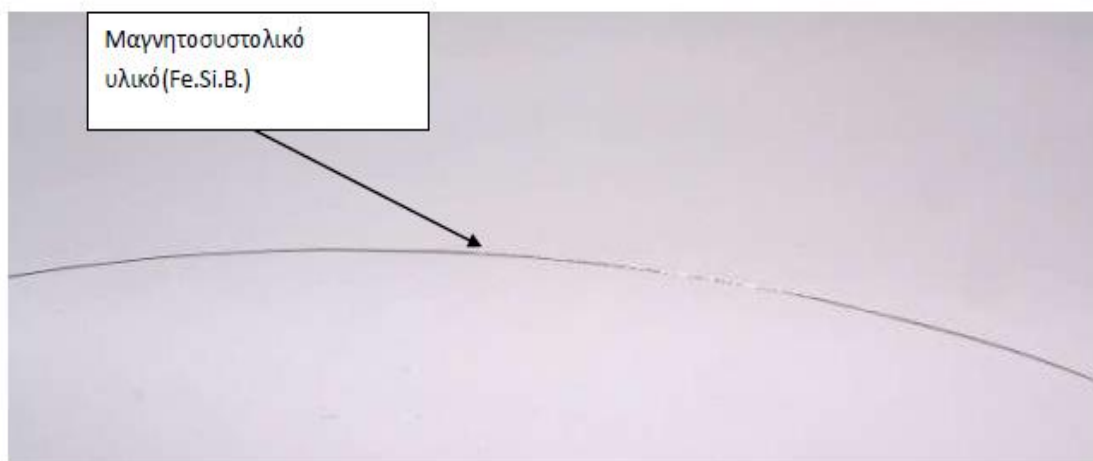


Εικόνα 21

## 7 Πειραματική διάταξη

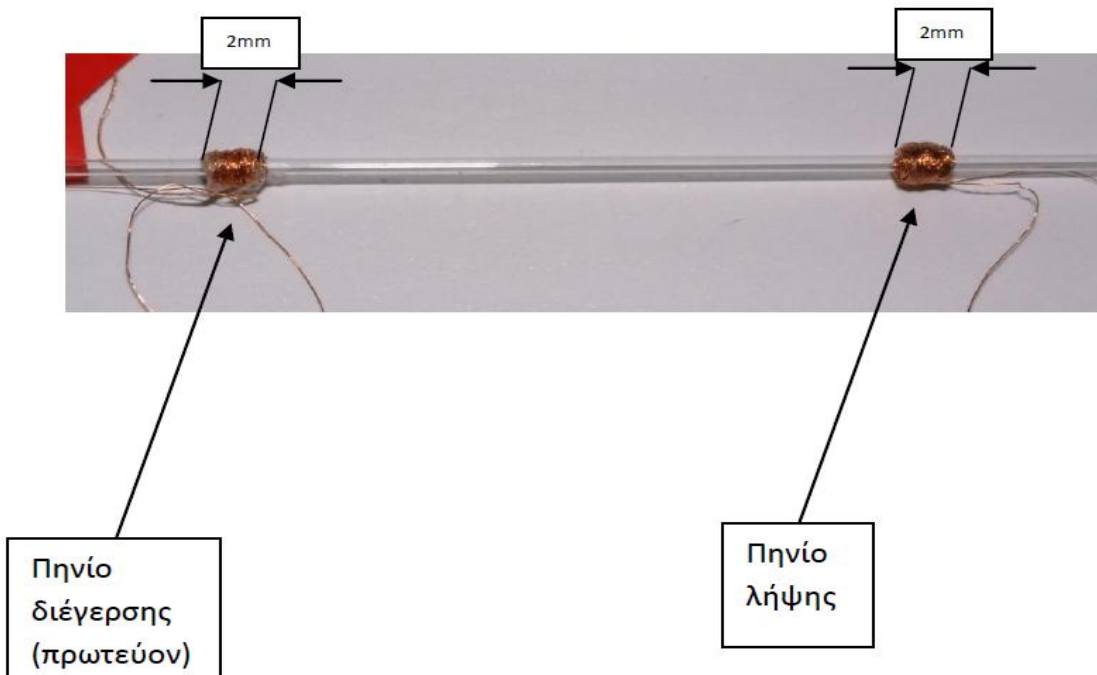
Για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν ως μαγνητοσυστολικό υλικό άμορφο σύρμα Fe.Si.B., ενώ για την κατασκευή των πηνίων διέγερσης, λήψης, χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0,1mm και για το πηνίο προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0,25mm.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μαγνητοσυστολικό υλικό που προαναφέρθηκε.

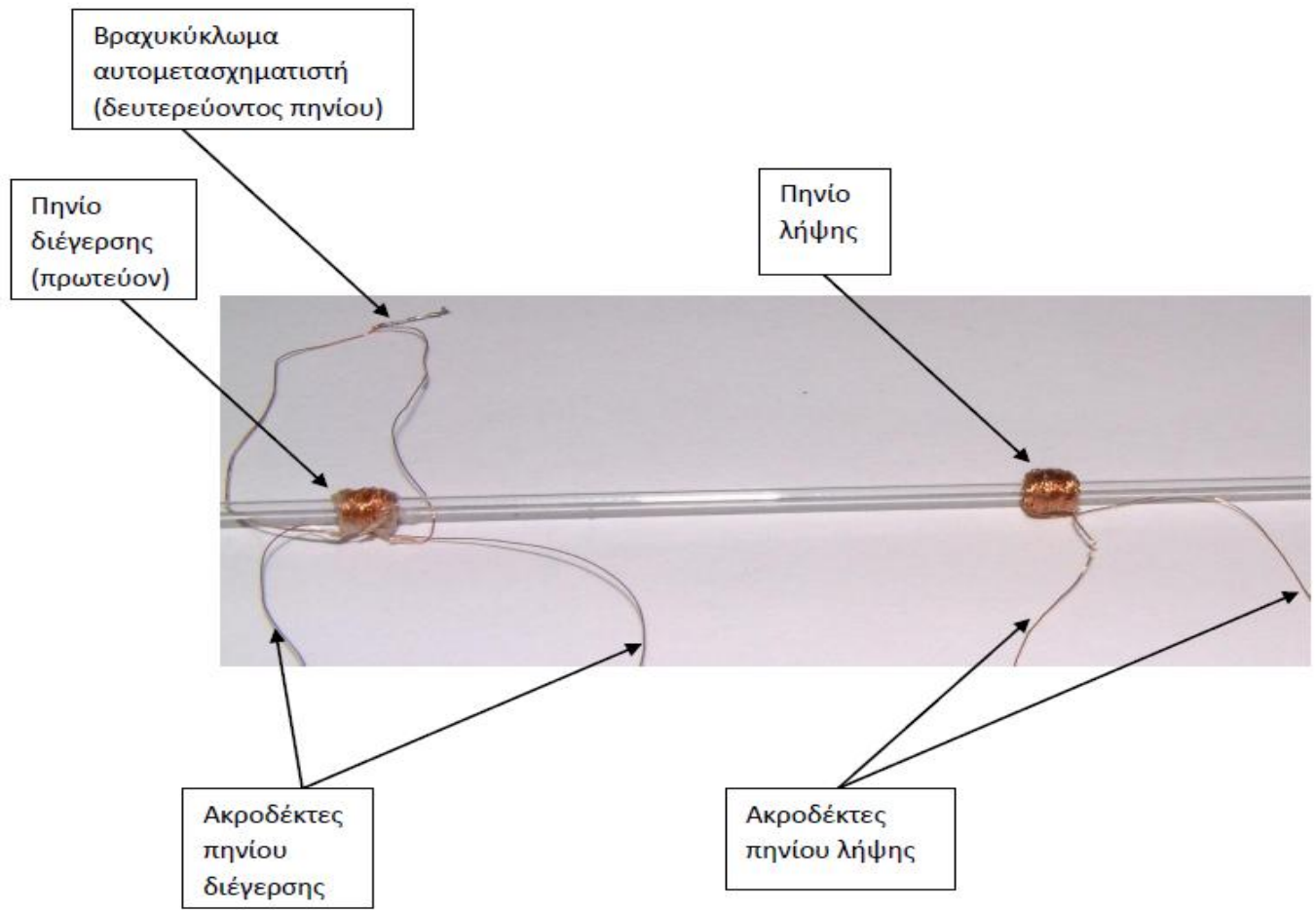


Εικόνα 22

Στις δυο άκρες ενός γυάλινου σωλήνα μήκους 100mm και διαμέτρου 1,2mm, κατασκευάστηκαν τρία πηνία από χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0,1mm και μήκους 2mm. Το πρώτο πηνίο αποτελείται από 100 σπείρες ενώ τα άκρα του είναι βραχυκυκλωμένα με καλάι, το δεύτερο πηνίο αποτελείται επίσης από 100 σπείρες και είναι τυλιγμένο γύρω από το πρώτο. Το τρίτο πηνίο αποτελείται συνολικά από 200 σπείρες και είναι τυλιγμένο στο άλλο άκρο του γυάλινου σωλήνα, σε απόσταση 35mm από το τελείωμα του πρώτου πηνίου. Μέσα στο γυάλινο σωλήνα τοποθετήθηκε το μαγνητοσυστολικό υλικό. Τα πηνία που κατασκευάστηκαν απεικονίζονται στην παρακάτω φωτογραφία.



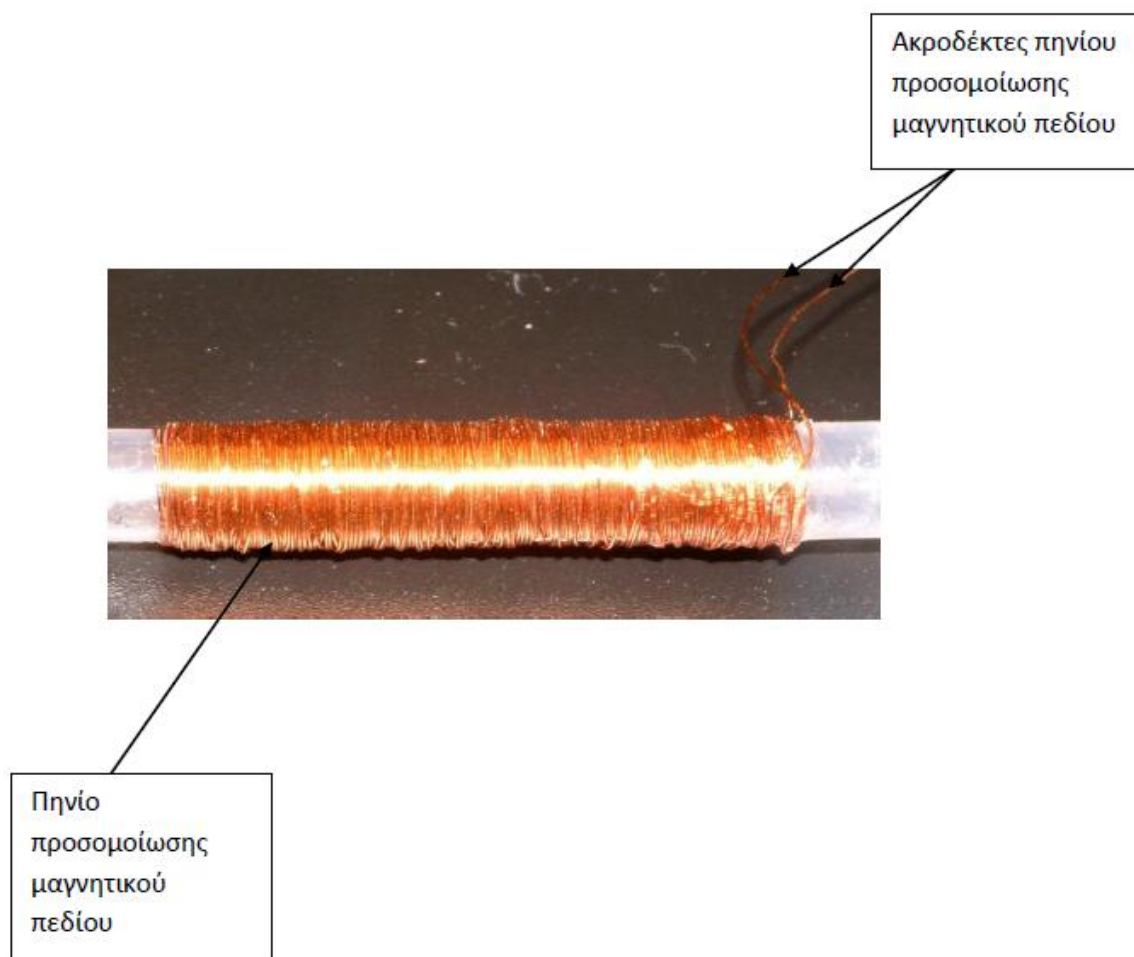
Εικόνα 23



Εικόνα 24

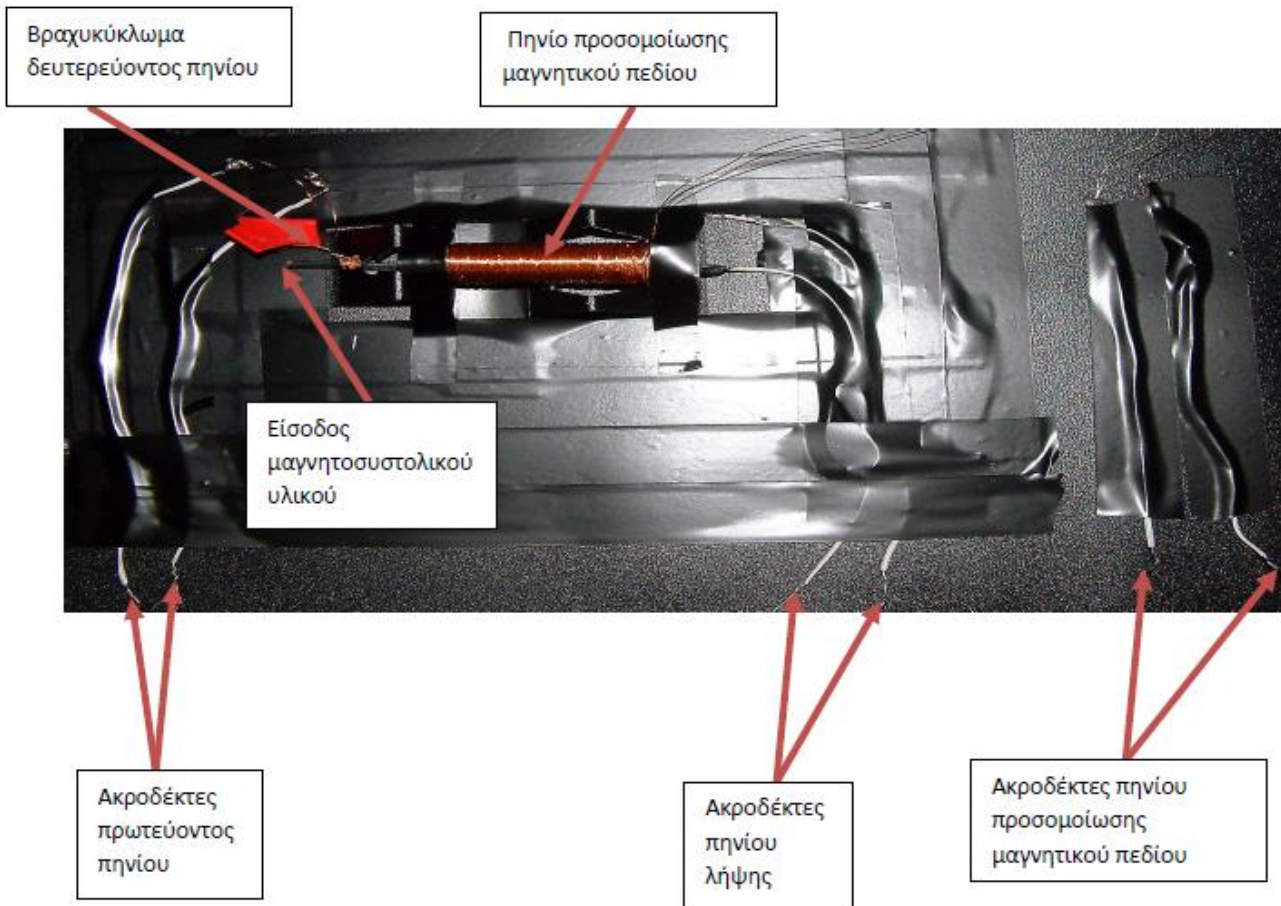
Στους ακροδέκτες του κάθε πηνίου, αφού καθαρίστηκαν από την επικάλυψη που έχουν από την κατασκευή τους, κολλήθηκαν καλώδια με τη χρήση καλαί, ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική η σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τους ακροδέκτες των πηγών και των οργάνων μέτρησης.

Στη φωτογραφία που ακολουθεί απεικονίζεται το πηνίο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση μαγνητικού πεδίου. Είναι κατασκευασμένο από 400 σπείρες χάλκινου σύρματος διαμέτρου 0,25mm και έχει μήκος 35mm.



Εικόνα 25

Λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν τα χάλκινα σύρματα, και για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας του πειράματος, τα μέρη που απαρτίζουν τη διάταξη τοποθετήθηκαν σε σταθερές θέσης σε πλαστική βάση, όπως φαίνεται παρακάτω.



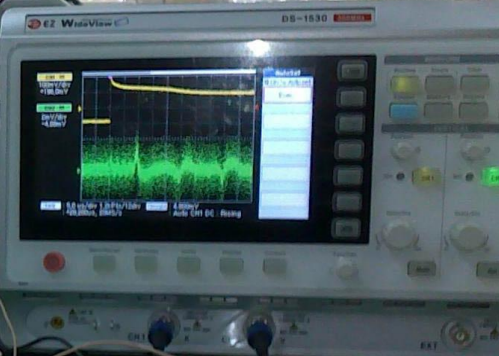
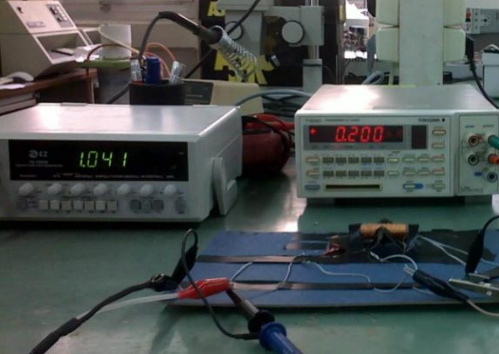


Εικόνα 26

Το άμορφο σύρμα χρησιμοποιείται ως μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης. Στους ακροδέκτες του πηνίου διέγερσης συνδέθηκε γεννήτρια τετραγωνικού παλμού συχνότητας 1kHz, και οι ακροδέκτες του πρώτου καναλιού του παλμογράφου. Οι παλμοί που διαρρέουν το πηνίο διέγερσης δημιουργούν ένα μαγνητικό παλμικό πεδίο κατά μήκος του άμορφου μαγνητοσυστολικού σύρματος. Λόγω του μαγνητοσυστολικού φαινομένου το προαναφερθέν μαγνητικό παλμικό πεδίο, παράγει έναν ακουστικό παλμό στην περιοχή του πηνίου διέγερσης. Ο ακουστικός παλμός διαδίδεται κατά μήκος της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης. Η παρουσία μαγνητοελαστικού κύματος στην περιοχή του πηνίου λήψης, δημιουργεί μια αλλαγή στη μαγνητική ροή στον *MDL* λόγω του αντίστροφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου, το οποίο ανιχνεύεται στο πηνίο λήψης ως παλμική τάση εξόδου. Η παλμική τάση εξόδου μετρήθηκε, με τη χρήση ψηφιακού παλμογράφου, στις δυο κορυφές του παλμού σε κάθε στάδιο του πειράματος.

Το πηνίο προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου τοποθετήθηκε συμμετρικά ως προς το πηνίο λήψης. Στους ακροδέκτες του πηνίου λήψης συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του δεύτερου καναλιού του παλμογράφου. Η τροφοδοσία του πηνίου προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου έγινε από πηγή *dc* εύρους τιμών ρεύματος από 0,01 μειούμενου έως -0,008A. Το πείραμα περιελάμβανε δυο μέρη: τη μέτρηση των κορυφών των παλμικών τάσεων που

πραγματοποιήθηκε με ορθή και με αντίστροφη πολικότητα στο πηνίο προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου.

	Γεννήτρια τετραγωνικού παλμού
	Πηγή τροφοδοσίας εξωτερικού πηνίου για την προσομοίωση dc πεδίου
	Παλμογράφος
	Πειραματική διάταξη

Πίνακας 1

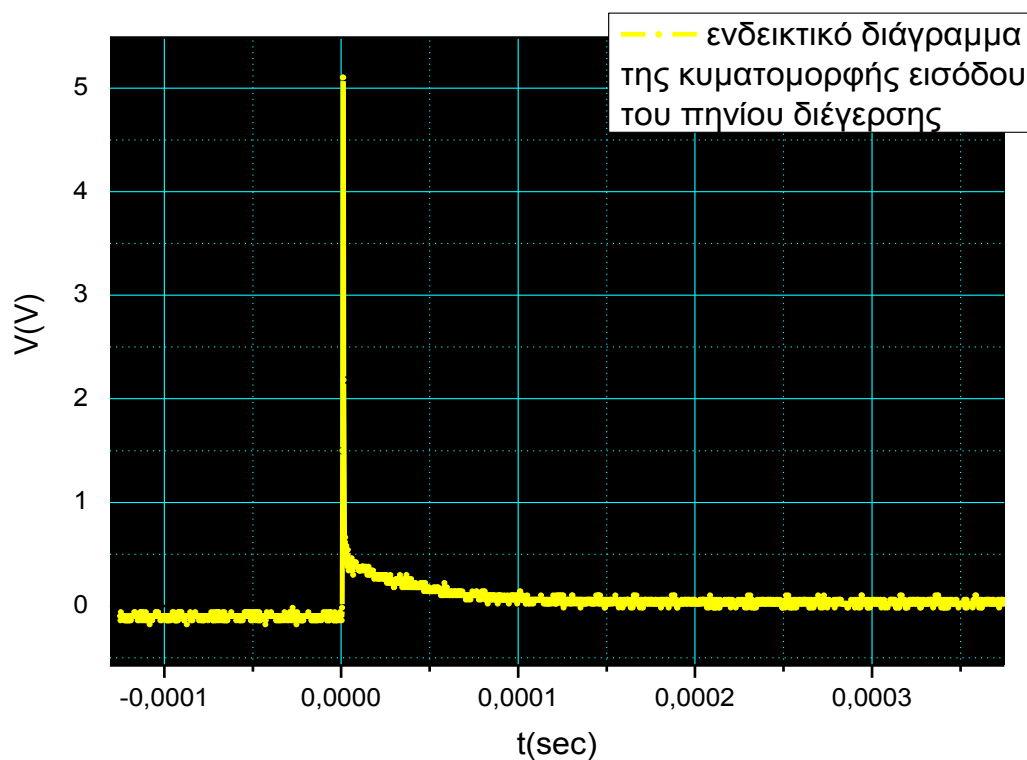


## 8 Πειραματικές μετρήσεις

### 8.1 Ορθή πολικότητα

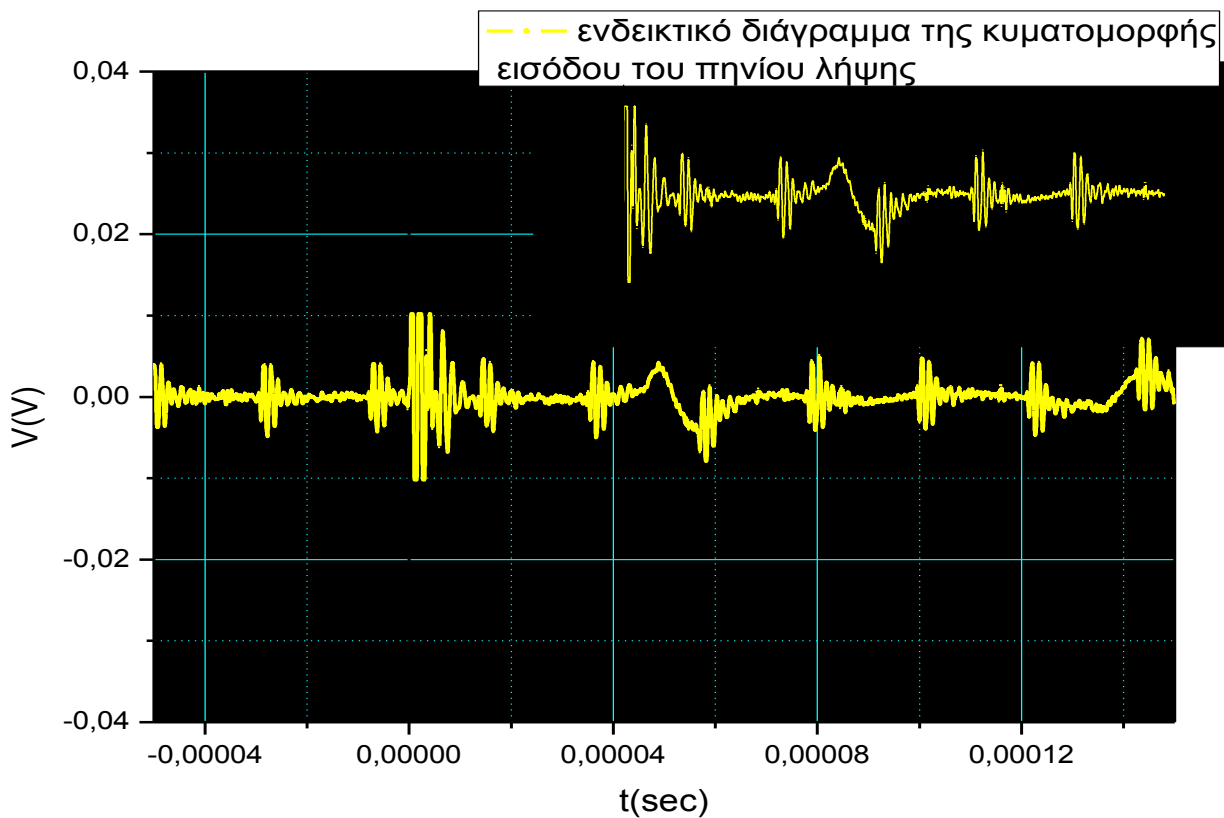
#### 8.1.1 Διαγράμματα παλμού

Ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα, της τάσης με το χρόνο, τα οποία αναπαριστούν τις κυματομορφές των εισόδων του παλμογράφου.

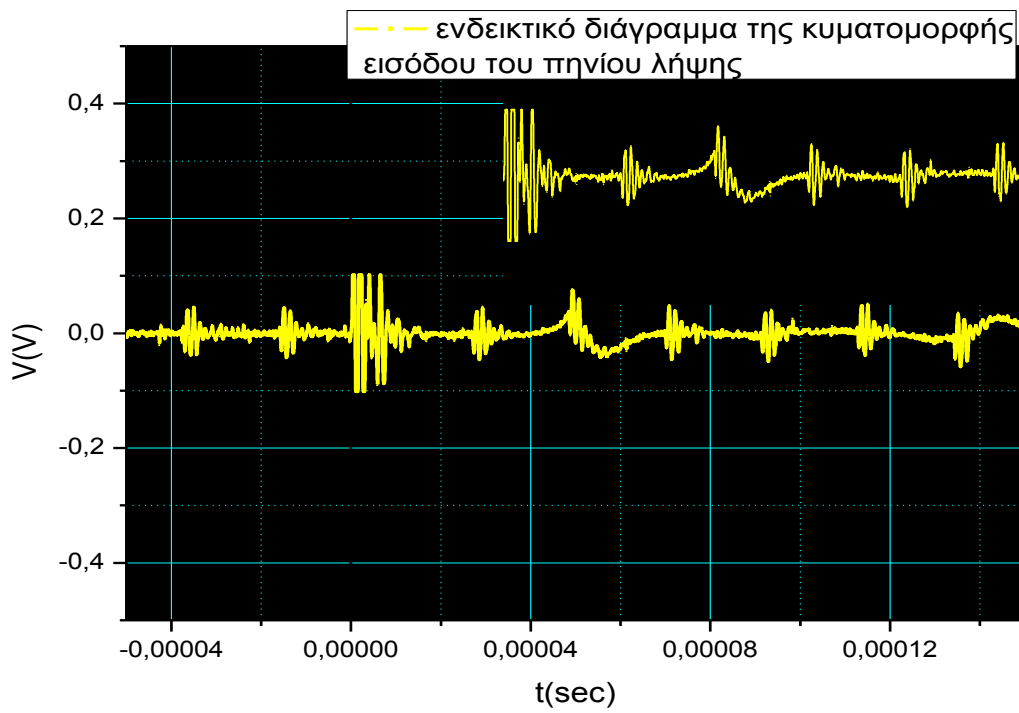


Διάγραμμα 25

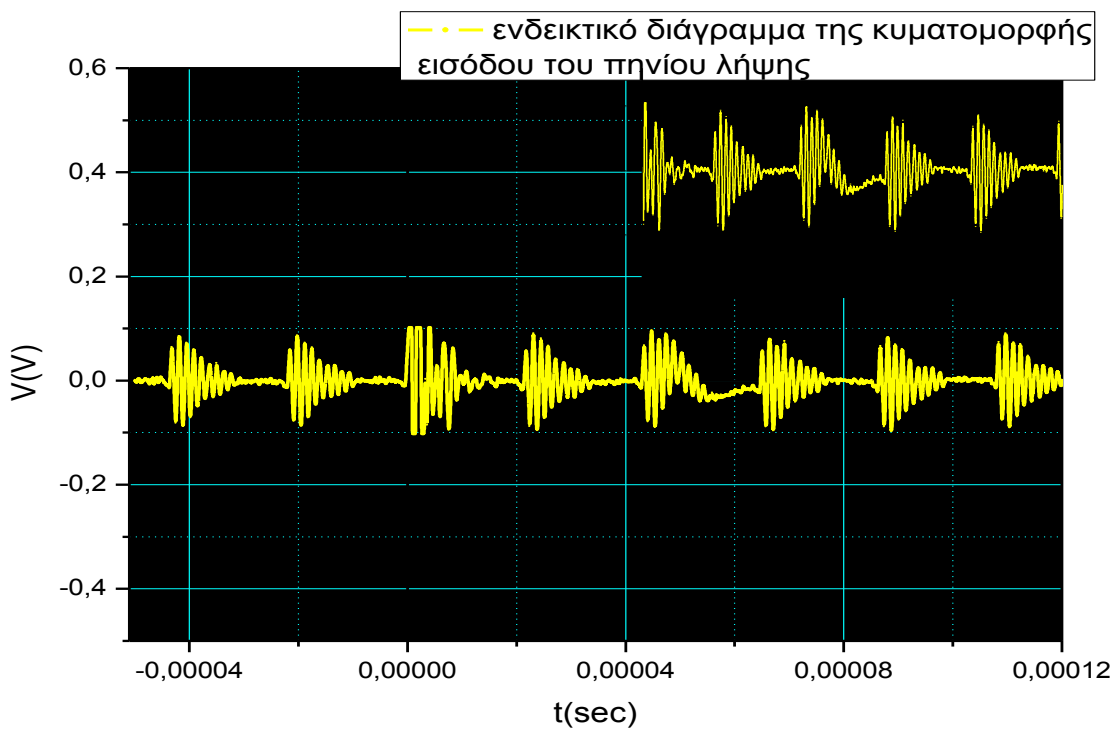
Τα διαγράμματα 26 και 27 απεικονίζουν τη μορφή του παλμού στις δυο αρχικές μετρήσεις, όπου ο παλμός έχει την ίδια μορφή, ενώ στα διαγράμματα 28 και 29 απεικονίζεται ο παλμός στις δυο τελευταίες μετρήσεις, όπου έχει πάρει αντίστροφη μορφή.



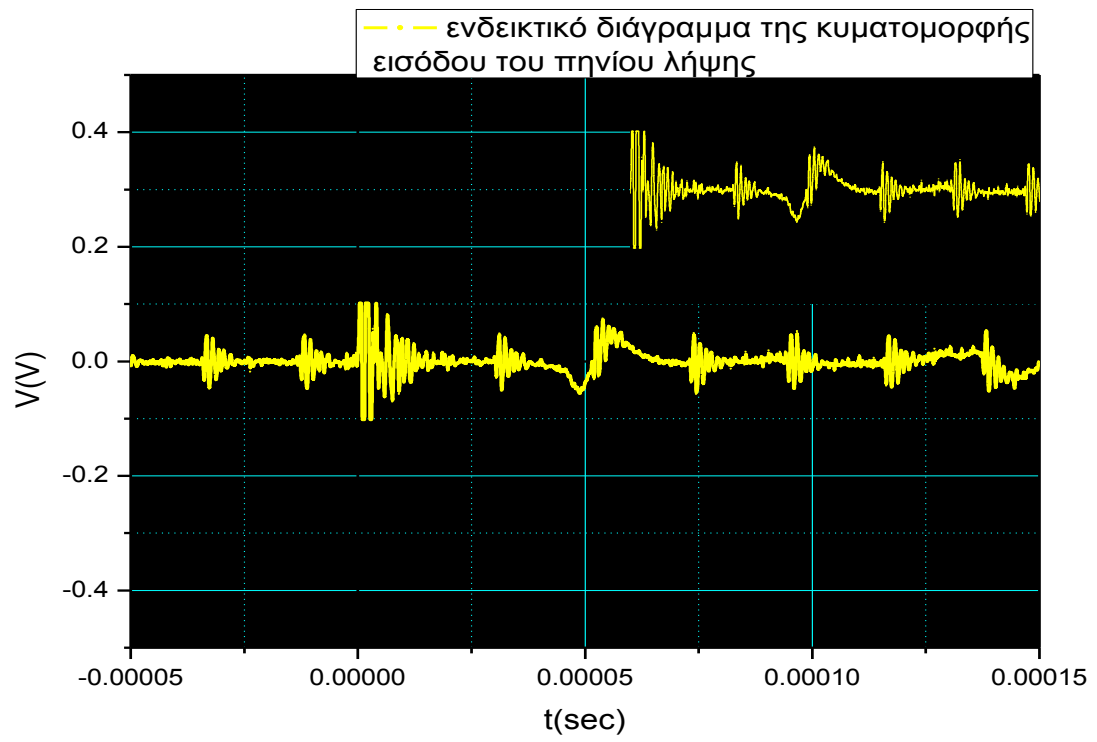
Διάγραμμα 26



Διάγραμμα 27



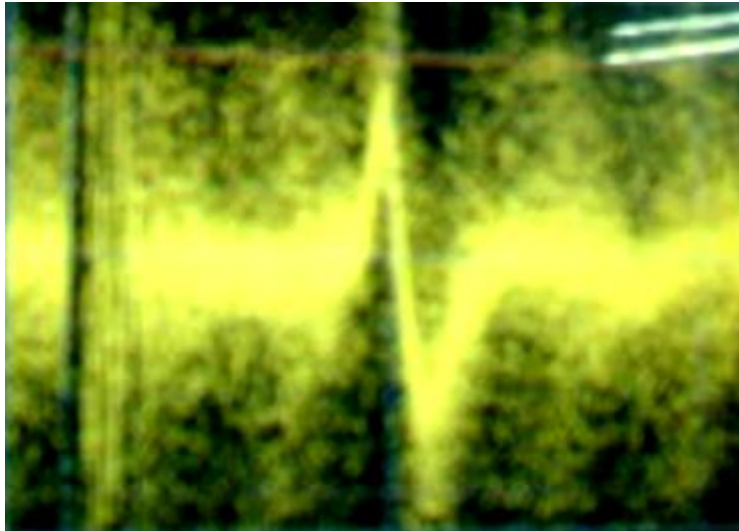
Διάγραμμα 28



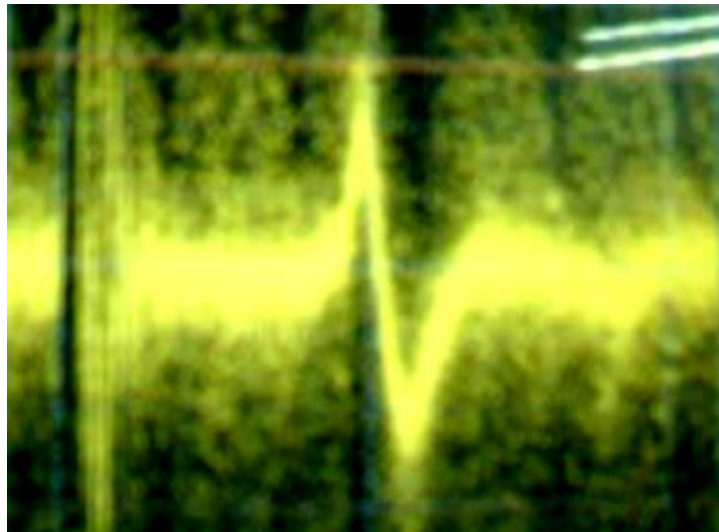
Διάγραμμα 29

### 8.1.2 Εικόνες παλμού

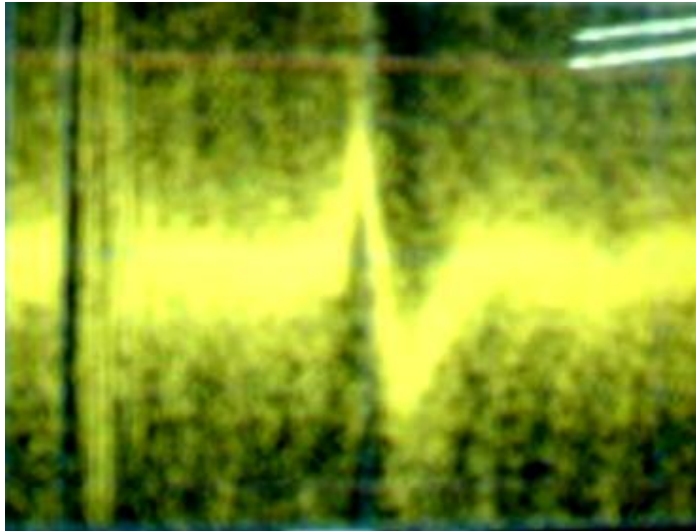
Οι παρακάτω φωτογραφίες απεικονίζουν τον παλμό σε διαδοχικά στάδια μέτρησης της παλμικής τάσης εξόδου κατά τη διάρκεια του πειράματος, δηλαδή σε κάθε βήμα που άλλαζε το ρεύμα τροφοδοσίας του πηνίου προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου.



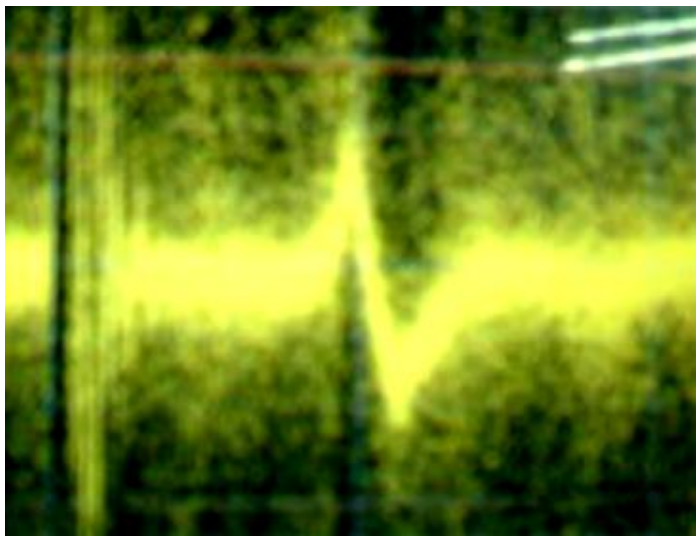
Εικόνα 27



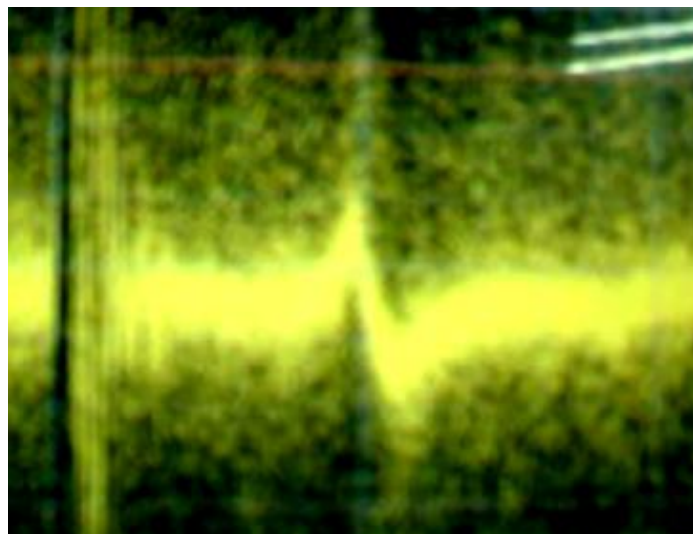
Εικόνα 28



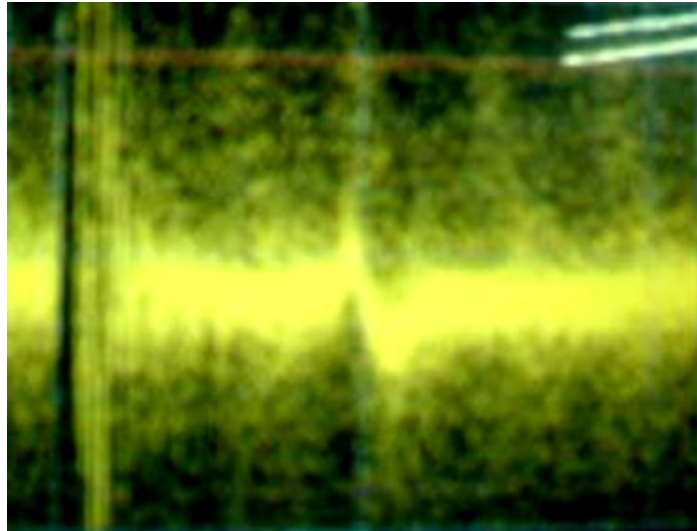
Εικόνα 29



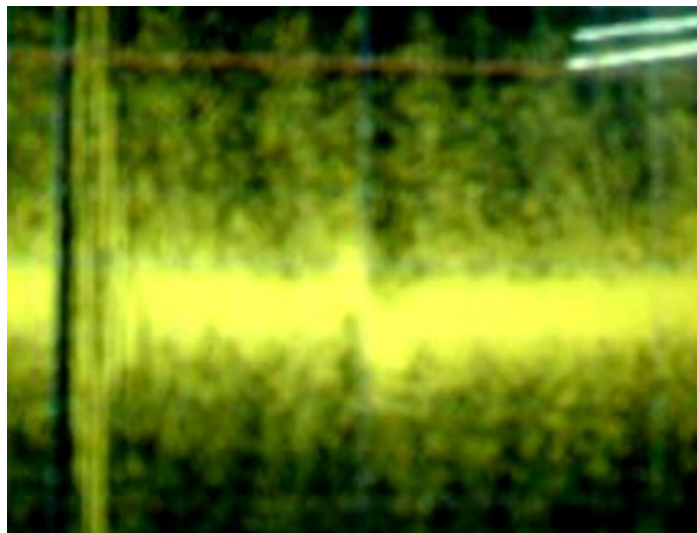
Εικόνα 30



Εικόνα 31

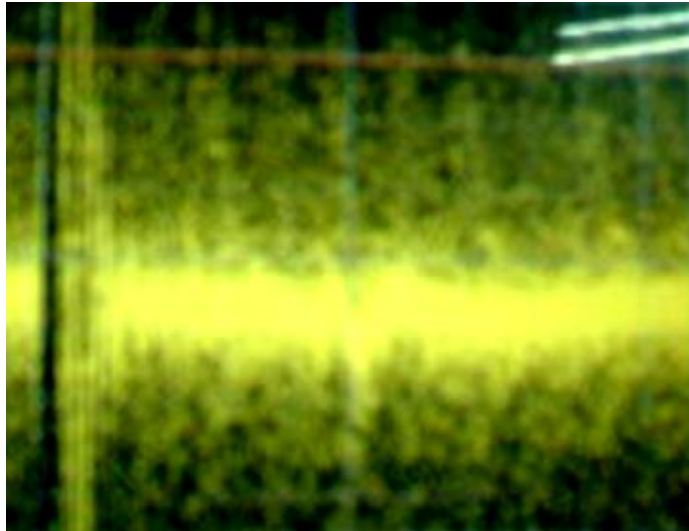


Εικόνα 32

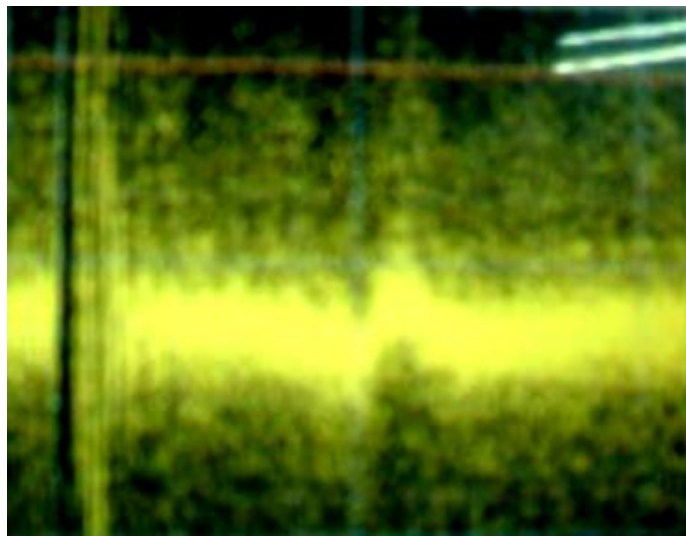


Εικόνα 33

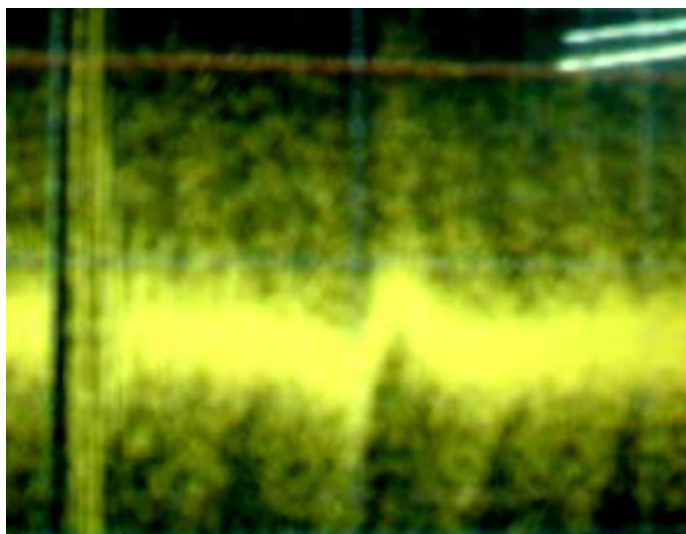
Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι το πλάτος του παλμού μειώνεται, μέχρι την ελαχιστοποίησή του, όπου αλλάζει απότομα μορφή και έχει αντίστροφη φορά σε σχέση με την αρχική, ενώ σταδιακά το πλάτος αρχίζει να αυξάνεται όπως φαίνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 34

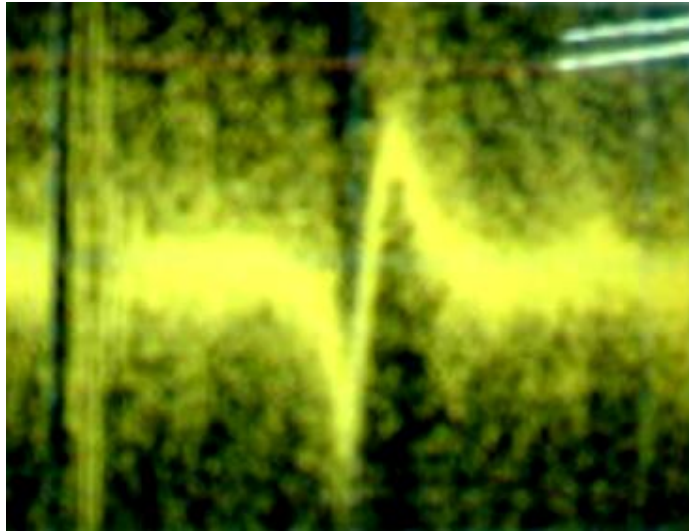


Εικόνα 35

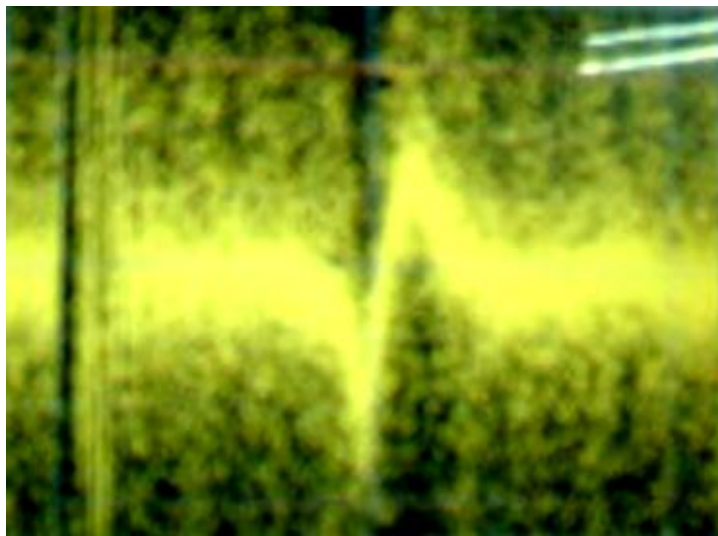


Εικόνα 36

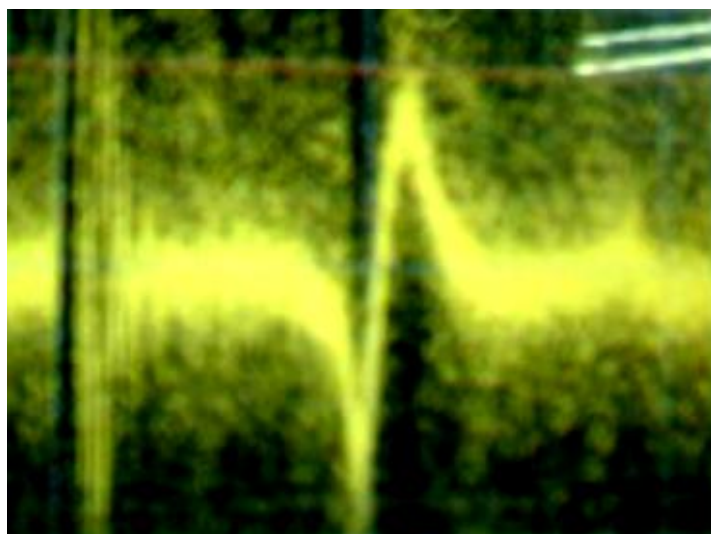




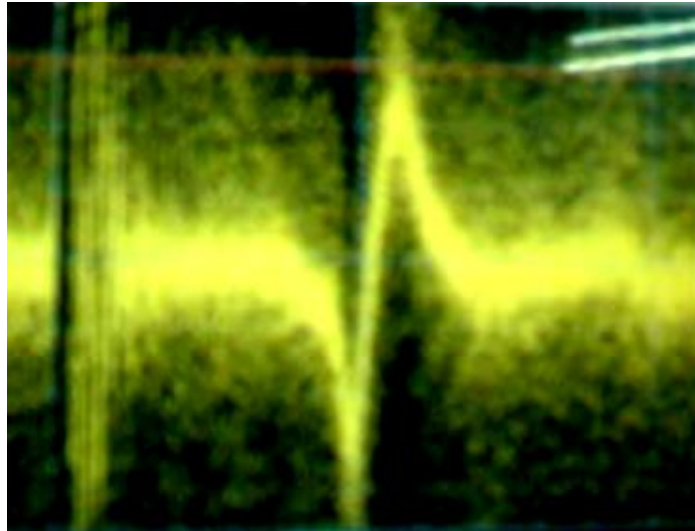
Εικόνα 37



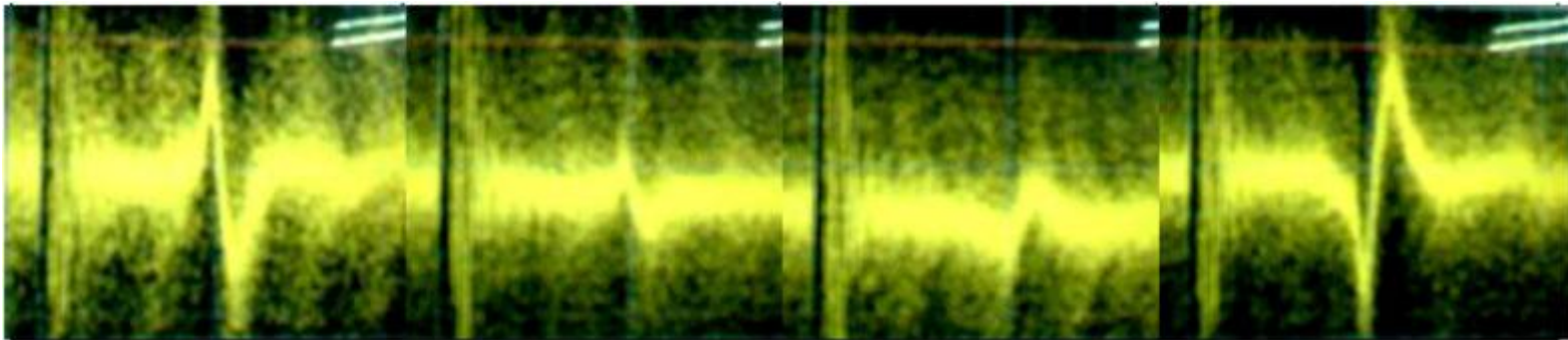
Εικόνα 38



Εικόνα 39



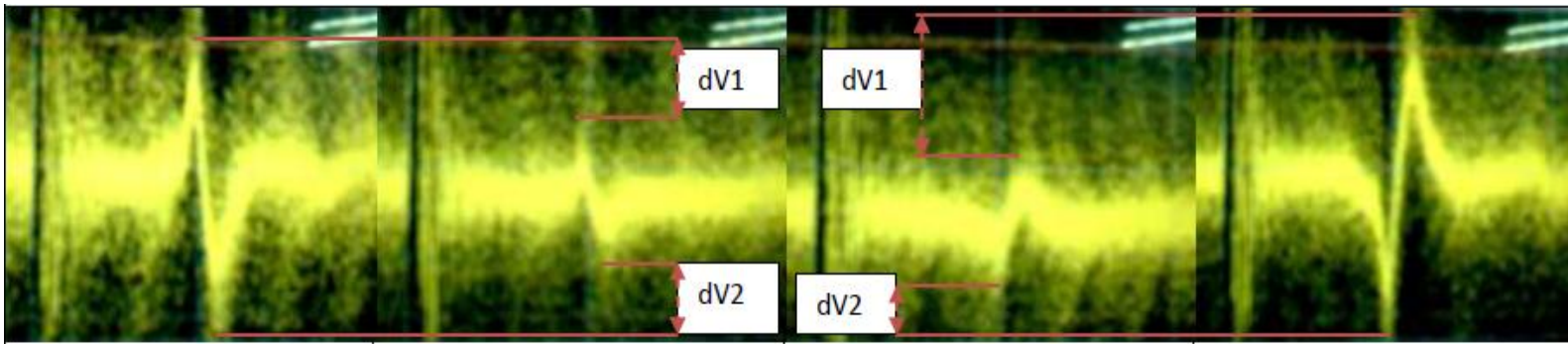
Εικόνα 40



Εικόνα 41

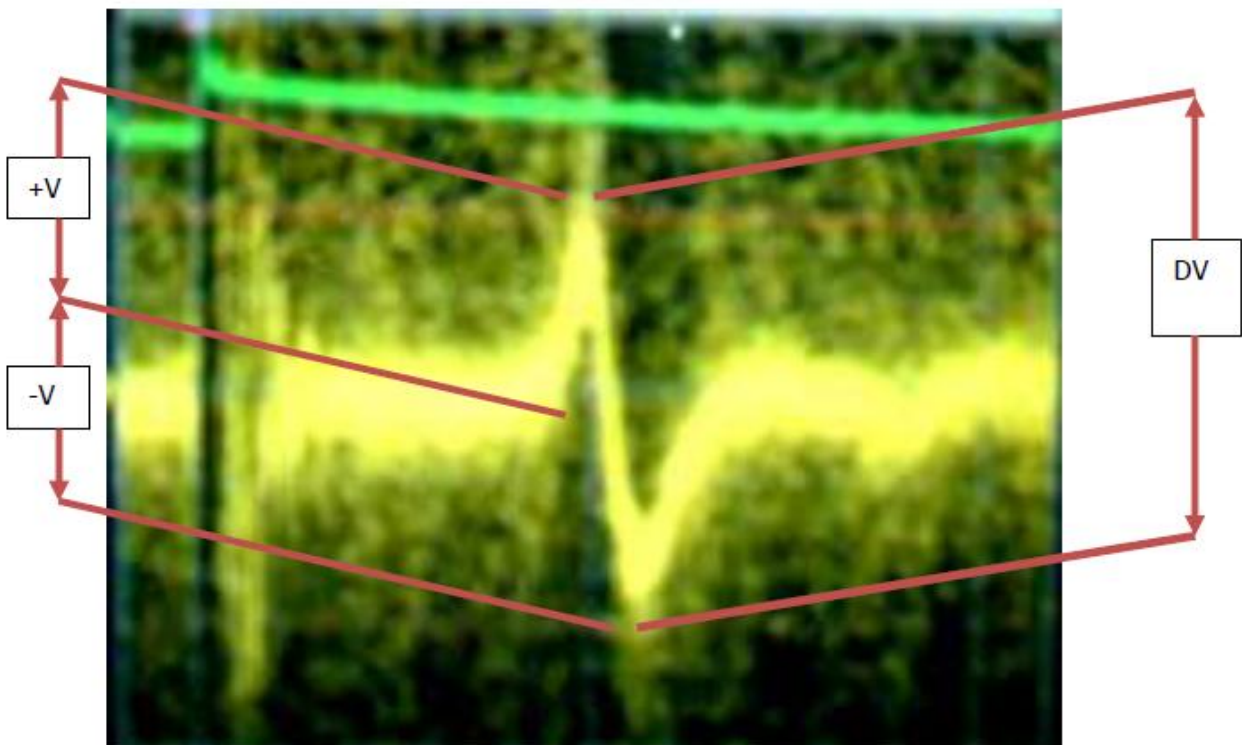
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται πιο καθαρά η αλλαγή της μορφής του παλμού κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται η μείωση του πλάτους του παλμού με την ελάττωση του πεδίου, μέχρι να μηδενιστεί, ενώ στη συνέχεια το πλάτος του παλμού αρχίζει να αυξάνεται, όμως πλέον η μορφή του παλμού είναι διαφορετική, έχει αντίστροφη φορά από την αρχική.

### 8.1.3 Μετρήσεις



Εικόνα 42

Σε κάθε στάδιο αύξησης του ρεύματος τροφοδοσίας του πηνίου προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου, γινόταν καταμέτρηση του πλάτους της παλμικής τάσης εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, μετρούταν η μέγιστη κορυφή(+V), η ελάχιστη κορυφή(-V) και η διαφορά αυτών(DV), κάτι το οποίο φαίνεται καλύτερα στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 43

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών είναι καταγεγραμμένα στον παρακάτω πίνακα.

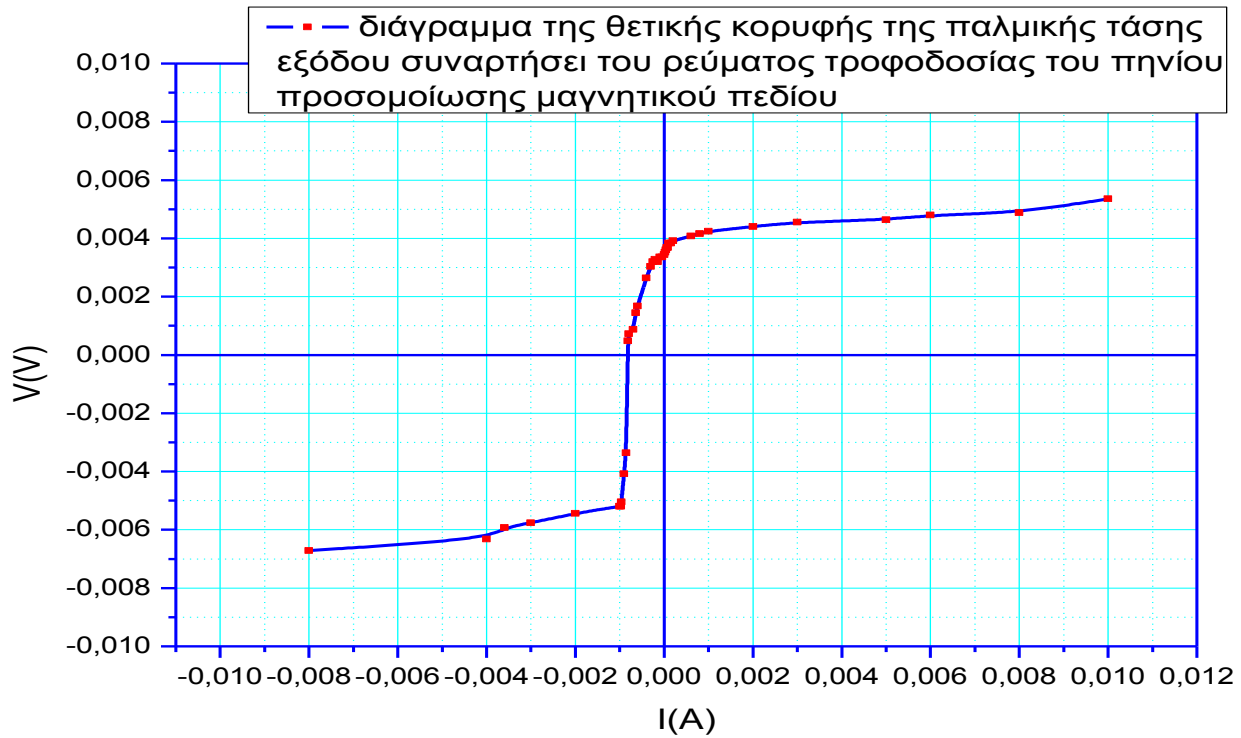
	V(V)	-V(V)	DV(V)	I(A)
1	0,00536	-0,00592	0,01128	0,01
2	0,00488	-0,00552	0,0104	0,008
3	0,0048	-0,00544	0,01024	0,006
4	0,00464	-0,00536	0,01	0,005
5	0,00456	-0,0052	0,00976	0,003
6	0,0044	-0,0052	0,00952	0,002
7	0,00424	-0,00504	0,00928	0,001
8	0,00416	-0,00504	0,0092	0,0008
9	0,00408	-0,00496	0,00904	0,0006
10	0,00392	-0,00472	0,00864	0,0002
11	0,00384	-0,00464	0,00848	0,00015
12	0,00384	-0,00456	0,0084	0,0001
13	0,00368	-0,00456	0,00832	0,00008
14	0,00368	-0,00456	0,00824	0,00006
15	0,0036	-0,0044	0,008	0,00004
16	0,00352	-0,00432	0,00784	0,00002
17	0,00344	-0,00424	0,00768	0
18	0,00336	-0,00416	0,00752	-0,00005
19	0,00336	-0,00416	0,00752	-0,0001
20	0,0032	-0,004	0,0072	-0,00015
21	0,00328	-0,00408	0,00736	-0,0002
22	0,0032	-0,004	0,0072	-0,00025
23	0,00304	-0,00392	0,00696	-0,0003
24	0,00264	-0,00384	0,00648	-0,0004

25	0,00168	0,00384	0,00552	-0,0006
26	0,00144	-0,00384	0,00528	-0,00064
27	0,00088	-0,00352	0,0044	-0,0007
28	0,00072	-0,00344	0,00416	-0,0008
29	0,00048	-0,00328	0,00376	-0,00082
30	-0,00336	-0,0016	0,0032	-0,00086
31	-0,00408	0,0008	0,00416	-0,0009
32	-0,00504	-0,0016	0,00488	-0,00096
33	-0,0052	0,00312	0,00832	-0,00097
34	-0,0052	0,0036	0,0088	-0,001
35	-0,00544	0,00408	0,00952	-0,002
36	-0,00576	0,00424	0,01	-0,003
37	-0,00592	0,00512	0,01104	-0,0036
38	-0,00632	0,00536	0,01168	-0,004
39	-0,00672	0,00584	0,01256	-0,008

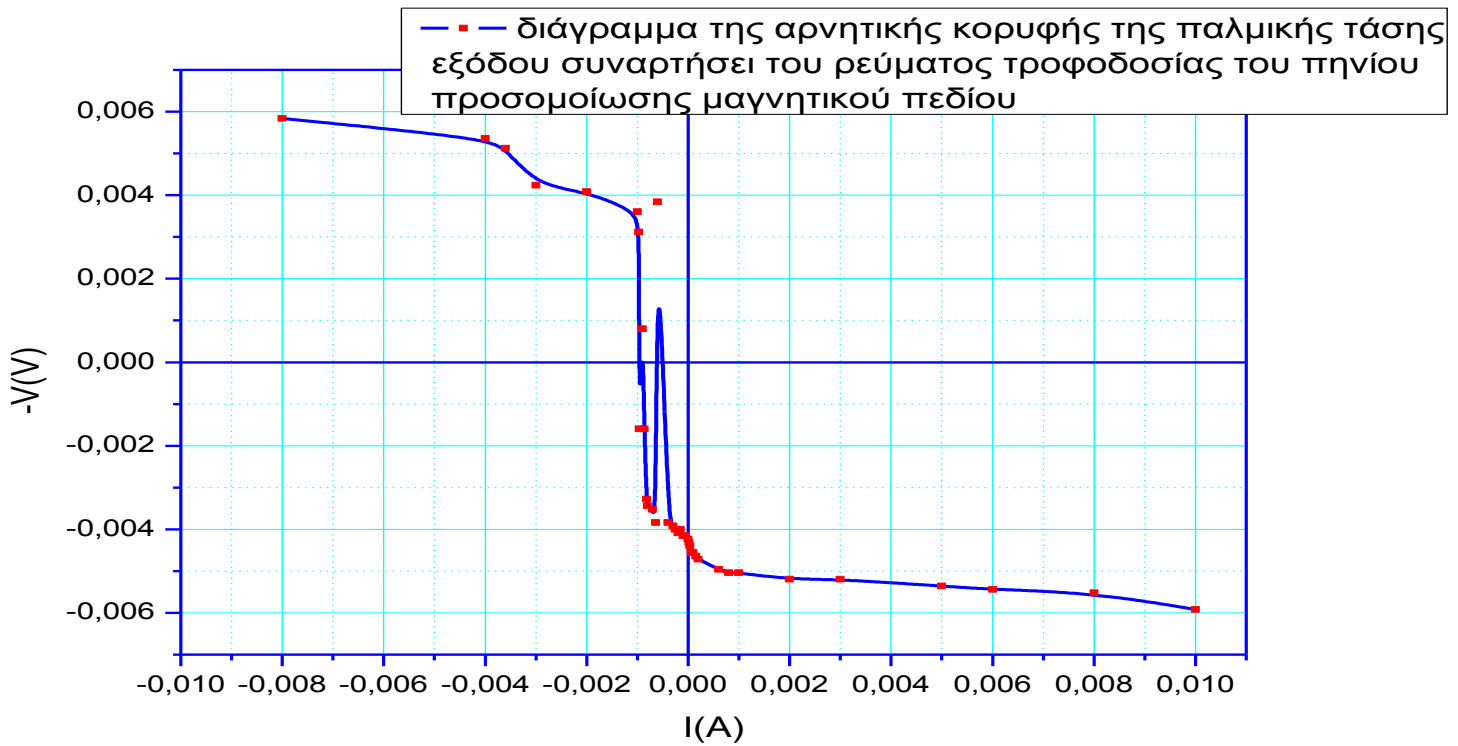
Πίνακας 2

### 8.1.4 Διαγράμματα

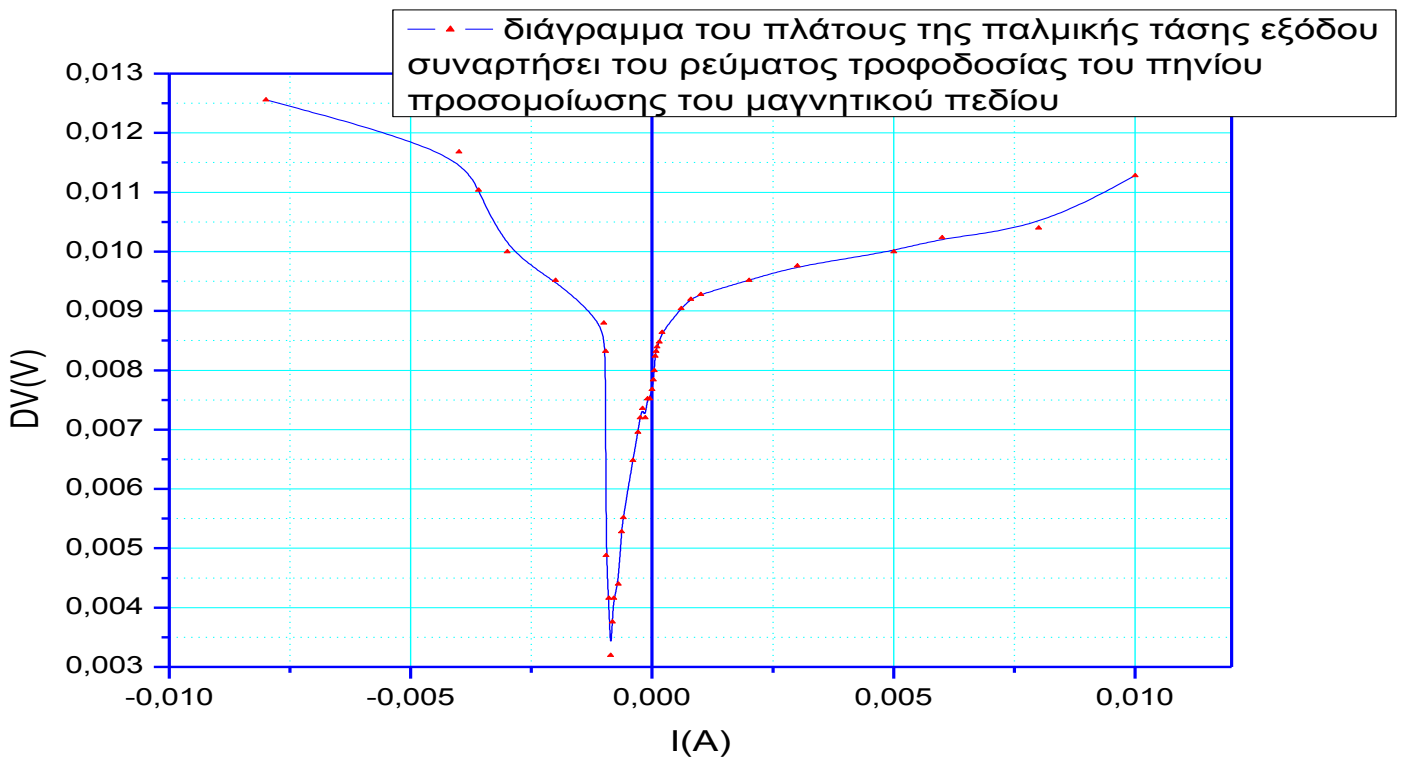
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η εξάρτηση των τιμών των τάσεων που μετρήθηκαν προηγούμενα, από το ρεύμα  $I$  του πηνίου προσομοίωσης του μαγνητικού πεδίου.



Διάγραμμα 30

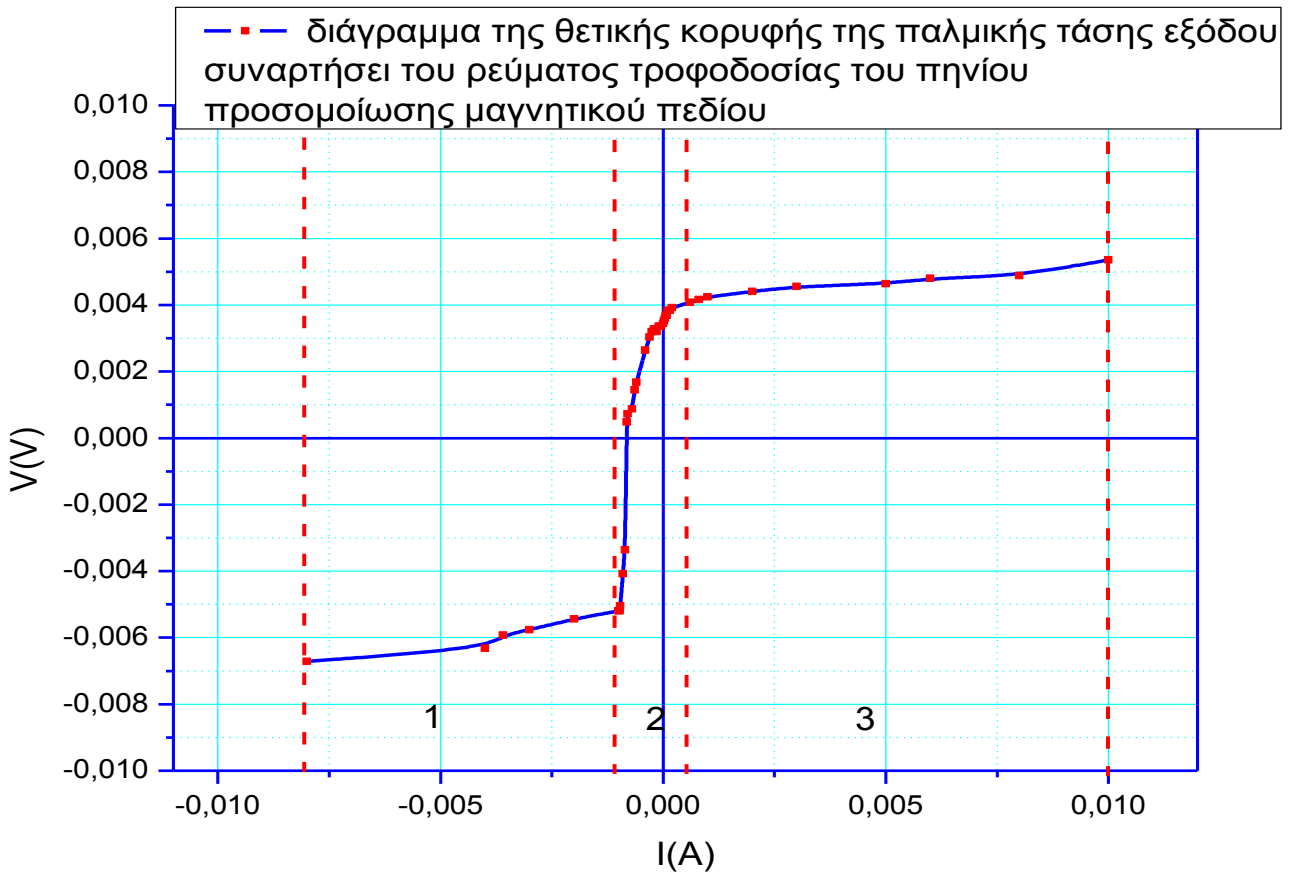


Διάγραμμα 31



Διάγραμμα 32

Στο διάγραμμα των θετικών κορυφών παρατηρούνται τρεις περιοχές, όπως φαίνεται παρακάτω:



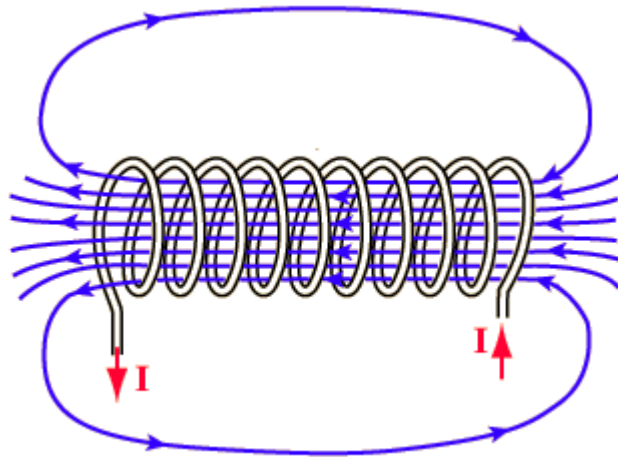
Διάγραμμα 33

Στην πρώτη περιοχή παρατηρείται μια γραμμική αύξηση της τάσης με την αύξηση των τιμών του ρεύματος. Στη συνέχεια στη δεύτερη περιοχή παρατηρείται απότομη αύξηση της τάσης με μικρή αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος. Ενώ στην τρίτη περιοχή παρατηρείται γραμμική αύξηση των τιμών της τάσης σε σχέση με την αύξηση του ρεύματος με ρυθμό όμοιο με αυτό της πρώτης περιοχής.



## Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που δημιουργήσει το εξωτερικό πηνίο, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος, ενώ στον πίνακα που ακολουθεί είναι καταγεγραμμένα τα αποτελέσματα.



Εικόνα 44

$$H = \text{μαγνητικό πεδίο} \left( \frac{A}{m} \right)$$

$$N = \text{αριθμός τυλιγμάτων}$$

$$I = \text{το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό πηνίο}(A)$$

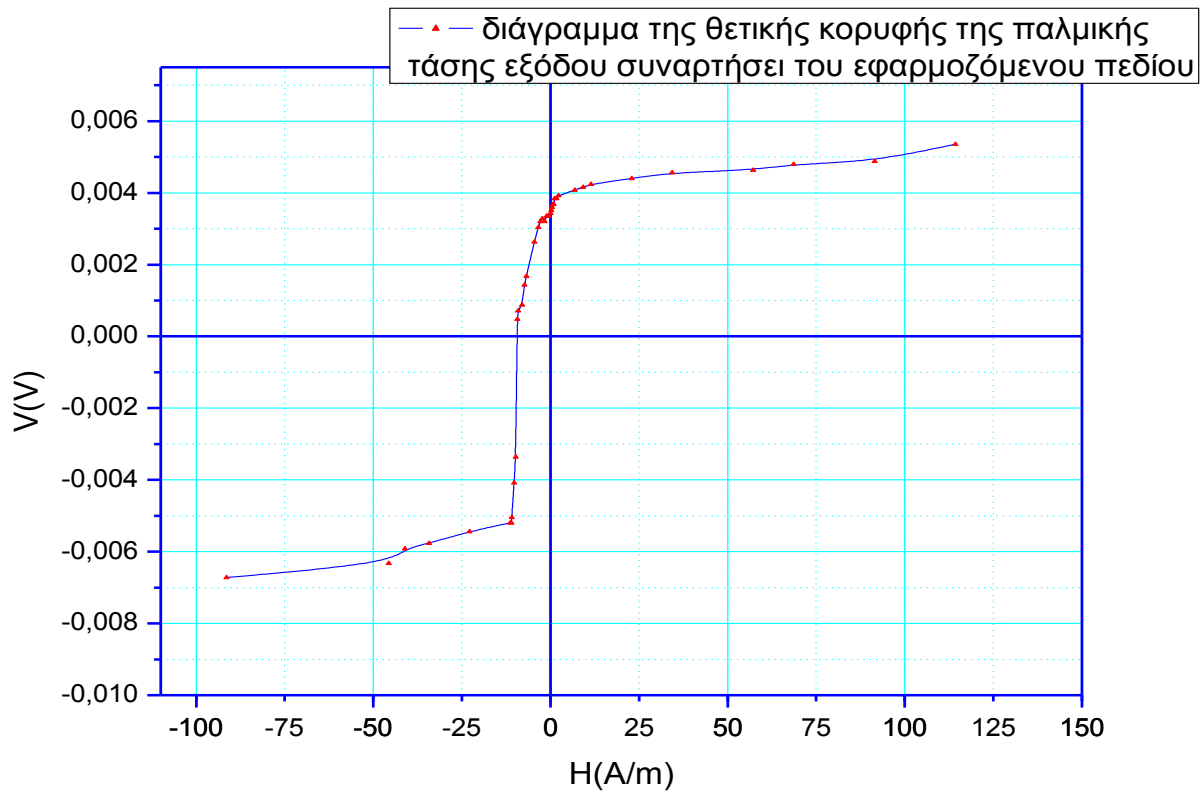
$$l = \text{το μήκος του εξωτερικού πηνίου}(m)$$

$$H = N * \frac{I}{l}$$

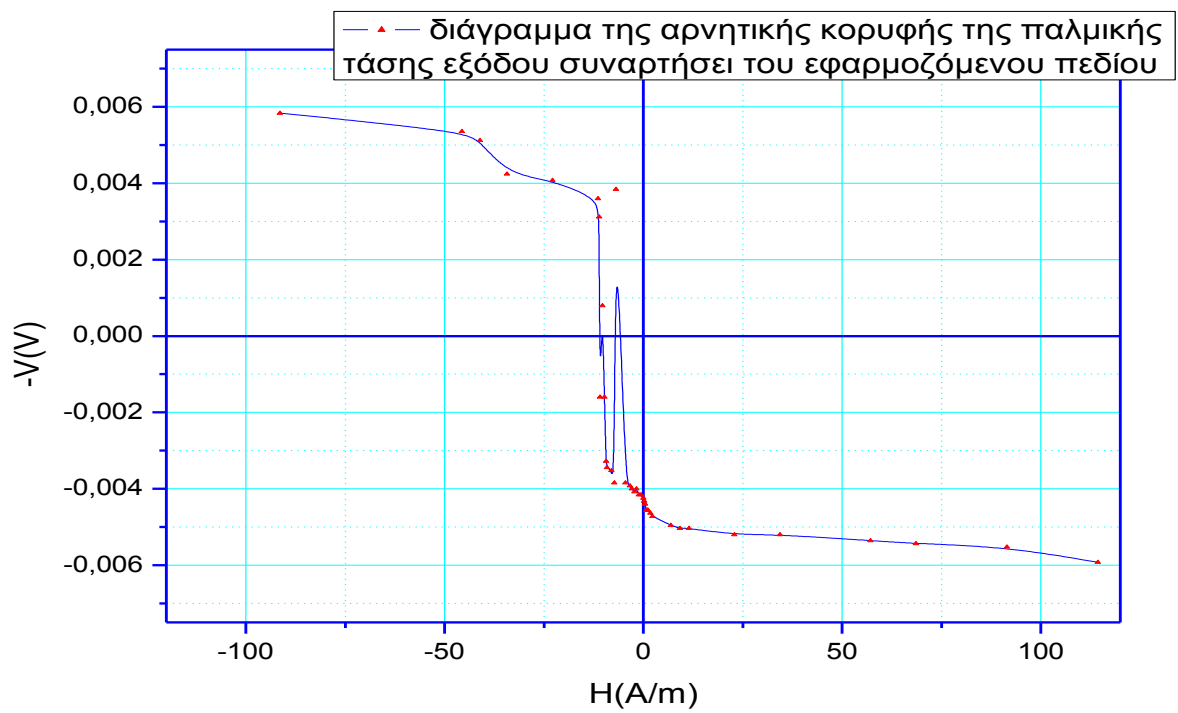
H(A/m)	I(A)	N(turns)	l(m)
114,2857	0,01	400	0,035
91,42857	0,008	400	0,035
68,57143	0,006	400	0,035
57,14286	0,005	400	0,035
34,28571	0,003	400	0,035
22,85714	0,002	400	0,035
11,42857	0,001	400	0,035
9,142857	0,0008	400	0,035
6,857143	0,0006	400	0,035
2,285714	0,0002	400	0,035
1,714286	0,00015	400	0,035
1,142857	0,0001	400	0,035
0,914286	0,00008	400	0,035
0,685714	0,00006	400	0,035
0,457143	0,00004	400	0,035
0,228571	0,00002	400	0,035
0	0	400	0,035
-0,57143	-0,00005	400	0,035
-1,14286	-0,0001	400	0,035
-1,71429	-0,00015	400	0,035
-2,28571	-0,0002	400	0,035
-2,85714	-0,00025	400	0,035
-3,42857	-0,0003	400	0,035
-4,57143	-0,0004	400	0,035
-6,85714	-0,0006	400	0,035
-7,31429	-0,00064	400	0,035
-8	-0,0007	400	0,035
-9,14286	-0,0008	400	0,035
-9,37143	-0,00082	400	0,035
-9,82857	-0,00086	400	0,035
-10,2857	-0,0009	400	0,035
-10,9714	-0,00096	400	0,035
-11,0857	-0,00097	400	0,035
-11,4286	-0,001	400	0,035
-22,8571	-0,002	400	0,035
-34,2857	-0,003	400	0,035
-41,1429	-0,0036	400	0,035
-45,7143	-0,004	400	0,035
-91,4286	-0,008	400	0,035

Πίνακας 3

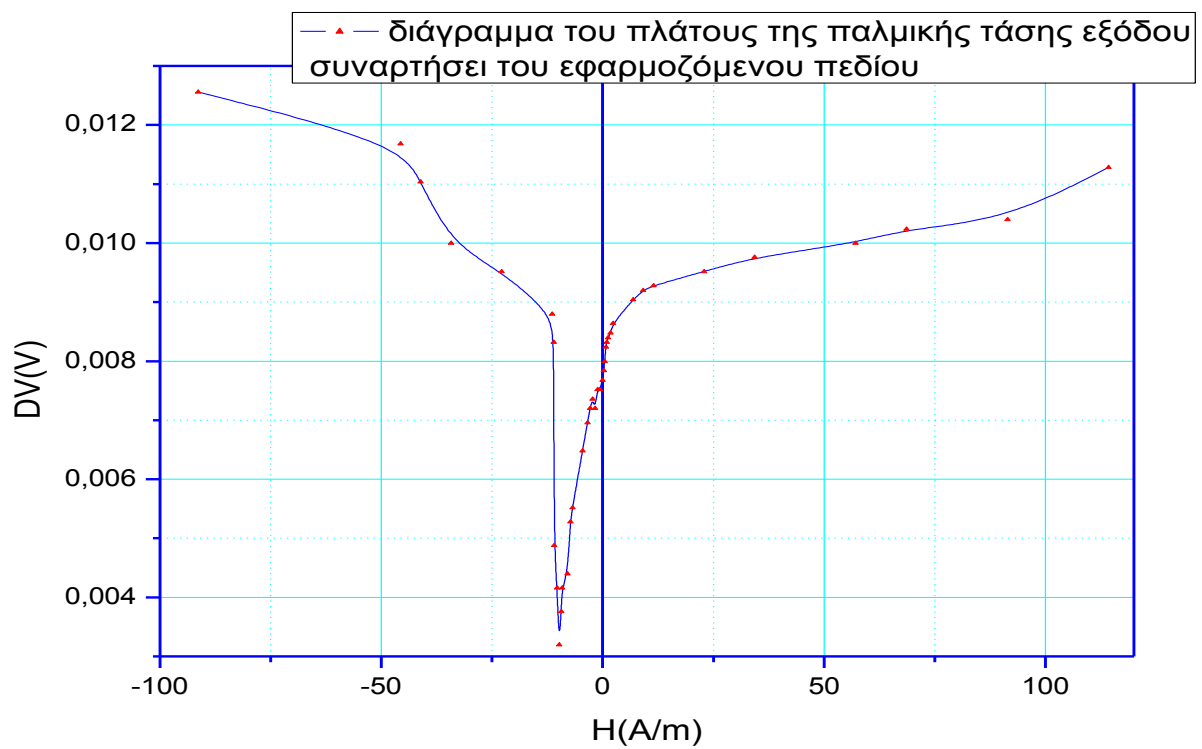
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η εξάρτηση της παλμικής τάσης εξόδου από την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί το εξωτερικό πηνίο προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου.



Διάγραμμα 34



Διάγραμμα 35



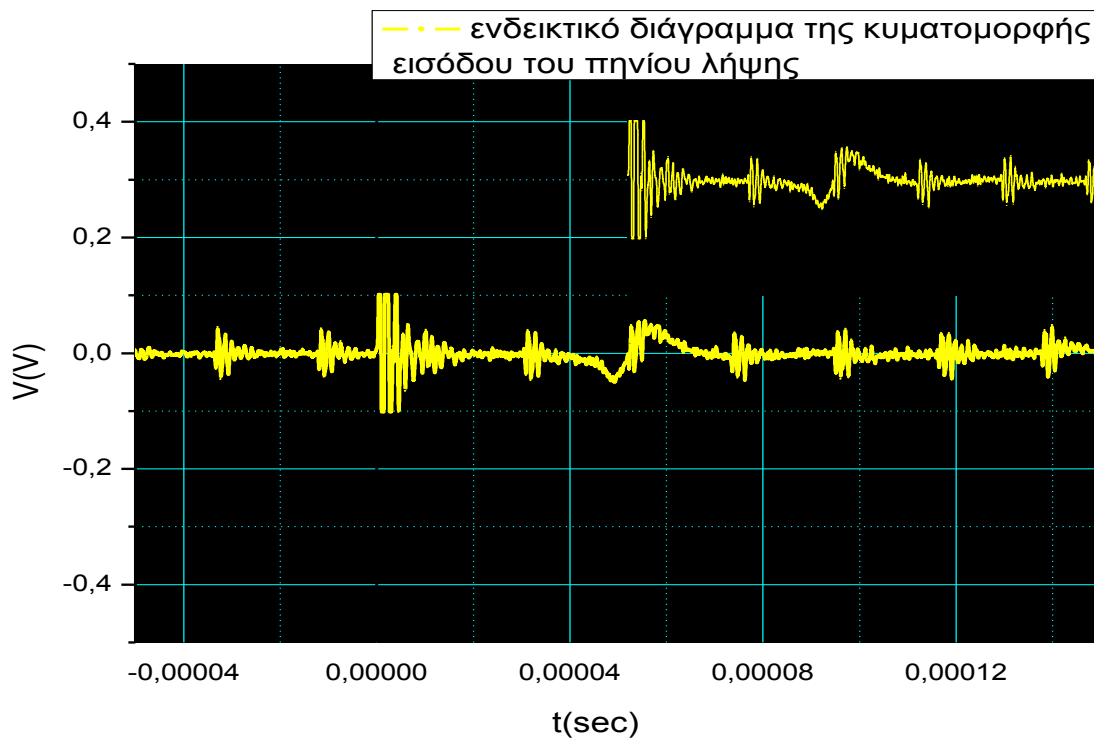
Διάγραμμα 36

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι τα διαγράμματα της τάσης με το ρεύμα είναι όμοια με αυτά της τάσης με το πεδίο, και είναι λογικό βάσει του τύπου υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου.

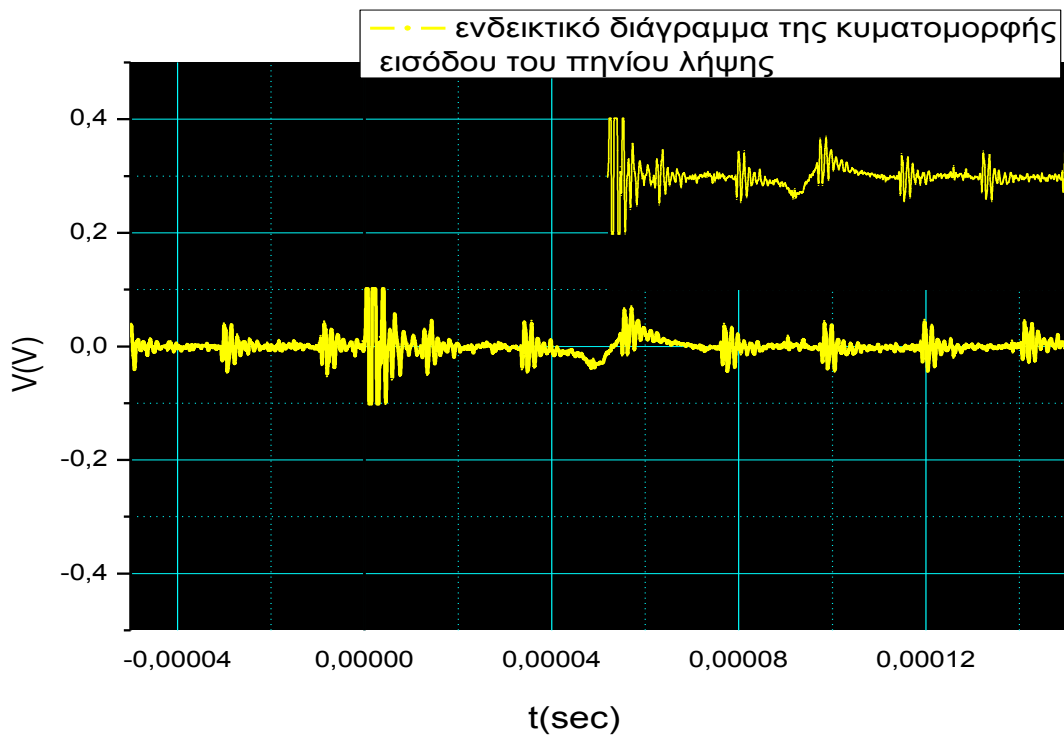
## 8.2 Αντίστροφη πολικότητα

Για την περίπτωση όπου τροφοδοτήθηκε το πηνίο προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου με ρεύμα αντίστροφης πολικότητας, ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία με προηγούμενα.

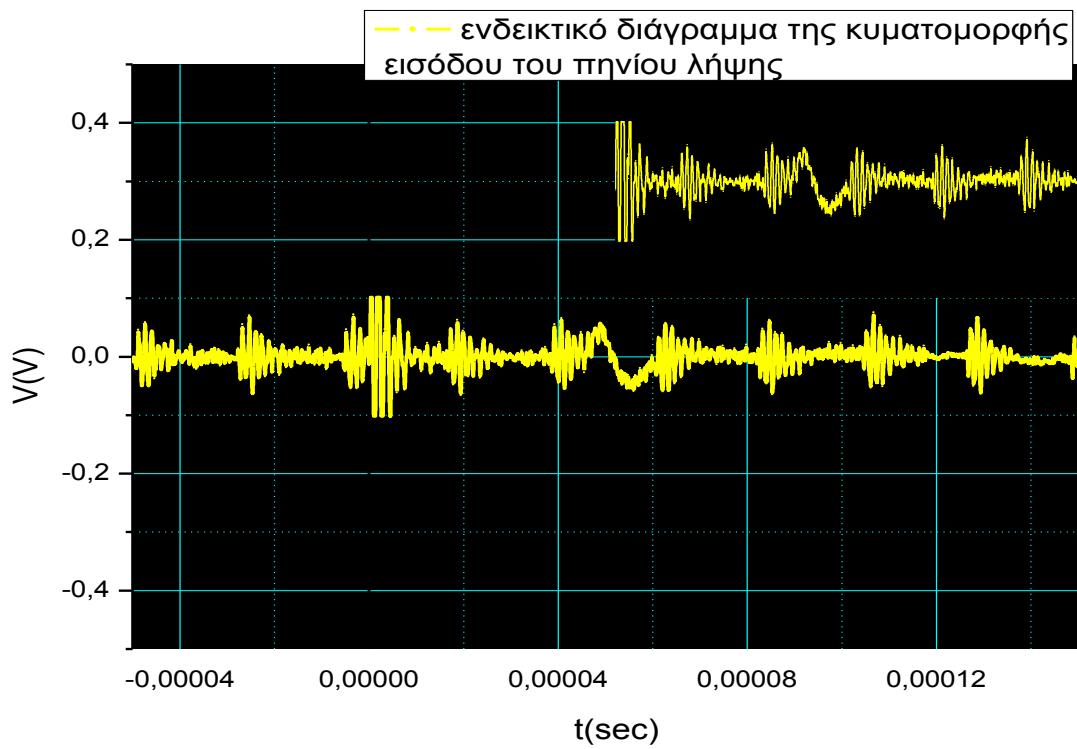
### 8.2.1 Διαγράμματα παλμού



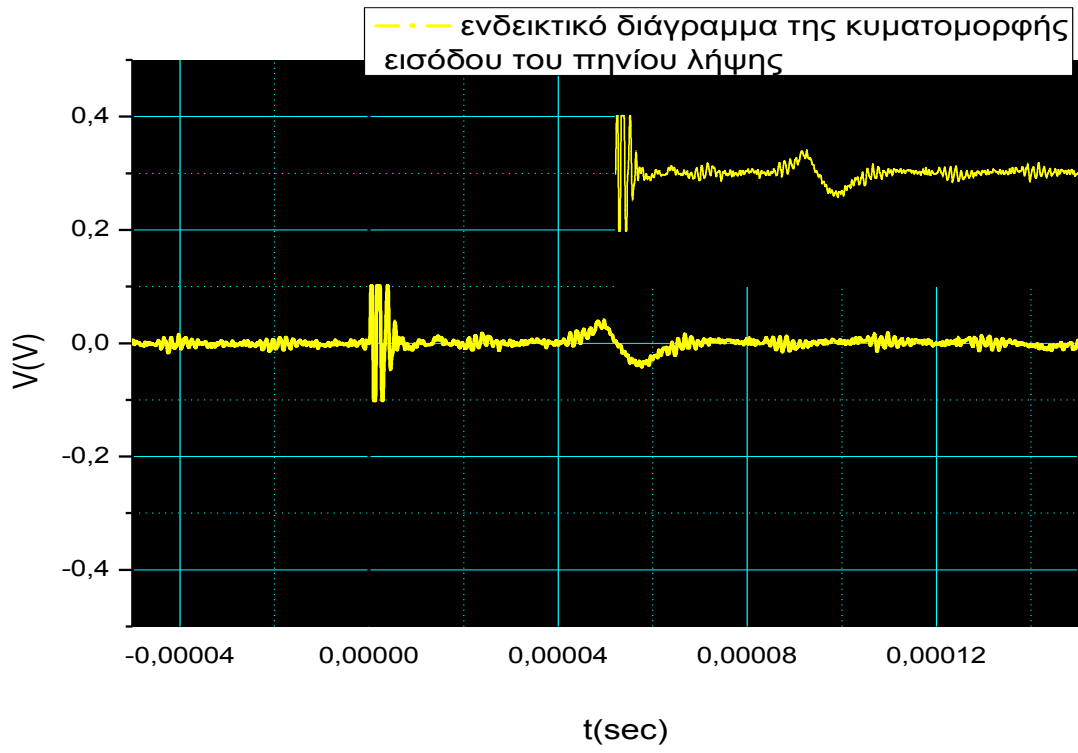
Διάγραμμα 37



Διάγραμμα 38



Διάγραμμα 39

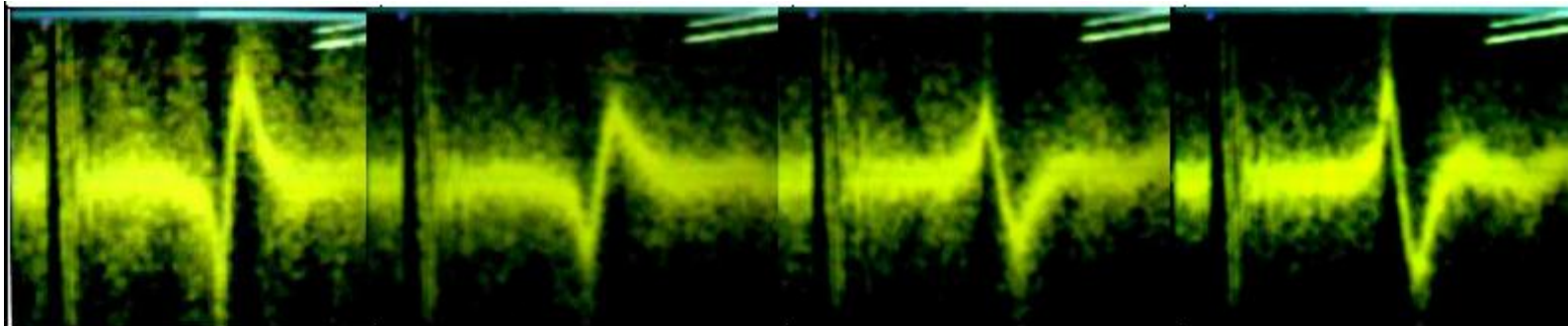


Διάγραμμα 40



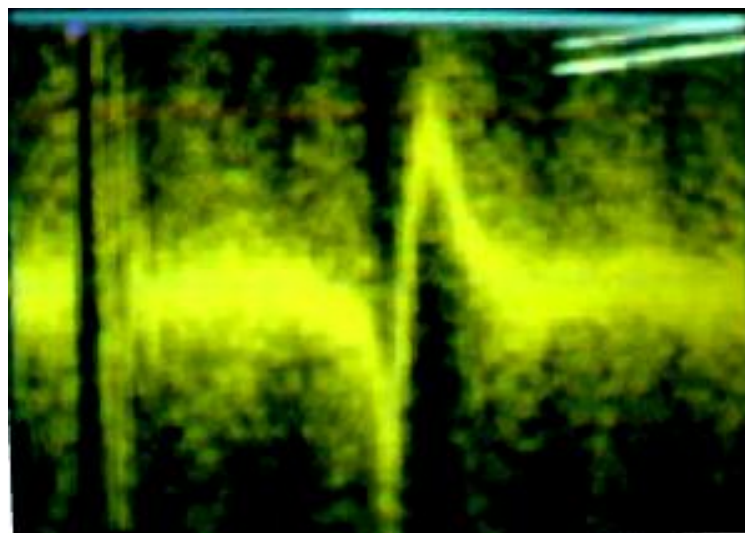
### 8.2.2 Εικόνες παλμού

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται καθαρά οι μορφές του παλμού στις δυο ακραίες και σε δυο ενδιάμεσες φάσεις.

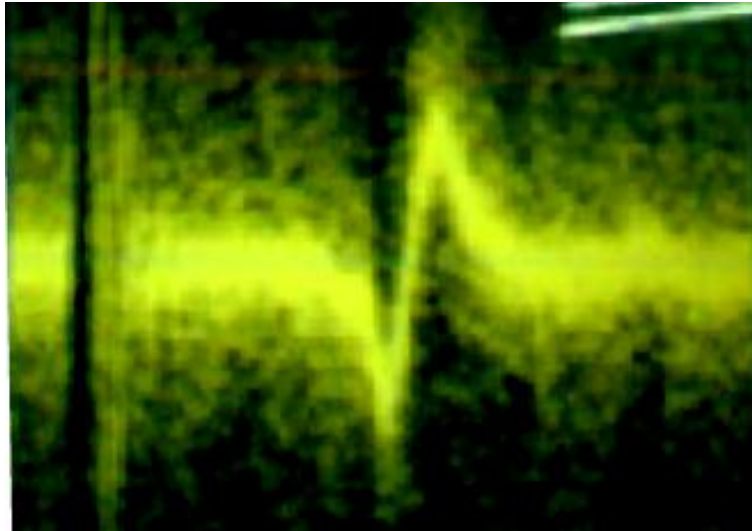


Εικόνα 45

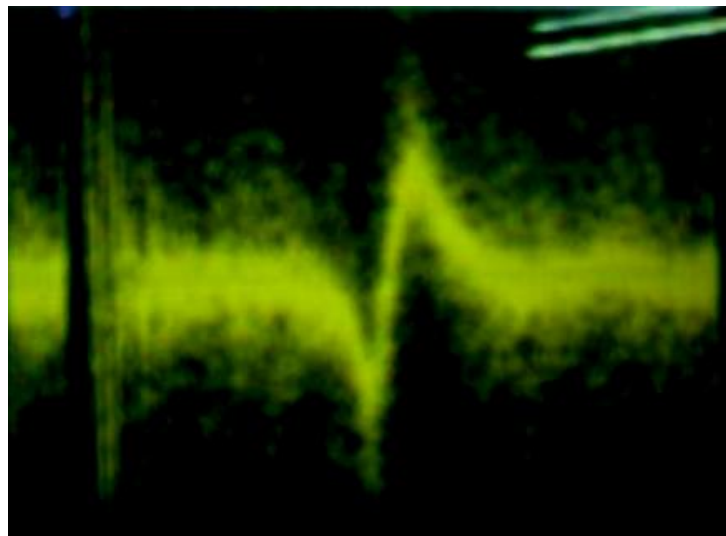
Στις επόμενες φωτογραφίες απεικονίζεται η μορφή του παλμού σε διάφορα διαδοχικά στάδια του πειράματος.



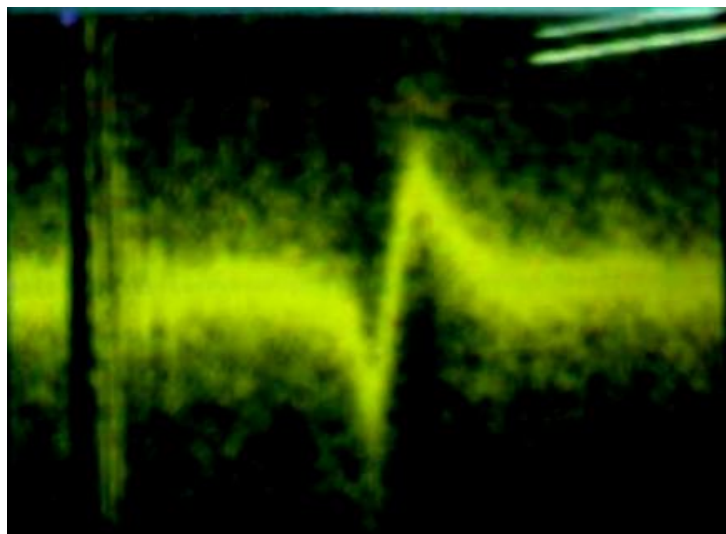
Εικόνα 46



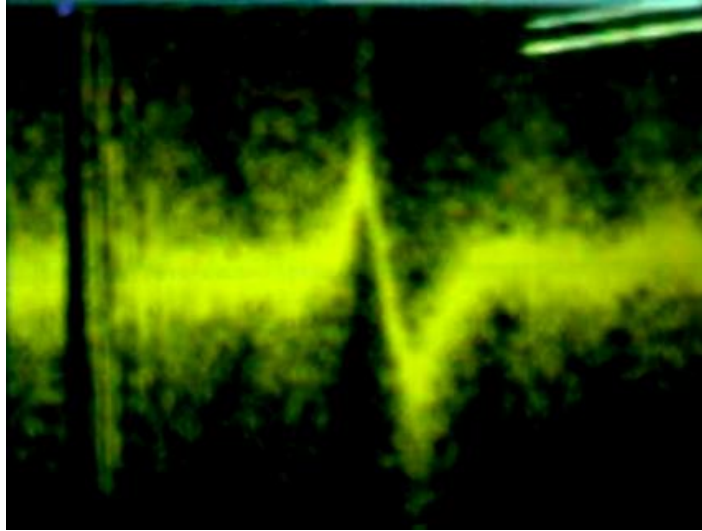
Εικόνα 47



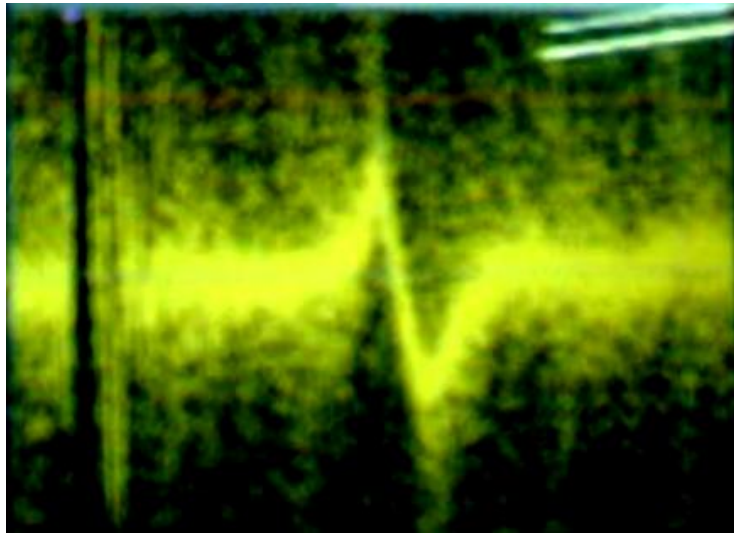
Εικόνα 48



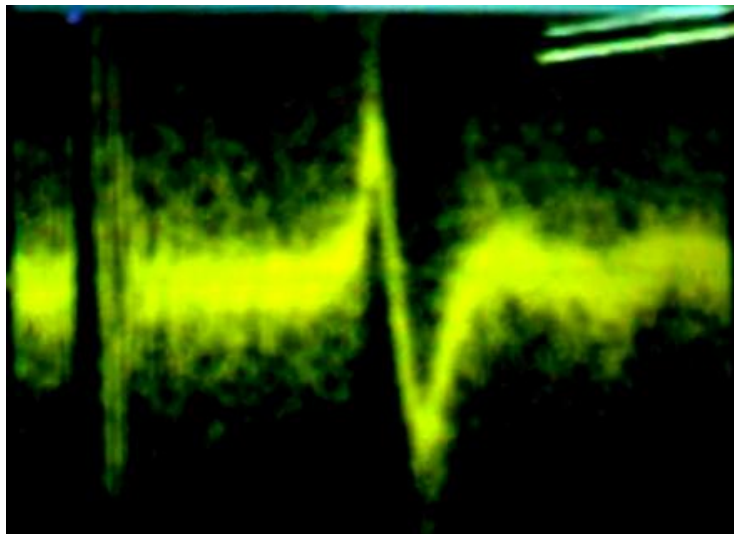
Εικόνα 49



Εικόνα 50



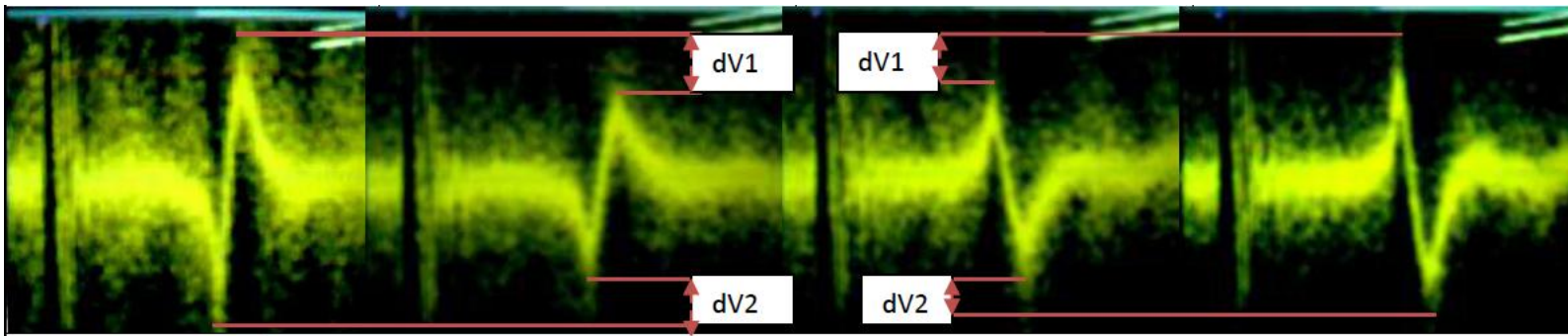
Εικόνα 51



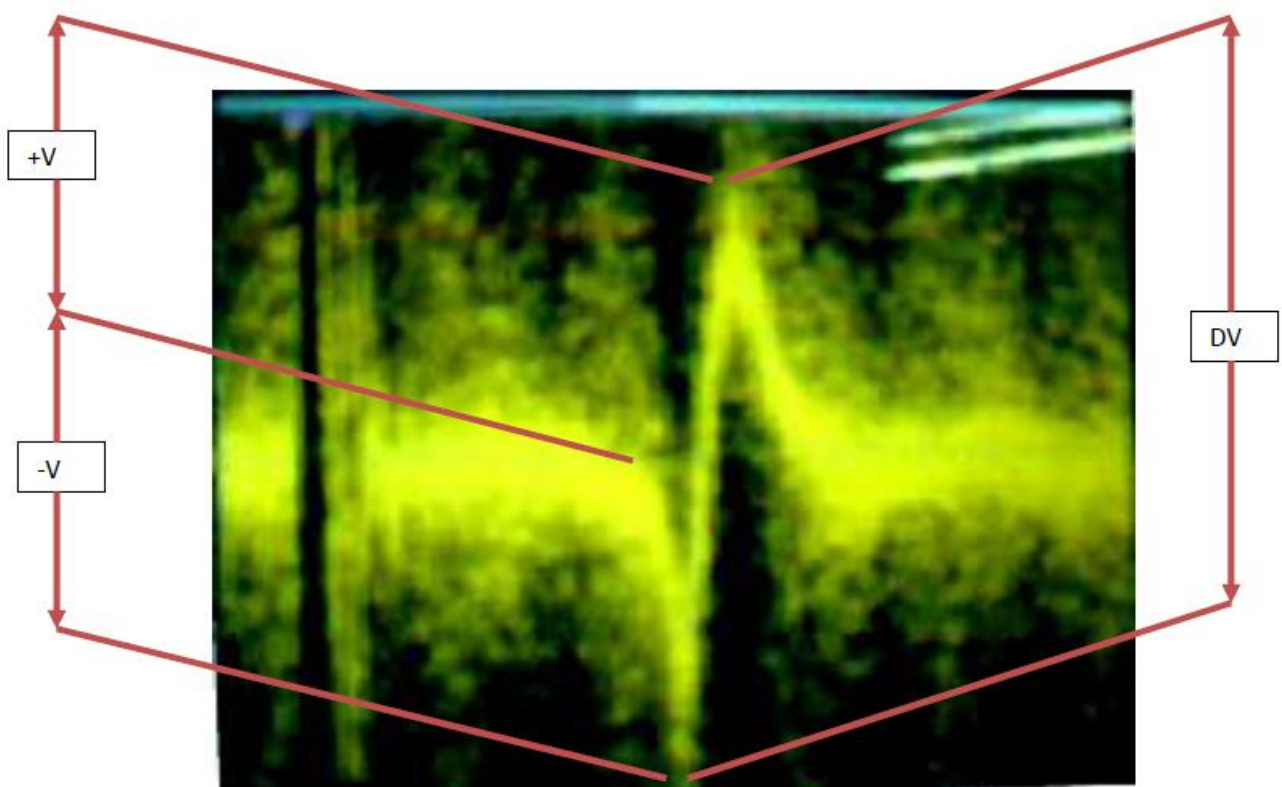
Εικόνα 52

### 8.2.3 Μετρήσεις

Στην περίπτωση της αντίστροφης πολικότητας ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία μετρήσεων με αυτή της ορθής πολικότητας.



Εικόνα 53



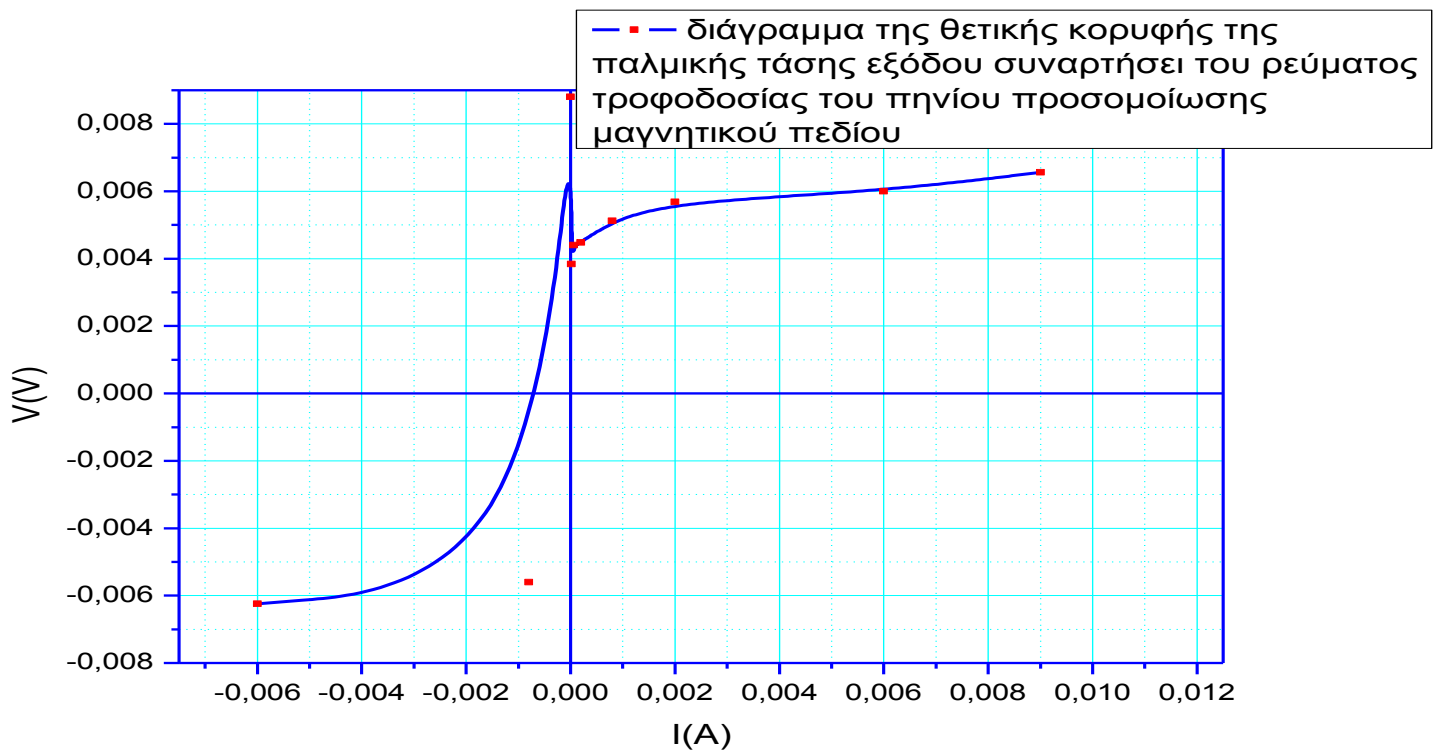
Εικόνα 54

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι καταγεγραμμένα στον παρακάτω πίνακα.

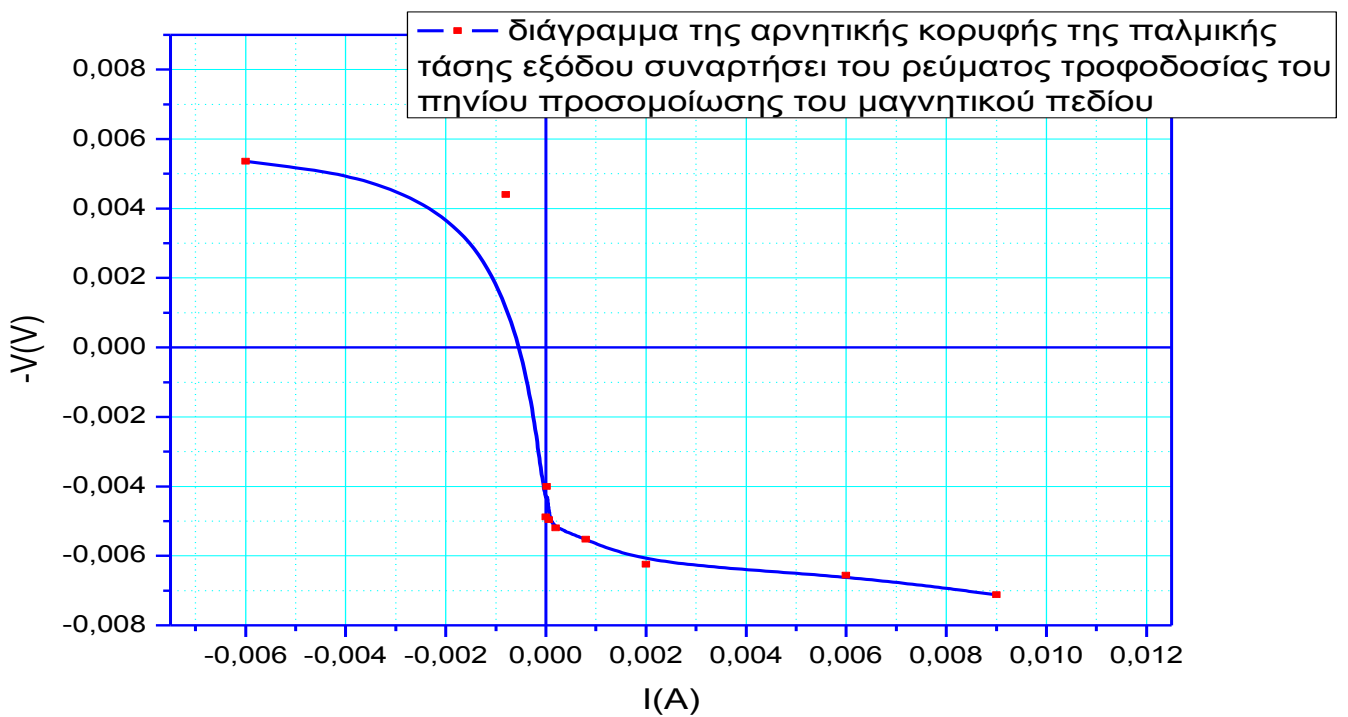
	<b>-V(V)</b>	<b>V(V)</b>	<b>DV(V)</b>	<b>I(A)</b>
1	-0,00712	0,00656	0,01368	0,009
2	-0,00656	0,006	0,01256	0,006
3	-0,00624	0,00568	0,01192	0,002
4	-0,00552	0,00512	0,01064	0,0008
5	-0,0052	0,00448	0,00968	0,0002
6	-0,00496	0,0044	0,00936	0,000063
7	-0,004	0,00384	0,00784	0,000016
8	-0,00488	0,0088	0,00392	0
9	0,0044	-0,0056	0,01	-0,0008
10	0,00536	-0,00624	0,0116	-0,006

Πίνακας 4

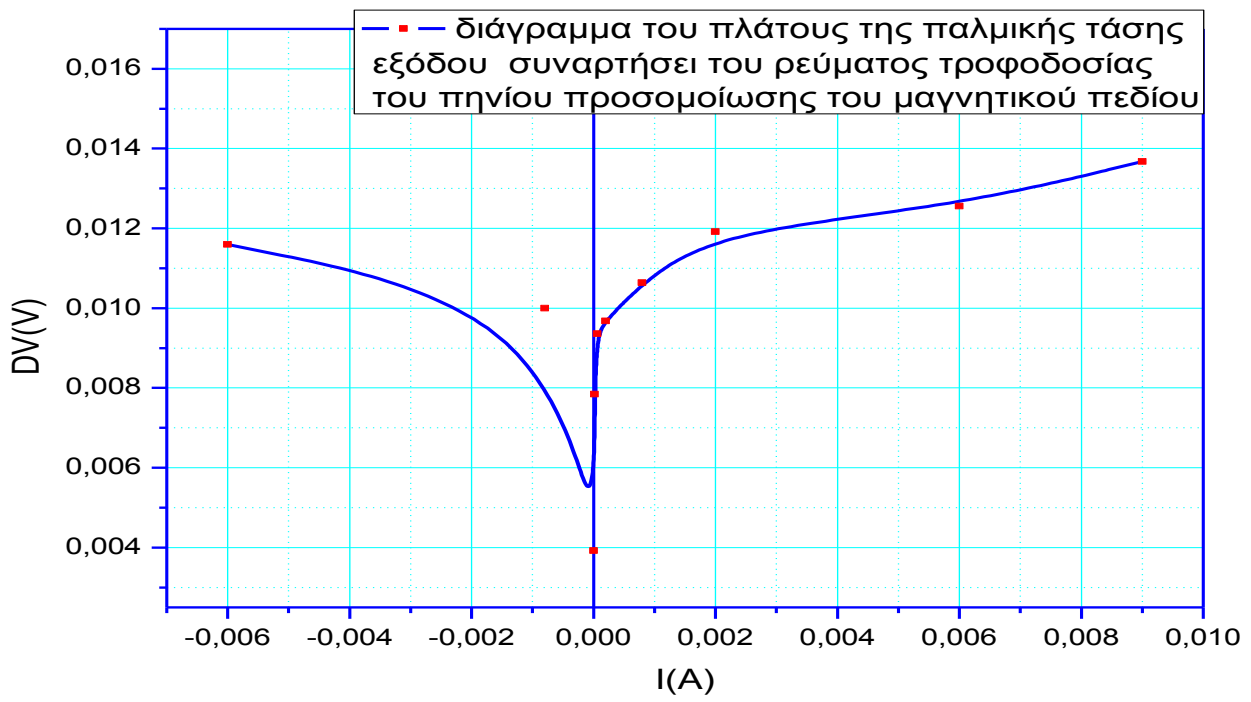
## 8.2.4 Διαγράμματα



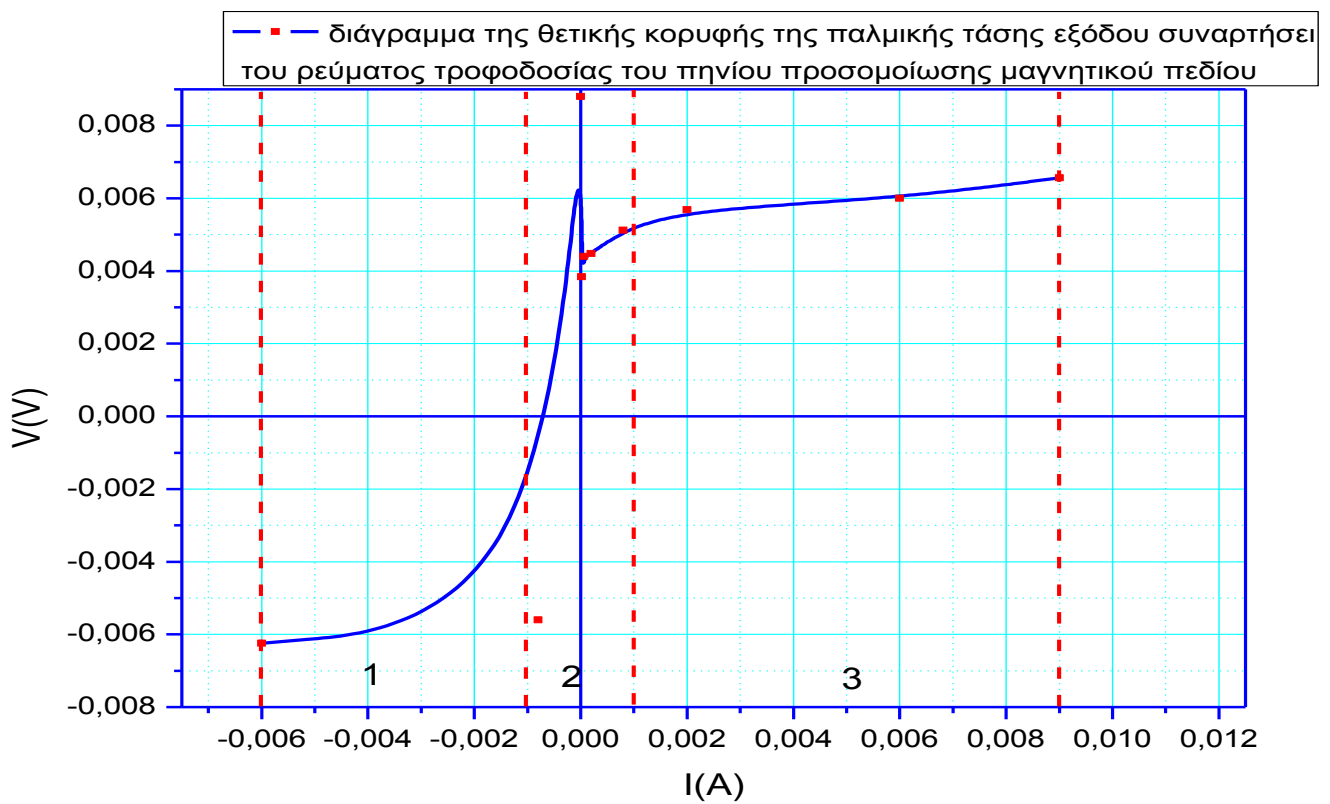
Διάγραμμα 41



Διάγραμμα 42



Διάγραμμα 43



Διάγραμμα 44

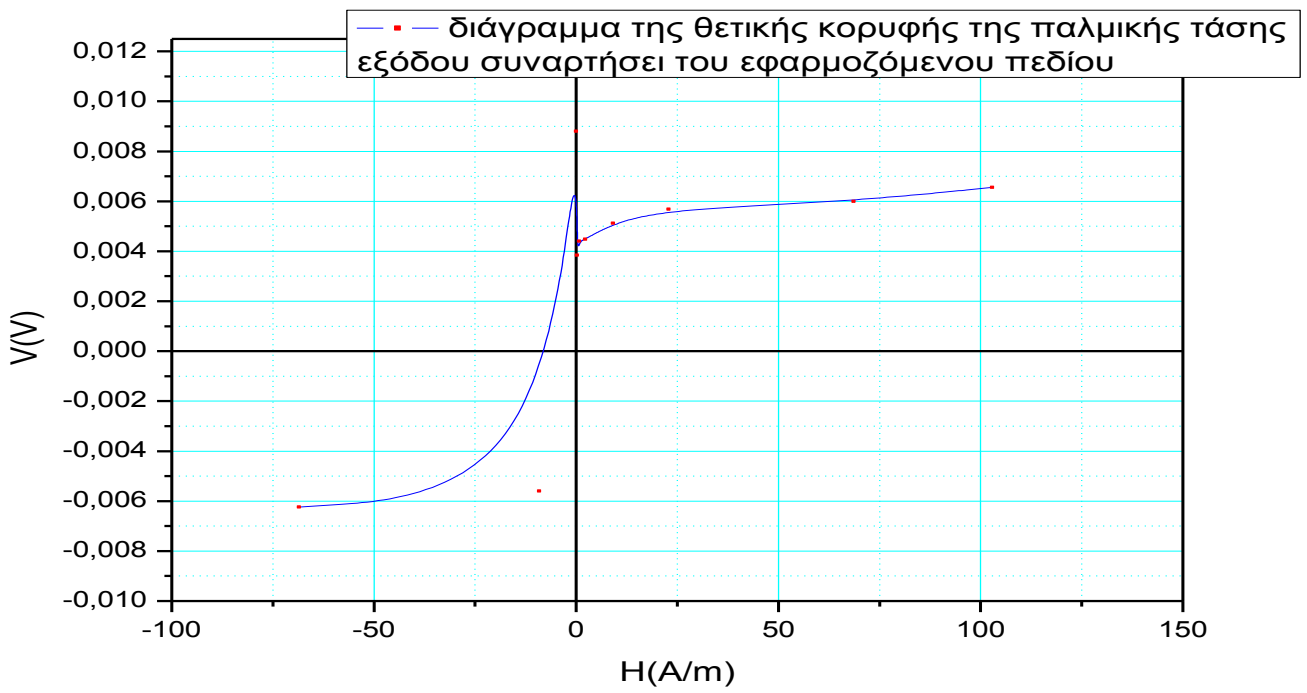
Και στην περίπτωση της αντίστροφης πολικότητας παρατηρείται η εμφάνιση των τριών περιοχών στα διαγράμματα της τάσης με το ρεύμα όπως και στα διαγράμματα της τάσης με το μαγνητικό πεδίο, πάλι λόγω της ομοιομορφίας της ανισοτροπίας του μαγνητοσυστολικού υλικού.

Διάγραμμα 45

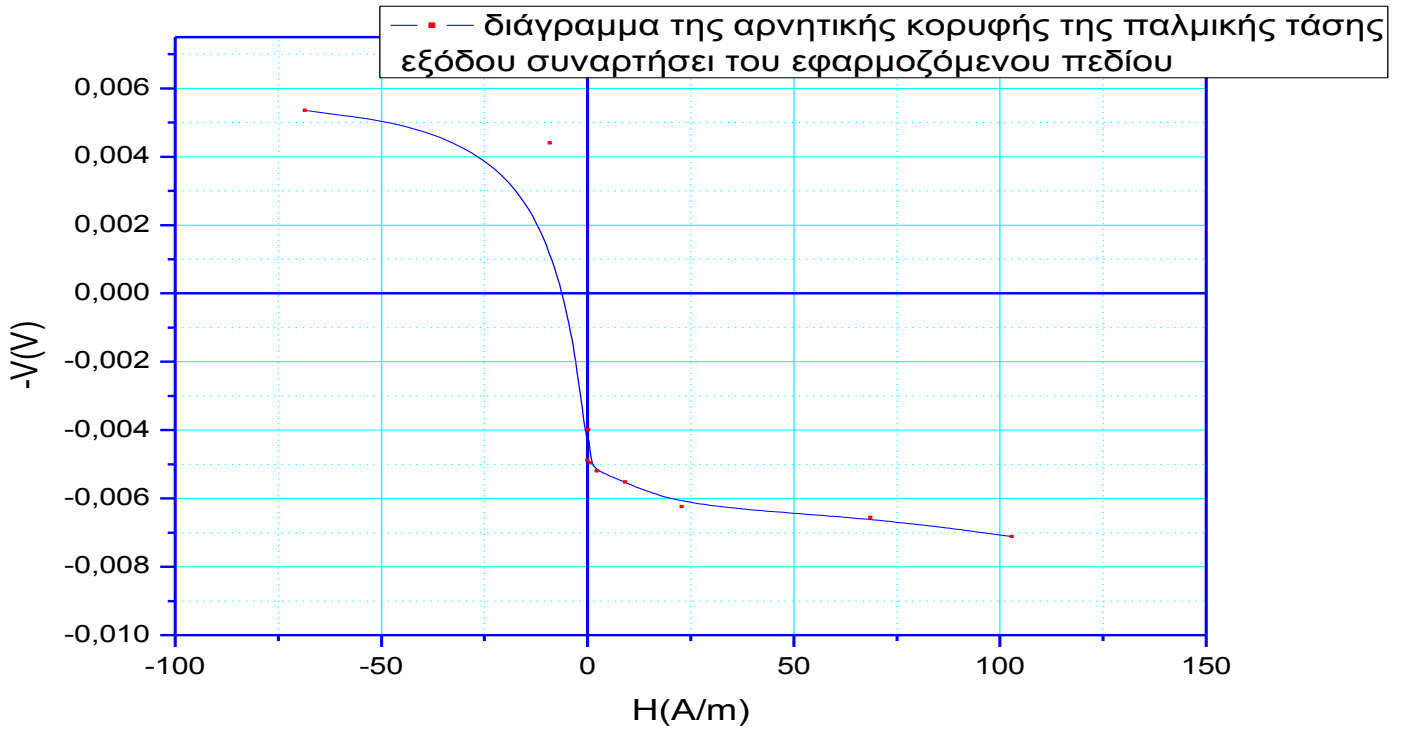
H(A/m)	I(A)	N(turns)	l(m)	V(V)	-V(V)	DV(V)
<b>102,8571</b>	0,009	400	0,035	0,00656	-0,00712	0,01368
<b>68,57143</b>	0,006	400	0,035	0,006	-0,00656	0,01256
<b>22,85714</b>	0,002	400	0,035	0,00568	-0,00624	0,01192
<b>9,142857</b>	0,0008	400	0,035	0,00512	-0,00552	0,01064
<b>2,285714</b>	0,0002	400	0,035	0,00448	-0,0052	0,00968
<b>0,72</b>	0,000063	400	0,035	0,0044	-0,00496	0,00936
<b>0,182857</b>	0,000016	400	0,035	0,00384	-0,004	0,00784
<b>0</b>	0	400	0,035	0,0088	-0,00488	0,00392
<b>-9,14286</b>	-0,0008	400	0,035	-0,0056	0,0044	0,01
<b>-68,5714</b>	-0,006	400	0,035	-0,00624	0,00536	0,0116

Πίνακας 5

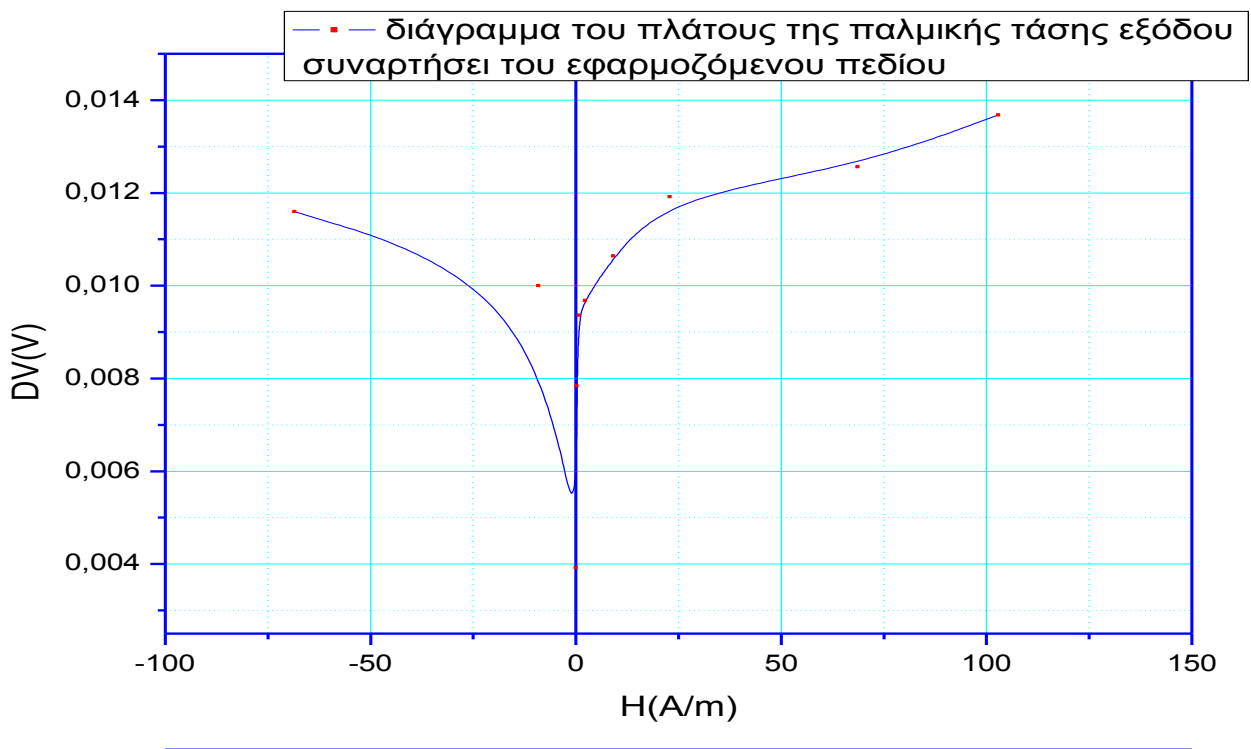




Διάγραμμα 46



Διάγραμμα 47

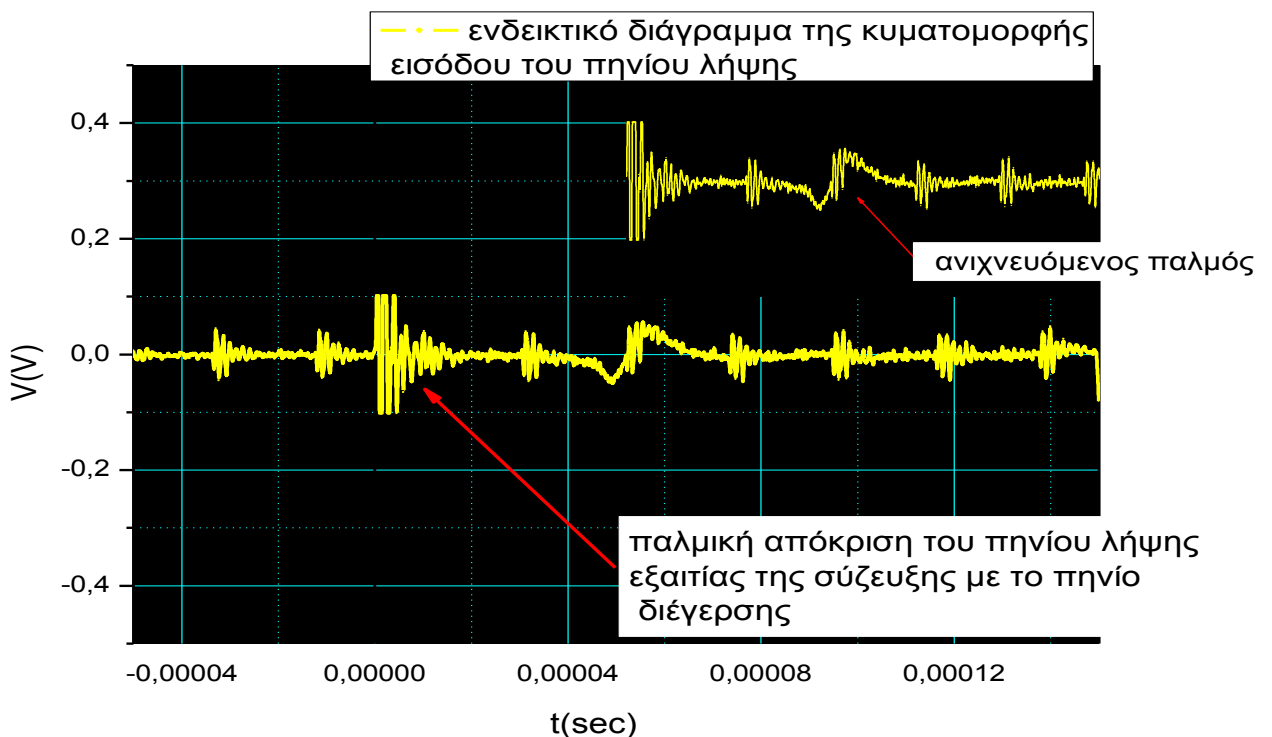


Διάγραμμα 48

## 9 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

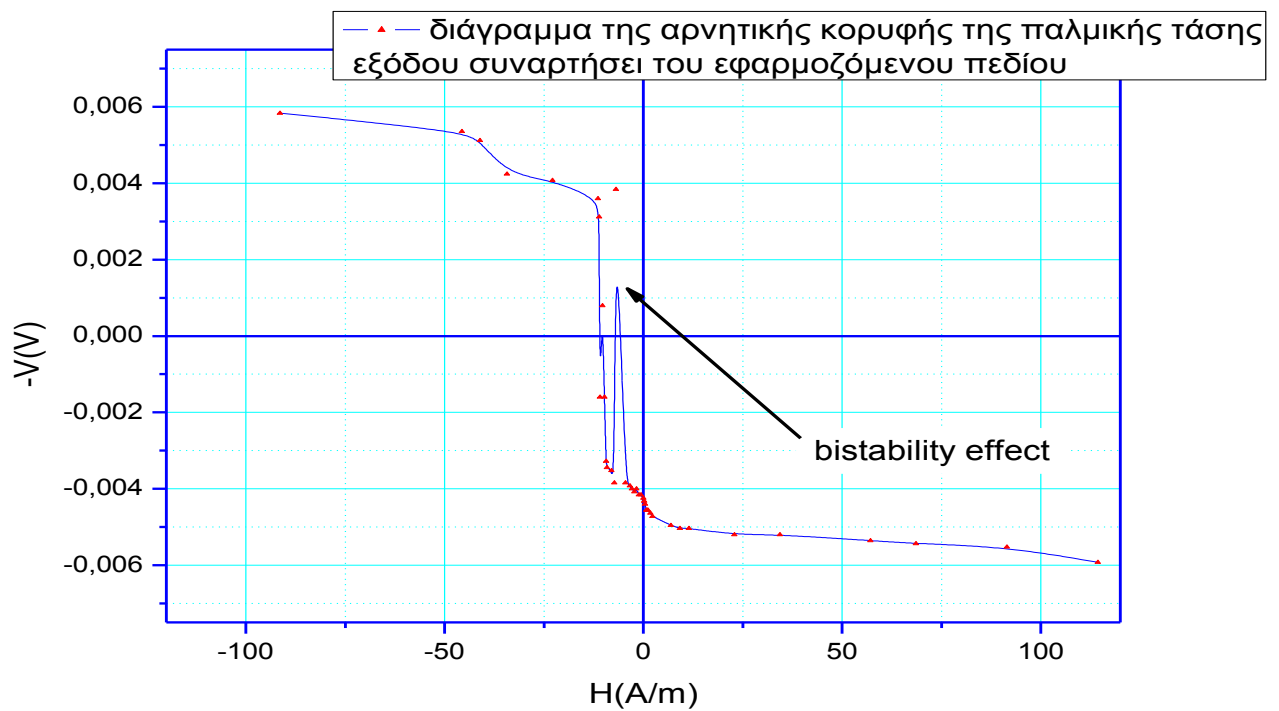
Μετά από μια σειρά πειραμάτων και επεξεργασίας των καταγεγραμμένων αποτελεσμάτων, μπορεί να ειπωθεί ότι κατασκευάστηκε ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου βασισμένος στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, για μαγνητικά πεδία εύρους από -100 μέχρι και 100 A/m.

Για μια δεδομένη διαδικασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος ο παλμός που διεγείρεται από το πρωτεύον πηνίο και διαδίδεται μέσω του μαγνητοσυστολικού υλικού, και ως έξοδος το εύρος της παλμικής τάσης που ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης. Με αυτή τη διαδικασία μπορεί να χαρτογραφηθεί μια μαγνητική περιοχή.



Διάγραμμα 49

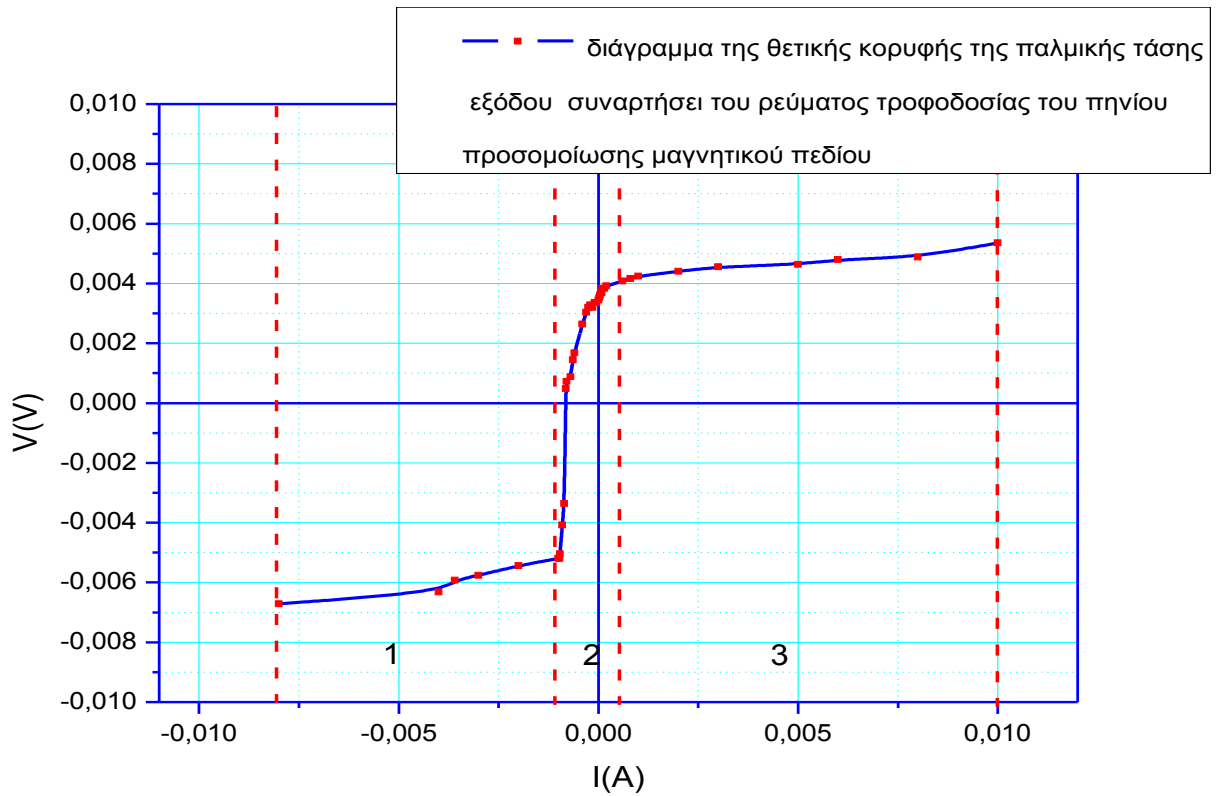
Στα ενδεικτικά διαγράμματα των κυματομορφών του πηνίου λήψης, παρατηρήθηκε ένα αρχικό σήμα το οποίο επαναλαμβάνονταν περιοδικά κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό το σήμα δεν είναι τίποτε άλλο από την παλμική απόκριση του πηνίου λήψης εξαιτίας της σύζευξής του με το πηνίο διέγερσης. Πολλές φορές αυτό το σήμα είναι μεγαλύτερο από τον παλμό που περιμένουμε να πάρουμε από το πηνίο λήψης.



Διάγραμμα 50

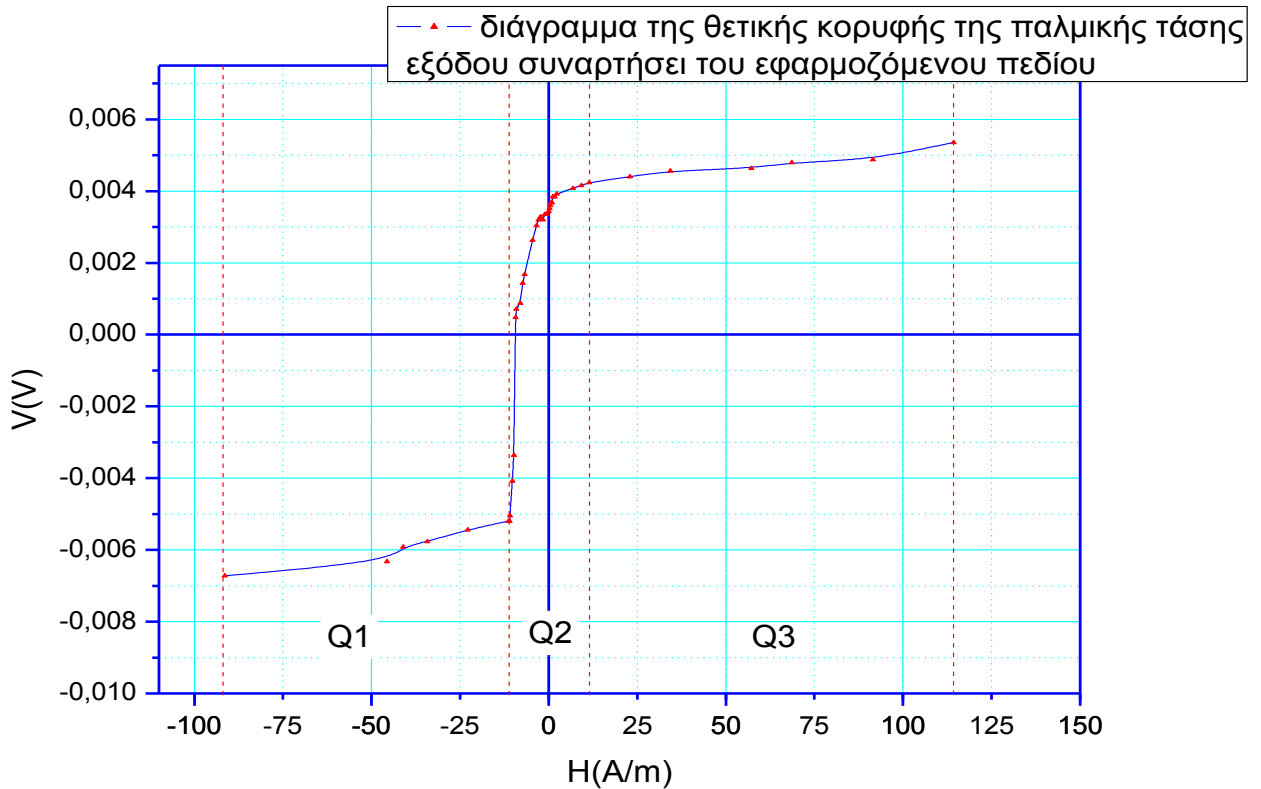
Στα διαγράμματα εξάρτησης της παλμικής τάσης εξόδου από το πεδίο, παρατηρείται μια απότομη αλλαγή πρόσημου της τάσης σε σχέση με τις γειτονικές τιμές της κοντά στα  $-7 \text{ A/m}$ . Αυτό οφείλεται στην επίδραση του πεδίου της γης.

Όπως φάνηκε σε προηγούμενο διάγραμμα, το μαγνητικό πεδίο της γης είναι ικανό να πολώσει τον πυρήνα της πειραματικής διάταξης.



Διάγραμμα 51

Στα διαγράμματα εξάρτησης της τάσης παρατηρούνται τρεις περιοχές. Στην πρώτη παρατηρείται σχεδόν γραμμική μεταβολή της τάσης, στη δεύτερη ο ρυθμός μεταβολής της τάσης αυξάνεται ραγδαία, ενώ στην τρίτη η μεταβολή της τάσης επανέρχεται στον αρχικό της ρυθμό. Αυτό οφείλεται στην ομοιομορφία της ανισοτροπίας του μαγνητοσυστολικού υλικού.



Διάγραμμα 52

Για τις τρεις προαναφερθείσες περιοχές υπολογίστηκε η ευαισθησία της διάταξης χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

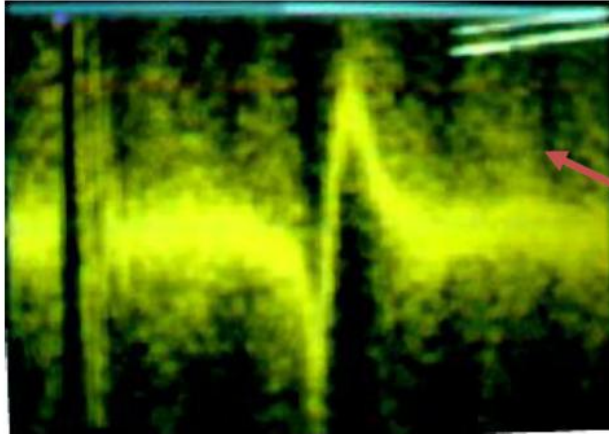
$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta H}$$

<b>Q<sub>1</sub></b>	<b>2,08825E-05</b>
<b>Q<sub>2</sub></b>	<b>0,000457484</b>
<b>Q<sub>3</sub></b>	<b>1,14134E-05</b>

Πίνακας 6

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται στη δεύτερη περιοχή μια υπεροχή ως προς την ευαισθησία, αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως περιοχή λειτουργίας της αισθητήριας διάταξης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μαγνητοσυστολικό υλικό θα πρέπει να είναι ελεύθερο μέσα στο γυάλινο σωλήνα ώστε να μην αλλοιώνεται ο παλμός



Εικόνα 55

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα τα επίπεδα του θορύβου ήταν υψηλά, αυτό οφείλεται στο περιβάλλον που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Για τη εξασφάλιση της επαναληψιμότητας του πειράματος, η διάταξη σταθεροποιήθηκε σε πλαστική βάση ώστε τα μέρη που την απαρτίζουν και οι ακροδέκτες των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν να είναι σταθεροί κατά τη διάρκεια του πειράματος.

## 10 Βιβλιογραφία

- [1] Doebelin E O 1990 *Measurement Systems: Applications and Design* 4th edn (New York: McGraw-Hill)
- [2] Hecceg E E 1976 *Handbook of Measurement and Control* review edn (Pennsauken, NJ: Schaevitz Engineering)
- [3] Boll R 1977 Soft magnetic materials *Vacuumschmelze Handbook* (London: Heyden)
- [4] Ripka P (ed) 2001 *Magnetic Sensors and Magnetometers* (Norwood, MA: Artech House)
- [5] Daughton J M 1999 GMR applications *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 334–42
- [6] Mohri K, Bushida K, Noda M, Yoshida H, Panina L V and Uchiyama T 1995 Magneto-impedance element *IEEE Trans. Magn.* **31** 2455–60
- [7] du Tremolet de Lacheisserie E 1994 *Magnetostriction: Theory and Applications of Magnetoelasticity* (Boca Raton, FL: Chemical Rubber Company Press)
- [8] Jackson J D 1965 *Electricity and Magnetism* (New York: Wiley)
- [9] Jiles D 1993 *Introduction to the Electronic Properties of Materials* (London: Chapman and Hall)
- [10] Jiles D 1991 *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* (London: Chapman and Hall)
- [11] O'Handley R C 1999 *Modern Magnetic Materials* (New York: Wiley)
- [12] Thomas A P, Gibbs M R J, Vincent J H and Ritchie S J 1991 Technical magnetostriction parameters for application of metallic glasses *IEEE Trans. Magn.* **27** 5247–9
- [13] Hayes J P, Stone L A, Snelling H V, Jenner A G and Greenough R D 1997 Magnetic and magnetoelastic properties of thin films by pulsed laser deposition *IEEE Trans. Magn.* **33** 3613–15
- [14] Grabham N J, Beeby S P and White N M 2002 The formulation and processing of a thick-film magnetostrictive material *Meas. Sci. Technol.* **13** 59–64
- [15] Hernando A, Vazquez M and Barandiaran J M 1988 Metallic glasses and sensing applications *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21** 1129–39
- [16] Biekowski A 2000 Magnetoelastic Villari effect in Mn–Zn ferrites *J. Magn. Magn. Mater.* **215/216** 231–3
- [17] Aharoni A 1996 *Introduction to the Theory of Ferromagnetism* (Oxford: Clarendon)
- [18] Onoe M 1962 Theory of ultrasonic delay lines for direct current pulse transmission *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1247
- [19] Vazquez M, Gomez-Polo C, Chen D X and Hernando A 1994 Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications *IEEE Trans. Magn.* **30** 907–12
- [20] Mizutani M, Katoh H, Panina L V, Mohri K and Humphrey F B 1993 Distance sensors utilizing large Barkhausen effect excited by wire current pulse train in twisted amorphous magnetostrictive wires *IEEE Trans. Magn.* **29** 3174–6
- [21] Kawashima K, Kohzawa T, Yoshida H and Mohri K 1993 Magneto-inductive effect in tension-annealed amorphous wires and MI sensors *IEEE Trans. Magn.* **29** 3168–70
- [22] Panina L V and Mohri K 1996 Effect of magnetic structure on giant magneto-impedance in Co-rich amorphous alloys



- J. Magn. Magn. Mater.* **157/158** 137–40
- [23] Mitra A, VazquezM, Hernando A and Gomez-Polo C 1990 Field flash annealing of Co-rich amorphous alloy *IEEE Trans. Magn.* **26** 1415–17
- [24] Chikazumi S 1964 *Physics of Magnetism* (New York: Wiley)
- [25] Chen Y H and Jiles D C 2001 The magnetomechanical effect under torsional stress in a cobalt ferrite composite *IEEE Trans. Magn.* **37** 3069–72
- [26] Thompson T B and Lyon J A M 1956 Analysis and application of magnetostrictive delay lines *Trans. IRE PGUE-4* **8**
- [27] Van den Berg K G 1982 A multiple wire magnetostrictive delay line for improved signal and reduced reflections *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **15** 325–7
- [28] InoueM, Fujita N and Fujii T 1984 Propagation characteristics of magnetoelastic surface waves in magnetic layer on non-piezomagnetic substrate *IEEE Trans. Magn.* **20** 1406–8
- [29] Epstein H and Strum O B 1957 A high performance magnetostriction-sonic delay line *Trans. IRE PGUE-5* **1**
- [30] Kakuno K, Masuda S and Yamada T 1988 Scattered magnetoelastic waves in amorphous wires *J. Physique C* **8** 2037
- [31] InoueM, Tsuboi Y, Makita A, Fujita N, Miyama T and Fujii T 1986 Effect of eddy current loss on the propagation properties of magneto-surface-acoustic-waves in highly magnetostrictive alloy film deposited on glass substrate *Japan. J. Appl. Phys.* **25** 157–9
- [32] Squire P T and Gibbs M R J 1988 Ultrasonic shear-wave absorption in amorphous magnetic ribbons *J. Appl. Phys.* **64** 5408–10
- [33] Scott M G and Kursomovic A 1981 Use of elastic waves to study relaxation in metallic glasses *Met. Sci.* **15** 583–6
- [34] Kakuno K, Masuda S, Yamada T and Mochida H 1987 Effects of wire drawing and annealing on propagation of magnetoelastic waves in amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **23** 2554–6
- [35] Lanotte L, Kaczkowski Z and Maritato L 1992 Enhancement of magnetoelastic wave amplitude in amorphous Co–P alloy by multilayer structure *Europhys. Lett.* **8** 717–22
- [36] Lanotte L, Luponio C and Annunziata A 1989Magnetic and structure phase transitions investigated by standing magnetoelastic waves *J. Magn. Magn. Mater.* **80** 153–8
- [37] Tsuya N, Arai K I and Oksaka T 1978 Saturation magnetostriction of iron rich amorphous ribbons and electronically variable delay line *IEEE Trans. Magn.* **14** 946–8
- [38] InoueM 1989 Study on propagation properties of magnetoelastic waves in Fe-based highly magnetostrictive amorphous materials and their applications *Doctoral Thesis* Toyohashi University of Technology
- [39] Masuda S and Kakuno K 1990 Properties and structure of scattering centers for magnetoelastic waves in amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **26** 1801–3
- [40] James D R 2002 Recent research in ferromagnetic shape memory materials and films *Proc. 5th Conf. on Magnetic Materials Measurements and Modeling* (Iowa State University, Ames, USA)

- [41] Quandt E 1997 Giant magnetostrictive thin film materials and applications *J. Alloys Compounds* **258** 126–32
- [42] Lacey E T M, Lord D G and Grundy P J 1988 Sputtered films of TbDyFe *IEEE Trans. Magn.* **24** 1713–15
- [43] Pasquale M, Infortuna A, Martino L, Sasso C, Beatrice C and Lim S H 2000 Magnetic properties of TbFe thin films under applied stress *J. Magn. Magn. Mater.* **215/216** 769–71
- [44] Chiriac H and Ovari T A 1996 Amorphous glass covered magnetic wires: preparation, properties, applications *Prog. Mater. Sci.* **40** 333–407
- [45] Chiriac H, Ovari T A, Pop Gh and Barariu F 1997 Amorphous glass-covered magnetic wires for sensing applications *Sensors Actuators A* **59** 243–51
- [46] Vázquez M 2001 Soft magnetic wires *Physica B* **299** 302–13
- [47] Fish G E 1990 Soft magnetic materials *Proc. IEEE* **78** 947–72
- [48] Hasegawa R 1984 Soft magnetic properties of metallic glasses *J. Magn. Magn. Mater.* **41** 79–85
- [49] Cobeno A F, Zhukov A P, Pina E, Blanco J M, Gonzalez J and Barandiaran J M 2000 Sensitive magnetoelastic properties of amorphous ribbon for magnetoelastic sensors *J. Magn. Magn. Mater.* **215/216** 743–5
- [50] Imamura K, Kwang-Ho S, Ishiyama K, Inoue M and Arai K I 2001 Anisotropy control of magnetostrictive film patterns *IEEE Trans. Magn.* **37** 2025–7
- [51] Jenner A G, Hayes J P, Stone L A, Snelling H V and Greenough R D 1999 Pulsed laser deposition—an alternative route to the growth of magnetic thin films *Appl. Surf. Sci.* **138/139** 408–12
- [52] Chiriac H, Pletea M and Hristoforou E 1998 Magnetoelastic characterization of thin films dedicated to magnetomechanical microsensor applications *Sensors Actuators A* **68** 414–18
- [53] Herzer G 1990 Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets *IEEE Trans. Magn.* **26** 1397–402
- [54] Marín P, López M, Agudo P, Vázquez M and Hernando A 2001 Applications of amorphous samples presenting high magnetomechanical coupling during the first stages of nanocrystallisation process *Sensors Actuators A* **91** 218–22
- [55] Ahamada B, Alves F and Barruete R 2002 Improvement of magnetoelastic properties of nanocrystalline materials for magnetostrictive sensors *J. Magn. Magn. Mater.* **242–245** 1443–5
- [56] Lanotte L, Ausanio G, Iannotti V and Luponio C 2002 The potentiality of composite elastic magnets as novel materials for sensors and actuators *Proc. 4th European Magnetic Sensor and Actuator Conf. (Athens, Greece, 2002)*
- [57] Prieto J L, Sánchez P, Aroca C, López E, Sánchez M C, de Abril O and Pérez L 2000 Improving the characteristics in magnetostrictive-piezoelectric sensors when the viscous interface is removed *Sensors Actuators A* **84** 338–41
- [58] Füzzer J, Brauer P and Nielsen O V 1998 Magnetic behaviour of amorphous ribbons with creep-induced helical anisotropy and their fluxgate properties *J. Magn. Magn.*

*Mater.* **188** 286–90

- [59] Costa J L, Makino Y and Rao K V 1990 Effects of longitudinal currents and torsion on the magnetization processes in amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **26** 1792–4
- [60] Thomas A P, Gibbs M R J and Squire P T 1990 Dependence of magnetostriction on induced anisotropy in metallic glasses *IEEE Trans. Magn.* **26** 1403–5
- [61] Costa J L, Makino Y and Rao K V 1990 Effects of longitudinal currents and torsion on the magnetisation process in amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **26** 1792–4
- [62] Ogasawara I and Mohri K 1990 Tension annealing cold-drawn amorphous CoFeSiB wires *IEEE Trans. Magn.* **26** 1795–7
- [63] Gonzalez J, Blanco J M, Barandiaran J M, Vazquez M, Hernando A, Rivero G and Niarchos D 1990 Helical magnetic anisotropy induced by current annealing under torsion in amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **26** 1798–800
- [64] Kraus L 1989 A novel method for measurement of the saturation magnetostriction of amorphous ribbons *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **22** 943–7
- [65] Kaneko M, Hashimoto S, Hayakawa M and Aso K 1988 Measuring the magnetostriction of thin films using an optical displacementmeter *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21** 487–9
- [66] Vlasak G, Duhaj P, Patrasova H and Svec P 1983 Apparatus for thermal dilatation and magnetostriction measurements of amorphous ribbons *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16** 1203–7
- [67] Heremans J, Michenaud J P, Iye Y, Miura N, Kido G, Nakamura K and Tanuma S 1983 A capacitive instrument for the measurement of magnetostriction in pulsed fields *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16** 382–6
- [68] Greenough R D and Underhill C 1976 Strain gauges for the measurement of magnetostriction in the range 4–300 K *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **9** 451–4
- [69] Shin Y D, Lee Y H and Rhee J R 1993 Observation of thin film magnetostriction using a piezoelectric sensor *IEEE Trans. Magn.* **29** 3025–7
- [70] Gudeman C S 1990 Magnetostriction mapping of soft magnetic films on thick rigid substrates *IEEE Trans. Magn.* **26** 2580–2
- [71] Kvarnsjo L and Engdahl G 1989 A set-up for dynamic measurements of magnetic and mechanical behaviour of magnetostrictive materials *IEEE Trans. Magn.* **25** 4195–7
- [72] Squire P T 1994 Magnetomechanical measurements of magnetically soft amorphous materials *Meas. Sci. Technol.* **5** 67–81
- [73] Garcia D J and Alascio B 2002 Low field magnetoresistance in double exchange compounds *Physica B* **320** 7–12
- [74] Kim Y K, Sanders S C and Russek S E 1995 Low magnetostriction in annealed NiFe/Ag giant magnetoresistive multilayers *IEEE Trans. Magn.* **31** 3964–6
- [75] Dumpich G, Krome T P and Hausmanns B 2002 Magnetoresistance of single Co nanowires *J. Magn. Magn.*

*Mater.* **248** 241–7

- [76] Li S and Greenblatt M 2002 Large intragrain magnetoresistance in the double perovskite BaLaMnMoO<sub>6</sub> *J. Alloys Compounds* **338** 121–5
- [77] Angelakeris M, Pouloupoulos P, Valassiades O, Flevaris N K, Niarchos D and Nassiopoulou A 2001 GMR study leading to sensor fabrication on the Ag–Co system *Sensors Actuators A* **91** 180–3
- [78] Lenssen K-M H, Van Kesteren H W, Kools J C S, De Nooijer M C, Coehoorn R, Folkerts W and Rijkse Th G S M 1997 Giant magnetoresistance and its application in recording heads *Sensors Actuators A* **60** 90–7
- [79] Kraus L 2002 GMI modeling and material optimization *Proc. 4th European Magnetic Sensor and Actuator Conf. (Athens, Greece, 2002)*
- [80] Pirota K R, Kraus L, Chiriac H and Knobel M 2001 Magnetostriction and GMI in Joule-heated CoFeSiB glass-covered microwires *J. Magn. Magn. Mater.* **226/230** 730–2
- [81] Tejedor M, Hernando B, Sánchez M L, Prida V M and Gorria P 2001 Magnetic domains and magnetoimpedance effect during the nanocrystallization of Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16.5</sub>B<sub>6</sub> ribbons *J. Non-Cryst. Solids* **287** 396–400
- [82] Yoshinga T, Furukawa S and Mohri K 1999 Magneto-impedance effect in etched thin amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **35** 3613–15
- [83] Vázquez M, Knobel M, Sánchez M L, Valenzuela R and Zhukov A P 1997 Giant magnetoimpedance effect in soft magnetic wires for sensor applications *Sensors Actuators A* **59** 20–9
- [84] Kawashima K, Ogasawara I, Ueno S and Mohri K 1999 Asymmetrical magneto-impedance effect in torsion-annealed Co-rich amorphous wire for MI micro magnetic sensor *IEEE Trans. Magn.* **35** 3610–12
- [85] Shen L P, Uchiyama T, Mohri K, Kita E and Bushida K 1997 Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire *IEEE Trans. Magn.* **33** 3355–7
- [86] Freitas P P, Silva F, Oliveira N J, Melo L V, Costa L and Almeida N 2000 Spin valve sensors *Sensors Actuators A* **81** 2–8
- [87] Kim S D, van't Erve O M J, Jansen R, Anil Kumar P S, Vlutters R and Lodder J C 2001 Fabrication technology for miniaturization of the spin-valve transistor *Sensors Actuators A* **91** 166–8
- [88] Attenborough K, Boeve H, de Boeck J, Borghs G and Celis J-P 2000 Ultra-sensitive spin-valve structures grown on n-GaAs by single bath electrodeposition *Sensors Actuators A* **81** 9–12
- [89] Stanley F E, Marrows C H, Zoller I, Hill E W and Hickey B J 2000 Optimisation of spin-valves on rough substrates *Sensors Actuators A* **81** 32–6
- [90] Kitade Y, Kikuchi H, Kishi H, Otagiri M and Kobayashi K 1995 Giant magnetoresistance effect in CoNiFe/Cu spin valves *IEEE Trans. Magn.* **31** 2600–2
- [91] Yuasa S, Nagahama T and Suzuki Y 2002 Spin-polarized resonant tunnelling in magnetic tunnel junctions *Science* **297** 234–7
- [92] Kechrakos D and Trohidou K N 2002 Spin correlations and

electronic transport in magnetic nanoclusters *Physica B* **318** 360–4

[93] Diaz de Lezana K, Garc´ıa-Arribas A, Barandiar´an J M and Guti´errez J 2001 Comparative study of alternative circuit configurations for inductive sensors *Sensors Actuators A* **91** 226–9

[94] Nielsen O V, Brauer P, Primdahl F, Jørgensen J L, Boe C, Risbo T, Deyerler M and Bauereisen S 1997 A high-precision triaxial fluxgate sensor for space applications: layout and choice of materials *Sensors Actuators A* **59** 168–76

[95] Chiriac H, Hristoforou E, Neagu M, Pieptanariu M and Castano F G 2000 Linear variable differential transformer sensor using Fe-rich amorphous wires as active core *J. Appl. Phys.* **87** 5344–6

[96] Hernando A, Vazquez M and Barandiaran J M 1988 Metallic glasses and sensing applications *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21** 1129–39

[97] Barandiaran J M and Gutierrez J 1997 Magnetoelastic sensors based on soft amorphous magnetic alloys *Sensors Actuators A* **59** 38–42

[98] V´azquez M and Hernando A 1996 A soft magnetic wire for sensor applications *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** 939–49

[99] Kano Y, Hasebe S, Huang C, Yamada T and Inubuse M 1990 Linear position detector with rod shape electromagnet *IEEE Trans. Magn.* **26** 2023–5

[100] Vertesy G, Szollosy J and Lovas A 1990 Magnetoinductive position sensor *IEEE Trans. Magn.* **26** 2026–8

[101] Mohri K and Shirosugi T 1981 New extensometers using amorphous magnetostrictive ribbon wound cores *IEEE Trans. Magn.* **17** 1317–19

[102] Barandiaran J M, Gutierrez J and G´omez-Polo C 2000 New sensors based on the magnetoelastic resonance of metallic glasses *Sensors Actuators A* **81** 154–7

[103] Worthington T K and Thompson D A 1980 A magnetoacoustic position sensor *IEEE Trans. Magn.* **6** 693–5

[104] Thompson D A and Worthington T K 1980 Transducers for a magnetostrictive position sensor *IBM Tech. Disc. Bull.* **22** 5561

[105] Campbell P 1990 Magnetostrictive sensors for rotary position encoders *IEEE Trans. Magn.* **26** 2029–31

[106] Lemarquand G 1990 Annular magnet position sensor *IEEE Trans. Magn.* **26** 2041–3

[107] Lassow R and Meydan T 1995 An angular accelerometer using amorphous wire *IEEE Trans. Magn.* **31** 3179–81

[108] Meydan T and Choudhary P 1997 A novel accelerometer design using the inverse magnetostrictive effect *Sensors Actuators A* **59** 51–5

[109] Shen L P, Mohri K, Uchiyama T and Honkura Y 2000 Sensitive acceleration sensor using amorphous wire SI element combined with CMOS IC multivibrator for environmental sensing *IEEE Trans. Magn.* **36** 3667–9

[110] Lemarquand V 1998 A new bi-directional inductive force sensor *IEEE Trans. Magn.* **34** 1333–5

[111] Son D and Sievert J 1990 Force sensor making use of changes in the maximum induction of an amorphous alloy *IEEE Trans. Magn.* **26** 2017–19

- [112] Kraus L, Svec P and Bydovský J 2002 Amorphous CoFeCrSiB ribbons for strain sensing applications *J. Magn. Magn. Mater.* **242–245** 241–3
- [113] Pasquale M, Sasso C P, Velluto M and Lim S H 2002 Stress sensing with Co based ferrite composites *J. Magn. Magn. Mater.* **242–245** 1460–3
- [114] Arcas J, Vázquez M, Hernando A and Gómez-Polo C 1997 Sensor applications based on induced magnetic anisotropy in toroidal cores *Sensors Actuators A* **59** 101–4
- [115] Gibbs M R J, Watts R, Karl W, Powell A L and Yates R B 1997 Microstructures containing piezomagnetic elements *Sensors Actuators A* **59** 229–35
- [116] Affane W, Powell A L and Gibbs M R J 1996 Performance modelling of micromachined sensor membranes coated with piezomagnetic material *Sensors Actuators A* **51** 219–24
- [117] Jain M K and Grimes C A 2001 A wireless magnetoelastic micro-sensor array for simultaneous measurement of temperature and pressure *IEEE Trans. Magn.* **37** 2022–4
- [118] Karl W J, Powell A L, Watts R, Gibbs M R J and Whitehouse C R 2000 A micromachined magnetostrictive pressure sensor using magneto-optical interrogation *Sensors Actuators A* **81** 137–41
- [119] Fosalau C, Cretu M and Postolache O 2000 Circular displacement sensor using magnetostrictive amorphous wires *IEEE Trans. Magn.* **36** 557–60
- [120] Chen Y, Snyder J E, Schwichtenberg C R, Dennis K W, McCallum R W and Jiles D C 1999 Metal-bonded Co–ferrite composites for magnetostrictive torque sensor applications *IEEE Trans. Magn.* **35** 3652–4
- [121] Shen L P, Naruse Y, Kusumoto D, Kita E, Mohri K, Uchiyama T and Yoshinaga T 1999 Sensitive stress sensor using amorphous magnetostrictive wires on both ends fixed double beam and diaphragm *IEEE Trans. Magn.* **35** 3619–21
- [122] Garshelis I J 1992 A torque transducer utilizing a circularly polarized ring *IEEE Trans. Magn.* **28** 2202–4
- [123] Miyashita K, Takahashi T, Kawamata S, Morinaga S and Hoshi Y 1990 Non contact magnetic torque sensor *IEEE Trans. Magn.* **26** 1560–2
- [124] Fleming W J 1989 Magnetostrictive torque sensor performance-nonlinear analysis *IEEE Trans. Veh. Technol.* **38** 159–67
- [125] Sasada I, Tanaka T, Baba M and Harada K 1988 Detection of instantaneous torque using the magnetostrictive effect in a practical ferromagnetic shaft *IEEE Trans. Magn.* **24** 2886–8
- [126] Son D, Lim S J and Kim C S 1992 Noncontact torque sensor using the difference of maximum induction of amorphous cores *IEEE Trans. Magn.* **28** 2205–7
- [127] Ishikawa K, Mohri K, Akagi K, Kashiwagi Y and Fukasaku H 1991 Torque sensor using perpendicularly magnetizing coils *IEEE Trans. Magn.* **27** 4849–51
- [128] Pinkerton F E, Herbst J F, Olk C H, Meyer M S and Moleski J J 2002 Tb<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub> Fe<sub>2</sub>/Fe composites: compositional effects on torque response *J. Magn. Magn. Mater.* **241** 162–72
- [129] Chen Y, Kriegermeier-Sutton B K, Snyder J E, Dennis K W, McCallum R W and Jiles D C 2001 Magnetomechanical

- effects under torsional strain in iron, cobalt and nickel  
*J. Magn. Magn. Mater.* **236** 131–8
- [130] Hristoforou E, Avaritsiotis J N and Chiriach H 1997 New flowmeters based on amorphous magnetic wires *Sensors Actuators A* **59** 94–6
- [131] 1989 Non destructive evaluation and quality control *Metals Handbook* vol 17, 9th edn (Metals Park, OH: American Society for Metals)
- [132] Ki D O, Ranade J, Arya V, Wang A and Claus R O 1997 Optical fibre Fabry–Perot interferometric sensor for magnetic field measurement *IEEE Photonics Technol. Lett.* **9** 797–9
- [133] Davis A R, Patrick S S, Dandridge A and Bucholtz F 1992 Remote fibre-optic AC magnetometer *Electron. Lett.* **28** 271–3
- [134] Bucholtz F, Dagenais D M and Koo K P 1989 High-frequency fibre-optic magnetometer with 70 fT/square root (Hz) resolution *Electron. Lett.* **25** 1719–21
- [135] Koo K P, Bucholtz F, Dagenais D M and Dandridge A 1989 A compact fibre-optic magnetometer employing an amorphous metal wire transducer *IEEE Photonics Technol. Lett.* **1** 464–6
- [136] Dagenais D M, Bucholtz F, Koo K P and Dandridge A 1988 Demonstration of 3 pT/square root (Hz) at 10 Hz in a fibre-optic magnetometer *Electron. Lett.* **24** 1422–3
- [137] Nielsen O V, Brauer P, Primdahl F, Jørgensen J L, Boe C, Risbo T, Deyerler M and Bauereisen S 1997 A high-precision triaxial fluxgate sensor for space applications: Layout and choice of materials *Sensors Actuators A* **59** 168–76
- [138] Ripka P 2000 New directions in fluxgate sensors *J. Magn. Magn. Mater.* **215/216** 735–9
- [139] Doherty J F, Arigapudi S and Weber R J 1994 Spectral estimation for a magnetostrictive magnetic field sensor *IEEE Trans. Magn.* **30** 1274–90
- [140] Dagenais D M, Bucholtz F, Koo K P and Dandridge A 1989 Detection of low-frequency magnetic signals in a magnetostrictive fibre-optic sensor with suppressed residual signal *J. Lightwave Technol.* **7** 881–7
- [141] Mermelstein M D and Dandridge A 1988 Magnetostrictive metallic glass ribbon gradiometer *Electron. Lett.* **24** 895–6
- [142] Sánchez M C, Aroca C, Sánchez P, Prieto J L and López E 1997 Current effects in magnetostrictive piezoelectric sensors *J. Magn. Magn. Mater.* **174** 289–94
- [143] Chung R, Weber R and Jiles D C 1991 A Terfenol based magnetostrictive diode laser magnetometer *IEEE Trans. Magn.* **27** 5358–60
- [144] Uchiyama T, Mohri K, Panina L V and Furuno K 1995 Magneto-impedance in sputtered amorphous films for micro magnetic sensor *IEEE Trans. Magn.* **31** 3182–4
- [145] Inada K, Mohri K and Inuzuka K 1994 Quick response large current sensor using amorphous MI element resonant multivibrator *IEEE Trans. Magn.* **30** 4623–5
- [146] Hauser H, Steindl R, Hausleitner C, Pohl A and Nicolics J 2000 Wirelessly interrogable magnetic field sensor utilizing giant magneto-impedance effect and surface acoustic wave devices *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **49** 648–52
- [147] Atkinson D, Squire P T, Maylin M G and Gore J 2000 An

- integrating magnetic sensor based on the giant magneto-impedance effect *Sensors Actuators A* **81** 82–5
- [148] Dimitropoulos P 2001 *PhD Thesis* National Technical University of Athens
- [149] Pulido E, del Real R P, Conde F, Rivero G, Vazquez M, Ascibar E and Hernando A 1991 Amorphous wire magnetic field and dc current sensor based on the inverse Wiedemann effect *IEEE Trans. Magn.* **27** 5241–3
- [150] Gutierrez J and Barandiaran J M 1995 High magnetostriction metallic glasses used as magnetoelastic labels *IEEE Trans. Magn.* **31** 3146–8
- [151] Ishiyama K, Imamura K and Arai K I 2002 Smart actuator with magneto-elastic strain sensor *J. Magn. Magn. Mater.* **242–245** 1163–5
- [152] Altpeter I, Theiner W A, Schneider E, Pritchard S E and Silk M G 1996 Non-destructive evaluation of stress states in steels *NDT&E Int.* **29** 342
- [153] Sasada I and Watanabe N 1995 Eddy current probe for nondestructive testing using cross-coupled figure-eight coils *IEEE Trans. Magn.* **31** 3149–51
- [154] Ullate L G, Ibanez A, Anaya J J and Sanchez M T 1998 Performances of remote digital processing in automated non-destructive evaluation *Sensors Actuators A* **68** 447–53
- [155] Parakka A and Jiles D C 1995 Magneprobe: A portable system for non-destructive testing of ferromagnetic materials *J. Magn. Magn. Mater.* **140–144** 1841–2
- [156] Sasada I, Suzuki N, Sasaoka T and Toda K 1994 In-process detection of torque on a drill using magnetostrictive effect *IEEE Trans. Magn.* **30** 4632–4
- [157] Adi P, Memon Z A, Mapps D J and Rakowski R T 1990 Serpentine MR Elements for tactile sensor applications *IEEE Trans. Magn.* **26** 2047–9
- [158] Okabe H and Wakaumi H 1990 Grooved bar-code pattern recognition system with magnetoresistive sensor *IEEE Trans. Magn.* **26** 1575–7
- [159] Hausleitner C, Steindl R, Pohl A, Hauser H, Goiser A M J and Siefert F 2001 Cordless batteryless wheel mouse application utilizing radio requestable SAW devices in combination with the giant magneto-impedance effect *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **49** 817–22
- [160] Glover G M, Hall G, Matheson A J and Stretton J L 1968 A magnetostrictive instrument for measuring the viscoelastic properties of liquids in the frequency range 20–100 kHz *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **1** 383–8
- [161] Brennan M J, Garcia-Bonito J, Elliott S J, David A and Pinnington R J 1999 Experimental investigation of different actuator technologies for active vibration control *Smart Mater. Struct.* **8** 145–53
- [162] Brennan M J, Elliott S J and Pinnington R J 1996 A non-intrusive fluid-wave actuator and sensor pair for the active control of fluid-borne vibrations in a pipe *Smart Mater. Struct.* **5** 281–96
- [163] Castano F J, Vazquez M, Ovari T A, Chen D X and Hernando A 2000 AC field-induced rotation of magnetostrictive wires: operating principle for field positioning microrotor sensors *IEEE Trans. Magn.* **36** 2791–3
- [164] Meydan T and Oduncu H 1997 Enhancement of



- magnetostrictive properties of amorphous ribbons for a biomedical application *Sensors Actuators A* **59** 192–6
- [165] Klinger T, Pfutzner H, Schonhuber P, Hoffmann K and Bachl N 1992 Magnetostrictive amorphous sensor for biomedical monitoring *IEEE Trans. Magn.* **28** 2400–2
- [166] Klinger T, Schmollebeck F, Pfutzner H and Schonhuber P 1992 3D-CAD of an amorphous magnetostrictive sensor for monitoring the movements of the human spine *IEEE Trans. Magn.* **28** 2397–9
- [167] Oduncu H and Meydan T 1996 A novel method of monitoring biomechanical movements using the magnetoelastic effect *J. Magn. Mater.* **160** 233–6
- [168] Shen L.P, Mohri K, Abudukelimu AL X and Aoyama H 2001 Mechano-encephalogram based on amorphous wire micro SI acceleration sensor *IEEE Trans. Magn.* **37** 2007–9
- [169] Aston A 2001 Biological warfare canaries *IEEE Spectrum* **38** (10) 35–40
- [170] IEC standards on electromagnetic compatibility
- [171] Treutler C P O 2001 Magnetic sensors for automotive applications *Sensors Actuators A* **91** 2–6
- [172] Uchiyama T, Mohri K, Itho H, Nakashima K, Ohuchi J and Sudo Y 2000 Car traffic monitoring system using MI sensor built-in disk set on the road *IEEE Trans. Magn.* **36** 3670–2
- [173] Honkura Y 2001 Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use *Int. Workshop on Magnetic Wires (San Sebastian, Spain)*
- [174] Nishibe Y, Nonomura Y, Tsukada K, Takeuchi M, Miyashita M and Ito K 1998 Determination of engine misfiring using magnetoelastic torque sensor *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **47** 760–5
- [175] Wulfhekel W, Ding H F, Hertel R and Kirschner J 2001 Amorphous wires as tips in spin-polarized scanning tunnelling microscopy *Int. Workshop on Magnetic Wires (San Sebastian, Spain)*
- [176] Olsen P T, Tew W L, Williams E R, Elmquist R E and Sasaki H 1991 Monitoring the mass standard via the comparison of mechanical to electrical power *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2** 115–20
- [177] Forester D W, Vittoria C, Webbs D C and Davis K L 1978 Variable delay lines using magnetostrictive metallic glass film overlays *J. Appl. Phys.* **49** 1794–6
- [178] Yamaguchi M, Hashimoto K Y, Kogo H and Naoe M 1980 Variable SAW delay line using TbFe<sub>2</sub> film *IEEE Trans. Magn.* **16** 916–18
- [179] Inoue M and Fujita N 1993 Optimum geometrical structure of highly magnetostrictive multilayer films for horizontally polarized high frequency magneto-surface-acoustic-wave propagation *J. Appl. Phys.* **73** 6159–61
- [180] Hristoforou E 1997 Magnetostrictive delay lines and their applications *Sensors Actuators A* **59** 183–91
- [181] Hristoforou E 2002 Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications *J. Magn. Mater. Mater.* **249** 387–92
- [182] Hauser H, Hristoforou E and Ktena A 2002 *Magnetism and Magnetic Materials 2002 Conf. (Tampa, FL, USA)* (2003 *J. Appl. Phys.* at press)
- [183] Hauser H 2002 Magnetic hysteresis modeling for electronic

- and sensor devices *Proc. 4th European Magnetic Sensor and Actuator Conf. (Athens, Greece)*
- [184] Lanotte L and Iannotti V 1995 Effects of local magnetization changes on resonant standing magnetoelastic waves *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* **16** 155–63
- [185] Lanotte L, Kaczkowski Z, Pasquino R, Palezzo L and Tagliaferri V 1994 Magnetoelastic wave application to investigate laser annealing effects in ferromagnetic glass *J. Magn. Magn. Mater.* **135** 265–70
- [186] Hristoforou E and Reilly R E 1991 Nonuniformity in amorphous ribbon delay lines after stress and current annealing *J. Appl. Phys.* **69** 5008–10
- [187] Hristoforou E and Niarchos D 1993 Fast characterisation of magnetostrictive delay lines *IEEE Trans. Magn.* **29** 3147–9
- [188] Chiriac H, Hristoforou E, Neagu M and Darie I 1997 On the bias field dependence of FeSiB wire delay lines response *Sensors Actuators A* **59** 75–8
- [189] Chiriac H, Hristoforou E, Neagu M, Darie I and Barariu F 1996 Dependence of the sound velocity in FeSiB amorphous wires on the magnetic bias field *J. Magn. Magn. Mater.* **157/158** 229–30
- [190] Hristoforou E and Reilly R E 1990 New mechanical stress transducers based on amorphous alloys *IEEE Trans. Magn.* **26** 1563–5
- [191] Hristoforou E, Tsomokou C, Chiriac H, Neagu M and Nagacevschi V 1997 Improving the magnetostrictive delay line resolution *Sensors Actuators A* **59** 84–8
- [192] Hristoforou E, Chiriac H and Neagu M 1994 Pulse width effect in magnetostrictive amorphous ribbons and wires *Phys. Status Solidi a* **143** 391–7
- [193] Chiriac H, Hristoforou E, Neagu Maria, Darie I and Nagacevschi V 1997 Pulse effect on the response of FeSiB wire delay lines *Mater. Sci. Eng. A* **226–228** 1093–7
- [194] Hristoforou E, Chiriac H and Neagu M 1998 An alternative method for determining the  $\lambda(H)$  function in magnetostrictive amorphous alloys *Sensors Actuators A* **67** 49–54
- [195] Hristoforou E, Hauser H and Niarchos D 2002 Magnetostrictive delay line characterization *J. Magn. Magn. Mater.* 269–72
- [196] 1991 Sony position sensors leaflet
- [197] Germano R, Ausanio G, Iannotti V, Lanotte L and Luponio C 2000 Direct magnetostriction and magnetoelastic wave amplitude to measure a linear displacement *Sensors Actuators A* **81** 134–6
- [198] Chiriac H and Marinescu C S 2000 New position sensor based on ultrasonic standing waves in FeSiB amorphous wires *Sensors Actuators A* **81** 174–5
- [199] Germano R and Lanotte L 1997 Application of magnetoelastic waves for sensors of displacement *Sensors Actuators A* **59** 337–41
- [200] Lanotte L and Germano R 1997 Application of magnetoelastic waves for sensors of displacement *Sensors Actuators A* **59** 337–41
- [201] Kemidis P, Orfanidou C and Hristoforou E 2002 Position sensors based on the delay line principle *J. Optoelectron.*

*Adv. Mater.* **4** 347–52

- [202] Meydan T and Elshebani M S M 1992 Displacement transducers using magnetostrictive delay line principle *J. Magn. Magn. Mater.* **112** 344–6
- [203] Legras O, Levin L and Royer D 1993 A liquid level sensor using the absorption of guided acoustic waves *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **40** 418–21
- [204] Hristoforou E and Niarchos D 1992 Amorphous wires in displacement sensing techniques *J. Magn. Magn. Mater.* **116** 177–88
- [205] Hristoforou E, Reilly R E and Niarchos D 1993 Sensors based on eddy currents in a moving disk *IEEE Trans. Magn.* **29** 3171–3
- [206] Hristoforou E and Reilly R E 1994 Displacement sensors using soft magnetostrictive alloys *IEEE Trans. Magn.* **30** 2728–33
- [207] Murakami A, Hosaka K, Fukushima M, Maeda M and Tsuya N 1988 An amorphous magnetostrictive delayline cordless digitizer *IEEE Trans. Magn.* **24** 1758–60
- [208] Murakami A, Hosaka K, Fukushima M, Maeda M and Tsuya N 1989 An amorphous magnetostrictive delay-line cordless digitizer *IEEE Trans. Magn.* **25** 2739–44
- [209] Meydan T and Elshebani M S M 1991 A magnetostrictive delay line digitizer by using amorphous ribbon materials *IEEE Trans. Magn.* **27** 5250–2
- [210] Hristoforou E and Reilly R E 1991 A digitiser based on reflections in delay lines *J. Appl. Phys.* **70** 4577–80
- [211] Hristoforou E, Neagu M and Chiriac H 1999 New self excited accelerometers based on magnetostrictive delay lines *IEEE Trans. Magn.* **35** 3622–4
- [212] Hristoforou E, Chiriac H, Neagu M and Darie I 1998 New load cells and torque meters based on magnetic amorphous alloy wires *Sensors Actuators A* **68** 307–15
- [213] Hristoforou E and Reilly R E 1992 Force sensors based on distortion in delay lines *IEEE Trans. Magn.* **28** 1974–7
- [214] Pletea M, Chiriac H, Hristoforou E and Neagu M 2001 Miniaturized magnetostrictive delay line arrangement using multilayer-like structure *Sensors Actuators A* **92** 115–18
- [215] Hristoforou E and Reilly R E 1993 Tensile stress distribution sensors based on amorphous alloys *J. Magn. Magn. Mater.* **119** 247–53
- [216] Leypold GmbH 1991 *Film Thickness Sensor Data*
- [217] Hristoforou E, Chiriac H and Avaritsiotis J N 1999 Thin film thickness sensor based on a new magnetostrictive delay line arrangement *Sensors Actuators A* **76** 156–61
- [218] Ripka P 1994 Magnetic sensors for industrial and field applications *Sensors Actuators A* **42** 394–7
- [219] Hristoforou E, Chiriac H and Neagu M 1997 A new magnetic field sensor based on magnetostrictive delay lines *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **46** 632–5
- [220] Frost and Sullivan, World Non Destructive Test equipment, *Market report*
- [221] Hristoforou E, Niarchos D, Chiriac H and Neagu M 2001 Non destructive evaluation sensors based on magnetostrictive delay lines *Sensors Actuators A* **92** 132–6
- [222] Fathimani A A and Bell J F W 1978 A new resonant thermometer for nuclear reactor applications *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **11** 588–96

[223] E Hristoforou Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications

[224]H.Chiriac, E.Hristoforou, Maria Neague, IDarie, and Firuja Barariu influence of magnetic field on the response of FeSiB wire delay lines

[225] Evangelos Hristoforou, Horia Chiriac, and Maria Neagu  
A New Magnetic Field Sensor Based on Magnetostrictive Delay Lines

[226] H. Chiriac , E. Hristoforou , Maria Neagu , L. Darie On the bias field dependence of FeSiB wire delay lines response

[227]Solenoids as Magnetic Field Sources  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfie.html#c1>