



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάπτυξη σημειακού αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Ι. Γιαννόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Εμμανουήλ Χουρδάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάπτυξη σημειακού αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπύρος Γιαννόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Μαρτίου 2025.

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Σπυρίδων Ι. Γιαννόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σπύρος Γιαννόπουλος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι μαγνητικοί αισθητήρες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη σύγχρονη τεχνολογία, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία στην ανίχνευση και μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Απαντώνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που συμβάλλουν στην ενίσχυση της ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της αποδοτικότητας σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η ιατρική, η ναυτιλία και η πλοήγηση. Οι αισθητήρες αυτοί αξιοποιούν τις ιδιότητες των μαγνητικών υλικών, όπως τη μαγνητική διαπερατότητα, την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη μαγνητική επαγωγή, επιτρέποντας την μέτρηση και εξαγωγή κρίσιμων παραμέτρων για τη δομή και την κατάσταση ενός υλικού.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα μιας καινούριας διάταξης αισθητήρα που έχει στόχο τον προσδιορισμό της σημειακής μαγνητικής διαπερατότητας φερρομαγνητικών υλικών, όπως του ηλεκτρικού χάλυβα. Σε μελλοντική δουρεία, θα γίνει συσχέτιση της διαπερατότητας με την κατάσταση υγείας του μετρούμενου υλικού, με τρόπο μη καταστροφικό, μέσω της καμπύλης MASC. Η διάταξη θα λειτουργεί σαν ένα “μαγνητικό μικροσκόπιο” και βασίζεται στο φαινόμενο της Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης. Για την κατασκευή του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκαν κατασκευαστικές τεχνικές της Μικροηλεκτρονικής όπως Φωτολιθογραφία, Sputtering, Lift-off σε καθαρό χώρο.

Λέξεις-κλειδιά: Μαγνητικά υλικά, Μη Καταστροφικός Έλεγχος, Ηλεκτρικός Χάλυβας, Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση, Φωτολιθογραφία.

Abstract

Magnetic sensors play a crucial role in modern technology, offering high precision and sensitivity in detecting and measuring magnetic fields. They are found in a wide range of applications that enhance safety, functionality, and efficiency in industries such as automotive, medical, maritime, and navigation. These sensors exploit the properties of magnetic materials, including magnetic permeability, magnetic field intensity, and magnetic induction, enabling the measurement and extraction of critical parameters regarding the structure and condition of a material.

In this thesis, the effectiveness of a novel sensor setup designed to determine the local magnetic permeability of ferromagnetic materials, such as electrical steel, will be investigated. In future work, the correlation between permeability and the health condition of the measured material will be explored in a non-destructive manner using the MASC curve. The setup will function as a "magnetic microscope" and is based on the Anisotropic Magnetoresistance (AMR) effect. Various microelectronics fabrication techniques were employed in the sensor's construction, including photolithography, sputtering, and lift-off in a cleanroom environment.

Keywords: *Magnetic materials, Non-Destructive Testing, Electrical Steel, Anisotropic Magnetoresistance, Photolithography.*

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Θέμα της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και πραγματοποίηση μετρήσεων ενός μαγνητικού μικροαισθητήρα για τον σημειακό χαρακτηρισμό της μαγνητικής διαπερατότητας φερρομαγνητικών δοκιμίων, όπως του ηλεκτρικού χάλυβα. Σκοπός της διπλωματικής ήταν το proof of concept, δηλαδή ότι η υπό εξέταση γενικότερη διάταξη θα μπορέσει να αξιοποιηθεί ως αισθητήρας και να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την “υγεία” του δοκιμίου. Αποτελεί προσπάθεια εξέλιξης προηγούμενης διάταξης αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας [1]. Η κατασκευή και οι μετρήσεις των αισθητήρων πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Στο κεφάλαιο 1, γίνεται μια εισαγωγή στη γεωμετρία της διάταξης του αισθητήρα, στον τρόπο κατασκευής του και στις θεωρητικές αρχές στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του. Αναλύονται επίσης και πιθανές εφαρμογές του στην βιομηχανία.

Το κεφάλαιο 2, πραγματεύεται την θεωρητική θεμελίωση των φαινομένων στα οποία στηρίζεται ο αισθητήρας, στα μετρούμενα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το φερρομαγνητικό υλικό, στο πώς αυτά σχετίζονται μεταξύ τους και τις πληροφορίες που παρέχουν για την κατάσταση “υγείας” του. Αναλύονται επίσης οι υπάρχουσες διατάξεις χαρακτηρισμού των παραπάνω μεγεθών, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους και τέλος κάποιες από τις κατασκευαστικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του αισθητήρα.

Το κεφάλαιο 3 αφορά την διαδικασία σχεδιασμού του αισθητήρα με χρήση του περιβάλλοντος KLayout. Αναφέρονται οι σχεδιαστικοί περιορισμοί και πως αντιμετωπίστηκαν, οι λόγοι για τους οποίους προτιμήθηκαν ορισμένες γεωμετρίες έναντι άλλων και ο σχεδιασμός της μάσκας της φωτολιθογραφίας.

Το κεφάλαιο 4 περιέχει την κατασκευή των αισθητήρων σε δύο διαφορετικά υποστρώματα, ένα πυριτίου με επίστρωση SiO_2 και ένα από quartz. Αρχικά

αναλύονται όλα τα 13 βήματα του process και στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από μικροσκόπιο μετά την εκτέλεση του κάθε βήματος. Τέλος, γίνεται σχολιασμός και αποτίμηση των αποτελεσμάτων σε ορισμένα κρίσιμα σημεία.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαδικασία ηλεκτρικού χαρακτηρισμού των παραχθέντων αισθητήρων. Επιλέγονται συγκεκριμένοι αισθητήρες και αναλύεται η απόκριση τους κατά την διαδικασία διέγερσης, γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση καθώς και μελέτη διαφορών μεταξύ της λειτουργίας ενός ίδιου αισθητήρα στα δύο διαφορετικά υποστρώματα. Επίσης πραγματοποιούνται κάποια πειράματα με σκοπό την απόδειξη της χρησιμότητας της γενικότερης διάταξης ως μικροαισθητήρα. Τέλος, γίνεται η ερμηνεία των μετρήσεων και των συνθηκών στις οποίες προκύπτουν.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια γενική αξιολόγηση της διάταξης και της κατασκευαστικής διαδικασίας που εφαρμόστηκε. Επισημαίνονται κάποια προβλήματα που προέκυψαν, πως αυτά μπορούν να ξεπεραστούν και οι ενέργειες που πρέπει να ακολουθηθούν για τον πλήρη χαρακτηρισμό των αισθητήρων και την εφαρμογή τους σε μια ολοκληρωμένη διάταξη.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που βοήθησαν στην διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.

Η αλήθεια είναι ότι κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας έτυχαν πολλά απρόοπτα και αναποδιές που καθυστέρησαν την ολοκλήρωση της. Ωστόσο, τα απρόοπτα χτίζουν χαρακτήρα, δοκιμάζουν τις αντοχές του καθενός και σίγουρα ενισχύουν το τελικό αίσθημα της επιτυχίας. Το αποτέλεσμα φαίνεται να δικαίωσε τους κόπους μας. Σε αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου. Θα ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε, τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου, τον Μάρκο που με βοήθησε στην λήψη κάποιων μετρήσεων, τον Άγγελο για τις γνώσεις του στα μαγνητικά πεδία. Σίγουρα πρέπει να αναφέρω την Χριστίνα Γεωργίου και την Έφη Μπολομύτη που ανήκουν στο προσωπικό του Δημόκριτου και τις απασχόλησα εκτενώς με τα 13 βήματα της κατασκευής και τα διάφορα αιτήματα μου. Επίσης ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ανδρέα Καϊδατζή ο οποίος μας εξυπηρέτησε στο στάδιο εναπόθεσης μαγνητικού υλικού "από την καλή του την καρδιά", καθώς είχε σταματήσει πια να εργάζεται στο εργαστήριό του στον Δημόκριτο. Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή μου Ευάγγελο Χριστοφόρου που μου εμπιστεύτηκε ένα σημαντικό,

δύσκολο θέμα και μου άνοιξε κάποιες “πόρτες”. Το μεγαλύτερο όμως ευχαριστώ το οφείλω στον Επίκουρο Καθηγητή Μανώλη Χουρδάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την ψυχραιμία του στις στιγμές κρίσης, για την άμεση ανταπόκριση του σε όλη την διάρκεια της έρευνας και την φιλική του συμπεριφορά.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	5
Πρόλογος – Ευχαριστίες	7
Πίνακας περιεχομένων	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	15
Ευρετήριο Πινάκων	21
1 Εισαγωγή.....	1
2 Θεωρητικό Μέρος.....	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Μαγνητικές Περιοχές.....	6
2.3 Βρόχος Υστέρησης	7
2.3.1 Μαγνήτιση κορεσμού.....	9
2.4 Μαγνητική διαπερατότητα	9
2.4.1 Μαγνητικά Κυκλώματα για υπολογισμό $B(H)$	10
2.4.2 Αισθητήρες Hall για υπολογισμό $B(H)$	13
2.5 Φαινόμενο Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR)	14
2.5.1 Αισθητήρες AMR	17
2.5.2 Permalloy.....	19
2.6 Καμπύλη Stress Strain	20
2.7 Εναπομένουσες Τάσεις Υλικών	21
2.7.1 Διάτρηση Οπών	22
2.7.2 X-Ray Diffraction.....	23
2.8 Σύνδεση Μαγνητικών και Μηχανικών Ιδιοτήτων	25
2.9 Φωτολιθογραφία	27
2.9.1 Φωτομάσκα	30
3 Σχεδιασμός Δομών.....	31
3.1 Εισαγωγή στην σχεδιαστική προσέγγιση	31

3.2	Σχεδιαστικοί περιορισμοί.....	31
3.3	Λύσεις σχεδιαστικών περιορισμών και παραμετροποίηση των διαστάσεων της διάταξης.....	32
3.3.1	Παραμετροποίηση Layer 1.....	34
3.3.2	Παραμετροποίηση Layers 2 & 3.....	35
3.3.3	Παραμετροποίηση Layer 4.....	37
3.3.4	Υπολογισμός Αντιστάσεων.....	38
3.4	Τα 6 devices	43
3.5	Σχεδιασμός Φωτομάσκας.....	45
4	Κατασκευή	53
4.1	Βήματα Process	53
4.2	Βήμα 1 ^ο : Καθαρισμός δειγμάτων.....	54
4.3	Βήμα 2 ^ο : Αρνητική Λιθογραφία (1 ^ο Layer)	54
4.4	Βήμα 3 ^ο : Εξάχνωση Αλουμινίου	56
4.5	Βήμα 4 ^ο : Lift-off Αλουμινίου	57
4.6	Βήμα 5 ^ο : Εναπόθεση Διηλεκτρικού υλικού SiO_2	58
4.7	Βήμα 6 ^ο : Αρνητική Λιθογραφία (2 ^ο Layer)	59
4.8	Βήμα 7 ^ο : Εξάχνωση Αλουμινίου	61
4.9	Βήμα 8 ^ο : Lift-off Αλουμινίου	61
4.10	Βήμα 9 ^ο : Αρνητική Λιθογραφία (3 ^ο Layer)	64
4.11	Βήμα 10 ^ο : Εξάχνωση Μαγνητικού υλικού	65
4.12	Βήμα 11 ^ο : Lift-off Μαγνητικού υλικού	68
4.13	Βήμα 12 ^ο : Αρνητική Λιθογραφία (4 ^ο Layer)	70
4.14	Βήμα 13 ^ο : Εγχάραξη με SF_6	70
5	Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός και Ερμηνεία.....	73
5.1	Εισαγωγή στην πειραματική διάταξη	73
5.2	Μετρήσεις στο wafer πυριτίου	75
5.2.1	Χαρακτηρισμός του D1 (περιοχή ενδιαφέροντος 500μm*10μm)	75
5.2.2	Επιβεβαίωση Μεταβολής της R_{meas} λόγω εξωτερικού μαγνητικού πεδίου	77
5.2.3	Επιβεβαίωση χρησιμότητας του D1 ως αισθητήρα	78
5.2.4	Χαρακτηρισμός του D3 (περιοχή ενδιαφέροντος 100μm*10μm)	79

5.2.5	Χαρακτηρισμός του D5 (περιοχή ενδιαφέροντος 50μm*10μm)	83
5.2.6	Χαρακτηρισμός του D6 (περιοχή ενδιαφέροντος 10μm*10μm)	85
5.3	Μετρήσεις στο wafer quartz	88
5.3.1	Χαρακτηρισμός του D1 (περιοχή ενδιαφέροντος 500μm*10μm)	88
5.3.2	Χαρακτηρισμός του D3 (περιοχή ενδιαφέροντος 100μm*10μm)	89
5.4	Σύγκριση ίδιων devices σε διαφορετικά wafers	91
5.5	Σύγκριση devices στο wafer πυριτίου	92
6	Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα	99
7	Βιβλιογραφία	103

Ευρετήριο Σχημάτων

Εικόνα 1: Γειτονικές μαγνητικές περιοχές ευθυγραμμισμένες κατά τον εύκολο άξονα τους. [3].....	7
Εικόνα 2: Σύγκριση των καμπύλων $M(H)$ και $B(H)$ [2].....	8
Εικόνα 3: Ενδεικτικές τιμές του μ_r για τύπους μαγνητικών υλικών [15].	10
Εικόνα 4: Σχεδίαση της καμπύλης $\mu(H)$ [3].....	10
Εικόνα 5: Παράδειγμα μαγνητικού κυκλώματος με χρήση ηλεκτρομαγνητικού Yoke [15].	11
Εικόνα 6: Αναλογία ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος [15].	11
Εικόνα 7: Απλή διάταξη μέτρησης μαγνητικής επαγωγής B [15].	12
Εικόνα 8: Διάταξη έμμεσης μέτρησης του B στο δείγμα [15].	13
Εικόνα 9: (a) Τυπική διάταξη SST, (b) Τομή της διάταξης [15].....	13
Εικόνα 10: Τυπική διάταξη εμφάνισης φαινομένου Hall [15].	14
Εικόνα 11: Μεταβολή της αντίστασης R ως συνάρτηση της γωνίας θ [5].....	15
Εικόνα 12: Τυπική διάταξη λεπτού υμενίου που εμφανίζει AMR [5].....	15
Εικόνα 13: Λόγος μεταβολής αντίστασης ως προς κανονικοποιημένο πεδίο για τιμές γωνίας μεταξύ ρεύματος και άξονα ανισοτροπίας [6].	16
Εικόνα 14: Καμπύλη $R(H)$ για $\theta = 45^\circ$ [5].	17
Εικόνα 15: Επιβολή σταθερής γωνίας μεταξύ του εύκολου άξονα μαγνήτισης και του ρεύματος με τοποθέτηση επικλινών λεπτών αγωγών πάνω από το permalloy [8].	18
Εικόνα 16: Βρόγχος Μαγνήτισης permalloy πάχους 200nm για παράλληλο και κάθετο πεδίο στον εύκολα άξονα του [7].	19
Εικόνα 17: Καμπύλη χαρακτηρισμού υλικών Stress Strain [18].	21
Εικόνα 18: Μέθοδος διάτρησης σπών για τον υπολογισμό επιφανειακών τάσεων [14].	23
Εικόνα 19: Προσπίπτουσες και περιθλαμένες ακτινοβολίες της διάταξης XRD..	24

Εικόνα 20: Διάγραμμα $I(2\theta)$ για δείγμα κυβικού SiC.	25
Εικόνα 21: Κανονικοποιημένη Καμπύλη MASC δοκιμίου χάλυβα [9].	26
Εικόνα 22: Πλάτυνση του βρόχου υστέρησης με την εφαρμογή θλιπτικής τάσης [10].	27
Εικόνα 23: Μείωση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας με την εφαρμογή θλιπτικής τάσης [10].	27
Εικόνα 24: Γενικό διάγραμμα της θετικής και αρνητικής φωτολιθογραφίας [12].	29
Εικόνα 25: Διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής φωτολιθογραφίας και στο προφίλ της ρητίνης [12].	29
Εικόνα 26: Αποτύπωση μοτίβου πάνω σε υπόστρωμα με χρήση φωτομάσκας [12].	30
Εικόνα 27: : Γεωμετρία τυχαίου device. Κόκκινο χρώμα: layer 1, Μπλε χρώμα: layer 2, Πράσινο χρώμα: layer 3.	33
Εικόνα 28: Παραμετροποίηση του Layer 1.	34
Εικόνα 29: Παραμετροποίηση των Layers 2 & 3.	35
Εικόνα 30: Παραμετροποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος.	36
Εικόνα 31: Δημιουργία 4 ^{ου} layer.	37
Εικόνα 32: Χωρισμός αντίστασης αγωγού σε 2 τμήματα: <i>Rcontactpad</i> που αφορά το τμήμα επαφής και <i>Rtrapmeas</i> που αφορά το τραπεζοειδές τμήμα.	38
Εικόνα 33: Διαχωρισμός της αντίστασης του μαγνητικού υλικού.	40
Εικόνα 34: Αποστάσεις μεταξύ των devices και του πλαισίου του dye.	45
Εικόνα 35: Σχετική θέση των 4 σταυρών ευθυγράμμισης κάθε device.	46
Εικόνα 36: Συνολική εικόνα ενός dye 15mm × 10mm με πάχος πλέγματος 20μm. (Οι μετρήσεις αφορούν την εσωτερική πλευρά του πλέγματος).	47
Εικόνα 37: Σχετική θέση δομών-περιθωρίου φωτομάσκας-wafer. Τα μπλε μοτίβα είναι βοηθητικά και δείχνουν την μάσκα και το 3" wafer.	51
Εικόνα 38: Τελικό αρχείο υποβολής με τίτλο 4"/BF/CU/WR και κέντρο μάσκας το (0,0).	52
Εικόνα 39: Φωτομάσκα φωτογραφισμένη Chrome Down.	52

Εικόνα 40: Δείγμα πυριτίου μετά την 1 ^η λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50). (Στην σκοτεινή περιοχή έχουμε απουσία ρητίνης και φανέρωση του wafer).	55
Εικόνα 41: Δείγμα quartz μετά την λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	56
Εικόνα 42: Δείγμα πυριτίου μετά την εναπόθεση αλουμινίου, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).....	56
Εικόνα 43: Δείγμα πυριτίου μετά το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	57
Εικόνα 44: Δείγμα quartz μετά το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	58
Εικόνα 45: Δείγμα πυριτίου μετά το LTO, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	58
Εικόνα 46: Δείγμα quartz μετά το LTO, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	59
Εικόνα 47: Δείγμα πυριτίου 2 ^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	60
Εικόνα 48: Δείγμα quartz 2 ^η Λιθογραφία, του device 10μm×10μm (φακός × 50).	60
Εικόνα 49: Δείγμα πυριτίου πριν το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 10).	61
Εικόνα 50: Δείγμα πυριτίου 3 ^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	64
Εικόνα 51: Δείγμα quartz 3 ^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).	65
Εικόνα 52: Ποσοστό λόγου $R2magmeticRmeas$ στο Device 6 με περιοχή ενδιαφέροντος 10μm × 10μm.	66
Εικόνα 53: Ποσοστό λόγου $R2magmeticRmeas$ στο Device 1 με περιοχή ενδιαφέροντος 500μm × 10μm.	66
Εικόνα 54: Ποσοστό α για στο Device 6 με περιοχή ενδιαφέροντος 10μm × 10μm.	67

Εικόνα 55: Ποσοστό α για στο Device 1 με περιοχή ενδιαφέροντος $500\mu m \times 10\mu m$.	67
Εικόνα 56: Δείγμα πυριτίου μετά το SF_6 , του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).	71
Εικόνα 57: Δείγμα quartz μετά το SF_6 , του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).	72
Εικόνα 58: Πειραματική Διάταξη με τα 2 SourceMeters συνδεδεμένα με το probe station.	74
Εικόνα 59: Εξέταση ενός device με 4 probes: 2 για διέγερση και 2 για μέτρηση.	74
Εικόνα 60: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} στο D1 Si, συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.	76
Εικόνα 61: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} στο D1 Si, συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.	76
Εικόνα 62: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} στο D1 Si, ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.	77
Εικόνα 63: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.	81
Εικόνα 64: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.	81
Εικόνα 65: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.	82
Εικόνα 66: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για τα D1, D3 Si.	82
Εικόνα 67: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.	84
Εικόνα 68: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.	85
Εικόνα 69: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.	85
Εικόνα 70: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.	86

Εικόνα 71: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.	87
Εικόνα 72: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.....	87
Εικόνα 73: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D1 quartz.	88
Εικόνα 74: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D1 quartz.	89
Εικόνα 75: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D3 quartz.	90
Εικόνα 76: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D3 quartz.	90
Εικόνα 77: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για devices τύπου D1 για τους 2 τύπους υποστρώματος.....	91
Εικόνα 78: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για devices τύπου D3 για τους 2 τύπους υποστρώματος.....	91
Εικόνα 79: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για τα D1, D3, D5, D6..	92
Εικόνα 80: Μαγνητικό πεδίο απέραντου υμενίου αμελητέου πάχους, πλάτους W που διαρρέεται από συνολικό ρεύμα I	95

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας απαραίτητων μεγεθών για τον υπολογισμό της μετρούμενης αντίστασης R_{meas} . Με πράσινο υπογραμμίζονται οι γεωμετρίες που εν τέλει επιλέχθηκαν.....	42
Πίνακας 2: Πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής μετρούμενης αντίστασης συναρτήσει των μεγεθών W , L του μαγνητικού υλικού	43
Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός Πίνακας με τα 6 devices.	44
Πίνακας 4: Οπτικοποίηση των βημάτων της by Rotation υλοποίησης φωτομάσκας.	49
Πίνακας 5: Συνολικός πίνακας για το wafer Si μετά το 2° Lift-off.....	61
Πίνακας 6: Συνολικός πίνακας για το wafer quartz μετά το 2° Lift-off.....	63
Πίνακας 7: Συνολικός πίνακας για το wafer Si μετά την εναπόθεση μαγνητικού υλικού.	68
Πίνακας 8: Συνολικός πίνακας για το wafer quartz μετά την εναπόθεση μαγνητικού υλικού.	69
Πίνακας 9: D1 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,1A]$ και σταδιακή αύξηση ανά 100mA.....	75
Πίνακας 10: D1 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,1A]$ και σταδιακή μείωση ανά 100mA.....	75
Πίνακας 11: Μεταβολή της R_{meas} στο D1 Si, υπό την παρουσία μαγνητών.....	78
Πίνακας 12: Μεταβολή της R_{meas} στο D1 Si κατά την τοποθέτηση σύρματος.	79
Πίνακας 13: D3 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,500mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.....	80
Πίνακας 14: D3 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,500mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.....	80
Πίνακας 15: D5 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,450mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.....	83

Πίνακας 16: D5 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,450mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.....	84
Πίνακας 17: D6 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.....	85
Πίνακας 18: D6 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.....	86
Πίνακας 19: D1 quartz, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,400mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.	88
Πίνακας 20: D3 quartz, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.	89
Πίνακας 21: Πίνακας Απαραίτητων μεγεθών για ερμηνεία ποσοστιαίων λόγων μεταβολής.....	93
Πίνακας 22: Στιγμιότυπο ίσων απωλειών Joule στα devices Si.	94
Πίνακας 23: Σχέσεις ποσοστιαίας μεταβολής λόγω εμφάνισης ΔT	94
Πίνακας 24: Υπολογισμός J_{line} στο στιγμιότυπο ίσων απωλειών Joule.	97
Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας απαραίτητων μεγεθών για $\Delta R_{2magnetic} = 2\%R_{2magnetic}$	97

1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες αποτελούν θεμελιώδες κομμάτι του σύγχρονου κόσμου, καθώς επιτρέπουν την αλληλεπίδραση των συστημάτων με το περιβάλλον, συλλέγοντας και επεξεργάζοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Μετατρέπουν φυσικά μεγέθη, όπως θερμοκρασία, πίεση, δόνηση ή μαγνητικά πεδία, σε σήματα που μπορούν να επεξεργαστούν και να αξιοποιηθούν από συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου. Χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, από την αυτοματοποίηση της βιομηχανίας και την ιατρική διάγνωση έως τις έξυπνες πόλεις και τις φορητές συσκευές. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι αισθητήρες γίνονται ολοένα και πιο ακριβείς, ευέλικτοι και προσιτοί, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και της αυτονομίας των συστημάτων.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) με χρήση αισθητήρων έχει ανεκτίμητη αξία, καθώς επιτρέπει την ανίχνευση ελαττωμάτων και φθορών σε υλικά, κατασκευές και μηχανήματα χωρίς να τα καταστρέφει ή να διακόπτει τη λειτουργία τους. Καθοριστικός είναι ο ρόλος των μαγνητικών υλικών σε αυτές τις διαδικασίες καθώς έχουν μεγάλη ευαισθησία ως προς το μαγνητικό πεδίο και τις διαταραχές του, οι οποίες μπορεί να αποτελούν ένδειξη της παρουσίας ατελειών στο υπό εξέταση υλικό.

Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ένας ειδικός τύπος χάλυβα που σχεδιάστηκε για να εμφανίζει καλές μαγνητικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές με περιοδικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο όπως κινητήρες, μετασχηματιστές. Η ευρεία χρήση του σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας καθιστά απαραίτητο τον χαρακτηρισμό του ως προς την υγεία του, τις μαγνητικές του ιδιότητες και την ποιότητα κατασκευής του. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα γίνει συσχέτιση των παραμενουσών επιφανειακών τάσεων μετρώντας την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Στόχος είναι η κατασκευή μιας αισθητήριας διάταξης η οποία θα μετράει μαγνητική διαπερατότητα φερρομαγνητικών υλικών όπως του ηλεκτρικού χάλυβα, με σκοπό την αξιολόγηση της "υγείας" του και την ενδεχόμενη ύπαρξη ατελειών σε

αυτό. Ο αισθητήρας θα ανάγει την μετρούμενη αντίσταση ενός μαγνητικού υλικού σε τιμές μαγνητικής διαπερατότητας. Αποτελεί συνέχεια του αισθητήρα που περιγράφεται στην 1^η βιβλιογραφική αναφορά [1], που αποτελεί πατέντα του εργαστηρίου Αισθητήρων και του καθηγητή Ευάγγελου Χριστοφόρου, στην οποία περιγράφεται μια πολυεπίπεδη διάταξη αισθητήρα που σχηματίζεται από την παρεμβολή ενός μαγνητικού υλικού και μονωτικών στρωμάτων ανάμεσα σε δύο αγωγίμες λεπτές πλάκες με σκοπό την μέτρηση της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας ενός φερρομαγνητικού υλικού. Η διάταξη που αναλύεται στην δοθείσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε δύο αγωγούς δύο διαφορετικών επιπέδων, έναν διέγερσης και έναν λήψης σε μια διάταξη σταυρού.

Ο αγωγός διέγερσης θα είναι το κάτω layer και θα τροφοδοτείται με ρεύμα με σκοπό την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Από πάνω του θα βρίσκεται διηλεκτρικό υλικό. Πάνω από το διηλεκτρικό θα βρίσκονται δύο κάθετοι ως προς τον αγωγό του 1ου layer αγωγοί, οι οποίοι θα πλησιάζουν τον αγωγό του 1ου layer χωρίς όμως να τον τέμνουν. Θα τον πλησιάζουν δηλαδή από πάνω και από κάτω του σε πολύ κοντινή απόσταση. Τα 2 τμήματα του αγωγού λήψης θα ενώνονται μεταξύ τους με ένα μαλακό μαγνητικό υλικό που ονομάζεται permalloy ($Ni_{80}Fe_{20}$), το οποίο παρουσιάζει το φαινόμενο AMR, δηλαδή μεταβολή της αντίστασης του συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου που έχει δημιουργηθεί από τον αγωγό διέγερσης. Το μαγνητικό υλικό θα περνάει δηλαδή πάνω από τον αγωγό διέγερσης, δεν θα δημιουργεί ηλεκτρική επαφή με αυτόν λόγω του διηλεκτρικού υλικού και θα πολώνεται από το μαγνητικό του πεδίο.

Η ιδέα είναι ότι κατά την σάρωση μίας επιφάνειας φερρομαγνητικού υλικού με τον αισθητήρα θα απελευθερώνονται κάποιες μαγνητικές γραμμές που είναι παγιδευμένες στο layer του αγωγού λήψης στο οποίο βρίσκεται και το μαγνητικό υλικό, με αποτέλεσμα την τοπική μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και την μεταβολή της μετρούμενης αντίστασης του μαγνητικού υλικού κατά ένα ΔR λόγω AMR. Θα γίνεται αντιστοίχιση της προαναφερθείσας μεταβολής με μία τιμή μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού σε μία περιοχή εμβαδού ανάλογου της διάστασης του μαγνητικού υλικού. Η υπόθεση είναι ότι μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας θα προκαλούν μεγαλύτερη πτώση της μετρούμενης αντίστασης.

Επίσης, μελλοντικά θα γίνει σύνδεση της μετρούμενης μαγνητικής διαπερατότητας με τις εναπομένουσες επιφανειακές τάσεις που υπάρχουν στο υλικό σύμφωνα με την καμπύλη MASC, που θα αναλυθεί στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Ως στόχος τέθηκε μια περιοχή υλικού με εμβαδόν $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, και άρα το μαγνητικό υλικό που θα βρίσκεται πάνω από τον αγωγό διέγερσης θα πρέπει να έχει αντίστοιχες διαστάσεις.

Για την κατασκευή λοιπόν τέτοιων διατάξεων έπρεπε να χρησιμοποιηθεί φωτολιθογραφία, να σχεδιαστεί φωτομάσκα με τις απαραίτητες δομές και η διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα να γίνει στον καθαρό χώρο του Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού του προαναφερθέντος Ινστιτούτου.

2 Θεωρητικό Μέρος

2.1 Εισαγωγή

Τα μαγνητικά υλικά είναι υλικά που αλληλεπιδρούν με τα μαγνητικά πεδία, καθώς μπορούν να μαγνητιστούν είτε όταν βρίσκονται κοντά σε μια μαγνητική πηγή είτε όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από τη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων τους, ιδίως από την περιστροφή και την κίνησή τους γύρω από τον ατομικό πυρήνα, οι οποίες δημιουργούν μικρές μαγνητικές ροπές. Ανάλογα με τη μαγνητική επιδεκτικότητά τους (χ), δηλαδή την ικανότητά τους να μαγνητίζονται υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ταξινομούνται σε διαμαγνητικά, παραμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, ιδιαίτερη σημασία έχουν ιδιότητες όπως ο βρόχος υστέρησης, οι οποίες είναι καθοριστικές για την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό αισθητήρων.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της διαδικασίας μαγνήτισης των μαγνητικών υλικών και διαφόρων μεγεθών που τα χαρακτηρίζουν. Συγκεκριμένα αναλύεται το μέγεθος της μαγνητικής διαπερατότητας και υπάρχουσες τεχνικές προσδιορισμού της. Επίσης γίνεται ανάλυση του φαινομένου AMR, στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της διάταξης της διπλωματικής και των συνηθισμένων τύπων διατάξεων που συναντάται στην βιομηχανία. Γίνεται λόγος για τις εναπομένουσες τάσεις που είναι εγκλωβισμένες στα υλικά, στο πώς αυτές μετριοούνται και στην συσχέτιση τους με τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Τέλος, αναφέρονται κάποιες από τις τεχνικές του κλάδου της μικροηλεκτρονικής που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία κατασκευής στον καθαρό χώρο.

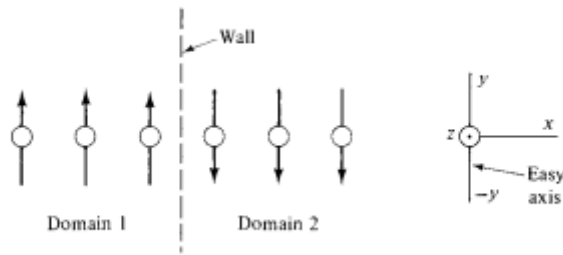
2.2 Μαγνητικές Περιοχές

Μια **μαγνητική περιοχή** ορίζεται ως ένα μικροσκοπικό τμήμα ενός μαγνητικού υλικού στο οποίο οι μαγνητικές ροπές που οφείλονται κυρίως στα spins των ηλεκτρονίων, είναι ευθυγραμμισμένες προς την ίδια κατεύθυνση. Τα υλικά τα οποία είναι αμαγνήτιστα αποτελούνται από πολλές περιοχές όπου κάθε μία έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Η τυχαία αυτή ευθυγράμμιση των περιοχών έχει ως αποτέλεσμα τον μηδενισμό του συνολικού μαγνητικού πεδίου. Κάθε μαγνητική περιοχή περικλείεται από σύνορα που ονομάζονται domain walls και διαχωρίζουν τις περιοχές με διαφορετικές κατευθύνσεις μαγνητικών ροπών. Ο κατακερματισμός του υλικού σε πολλές μαγνητικές περιοχές οφείλεται στην μείωση της συνολικής μαγνητοστατικής ενέργειας του υλικού σε κατάσταση ηρεμίας.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην δημιουργία των μαγνητικών περιοχών, κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι οι εξής:

- Τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα σε συγκεκριμένες τροχιακές καταστάσεις. Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί την προαναφερθείσα τροχιακή μαγνητική ροπή.
- Ανταλλαγές Αλληλεπιδράσεων που βασίζονται στην αρχή του Pauli και την ηλεκτροστατική άπωση και περιγράφουν την χαμηλή ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ηλεκτρονίων που βρίσκονται στο ίδιο άτομο με παράλληλα spin.
- Κρυσταλλική ανισοτροπία που οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις των τροχιακών μαγνητικών ροπών με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα ιόντα του κρυσταλλικού πλέγματος.
- Μαγνητοστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών μαγνητικών περιοχών. Κάθε μία μαγνητική περιοχή αποτελεί ένα μαγνητικό δίπολο και η αλληλεπίδραση αυτών των περιοχών στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της συνολικής μαγνητοστατικής ενέργειας.

Η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό υλικό έχει ως αποτέλεσμα την προσπάθεια ευθυγράμμισης των μαγνητικών περιοχών σύμφωνα με την κατεύθυνση αυτού, στο βαθμό που είναι εφικτό για κάθε περιοχή.



Εικόνα 1: Γειτονικές μαγνητικές περιοχές ευθυγραμμισμένες κατά τον εύκολο άξονα τους. [3].

Ορίζουμε ως μαγνήτιση $\vec{M}$ ενός υλικού το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών ροπών των μαγνητικών περιοχών του $\vec{\Delta m} = \sum_n \vec{m}_n$ μέσα σε έναν στοιχειώδη όγκο του υλικού ΔV ο οποίος τείνει να μηδενιστεί και εκφράζεται με το όριο:

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\vec{\Delta m}}{\Delta V}$$

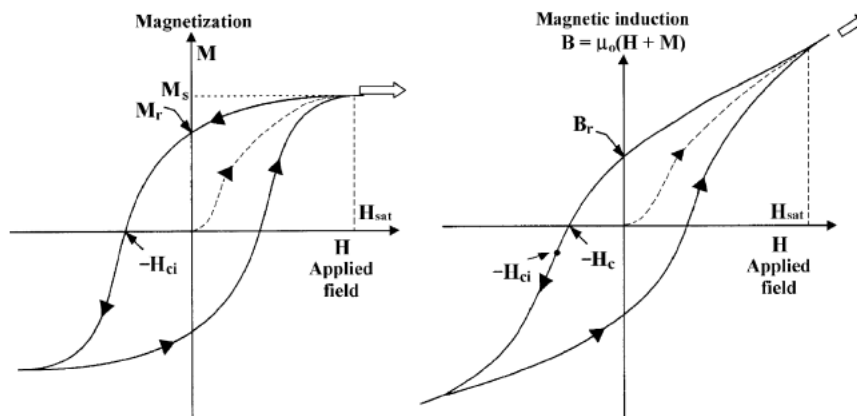
2.3 Βρόχος Υστέρησης

Ο **βρόχος υστέρησης** είναι η χαρακτηριστική καμπύλη που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής B και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H σε ένα μαγνητικό υλικό κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου μαγνήτισης και απομαγνήτισης. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως η ευθυγράμμιση των μαγνητικών περιοχών του υλικού σύμφωνα με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έχει ως αποτέλεσμα την μαγνήτιση M του υλικού. Η σχέση που ενώνει αυτά τα 3 μεγέθη είναι:

$$B = \mu_0(H + M)$$

Όπου $B(T)$, $H(A/m)$, $M(A/m)$ και $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$, η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Οι καμπύλες $B(H)$ και $M(H)$ έχουν παρόμοια μορφή με κάποιες μικρές διαφορές.



Εικόνα 2: Σύγκριση των καμπύλων $M(H)$ και $B(H)$ [2].

Στην αρχική κατάσταση όπου $M=0$ και $H=0$ το υλικό αρχικά δεν έχει τιμή μαγνήτισης. Με την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου προς τα θετικά παρατηρείται σταδιακά ο προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών σύμφωνα με την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Σε αυτό το τμήμα του βρόχου έχουμε αύξηση της μαγνήτισης του υλικού και της μαγνητικής επαγωγής μέχρι ένα σημείο κορεσμού για $H=H_{sat}$, όπου όλες οι περιοχές έχουν ευθυγραμμιστεί με το εξωτερικό πεδίο στον βαθμό που είναι επιτρεπτό για την κάθε μια. Έτσι η τιμή της μαγνήτισης φτάνει μια μέγιστη τιμή και μηδενίζεται η κλίση της καμπύλης $M(H)$. Αντιθέτως η καμπύλη $B(H)$ συνεχίζει να αυξάνεται γραμμικά λόγω του όρου $\mu_0 H$ (το $M=M_s=M_{max}$).

Μετά την μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου ξεκινά η διαδικασία απομαγνήτισης του υλικού. Ωστόσο όταν το H ξαναγίνει ίσο με μηδέν δεν παρατηρείται και μηδενισμός στο M αλλά η ισορροπία του σε μία τιμή M_r που ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση. Αυτή η δυσκολία επιστροφής στην τυχαία αρχική κατάσταση οφείλεται στις ανταλλαγές αντιδράσεων που έγινε στο προηγούμενο τμήμα του βρόγχου, στην κρυσταλλική ανισοτροπία που καθορίζει ορισμένες εύκολες κατευθύνσεις και στις τοπικές ατέλειες που εμποδίζουν τα μετακινημένα σύνορα των μαγνητικών περιοχών να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις. Στην συνέχεια, κατά την αναστροφή της έντασης του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται γρηγορότερη μείωση της μαγνήτισης λόγω φαινομένων “χιονοστιβάδας” που οφείλονται στη μαζική αναδιάταξη των μαγνητικών περιοχών, όπου η μετακίνηση μιας περιοχής επηρεάζει τις γειτονικές, δημιουργώντας

αλυσιδωτές αντιδράσεις, μέχρι τον μηδενισμό της στο σημείο $-H_{ci}$. Σημειώνεται και άλλη μια διαφορά των 2 βρόγχων, η μη-ταύτιση των συνεκτικών πεδίων H_c και H_{ci} κάτι το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 1 και μπορεί να συμπεραθεί από την σχέση (1).

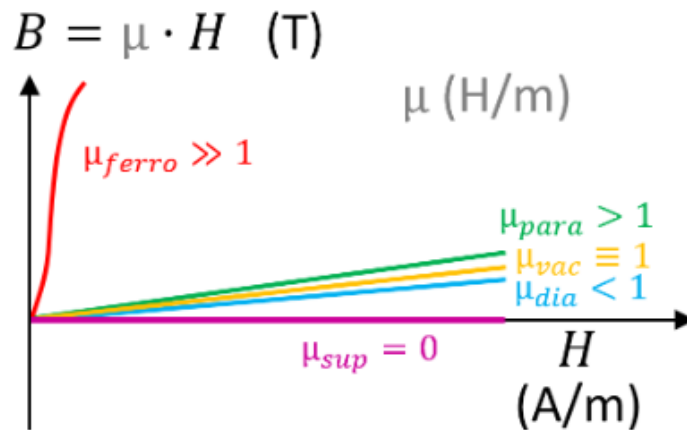
Η τιμή H_c ονομάζεται **συνεκτικό πεδίο** και δηλώνει την ευκολία ή δυσκολία με την οποία μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται το υλικό. Μεγαλύτερες τιμές του H_c παρατηρούνται σε πιο σκληρά μαγνητικά υλικά όπως πχ τους μόνιμους μαγνήτες και μικρότερες τιμές του σε μαλακά. Για $H = -H_{sat}$ παρατηρείται κορεσμός στην τιμή της μαγνήτισης $-M_s$ για αντίστοιχους λόγους με προηγουμένως. Τέλος παρατηρείται συμμετρία των βρόγχων ως προς τον άξονα των y μέχρι το $H=0$ και μέχρι το $H=H_{sat}$.

2.3.1 Μαγνήτιση κορεσμού

Όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση της έντασης του πεδίου πάνω από την τιμή του H_{sat} δεν προσφέρει περαιτέρω αύξηση του M . Αντιθέτως αυτή έχει φτάσει στην μέγιστη τιμή της λόγω του προσανατολισμού του μέγιστου δυνατού αριθμού των μαγνητικών περιοχών στην διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου και άρα το διάνυσμα της μαγνήτισης σχηματίζει γωνία με το εξωτερικό πεδίο που τείνει να μηδενιστεί. Για τον προσδιορισμό της γωνίας ισορροπίας στην οποία θα βρίσκεται το διάνυσμα της μαγνήτισης υπάρχουν μακροσκοπικά μοντέλα όπως του Stoner-Wohlfarth και μικροσκοπικά μέσω της επίλυσης της εξίσωσης Landau-Lifshitz-Gilbert.

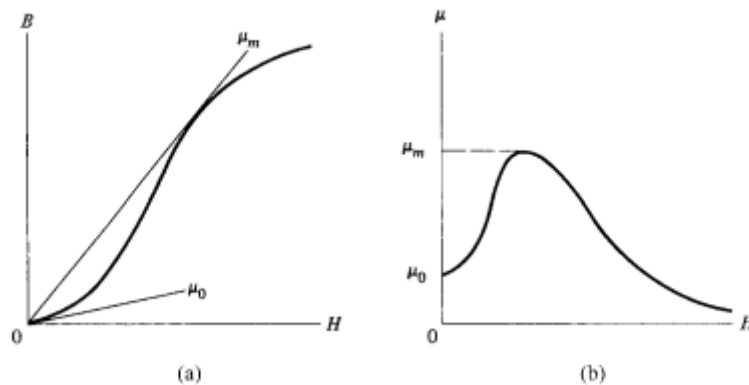
2.4 Μαγνητική διαπερατότητα

Από τους βρόγχους υστέρησης μπορεί να υπολογιστεί η **μαγνητική διαπερατότητα μ** η οποία ισούται με τον λόγο της μαγνητικής επαγωγής B ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού υποδηλώνει την δυνατότητα του υλικού να ευθυγραμμίζεται με το εξωτερικό επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και το πόσο εύκολα ενισχύει το μαγνητικό πεδίο μέσω της μαγνήτισης του. Μεγαλύτερες τιμές της μ είναι επιθυμητές σε υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι μαγνητικοί πυρήνες, καθώς επιτρέπουν ευκολότερη μαγνήτιση και καλύτερη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας. Επιπλέον ορίζεται η **σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r** ως ο λόγος της μαγνητικής διαπερατότητας προς την διαπερατότητα του κενού μ_0 : $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$



Εικόνα 3: Ενδεικτικές τιμές του μ_r για τύπους μαγνητικών υλικών [15].

Ωστόσο συχνά συμφέρει ο υπολογισμός της **διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας** $\mu_d = \frac{dB}{dH}$, δηλαδή της κλίσης της εφαπτομένης της καμπύλης μαγνήτισης. Αυτό γίνεται διότι όταν το $H=0$ ο λόγος $\frac{B}{H}$ της μαγνητικής διαπερατότητας απειρίζεται και όταν το $B=0$ το μ μηδενίζεται (κάτω από τέτοιες προϋποθέσεις η μαγνητική διαπερατότητα χάνει την σημασία της). Για αυτό τον λόγο όταν δίνεται το διάγραμμα $\mu(H)$ ξεκινάει από μία αρχική τιμή του $\mu=\mu_0$ και φτάνει μέχρι μία μέγιστη τιμή μ_{max} στο σημείο όπου η κλίση της καμπύλης $B(H)$ γίνεται μέγιστη (Εικόνα 2).

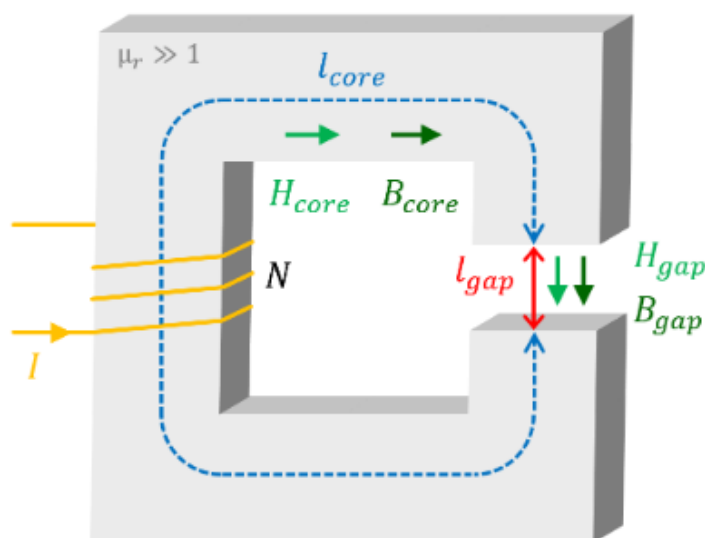


Εικόνα 4: Σχεδίαση της καμπύλης $\mu(H)$ [3].

2.4.1 Μαγνητικά Κυκλώματα για υπολογισμό $B(H)$

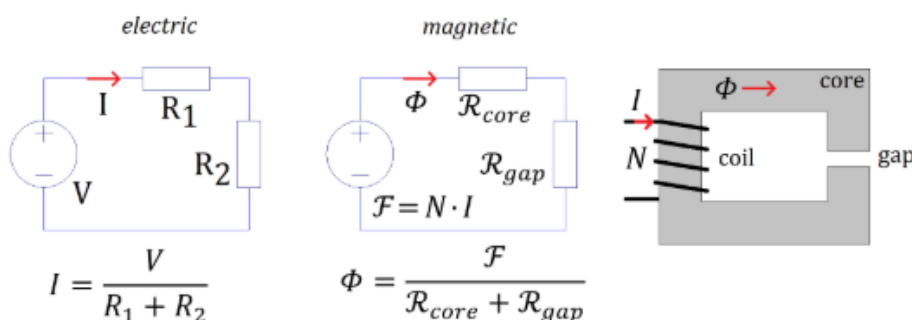
Μαγνητικά κυκλώματα ονομάζονται οι διατάξεις που περιλαμβάνουν κλειστούς βρόγχους μαγνητικής ροής. Πηγή της μαγνητικής ροής είναι συνήθως ένας ηλεκτρομαγνήτης και ο περιορισμός της γίνεται συνήθως με έναν μαγνητικό πυρήνα

από φερρομαγνητικό υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας για λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 5: Παράδειγμα μαγνητικού κυκλώματος με χρήση ηλεκτρομαγνητικού Yoke [15].

Ο όρος των μαγνητικών κυκλωμάτων προέκυψε από την αναγωγή των παραπάνω διατάξεων σε κυκλώματα που μοιάζουν με τα ηλεκτρικά για την ευκολότερη ανάλυση τους. Την θέση της πηγής τάσης την έχει ο όρος $N \cdot I$ που αντιπροσωπεύει τα αμπερελίσματα του πηνίου, το οποίο για δεδομένο ρεύμα πόλωσης I και αριθμό σπειρών N δημιουργεί μαγνητικό πεδίο B στο εσωτερικό του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μαγνητικής ροής Φ η οποία συγκεντρώνεται από τον μαγνητικό πυρήνα και ρέει σε αυτόν, όπως το ρεύμα στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Το διάκενο και ο πυρήνας χαρακτηρίζονται από ένα μέγεθος που ονομάζεται μαγνητική αντίσταση $R_{magnetic} = \frac{l_i}{\mu_i A_i}$, όπου l_i : μέσο μήκος διαδρομής μαγνητικής ροής, μ_i : μαγνητική διαπερατότητα του κάθε μέσου διάδοσης και A_i : η διατομή του.

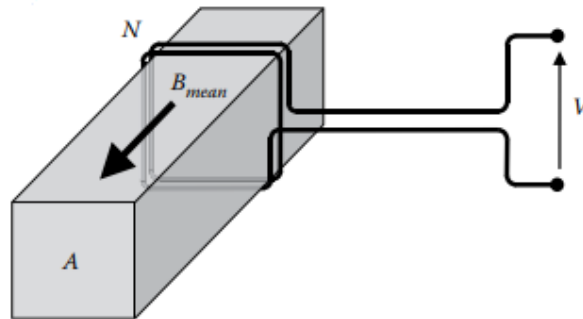


Εικόνα 6: Αναλογία ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος [15].

Τοπολογίες όπως η παραπάνω χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του βρόχου υστέρησης και μέσω αυτού γίνεται μελέτη της μαγνητικής διαπερατότητας. Για την εξαγωγή του βρόχου υστέρησης ενός φερρομαγνητικού υλικού χρησιμοποιείται ένα πηνίο λήψης στο οποίο επάγεται μία τάση V_{out} η οποία στην συνέχεια αντιστοιχίζεται σε μία τιμή της μαγνητικής επαγωγής B .

Στην περίπτωση που το πηνίο λήψης περικλείει το υπό εξέταση υλικό, μπορεί να γίνει χρήση του νόμου Faraday ως εξής:

$$V_{out} = NA \frac{dB}{dt}$$



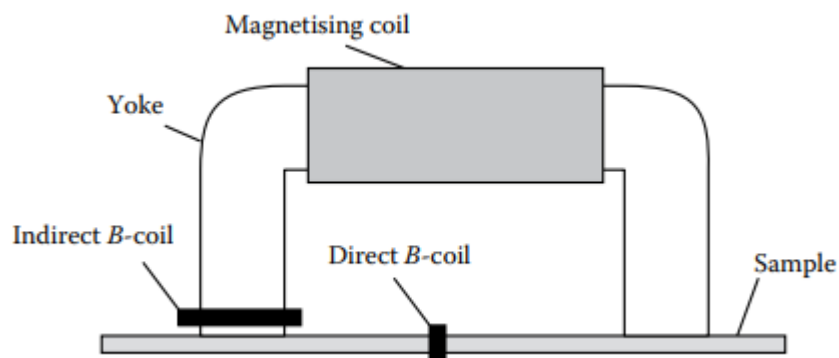
Εικόνα 7: Απλή διάταξη μέτρησης μαγνητικής επαγωγής B [15].

Υπάρχει επίσης περίπτωση η μέτρηση της τάσης και άρα η τοποθεσία του πηνίου μέτρησης να μην βρίσκεται πάνω στο δείγμα. Σε τέτοιες τοπολογίες γίνεται χρήση μαγνητικού πυρήνα και των ιδιοτήτων των μαγνητικών κυκλωμάτων που αναλύθηκαν παραπάνω. Η τοποθεσία του πηνίου λήψης γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο δείγμα. Θεωρούμε ότι η μαγνητική ροή διατηρείται μεταξύ του πυρήνα και του δείγματος και άρα : $\Phi_{yoke} = \Phi_{sample} \rightarrow B_{yoke} * A_{yoke} = B_{sample} * A_{sample}$. Για το πηνίο λήψης με εφαρμογή του Νόμου Faraday ισχύει:

$$V_{out} = NA_{yoke} \frac{dB_{yoke}}{dt}$$

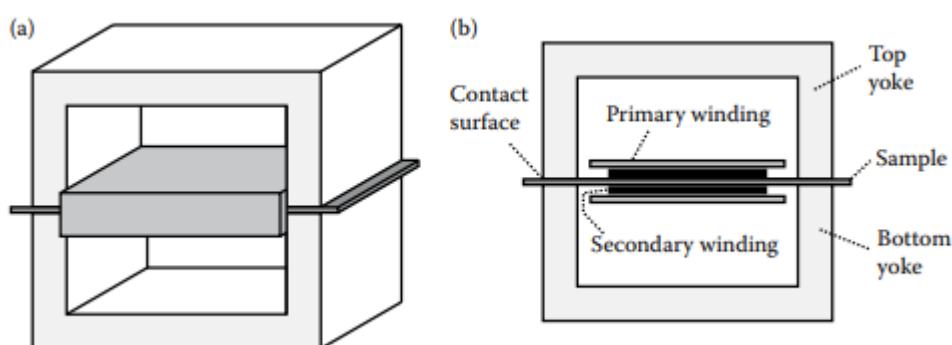
Με την θεώρηση της σταθερής μαγνητικής ροής Φ ισχύει:

$$B_{sample} = \frac{1}{NA_{sample}} \int V_{out} dt$$



Εικόνα 8: Διάταξη έμμεσης μέτρησης του B στο δείγμα [15].

Στις παραπάνω αρχές βασίζονται μέθοδοι προσδιορισμού του βρόγχου υστέρησης $B(H)$ όπως το **Single Sheet Tester** (SST, [16]) και μέθοδοι που κάνουν χρήση ηλεκτρομαγνητικού πυρήνα (EMY).



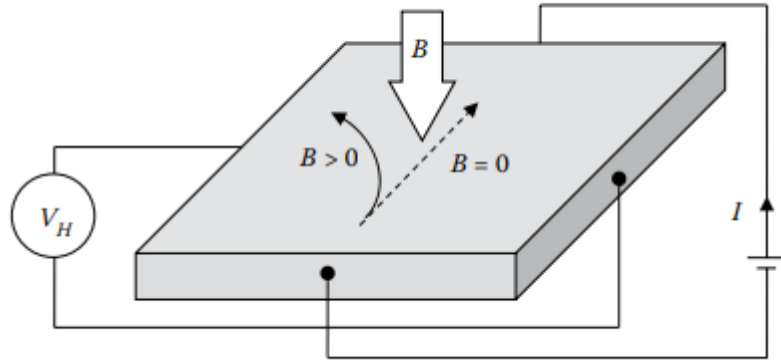
Εικόνα 9: (α) Τυπική διάταξη SST, (β) Τομή της διάταξης [15].

2.4.2 Αισθητήρες Hall για υπολογισμό $B(H)$

Οι αισθητήρες Hall βασίζονται στο φαινόμενο Hall σύμφωνα με το οποίο όταν μία ημιαγώγιμη πλάκα διαρρέεται από ρεύμα I και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο B με συνιστώσα κάθετη σε αυτήν παρατηρείται διαφορά δυναμικού V_H στα άκρα της πλάκας. Αυτή η διαφορά δυναμικού οφείλεται στην εκτροπή των φορτίων από την κανονική τους πορεία και την συσσώρευση τους στα άκρα της πλάκας (αν $B=0$ δεν υπάρχει εκτροπή και άρα $V_H = 0$). Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται από τις δυνάμεις Lorentz που ασκούνται σε φορτία που κινούνται με ταχύτητα V εντός μαγνητικού πεδίου B . Η τάση Hall V_H που αναπτύσσεται συνδέεται με γραμμικά με το μαγνητικό πεδίο B :

$$V_H = \frac{R_H B I}{d}$$

Όπου: R_H : σταθερά Hall, B : η μαγνητική επαγωγή, I : ρεύμα διέγερσης και d : πάχος πλάκας



Εικόνα 10: Τυπική διάταξη εμφάνισης φαινομένου Hall [15].

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους, οι αισθητήρες Hall δεν χρειάζονται ολοκλήρωση της τάσης του σήματος λήψης προκειμένου να γίνει συσχέτιση με το μαγνητικό πεδίο. Έτσι έχοντας επιβάλλει ένα ελεγχόμενο εξωτερικό πεδίο έντασης H στο δείγμα που προορίζεται για χαρακτηρισμό βρόχου (πχ με χρήση πηνίου τυλιγμένο σε πυρήνα) και μετρώντας την τάση Hall, προσδιορίζεται η μαγνητική επαγωγή B σε σχέση με την ένταση H .

2.5 Φαινόμενο Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR)

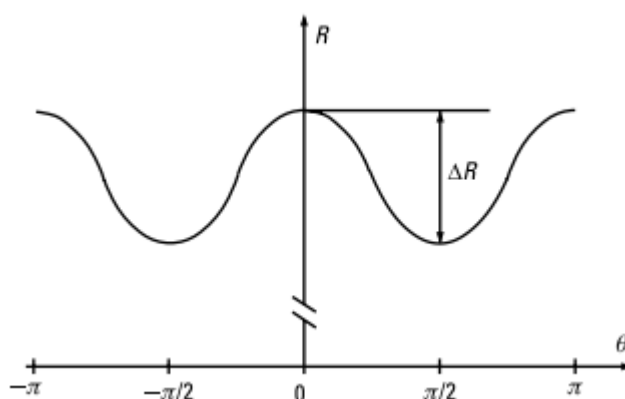
Το φαινόμενο AMR περιγράφει την μεταβολή της αντίστασης ενός φερρομαγνητικού υλικού όταν η μαγνήτιση του (που του επιβάλλεται από κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο) περιστρέφεται σε σχέση με το ρεύμα που το διαρρέει. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της σκέδασης σ των ελεύθερων ηλεκτρονίων όταν η κατεύθυνση του ρεύματος ταυτίζεται με αυτή του μαγνητικού πεδίου.

Η εξίσωση που συνδέει την αντίσταση του υλικού με την γωνία θ μεταξύ μαγνήτισης και χωρικού ρεύματος J που το διαρρέει είναι:

$$R = R_0 + \Delta R_{AMR} \cos^2 \theta$$

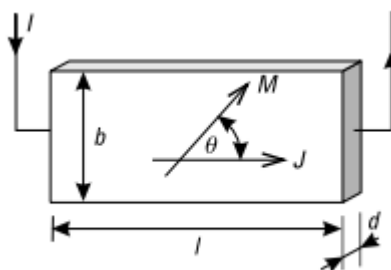
Όπου R_0 : η αρχική αντίσταση σε αμαγνήτιστη κατάσταση, ΔR_{AMR} : η μεταβολή της αντίστασης λόγω AMR και θ : η γωνία μεταξύ της μαγνήτισης του υλικού και του ρεύματος που το διαρρέει.

Η μεταβολή ΔR_{AMR} είναι ίση με την διαφορά $R_{||} - R_{\perp}$, όπου $R_{||}$ είναι η τιμή της αντίστασης του υλικού όταν αυτό βρίσκεται σε μαγνητικό κορεσμό υπό εξωτερικό πεδίο παράλληλο με το ρεύμα που το διαρρέει και $R_{\perp}$, η τιμή της αντίστασης όταν βρίσκεται σε μαγνητικό κορεσμό και το πεδίο είναι κάθετο στο ρεύμα.



Εικόνα 11: Μεταβολή της αντίστασης R ως συνάρτηση της γωνίας θ [5].

Το μέγεθος της μεταβολής AMR και το πρόσημο της δεν μπορούν να προβλεφθούν εύκολα. Τα περισσότερα υλικά έχουν θετικό συντελεστή AMR, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν την μέγιστη τιμή αντίστασης όταν τα διανύσματα μαγνήτισης M και η χωρικής πυκνότητας ρεύματος J είναι παράλληλα μεταξύ τους.



Εικόνα 12: Τυπική διάταξη λεπτού υμενίου που εμφανίζει AMR [5].

Ο προσδιορισμός της γωνίας θ στην οποία “ισορροπεί” το διάνυσμα της μαγνήτισης γίνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της ενέργειας E του υλικού αν αυτό

θεωρηθεί ως ένα νανοσωματίδιο με μοναδική μαγνητική περιοχή και άξονα εύκολης μαγνήτισης τον άξονα των x .

$$E = E_{applied\ field} + E_{anisotropy} = -\mu_0 M_s H_x \cos(\theta) - \mu_0 M_s H_y \sin(\theta) + K_u \sin^2 \theta$$

Όπου $E_{applied\ field}$: η ενέργεια του σωματιδίου λόγω του εξωτερικού πεδίου και $E_{anisotropy}$: η ενέργεια ανισοτροπίας του σωματιδίου που οφείλεται στην περιστροφή της μαγνήτισης ως προς τον εύκολο άξονα μαγνήτισης.

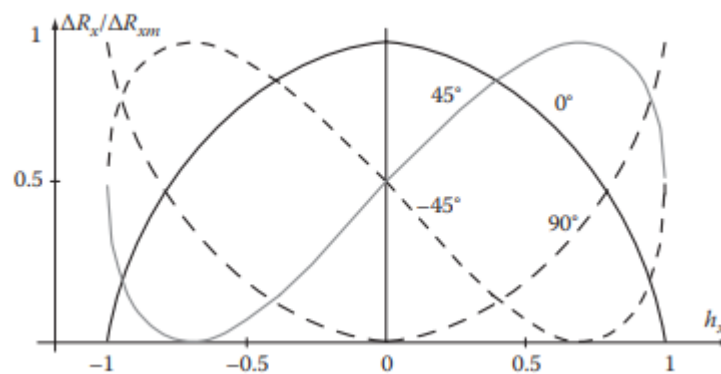
$$\frac{dE}{d\theta} = \mu_0 M_s H_x \sin(\theta) - \mu_0 M_s H_y \cos(\theta) + 2K_u \sin\theta \cos\theta$$

$$\frac{dE}{d\theta} = 0 \rightarrow \sin\theta = \frac{H_y}{H_k + H_x}$$

Όπου το H_k : κανονικοποιημένη ένταση πεδίου ίση με $\frac{2K_u}{\mu_0 M_s}$.

Έτσι σύμφωνα με την αρχική σχέση προκύπτει μια μη γραμμική σχέση που συνδέει την αντίσταση R με την ένταση του πεδίου H :

$$R(H) = R_0 + \Delta R_{AMR} \left(1 - \frac{H_y^2}{H_k^2 + H_x^2}\right)$$

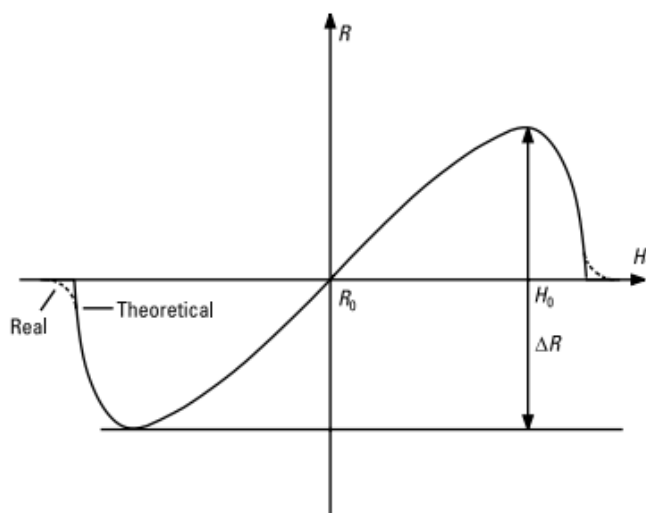


Εικόνα 13: Λόγος μεταβολής αντίστασης ως προς κανονικοποιημένο πεδίο για τιμές γωνίας μεταξύ ρεύματος και άξονα ανισοτροπίας [6].

Το φαινόμενο AMR είναι πιο εμφανές σε υλικά που έχουν μεγαλύτερη σύζευξη spin – τροχιάς όπως το κράμα $Ni_{80}Fe_{20}$ του οποίου η μέγιστη μεταβολή στην αντίσταση του φτάνει έως και το 4% ([4]).

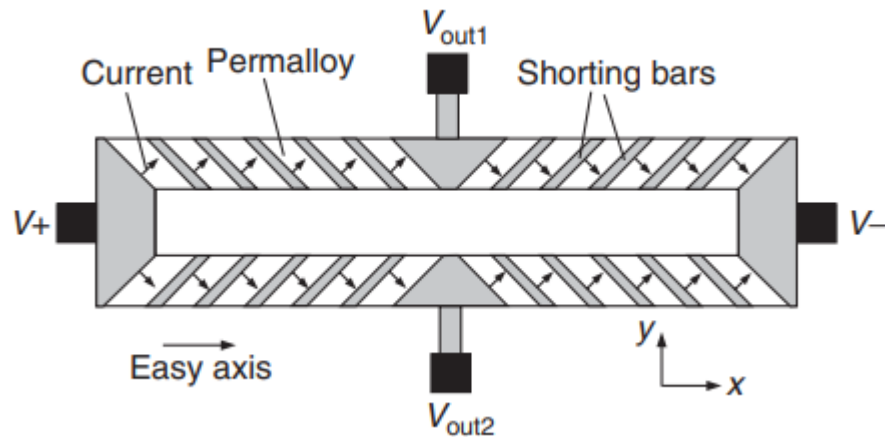
2.5.1 Αισθητήρες AMR

Η μεγαλύτερη ευαισθησία για αισθητήρες AMR επιτυγχάνεται για γωνία $\theta = 45^\circ$, όπου και η γραφική $R(H)$ είναι σχεδόν γραμμική. Ο καθορισμός της γωνίας θ μεταξύ του ρεύματος και της Μαγνήτισης μπορεί να γίνει με 2 τρόπους ([5] σελίδα 106). Ο πρώτος τρόπος αφορά την εφαρμογή σταθερού πεδίου υπό γωνία 45° με την διεύθυνση του άξονα διέλευσης ρεύματος που έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό της διεύθυνσης του εύκολου άξονα μαγνήτισης σε αυτήν του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 14: Καμπύλη $R(H)$ για $\theta = 45^\circ$ [5].

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται σταθερή γωνία ίση με 45° είναι μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης της επιφάνειας του υλικού. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται μία τεχνική που ονομάστηκε **"barber pole"** σύμφωνα με την οποία γίνεται εναπόθεση λεπτών αγώγιμων υμενίων, με ειδική αγωγιμότητα υψηλότερη από αυτήν του μαγνητικού υλικού (πχ αλουμινίου ή χρυσού) με σκοπό την παρεκτροπή της κατεύθυνσης του ρεύματος. Οι αγώγιμες αυτές λωρίδες τοποθετούνται υπό γωνία 45 μοιρών με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης, κατά τον οποίο είναι πιο εύκολο και πιθανό να βρίσκεται η μαγνήτιση με αποτέλεσμα την επιβολή της επιθυμητής γωνίας θ μεταξύ μαγνήτισης και ρεύματος.



Εικόνα 15: Επιβολή σταθερής γωνίας μεταξύ του εύκολου άξονα μαγνήτισης και του ρεύματος με τοποθέτηση επικλινών λεπτών αγωγών πάνω από το permalloy [8].

Ωστόσο η τεχνική “barber pole” έχει το βασικό μειονέκτημα της αξιοποίησης περίπου του 60% της αντίστασης του μαγνητικού υλικού εξαιτίας της μερικής βραχυκύκλωσης του από τα αγωγικά υμένα που το επικαλύπτουν ([5] σελίδα 109). Παρόλα αυτά είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή AMR αισθητήρων λόγω του πλεονεκτήματος της εξάρτησης της γωνίας θ μόνο από την γεωμετρία της διάταξης.

Η επικρατέστερη συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες AMR είναι αυτή της **γέφυρας Wheatstone**. Για να δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών V_{out1}, V_{out2} της Εικόνας 15 θα πρέπει οι 2 κλάδοι της γέφυρας να έχουν αντίθετα χαρακτηριστικά ευαισθησίας, το οποίο επιτυγχάνεται με την εναλλαγή της κατεύθυνσης των αγωγών. Τα πλεονεκτήματα αυτής της συνδεσμολογίας είναι η εξάλειψη του θερμοκρασιακού παράγοντα αφού όλες οι αντιστάσεις αλλάζουν ομοιόμορφα, η καταστολή του θορύβου που είναι κοινός στους 2 ακροδέκτες, η μεγαλύτερη ευαισθησία σε ορισμένες διευθύνσεις του μαγνητικού πεδίου. Η τάση εξόδου αντιστοιχεί σε διπλάσια ένταση πεδίου από του μετρούμενου και η ακρίβεια της μέτρησης ανήκει στην τάξη του ppm.

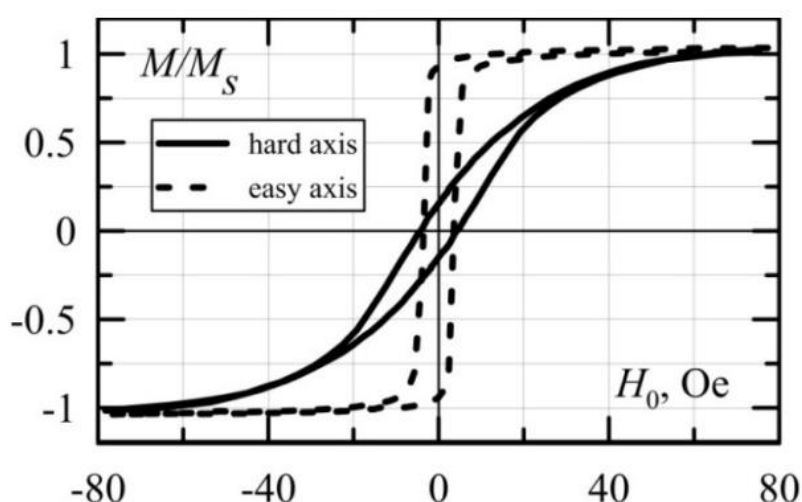
Οι αισθητήρες AMR εκτός από την ανίχνευση και μέτρηση μαγνητικού πεδίου και των ρευμάτων που τα προκαλούν, χρησιμοποιούνται και ως αισθητήρες θέσης σε ρομποτικές διατάξεις, στην αυτοκινητοβιομηχανία για την ανίχνευση της θέσης του τιμονιού, της περιστροφής των τροχών, των στροφών του κινητήρα και στην ιατρική

για την ανίχνευση καρδιακών παλμών, για την βαθμονόμηση μαγνητικών τομογράφων κλπ.

2.5.2 Permalloy

Το μαγνητικό υλικό permalloy χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή αισθητήρων AMR και άρα κρίθηκε ιδανικό για την θέση του μαγνητικού υλικού στο επίπεδο μέτρησης αντίστασης. Συγκεκριμένα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα μ .
- Χαμηλό συνεκτικό πεδίο με συνέπεια την ευκολότερη μαγνήτιση του. Για αυτό χαρακτηρίζεται ως μαλακό μαγνητικό υλικό.
- Μεγάλη Ανισοτροπική αντίσταση. Η μεταβολή της αντίστασης μπορεί να φτάσει έως και το 4%.



Εικόνα 16: Βρόγχος Μαγνήτισης permalloy πάχους 200nm για παράλληλο και κάθετο πεδίο στον εύκολο άξονα του [7].

Ο **εύκολος άξονας μαγνήτισης** του permalloy συνήθως καθορίζεται κατά την εναπόθεση του ([6] σελίδα 25), σύμφωνα με την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου που επιβάλλεται σε αυτό. Σε περίπτωση λεπτού και επιμηκυμένου υμενίου ο εύκολος άξονας τείνει να ταυτίζεται με την επιμηκυμένη διάσταση του. Τέλος, καθορίζεται και από την κρυσταλλική ανισοτροπία του.

Το permalloy μπορεί να εντοπιστεί σε πολλές εφαρμογές αισθητήριων διατάξεων όπως :

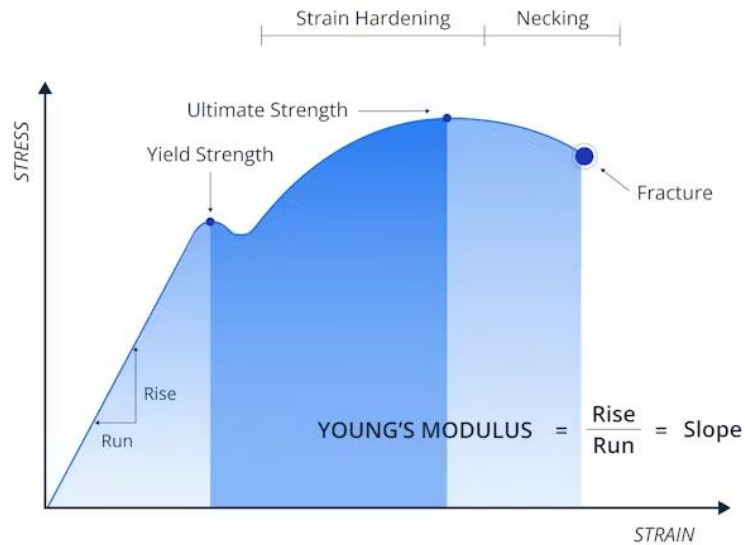
- Σε πυρήνες Μετασχηματιστών λόγω της υψηλής του διαπερατότητας και των χαμηλών απωλειών ισχύος που οφείλονται στον "στενό" βρόγχο υστέρησης του.
- Σε διάφορα μαγνητόμετρα με σκοπό την ανίχνευση και μέτρηση μαγνητικών πεδίων.
- Σε μαγνητικές μνήμες λόγω της ευαισθησίας του στο μαγνητικό πεδίο και της εύκολης μαγνήτισης του.
- Για την μαγνητική θωράκιση εξαρτημάτων από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Χρησιμοποιείται στον κλάδο της ιατρικής σε μηχανήματα όπως τον αξονικό τομογράφο και σε άλλους ευαίσθητους ιατρικούς αισθητήρες. Χρησιμοποιείται επίσης σε συστήματα τηλεπικοινωνιών λόγω των ιδιοτήτων θωράκισης και μείωσης του εξωτερικού θορύβου.
- Σε ιατρικές εφαρμογές για τον εντοπισμό μαγνητικών σωματιδίων.

2.6 Καμπύλη Stress Strain

Η **καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Stress-Strain Curve)** είναι ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της μηχανικής τάσης (σ) και της παραμόρφωσης (ϵ) ενός υλικού υπό εφαρμογή δύναμης. Αποτελεί βασικό εργαλείο στη μηχανική των υλικών, καθώς περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού από την ελαστική περιοχή μέχρι τη θραύση του. Παρέχει κρίσιμες πληροφορίες, όπως το όριο διαρροής, το όριο θραύσης, η αντοχή εφελκυσμού και η ολκιμότητα του υλικού.

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ και } \epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}.$$

Όπου L_f : Τελική μήκος του υλικού μετά την παραμόρφωση, L_0 : Αρχική μήκος υλικού.



Εικόνα 17: Καμπύλη χαρακτηρισμού υλικών Stress Strain [18].

Στην γραμμική περιοχή της καμπύλης το υλικό βρίσκεται στην ελαστική του περιοχή και η παραμόρφωση του είναι αντιστρέψιμη, δηλαδή όταν σταματήσει να εφαρμόζεται σε αυτό επιφανειακή τάση επιστρέφει στην αρχική του διάσταση. Από την κλίση της καμπύλης μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής ελαστικότητας E που ονομάζεται young's modulus. Μετά το Yield point και το τέλος της ελαστικής περιοχής παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση και άρα μη αντιστρέψιμη λόγω της μετακίνησης των εσωτερικών επιφανειών του υλικού. Η παραμόρφωση του υλικού συνεχίζει μέχρι το σημείο που αποκαλείται Necking, στο οποίο εμφανίζεται αλλαγή στην διατομή του υλικού σε μορφή "στένωσης". Τέλος η επιμήκυνση του συνεχίζεται μέχρι το σημείο θραύσης.

2.7 Εναπομένουσες Τάσεις Υλικών

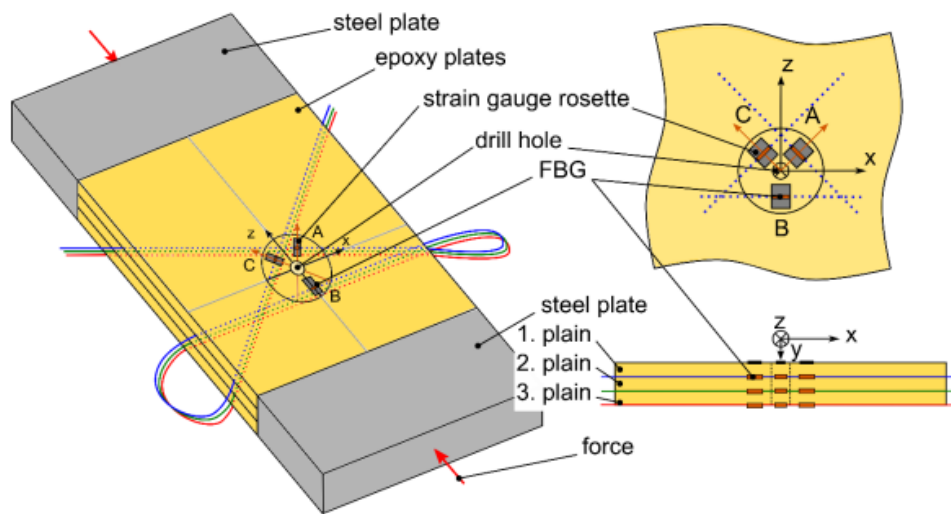
Οι εναπομένουσες τάσεις εμφανίζονται σε υλικά όταν δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις και προκύπτουν από πλαστική παραμόρφωση, θερμικές μεταβολές ή αλλαγές φάσης κατά τη μεταλλουργική ή μηχανική επεξεργασία τους. Συγκεκριμένα, μπορεί να δημιουργηθούν μετά από διεργασίες όπως η κόλληση, η κατεργασία ή η θερμική σκλήρυνση, καθώς και όταν το υλικό δεν μπορεί να επανέλθει πλήρως στην αρχική του κατάσταση λόγω εγκλωβισμένων τάσεων. Αν και το συνολικό αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων σε ένα ελεύθερο σώμα είναι μηδέν, η κατανομή των τάσεων

στο εσωτερικό του μπορεί να είναι ανομοιομορφή, δημιουργώντας περιοχές συμπίεσης και εφελκυσμού. Αυτές οι τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία, καθώς συμβάλλουν στην ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης, στη διάβρωση υπό τάση και σε ανεπιθύμητες παραμορφώσεις. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας η ανίχνευση των περιοχών με τις υψηλότερες επιφανειακές τάσεις, καθώς αυτές αποτελούν πιθανά σημεία ανάπτυξης ρωγμών και ατελειών. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι για τη μέτρηση των εναπομενουσών τάσεων περιλαμβάνουν τη μέθοδο διάτρησης οπών (Hole Drilling Method), που χρησιμοποιείται για την ανάλυση επιφανειακών τάσεων, και τη διάθλαση ακτίνων Χ (XRD), η οποία επιτρέπει τη μέτρηση των τάσεων σε κρυσταλλικό επίπεδο. Επιπλέον, σε φερρομαγνητικά υλικά εφαρμόζεται η Μέθοδος Μαγνητικής Διάχυσης (Magnetic Barkhausen Noise Analysis), που προσφέρει πληροφορίες για την κατανομή των υπολειμματικών τάσεων και τη μικροδομή του υλικού.

2.7.1 Διάτρηση Οπών

Η μέθοδος διάτρησης οπών βασίζεται στην αρχή της αναδιάταξης των εναπομενουσών εσωτερικών τάσεων του υλικού ως αποτέλεσμα της δημιουργίας οπών. Σε αυτά τα σημεία το υλικό “χαλαρώνει” και παρατηρούνται μικρές παραμορφώσεις η μέτρηση των οποίων (πχ με strain gauge) μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα για την αρχική κατανομή των επιφανειακών τάσεων. Ωστόσο αυτή η μέθοδος έχει κάποιους βασικούς περιορισμούς:

- Την προετοιμασία της επιφάνειας αφού θα πρέπει πρώτα να καθαριστεί από επιφανειακές ακαθαρσίες που επηρεάζουν την μέτρηση και να τοποθετηθεί αισθητήρας μέτρησης των παραμορφώσεων.
- Η εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται μέχρι το βάθος του τρυπανιού του υλικού και όχι για τον συνολικό όγκο του. Δεν υπάρχει πλεονέκτημα σε εισχώρηση βάθους μεγαλύτερου της διαμέτρου του τρυπανιού ([14]).
- Η ανάλυση είναι επιτυχής μόνο στα σημεία όπου οι εναπομένουσες τάσεις δεν ξεπερνούν το μισό της τάσης στο Yield point.
- Η παρεμβατική φύση της μέτρησης πάνω στο υλικό αφού προϋποθέτει την μερική του καταστροφή του δείγματος.



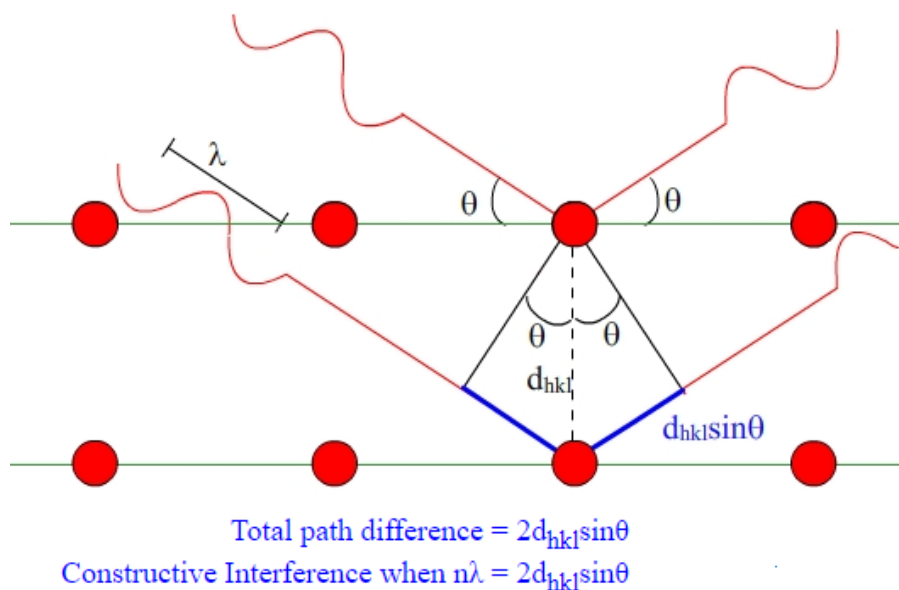
Εικόνα 18: Μέθοδος διάτρησης οπών για τον υπολογισμό επιφανειακών τάσεων [14].

2.7.2 X-Ray Diffraction

Η μέθοδος XRD χρησιμοποιείται για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής των υλικών, βασιζόμενη στην αλληλεπίδραση των ακτίνων X με το κρυσταλλικό πλέγμα σε μικρό βάθος από την επιφάνειά τους. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει μια πηγή ακτίνων X, μια βάση για το υπό εξέταση δείγμα και έναν ανιχνευτή που καταγράφει την ένταση των διαχεόμενων ακτίνων X. Οι ακτίνες προσπίπτουν στο δείγμα υπό γωνία θ , και η ανιχνευόμενη ακτινοβολία καταγράφεται υπό γωνία 2θ . Σύμφωνα με το νόμο του Bragg, η περίθλαση ικανοποιείται όταν ισχύει η σχέση:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Όπου n : τάξη περίθλασης (συνήθως $n=1$), λ : μήκος κύματος ακτίνων, θ : γωνία πρόσπτωσης, d : είναι η απόσταση μεταξύ των επιπέδων του κρυστάλλου.

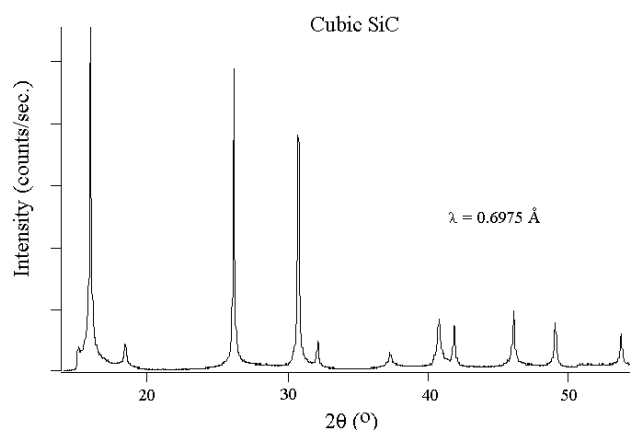


Εικόνα 19: Προσπίπτουσες και περιθλαμένες ακτινοβολίες της διάταξης XRD [25].

Σχεδιάζεται το διάγραμμα $I(2\theta)$, το οποίο απεικονίζει την ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας περίθλασης. Για συγκεκριμένες τιμές του 2θ , η σχέση του Bragg ικανοποιείται και συμβαίνει ενισχυτική συμβολή των ακτινών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση κορυφών στο διάγραμμα. Η ερμηνεία των κορυφών αυτών επιτρέπει τη διερεύνηση της κρυσταλλικής δομής του υλικού. Η ένταση των κορυφών εξαρτάται από την κατανομή των ατόμων στα κρυσταλλικά επίπεδα, την πιθανότητα περίθλασης και την προσανατολισμένη δομή των κόκκων του υλικού.

Η ανάλυση των επιφανειακών τάσεων μέσω της μεθόδου XRD γίνεται με τη μελέτη της μετατόπισης των κορυφών στο διάγραμμα περίθλασης, καθώς οι εφελκυστικές ή συμπιεστικές τάσεις μεταβάλλουν την απόσταση d μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων. Συγκεκριμένα, όταν το υλικό υφίσταται εφελκυστικές τάσεις, η απόσταση d αυξάνεται, με αποτέλεσμα, σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg, η γωνία περίθλασης 2θ να μειώνεται, γεγονός που οδηγεί σε μετατόπιση των κορυφών προς μικρότερες τιμές 2θ (αριστερά μετατόπιση). Αντίθετα, όταν ασκούνται συμπιεστικές τάσεις, η απόσταση d μειώνεται, αυξάνοντας τη γωνία 2θ και προκαλώντας μετατόπιση των κορυφών προς μεγαλύτερες τιμές 2θ (δεξιά μετατόπιση).

Η μέθοδος XRD προσφέρει υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό της κρυσταλλικής κατεύθυνσης και της κατανομής των υπολειμματικών τάσεων με μη καταστροφικό τρόπο. Ωστόσο, παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος εξοπλισμού, το περιορισμένο βάθος ανάλυσης (συνήθως λίγα μικρόμετρα κάτω από την επιφάνεια), την απαίτηση για λεία επιφάνεια, την ευαισθησία στη γεωμετρία του δείγματος και τη σχετική πολυπλοκότητα στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



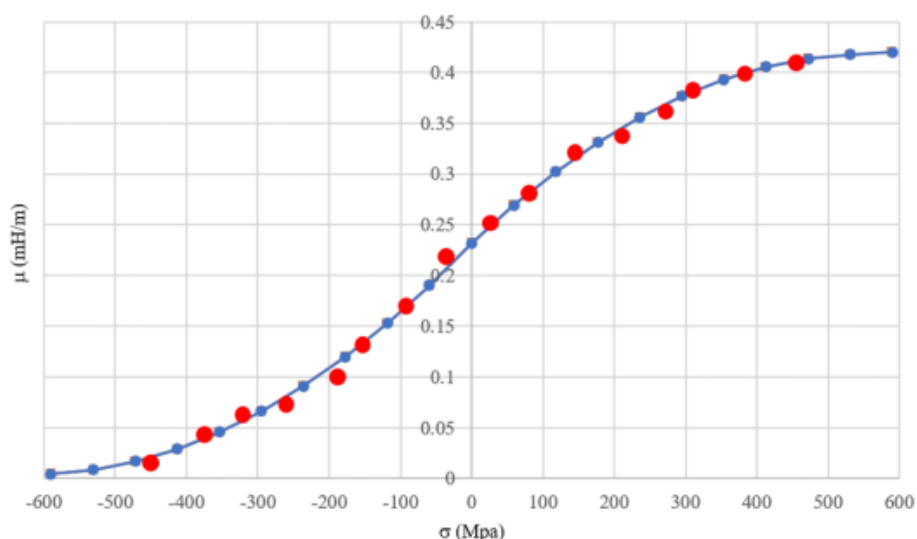
Εικόνα 20: Διάγραμμα $I(2\theta)$ για δείγμα κυβικού SiC [26].

2.8 Σύνδεση Μαγνητικών και Μηχανικών Ιδιοτήτων

Ένας από τους τρόπους προσδιορισμού των εναπομενουσών τάσεων υλικών στον οποίο δραστηριοποιείται το εργαστήριο του κ. Χριστοφόρου είναι μέσω της μελέτης της σημειακής διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας τους. Πρόκειται για έναν μη καταστροφικό τύπο ελέγχου όπως είναι η διάτρηση οπών και παράλληλα είναι απαλλαγμένος από τους περιορισμούς της μεθόδου XRD. Στόχος είναι η εξαγωγή μιας γενικής καμπύλης χαρακτηρισμού δοκιμίων όπως του χάλυβα που θα παρέχει χρήσιμες ιδιότητες για τις μηχανικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών.

Η σύνδεση των μεγεθών των επιφανειακών τάσεων με την διαφορική διαπερατότητα γίνεται μέσω της μελέτης ενός δοκιμίου στο οποίο υπάρχουν ατέλειες που μπορεί να προέρχονται πχ από την κόλληση δύο κομματιών. Το δείγμα αυτό αρχικά εξετάζεται με την μέθοδο του XRD με σκοπό τον προσδιορισμό των εναπομενουσών τάσεων που προέκυψαν μετά την κόλληση, σε όλα τα σημεία του και στην συνέχεια μέσω του προσδιορισμού της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας με κάποιον επιφανειακό μαγνητικό αισθητήρα, αποκτάται για κάθε

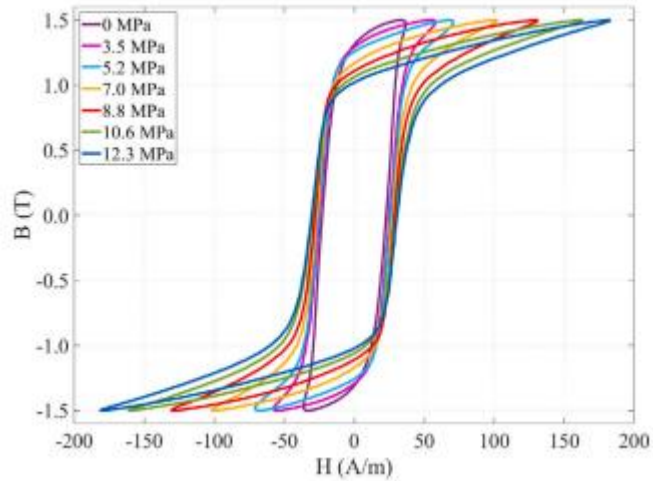
σημείο ένα ζεύγος τιμών μ, σ . Μέσω της κανονικοποίησης των παραπάνω σημείων προκύπτει μία καμπύλη που ονομάζεται **MASC (Magnetic Stress Calibration Curve)**, που χαρακτηρίζει την ελαστική περιοχή του υλικού. Η συνολική αβεβαιότητα της μεθόδου είναι $\pm 3\%$, προκύπτει από το άθροισμα των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις των 2 συσχετιζόμενων μεγεθών ([9]) και θα συνεχίσει να μειώνεται με τον πιο αποτελεσματικό προσδιορισμό των εναπομενουσών τάσεων.



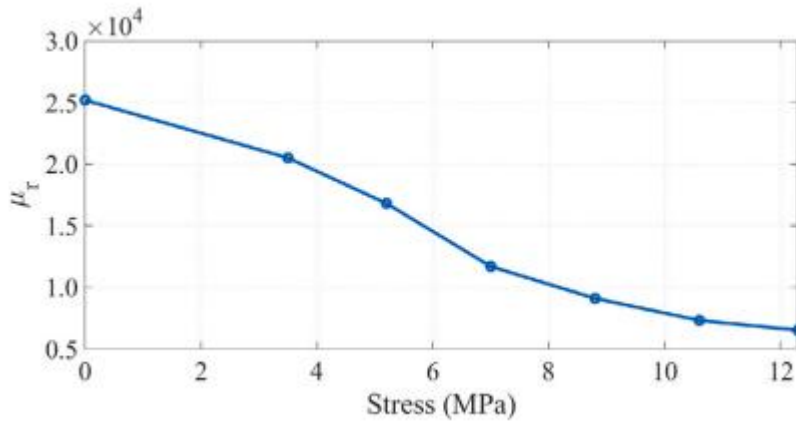
Εικόνα 21: Κανονικοποιημένη Καμπύλη MASC δοκιμίου χάλυβα [9].

Για δοκίμια με θετική μαγνητοελαστικότητα είναι αναμενόμενες καμπύλες όπως της Εικόνας 21 στην οποία παρατηρείται αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας για εφελκυστικές τάσεις και μείωση της για θλιπτικές. Αυτή η συμπεριφορά έχει να κάνει με το πλήθος των μαγνητικών περιοχών που ευθυγραμμίζονται παράλληλα ή κάθετα με τον άξονα εφαρμογής τάσης. Κατά την σύνθλιψη, υπάρχει αύξηση των περιοχών που ευθυγραμμίζονται κάθετα με αυτόν και άρα παρατηρείται πτώση της μαγνητικής διαπερατότητας.

Ενδιαφέρον έχει επίσης η μεταβολή του βρόχου υστέρησης αναλόγως με το αν ασκείται εφελκυστική ή θλιπτική τάση μια δεδομένη στιγμή σε κάποιο δοκίμιο. Η άσκηση θλιπτικών τάσεων προκαλεί αύξηση του συνεκτικού πεδίου H_c και μείωση της εναπομένουσας μαγνήτισης B_r , για λόγους παρόμοιους με παραπάνω, δηλαδή την αύξηση του πλήθους των μαγνητικών περιοχών που σχηματίζουν 90° με τον άξονα τάσης. Άρα συνέπεια της σύνθλιψης του υλικού είναι η μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας του.



Εικόνα 22: Πλάτυνση του βρόχου υστέρησης με την εφαρμογή θλιπτικής τάσης [10].



Εικόνα 23: Μείωση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας με την εφαρμογή θλιπτικής τάσης [10].

2.9 Φωτολιθογραφία

Η φωτολιθογραφία είναι μία από τις διαδικασίες που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Στόχος της είναι ο σχηματισμός μοτίβων σε ένα υπόστρωμα, συνήθως πυριτίου με την χρήση φωτεινής ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1950 όπου δημιουργήθηκε η ανάγκη δημιουργίας μικρότερων transistor και η ενσωμάτωση τους σε microchip. Τα βασικά βήματα της UV φωτολιθογραφίας είναι τα εξής:

- Προετοιμασία του υποστρώματος: Γίνεται απομάκρυνση οργανικών υλικών και σωματιδίων με εμβάπτιση σε χημικά διαλύματα όπως το piranha. Για την

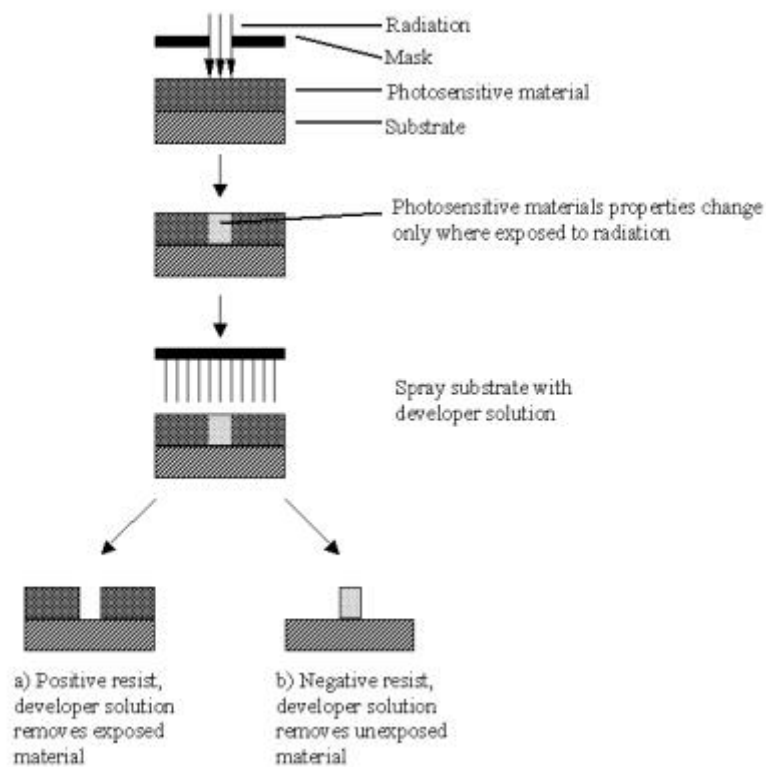
εξάλειψη της υγρασίας χρησιμοποιείται η ουσία HMDS που καλείται promoter.

- Επικάλυψη με φωτοευαίσθητη ουσία: Γίνεται εναπόθεση κατάλληλης φωτοευαίσθητης ουσίας στο υπόστρωμα, αναλόγως με τον αν τα μοτίβα που είναι επιθυμητό να σχηματιστούν προκύπτουν από τις περιοχές που έρχονται σε επαφή με την ακτινοβολία ή όχι (θετική ή αρνητική φωτολιθογραφία). Η εξάπλωση της ουσίας σε ολόκληρη την επιφάνεια γίνεται με χρήση spin coater, μίας πακτωμένης βάσης σε ένα άξονα περιστροφής με δυνατότητα ελέγχου του αριθμού στροφών ανά λεπτό. Η παραμονή του δείγματος πάνω στην βάση εξασφαλίζεται με τεχνητό κενό αέρα ανάμεσα τους. Τέλος, το δείγμα οδηγείται σε φούρνο όπου και ψήνεται με σκοπό την στερεοποίηση της ουσίας.
- Ευθυγράμμιση της φωτομάσκας με το δείγμα και δημιουργία κενού μεταξύ τους.
- Έκθεση σε ακτινοβολία: Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται τυπικά ανήκουν στο φάσμα της UV ακτινοβολίας (100nm - 400nm), η οποία προκαλεί χημικές αντιδράσεις στον φωτοαντιστάτη. Στην περίπτωση της θετικής λιθογραφίας, το ακτινοβολημένο κομμάτι γίνεται διαλυτό στο επόμενο βήμα ενώ στην αρνητική το ακτινοβολημένο τμήμα γίνεται αδιάλυτο.
- Τέλος, το δείγμα ψήνεται πάλι και τοποθετείται στην ουσία του developer με σκοπό την απομάκρυνση της ανεπιθύμητης ρητίνης, αναλόγως του τύπου της λιθογραφίας.

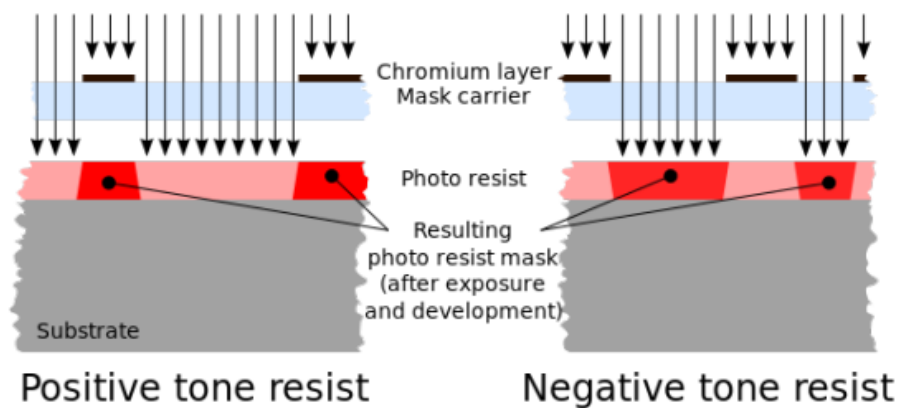
Η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί από την έκθεση στην ακτινοβολία καθορίζεται από την **εξίσωση του Rayleigh** σύμφωνα με την οποία:

$$CD = \frac{k_1 \lambda}{NA}$$

Όπου CD (Critical Dimension): η μικρότερη διάσταση που μπορεί να αποτυπωθεί, k_1 : εμπειρικός συντελεστής (συνήθως μεταξύ 0,4 και 1), λ : μήκος κύματος φωτός, NA: το αριθμητικό άνοιγμα του φακού.



Εικόνα 24: Γενικό διάγραμμα της θετικής και αρνητικής φωτολιθογραφίας [12].

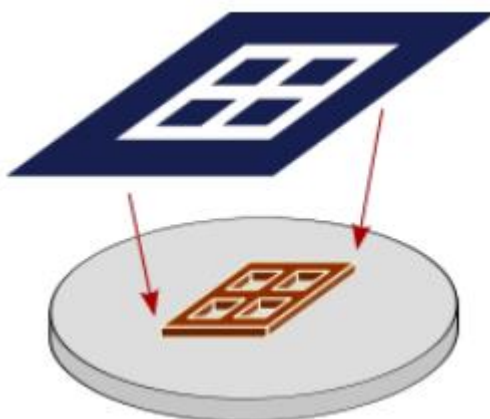


Εικόνα 25: Διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής φωτολιθογραφίας και στο προφίλ της ρητίνης [12].

Η σημερινή τεχνολογία “αιχμής” επιτρέπει την κατασκευή δομών με CD ίση με 13,5nm! Αυτό γίνεται με χρήση EUV λιθογραφίας (Extreme Ultraviolet) που χρησιμοποιεί ακτινοβολία πολύ κοντινή στο φάσμα των ακτίνων Χ.

2.9.1 Φωτομάσκα

Ως **φωτομάσκα** ορίζεται το πρότυπο που χρησιμοποιείται κατά την φωτολιθογραφία για την μεταφορά ενός μοτίβου πάνω σε ένα υπόστρωμα. Συνήθως είναι κατασκευασμένη από γυαλί ή quartz με λεπτές επιστρώσεις κάποιου αδιαφανούς υλικού όπως χρώμιο, με το οποίο σχηματίζονται οι επιθυμητές δομές. Στις περιοχές που δεν υπάρχει αδιαφανές υλικό, επιτρέπεται η διέλευση φωτός και η διέγερση του φωτοευαίσθητου υλικού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτομάσκας αναλόγως του είδους λιθογραφίας που χρησιμοποιούνται όπως : Binary Mask για κλασική UV λιθογραφία, Phase Shift Mask για βελτιωμένη ανάλυση, EUV Mask για EUV λιθογραφία.



Εικόνα 26: Αποτύπωση μοτίβου πάνω σε υπόστρωμα με χρήση φωτομάσκας [12].

Μετά τον σχεδιασμό της φωτομάσκας σε κάποιο σχεδιαστικό περιβάλλον είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός κάποιων παραμέτρων για την κατασκευή της. Συγκεκριμένα πρέπει να προσδιοριστεί αν τα "γεμισμένα" πολύγωνα αντιστοιχούν σε δομές χρωμίου της μάσκας και άρα αυτή να είναι Bright Field ή σε διαφανείς περιοχές και άρα να είναι Dark Field. Τέλος πρέπει να επισημανθεί αν τα μοτίβα του αρχείου αντιστοιχούν στην όψη της μάσκας που υπάρχει χρώμιο (Chrome Up) ή στην από πίσω (Chrome Down) και αν πρέπει αυτά να κατοπτριστούν (Wrong Reading) ή όχι (Right Reading).

3 Σχεδιασμός Δομών

3.1 Εισαγωγή στην σχεδιαστική προσέγγιση

Αρχικά έπρεπε να καταστρωθεί ένα βασικό σχέδιο για την διαδικασία κατασκευής που θα εκτελείτο στον καθαρό χώρο του Δημόκριτου για να αποφασιζόταν το πλήθος των φωτομασκών που θα απαιτούταν. Ήταν γνωστό ότι θα χρειαζόταν σίγουρα δομές για τον αγωγό διέγερσης, για τα 2 τμήματα του αγωγού λήψης και για το μαγνητικό υλικό. Αποφασίστηκε πως θα ήταν αναγκαίο να υπάρχουν δομές που θα αποκάλυπταν τις 4 επαφές εκ των οποίων 2 ήταν του αγωγού διέγερσης και 2 της λήψης, οι οποίες κατά το process θα καλύπτονταν από διηλεκτρικό υλικό. Η φανέρωση τους είναι αναγκαία για την κόλληση συρμάτων σε αυτές μετά το τέλος του process για την ευκολότερη διέγερση και λήψη από τους αντίστοιχους αγωγούς. Για την παραγωγή όσο τον δυνατό περισσότερων devices με μία επανάληψη του συνολικού process θα έπρεπε σύμφωνα με τα παραπάνω να σχεδιαστούν 4 διαφορετικές φωτομάσκες. Για την εξοικονόμηση χρημάτων, όλες οι παραπάνω δομές ήταν εφικτό να χωρέσουν σε μία φωτομάσκα, με τον κατάλληλο χωρισμό της σε 4 τεταρτημόρια καθένα από τα οποία θα περιείχε ένα layer πια. Τα layers περιέχουν για κάθε device τα εξής τμήματα:

1. Layer 1: Έναν αγωγό διέγερσης
2. Layer 2: Δύο αγωγούς λήψης
3. Layer 3: Μαγνητικό υλικό
4. Layer 4: Τέσσερα contact pads

3.2 Σχεδιαστικοί περιορισμοί

Έχοντας πια αποφασίσει την δημιουργία μίας φωτομάσκας χωρισμένη σε 4 τεταρτημόρια, πρέπει να επισημανθούν περιορισμοί που προκύπτουν από την θεωρητική θεμελίωση της διάταξης και από τις δυνατότητες των μηχανημάτων και των πόρων που είχαμε υπό την διάθεση μας.

1. Η μεταβολή της αντίστασης θα πρέπει να είναι μετρήσιμη. Συγκεκριμένα θα πρέπει η αντίσταση του μαγνητικού υλικού να είναι μεγαλύτερη από τις

αντιστάσεις των 2 κομματιών αγωγών λήψης, έτσι ώστε η μεταβολή της να είναι ευκρινής. Σαν θεωρητική τιμή είχε δοθεί μια μεταβολή της τάξης του 2% από τον κ.Χριστοφόρου, το οποίο είναι συνεπές με την βιβλιογραφία και τα προαναφερθέντα.

2. Οι αντιστάσεις επαφής των μεταλλικών υμενίων να είναι μικρές. Για όμοιους λόγους με παραπάνω δεν είναι επιθυμητή μεγάλη αντίσταση επαφής του μαγνητικού υλικού με τους αγωγούς λήψης.
3. Η μικρότερη διάσταση σε οποιοδήποτε device να μην ήταν κάτω από 10 μm για την εξοικονόμηση πόρων και την μεγαλύτερη επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.
4. Οι επαφές των αγωγών (contact pads) να είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε να μπορεί να κολληθεί καλώδιο με την μέθοδο του wire bonding αλλά και δια χειρός. Επίσης, οι κολλήσεις ιδανικά δεν πρέπει να προσθέτουν αντίσταση σειριακά στην συνολική μετρούμενη αντίσταση του επιπέδου λήψης.
5. Η απόσταση μεταξύ του επιπέδου διέγερσης και του επιπέδου λήψης να μην είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε το πεδίο που δημιουργείται στο 2^ο να είναι επαρκές ισχυρό.
6. Η γεωμετρία του αγωγού διέγερσης να είναι τέτοια που να μας επιτρέπει να τον πολώσουμε με ρεύμα αρκετής έντασης για την δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου.

3.3 Λύσεις σχεδιαστικών περιορισμών και παραμετροποίηση των διαστάσεων της διάταξης

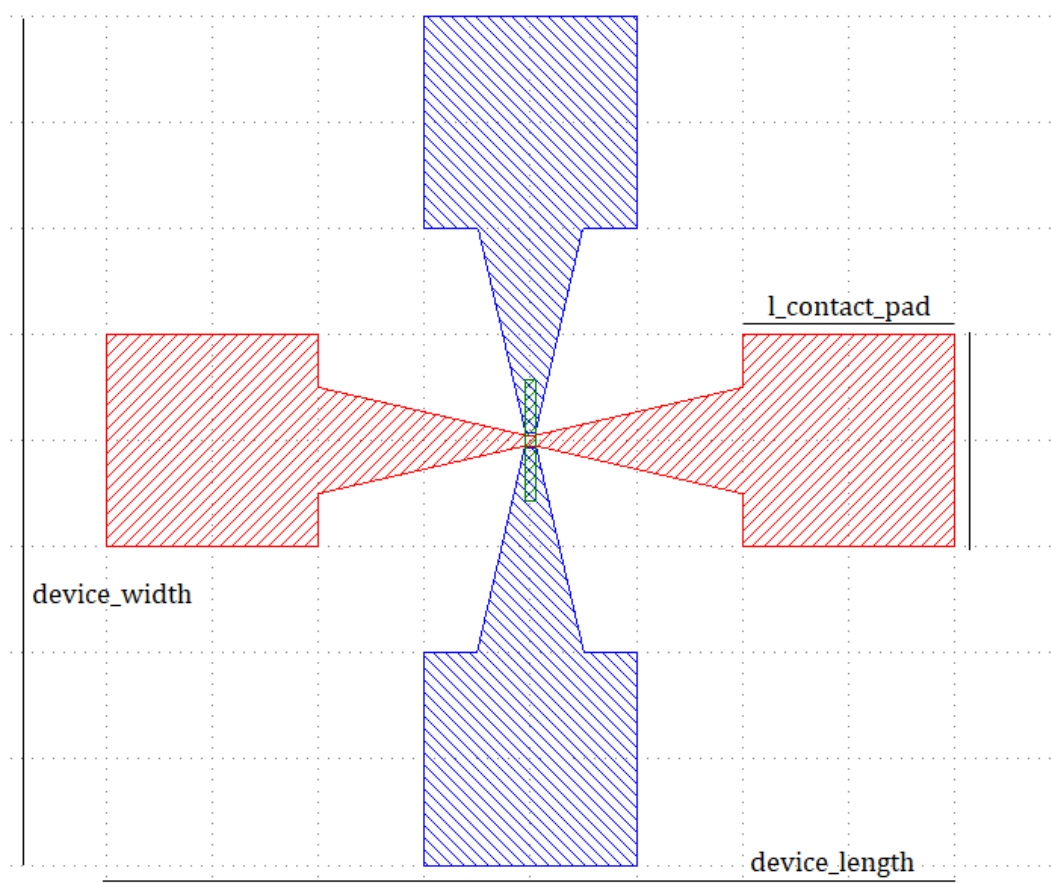
Το πιο σημαντικό ζήτημα που έπρεπε να λυθεί ήταν η εύρεση της γεωμετρίας της διάταξης και των σχεδιαστικών της μοτίβων. Έπρεπε να ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί 1, 2, 4 δηλαδή αυτοί που αφορούσαν την μείωση της αντίστασης των αγωγών διέγερσης και της σειριακής αντίστασης από τις κολλήσεις και τις επαφές ανόμοιων υλικών σε σχέση με την αντίσταση του μαγνητικού υλικού.

Εφόσον οι κολλήσεις στα contact pads θα έπρεπε να γίνουν με το χέρι, το εμβαδόν τους τέθηκε ίσο με $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ (περιορισμός 4).

Παρακάτω γίνεται η ανάλυση της γενικότερης γεωμετρίας. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται ο αγωγός διέγερσης, με μπλε χρώμα οι αγωγοί λήψης και με πράσινο χρώμα το μαγνητικό υλικό. Στην συγκεκριμένη φωτογραφία παραλείπεται το layer 4 που αφορά τα contact pads.

Το $l_{contactpad}$ τίθεται ίσο με 1000μm και όπως προαναφέρθηκε θέτουμε ίσο το μήκος και το πλάτος κάθε device άρα:

$$device_{width} = device_{length} = 4000\mu m = 4mm.$$

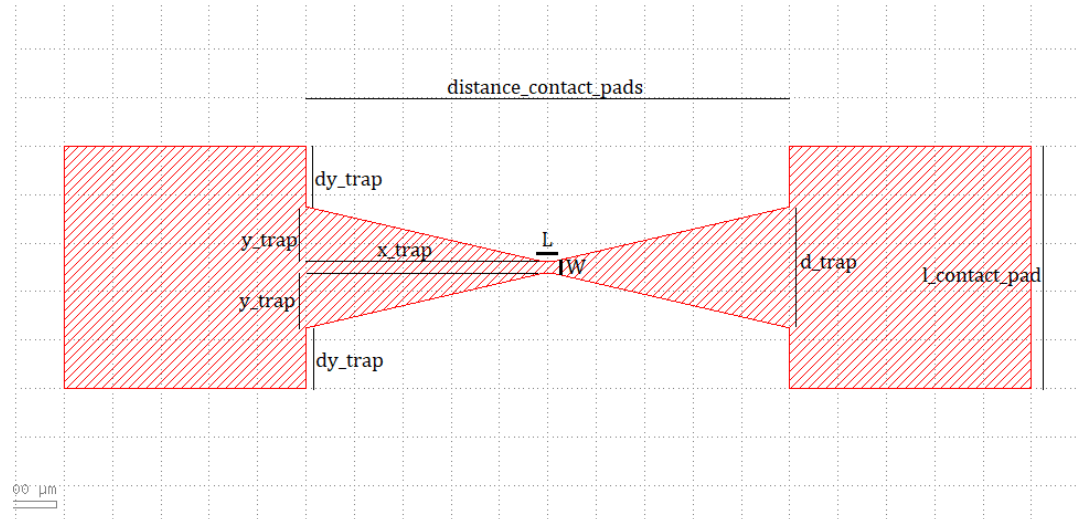


Εικόνα 27: : Γεωμετρία τυχαίου device. Κόκκινο χρώμα: layer 1, Μπλε χρώμα: layer 2, Πράσινο χρώμα: layer 3.

Σε κάθε device και άρα σε κάθε διαφορετική υλοποίηση θα αλλάζουν οι διαστάσεις του μαγνητικού υλικού και σύμφωνα με αυτές θα πρέπει να διαμορφώνονται οι διαστάσεις των αγωγών διέγερσης και λήψης. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις πιο αποτελεσματικές γεωμετρίες ήταν αναγκαία η παραμετροποίηση του προβλήματος και στην συνέχεια η μελέτη του ποσοστού

μεταβολής μετρούμενης αντίστασης λόγω μαγνητικού υλικού ως προς την συνολική αντίσταση του αγωγού λήψης σε κατάσταση ηρεμίας.

3.3.1 Παραμετροποίηση Layer 1



Εικόνα 28: Παραμετροποίηση του Layer 1.

Ο δείκτης trap έχει να κάνει με το τμήμα του αγωγού που έχει σχήμα τραπεζίου.

Από τα παραπάνω έχει ήδη οριστεί ότι η απόσταση των contact pads είναι ίση με $2000\mu m$ δηλαδή $distance_{contactpads} = 2000\mu m$.

Σύμφωνα με τις ονομασίες των παραπάνω αποστάσεων ισχύουν τα εξής:

$$x_{trap} + L + x_{trap} = distance_{contactpads} = 2000\mu m.$$

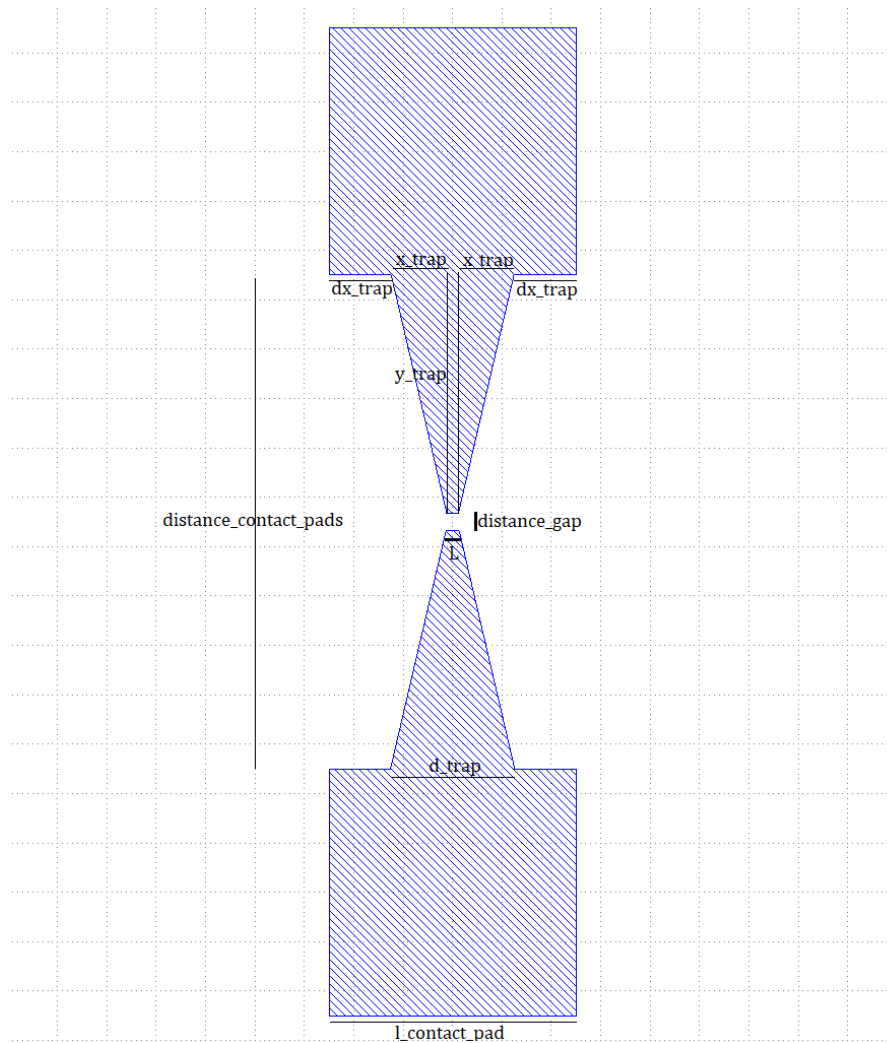
$$2dy_{trap} + d_{trap} = l_{contactpad} = 1000\mu m.$$

$$2y_{trap} + W = d_{trap}$$

Το d_{trap} τέθηκε ίσο με $500\mu m$, δηλαδή ίσο με το μισό μήκος της πλευράς του contact pad. Έτσι προκύπτουν:

$$x_{trap}(\mu m) = \frac{2000 - L}{2}, \quad y_{trap}(\mu m) = \frac{500 - W}{2}, \quad dy_{trap} = 250\mu m$$

3.3.2 Παραμετροποίηση Layers 2 & 3



Εικόνα 29: Παραμετροποίηση των Layers 2 & 3.

Τα W και L είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο layer 1 για τον αγωγό διέγερσης ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη είναι διαφορετικά σε σχέση με πριν.

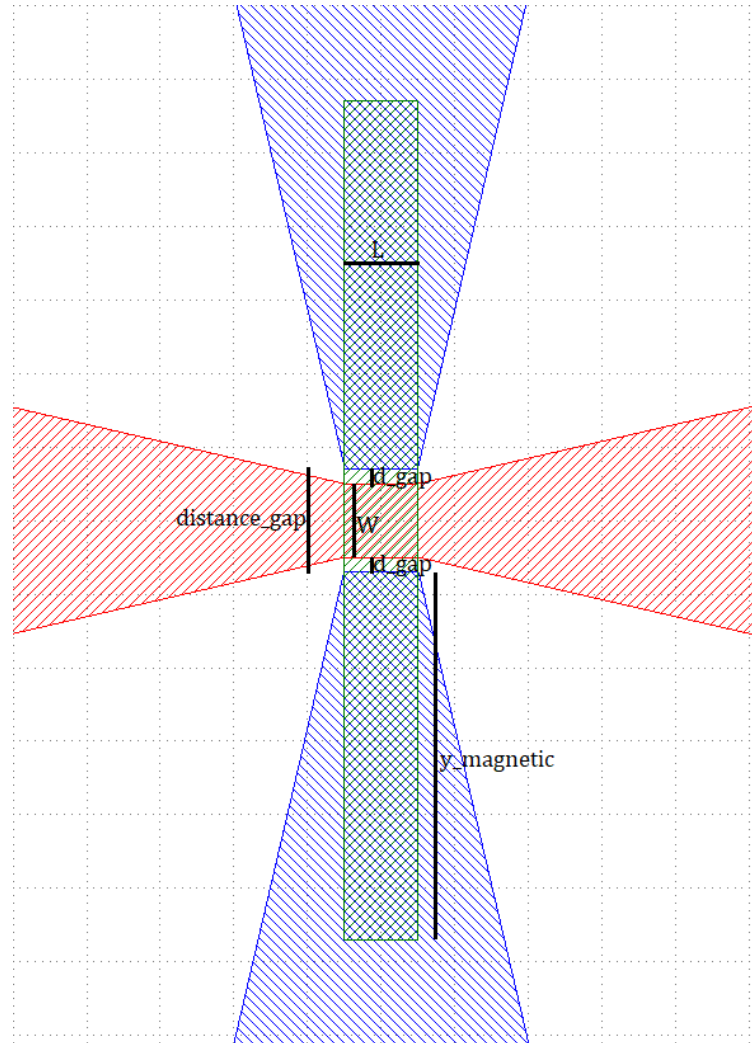
Αντίστοιχα με προηγούμενως έχουμε:

$$distance_{contactpads} = 2000\mu m \text{ και } d_{trap} = 500\mu m$$

$$2x_{trap} + L = d_{trap} \rightarrow x_{trap}(\mu m) = \frac{500 - L}{2}$$

$$2dx_{trap} + d_{trap} = l_{contactpad} \rightarrow dx_{trap} = 250\mu m$$

Ωστόσο, όπως έχει προαναφερθεί οι 2 αγωγοί λήψης πρέπει να πλησιάζουν πολύ κοντά στον αγωγό διέγερσης χωρίς όμως να τον τέμνουν, έτσι ώστε οι περισσότερες μαγνητικές γραμμές να “συγκρατηθούν” από το μαγνητικό υλικό. Για αυτό τον λόγο $distance_{gap} \neq W$ όπως φαίνεται καλύτερα παρακάτω όπου φαίνεται η σχετική θέση μαγνητικού υλικού, αγωγού διέγερσης και λήψης.



Εικόνα 30: Παραμετροποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος.

Το d_{gap} τέθηκε ίσο με 10μm (λόγω 3^{ου} περιορισμού) και άρα ισχύει:

$$W + 2d_{gap} = distance_{gap}$$

Στην συνέχεια έπρεπε να οριστεί η απόσταση $y_{magnetic}$ που δείχνει την έκταση του μαγνητικού υλικού πάνω στον αγωγό λήψης.

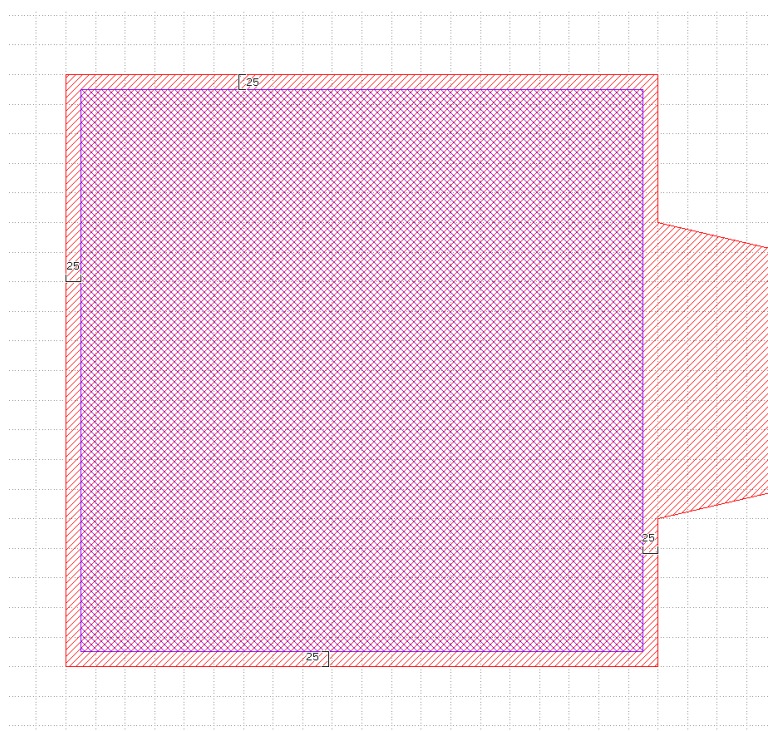
Καθώς είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της αντίστασης που δημιουργείται από την επαφή αγωγού – μαγνητικού υλικού (2^{ος} περιορισμός), είναι ευνοϊκότερη η αύξηση του $y_{magnetic}$ και άρα το εμβαδόν της επαφής.

Στοχεύοντας σε μία σταθερή τιμή της προαναφερθείσας αντίστασης επαφής για όλα τα devices, θέτουμε το εμβαδόν της περιοχής τομής μαγνητικού υλικού – αγωγού ίσο με $W_{Area} = 2500\mu m^2$. Έτσι:

$$y_{magnetic} \times L = W_{Area} \rightarrow y_{magnetic}(\mu m) = \frac{2500}{L(\mu m)} \mu m^2$$

3.3.3 Παραμετροποίηση Layer 4

Για την σχεδίαση του 4^{ου} layer που αποσκοπεί στην φανέρωση των επαφών των αγωγών σχεδιάστηκαν τετράγωνα τα οποία βρίσκονται πάνω από τις επαφές των αγωγών χωρίς να τις καλύπτουν πλήρως. Στόχος ήταν η φανέρωση αρκετού υλικού για την πραγματοποίηση επαφής με κόλληση καλωδίου.



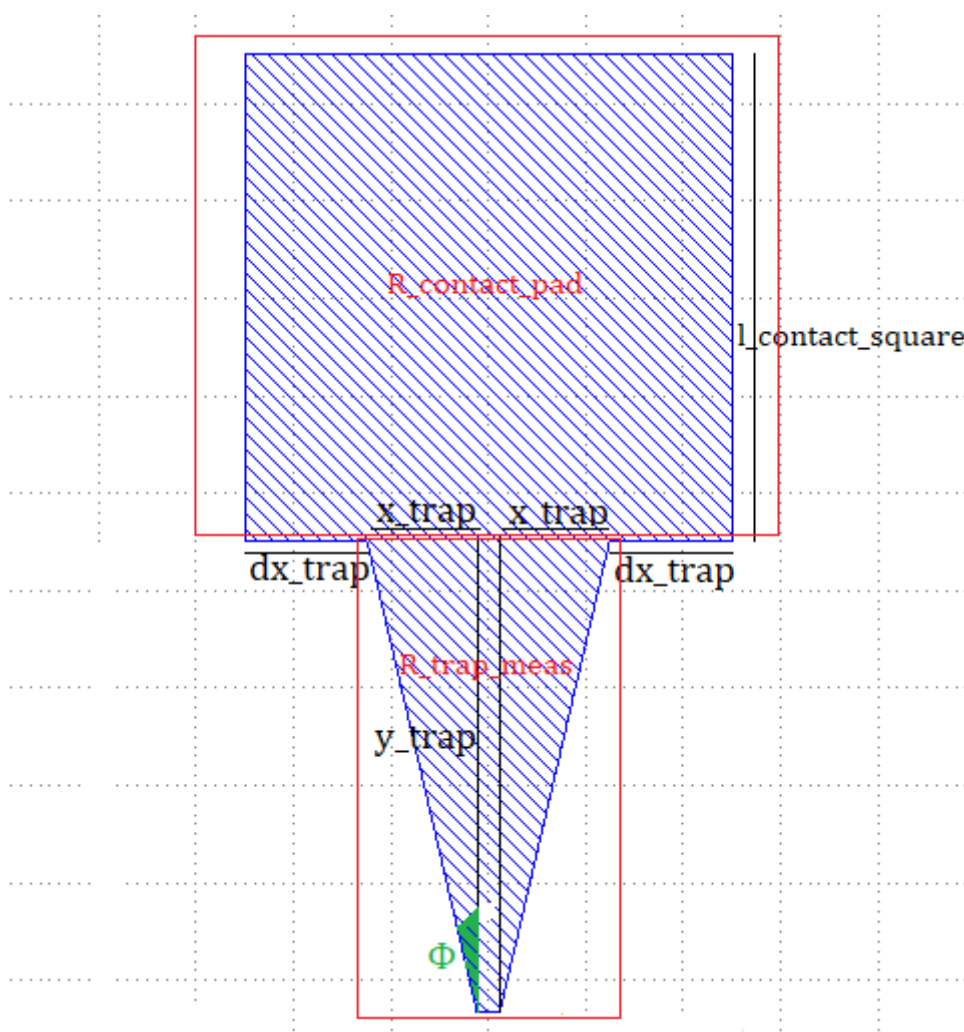
Εικόνα 31: Δημιουργία 4^{ου} layer.

Το 4^ο layer περιέχει τις αντίστοιχες δομές για όλα τα contact pads όλων των αισθητήρων.

3.3.4 Υπολογισμός Αντιστάσεων

Μετά από την γεωμετρική ανάλυση του προβλήματος ήταν αναγκαία η εύρεση της διάταξης, δηλαδή του συνδυασμού W , L , η οποία πετυχαίνει μεγαλύτερο λόγο μεταβολής αντίστασης λόγω διέγερσης μαγνητικού υλικού ως προς την συνολική αντίσταση σε κατάσταση ηρεμίας. Για τον σκοπό αυτό υπολογίστηκαν οι αντιστάσεις του επιπέδου στο οποίο θα γίνεται η μέτρηση τους, δηλαδή σε αυτό με τους 2 αγωγούς λήψης και το μαγνητικό υλικό.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση για έναν αγωγό λήψης σήματος.



Εικόνα 32: Χωρισμός αντίστασης αγωγού σε 2 τμήματα: $R_{\text{contactpad}}$ που αφορά το τμήμα επαφής και R_{trapmeas} που αφορά το τραπεζοειδές τμήμα.

Κάνοντας χρήση του τύπου: $dR = \rho \frac{dl}{ds}$, θα υπολογιστούν οι 2 προαναφερθείσες τιμές αντίστασης.

Για το τμήμα της επαφής του αγωγού η αντίσταση είναι ίση με:

$$R_{contactpad} = \rho \frac{l_{contactpad}}{l_{contactpad} \times thickness} = \frac{\rho}{thickness}$$

Όπου ρ : σχετική αντίσταση αγωγού και $thickness$: πάχος αγωγού. Τιμές για τα μεγέθη αυτά θα αναφερθούν παρακάτω.

Για το τραπεζοειδές τμήμα του αγωγού θα χρειαστεί παραπάνω ανάλυση καθώς το εμβαδόν της επιφάνειας κατά μήκος της οποίας διέρχεται ρεύμα εξαρτάται από την τεταγμένη y που δείχνει το ύψος της επιφάνειας ($y \in [0, y_{trap}]$). Συγκεκριμένα ισχύει ότι:

$$\tan\Phi = \frac{x_{trap}}{y_{trap}}$$

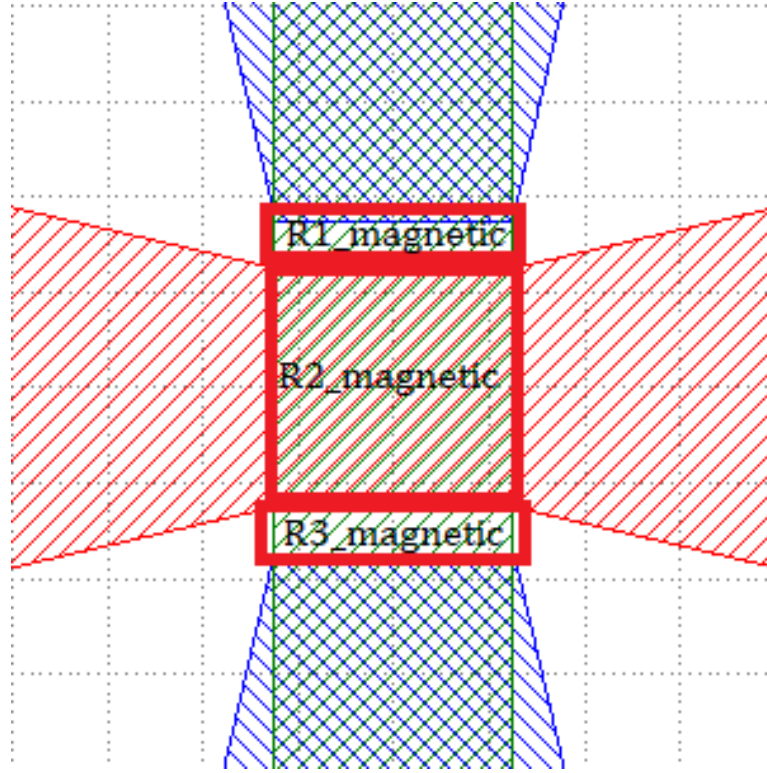
$$S(y) = thickness(2x + L) = thickness(2y\tan\Phi + L)$$

$$\text{Έτσι } dR = \rho \frac{dy}{ds} = \rho \frac{dy}{thickness \times (2y\tan\Phi + L)} \rightarrow$$

$$R_{trapmeas} = \int_0^{y_{trap}} \rho \frac{dy}{thickness \times (2y\tan\Phi + L)}.$$

Αντίστοιχη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τραπεζοειδών τμημάτων του αγωγού διέγερσης.

Στην συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση του μαγνητικού υλικού που ενώνει τα 2 τμήματα του αγωγού. Γίνεται χωρισμός της αντίστασης του μαγνητικού υλικού σε 3 τμήματα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 33: Διαχωρισμός της αντίστασης του μαγνητικού υλικού.

Έτσι προκύπτει:

$$R1_{magnetic} = R3_{magnetic} = \rho_{magnetic} \frac{d_{gap}}{thickness \times L},$$

$$R2_{magnetic} = \rho_{magnetic} \frac{W}{thickness \times L}$$

$$\text{Άρα } R_{magnetic} = R1_{magnetic} + R2_{magnetic} + R3_{magnetic}$$

Για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης αυτού του layer πρέπει να αναφερθούν τα εξής:

- Η αντίσταση $R_{contact}$ η οποία προκύπτει από την επαφή μαγνητικού υλικού και αγωγού λήψης, η οποία δεν μπορεί να υπολογιστεί αλλά όπως έχει προαναφερθεί, έχουν παρθεί μέτρα για την ελαχιστοποίηση της.
- Κατά την λήψη μετρήσεων αντίστασης θα μεσολαβούν καλώδια ανάμεσα στο device και στο όργανο μέτρησης τα οποία θα αυξάνουν την συνολική αντίσταση κατά μια σταθερή τιμή R_{cables} , η οποία σε αυτή την φάση αγνοείται.
- Θεωρείται ότι τα καλώδια θα κολληθούν στο κέντρο των contact pads και άρα θα συμπεριληφθεί στην συνολική αντίσταση το μισό της τιμής τους.

Βάσει των παραπάνω:

$$\begin{aligned}
 R_{meas} &= \frac{1}{2} R_{contactpad} + R_{trapmeas} + R1_{magnetic} + R2_{magnetic} + R3_{magnetic} \\
 &\quad + R_{trapmeas} + 2R_{contact} + \frac{1}{2} R_{contactpad} + R_{cables} \\
 &\cong R_{contactpad} + 2R_{trapmeas} + 2R1_{magnetic} + R2_{magnetic}
 \end{aligned}$$

Στην συνέχεια έπρεπε να υπολογιστεί η μεταβολή της αντίστασης λόγω μαγνητικού πεδίου. Θεωρώντας πως η μεταβολή της αντίστασης θα επηρέαζε μόνο το τμήμα του μαγνητικού υλικού που βρίσκεται πάνω από τον αγωγό διέγερσης, δηλαδή την αντίσταση $R2_{magnetic}$ και ότι η μέγιστη μεταβολή της θα είναι κατά 2% της τιμής της, έχουμε:

$$R'_{meas} = R_{contactpad} + 2R_{trapmeas} + 2R1_{magnetic} + 1,02 \times R2_{magnetic}$$

Έτσι η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης είναι:

$$\alpha = \frac{R'_{meas} - R_{meas}}{R_{meas}} \times 100\% = 2\% \frac{R2_{magnetic}}{R_{meas}}$$

Για την εκτέλεση των παραπάνω πράξεων πρέπει να δοθούν υποδειγματικές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη. Θα θεωρηθεί πως για αγωγούς θα χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο που βάσει βιβλιογραφίας η ειδική του αντίσταση ρ κυμαίνεται μεταξύ: $2,63-2,85 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \mu m$. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε $\rho = 2,63 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \mu m$ και πάχος εναποτιθέμενου αλουμινίου ίσο με 100nm (**thickness = 100nm**). Όσον αφορά το μαγνητικό υλικό, θεωρήθηκε ένα κράμα σιδήρου και νικελίου Fe_xNi_y σε αναλογία 20%-80%, το οποίο σύμφωνα με βιβλιογραφία θα έχει ειδική αντίσταση $\rho_{magnetic} = 4,5 \cdot 10^{-1} \Omega \cdot \mu m$. Τέλος το πάχος του μαγνητικού υλικού θεωρήθηκε και αυτό 100nm, με το ενδεχόμενο αυτό να αλλάξει κατά το process.

Δημιουργήθηκε script που έκανε τους παραπάνω υπολογισμούς και έκανε εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε ένα φύλλο excel. Δοκιμάστηκαν αρκετά ζεύγη τιμών W, L με σκοπό να φανερωθούν οι πιο αποτελεσματικές γεωμετρίες, δηλαδή αυτές που απέδιδαν μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή α .

Πίνακας 1: Πίνακας απαραίτητων μεγεθών για τον υπολογισμό της μετρούμενης αντίστασης R_{meas} . Με πράσινο υπογραμμίζονται οι γεωμετρίες που εν τέλει επιλέχθηκαν.

W (μm)	L (μm)	R_contact_pad (Ω)	R_trap_meas (Ω)	R1_magnetic (Ω)	R2_magnetic (Ω)	R3_magnetic (Ω)	R_magnetic (Ω)	R_meas (Ω)	R'_meas (Ω)	Resistance change %
50	50	0,263	1,311631447	0,9	4,5	0,9	6,3	9,18626289	9,27626289	0,979723757
20	20	0,263	1,733636602	2,25	4,5	2,25	9	12,7302732	12,8202732	0,706976186
10	10	0,263	2,070846173	4,5	4,5	4,5	13,5	17,9046923	17,9946923	0,502661527
50	100	0,263	1,034183822	0,45	2,25	0,45	3,15	5,48136764	5,52636764	0,820962995
20	100	0,263	1,042279966	0,45	0,9	0,45	1,8	4,14755993	4,16555993	0,433990112
10	100	0,263	1,04495702	0,45	0,45	0,45	1,35	3,70291404	3,71191404	0,243051821
100	50	0,263	1,290678957	0,9	9	0,9	10,8	13,6443579	13,8243579	1,319226607
100	20	0,263	1,683505698	2,25	22,5	2,25	27	30,6300114	31,0800114	1,469147348
100	10	0,263	1,999372811	4,5	45	4,5	54	58,2617456	59,1617456	1,544752891
200	50	0,263	1,24780959	0,9	18	0,9	19,8	22,5586192	22,9186192	1,595842357
200	20	0,263	1,619623332	2,25	45	2,25	49,5	53,0022467	53,9022467	1,698041228
200	10	0,263	1,918649931	4,5	90	4,5	99	103,1003	104,9003	1,745872711
500	50	0,263	1,110658717	0,9	45	0,9	46,8	49,2843174	50,1843174	1,826138713
500	20	0,263	1,41901424	2,25	112,5	2,25	117	120,101028	122,351028	1,873422758
500	10	0,263	1,667382805	4,5	225	4,5	234	237,597766	242,097766	1,893957205
50	10	0,263	2,039214166	4,5	22,5	4,5	31,5	35,8414283	36,2914283	1,25553032

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνονται ορισμένες υποθέσεις που προϋπήρχαν. Έχοντας θεωρήσει ότι το τμήμα του μαγνητικού υλικού που επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο είναι αυτό με αντίσταση $R2_{magnetic}$, συμφέρει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έτσι ώστε να αποτελεί και μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής μετρούμενης αντίστασης. **Η προαναφερθείσα αντίσταση μεγαλώνει όταν το μαγνητικό υλικό γίνεται όλο και πιο "στενόμακρο" δηλαδή όταν μειώνεται το L και άρα στενεύει και μεγαλώνει το W και άρα μακραίνει.** Αυτό επιβεβαιώνεται αφού για συγκεκριμένη τιμή W όταν το L μικραίνει, παρατηρείται αύξηση του ποσοστού μεταβολής (πχ βλέπε για W=100μm).

Αποφασίστηκε να υλοποιηθεί μια εξάδα devices. Μέσα σε αυτήν συμπεριλήφθηκαν οι υλοποιήσεις που πετύχαιναν υψηλότερη ποσοστιαία μεταβολή για δεδομένο W ξεκινώντας από τα 500μm μέχρι τα 10μm. Το L σύμφωνα με τα παραπάνω συνέφερε να είναι το μικρότερο δυνατό που για λόγους που έχουν αναφερθεί (κατασκευαστικές δυσκολίες) θα είναι τα 10μm.

Σημειώσεις:

- Η υλοποίηση W=L=10μm δεν φαίνεται να αποδίδει ευδιάκριτα αποτελέσματα αλλά αποφασίστηκε να συμπεριληφθεί στην διαδικασία κατασκευής, καθώς αυτή ήταν η αρχική ιδέα και θεωρητικά θα αποδίδει την μεγαλύτερη χωρική ευαισθησία για την υπό μελέτη περιοχή φερρομαγνητικού υλικού.
- Για W=100μm, χρησιμοποιήθηκε L=10μm και L=20μm, παρόλο που για τα 10μm το ποσοστό μεταβολής είναι μεγαλύτερο. Αυτό αποφασίστηκε για την

περίπτωση που δεν είχε ληφθεί υπόψιν κάποιο πιθανό μελλοντικό πρόβλημα που θα σχετίζεται με τις μικρές δομές.

3.4 Τα 6 devices

Οι 6 υλοποιήσεις που επιλέχθηκαν ή αλλιώς τα 6 devices είναι για τους εξής συνδυασμούς των W , L που διαμορφώνουν τις διαστάσεις του μαγνητικού υλικού.

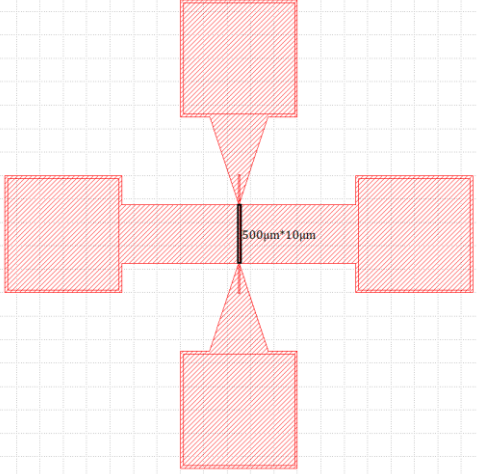
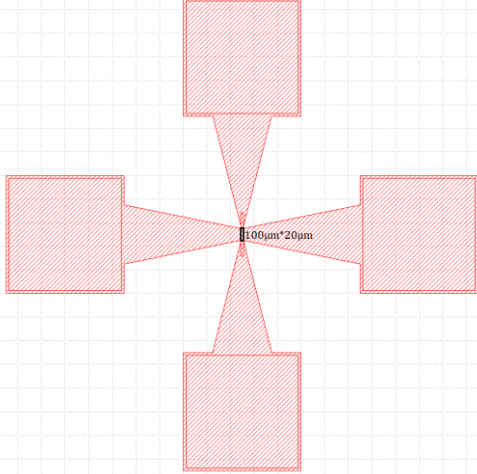
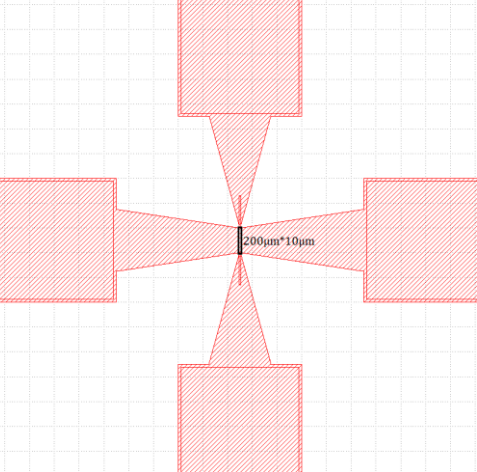
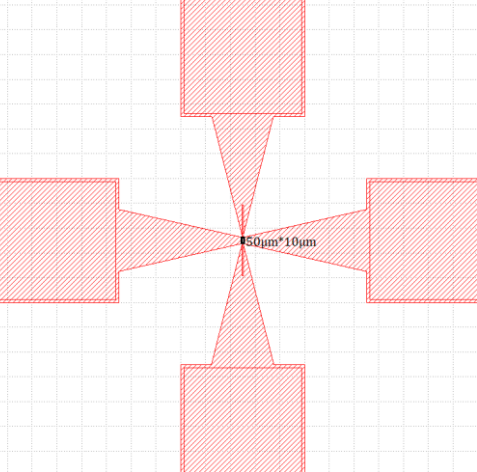
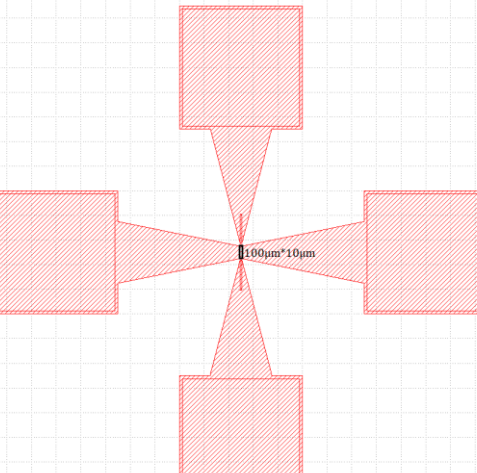
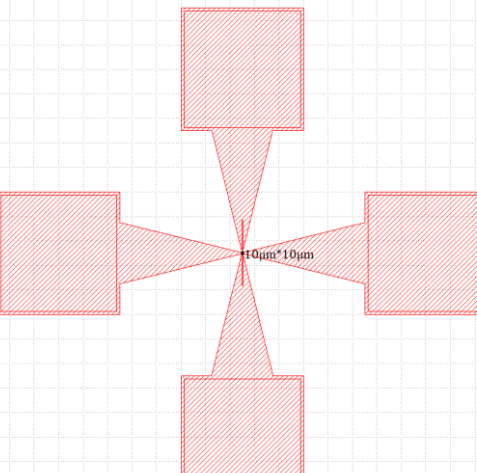
Πίνακας 2: Πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής μετρούμενης αντίστασης συναρτήσει των μεγεθών W , L του μαγνητικού υλικού

W (μm)	L (μm)	R_{meas} (Ω)	R'_{meas} (Ω)	Resistance change %
500	10	237,5977656	242,0977656	1,893957205
200	10	103,1002999	104,9002999	1,745872711
100	10	58,26174562	59,16174562	1,544752891
100	20	30,6300114	31,0800114	1,469147348
50	10	35,84142833	36,29142833	1,25553032
10	10	17,90469235	17,99469235	0,502661527

Όπως έχει αναφερθεί, όλα τα devices έχουν διαστάσεις $4mm \times 4mm$ και αυτό που αλλάζει την γεωμετρία είναι **η περιοχή τομής του μαγνητικού υλικού με τον αγωγό διέγερσης**. Αυτή είναι η **περιοχή ενδιαφέροντος** και βάσει αυτής θα γίνεται η διάκριση των devices.

Υπενθυμίζεται ότι τα 4 layers βρίσκονται όλα σε μία φωτομάσκα και άρα στο ίδιο σχεδιαστικό layer του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε (KLayout). Όλες οι συντεταγμένες των πολύγωνων προέκυψαν από παραμετροποιημένο script γλώσσας Python σύμφωνα με τα παραπάνω.

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός Πίνακας με τα 6 devices.

<i>Device 1: περιοχή ενδιαφέροντος 500μm $\times$ 10μm</i> 	<i>Device 4: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm $\times$ 20μm</i> 
<i>Device 2: περιοχή ενδιαφέροντος 200μm $\times$ 10μm</i> 	<i>Device 5: περιοχή ενδιαφέροντος 50μm $\times$ 10μm</i> 
<i>Device 3: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm $\times$ 10μm</i> 	<i>Device 6: περιοχή ενδιαφέροντος 10μm $\times$ 10μm</i> 

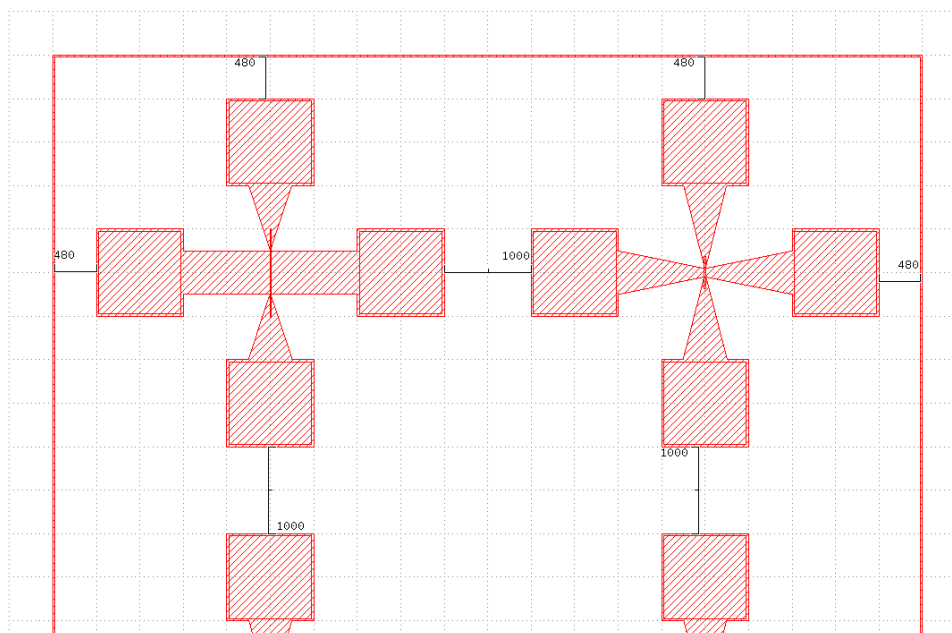
3.5 Σχεδιασμός Φωτομάσκας

Στην συνέχεια έπρεπε, βάσει του εξοπλισμού που ήταν διαθέσιμος να γινόταν η διαμόρφωση της μάσκας. Τα δισκία πάνω στα οποία θα εμφανίζαμε τις παραπάνω δομές ήταν 3 inches άρα η φωτομάσκα δεν είχε νόημα να ήταν μεγαλύτερη από $4\text{inches} \times 4\text{inches} \equiv 10,16\text{cm} \times 10,16\text{cm}$.

Τα παραπάνω 6 devices σχημάτισαν ένα dye, δηλαδή μία επαναλαμβανόμενη δομή από devices. Για την διευκόλυνση μας κατά την διαδικασία κατασκευής, έγινε οριοθέτηση του dye, έτσι ώστε να είναι εύκολα διακριτό με το ανθρώπινο μάτι. Το πάχος του συνόρου τέθηκε ίσο με $20\mu\text{m}$ και ολόκληρο το dye διαμορφώθηκε σε διαστάσεις $15000\mu\text{m} \times 10000\mu\text{m}$.

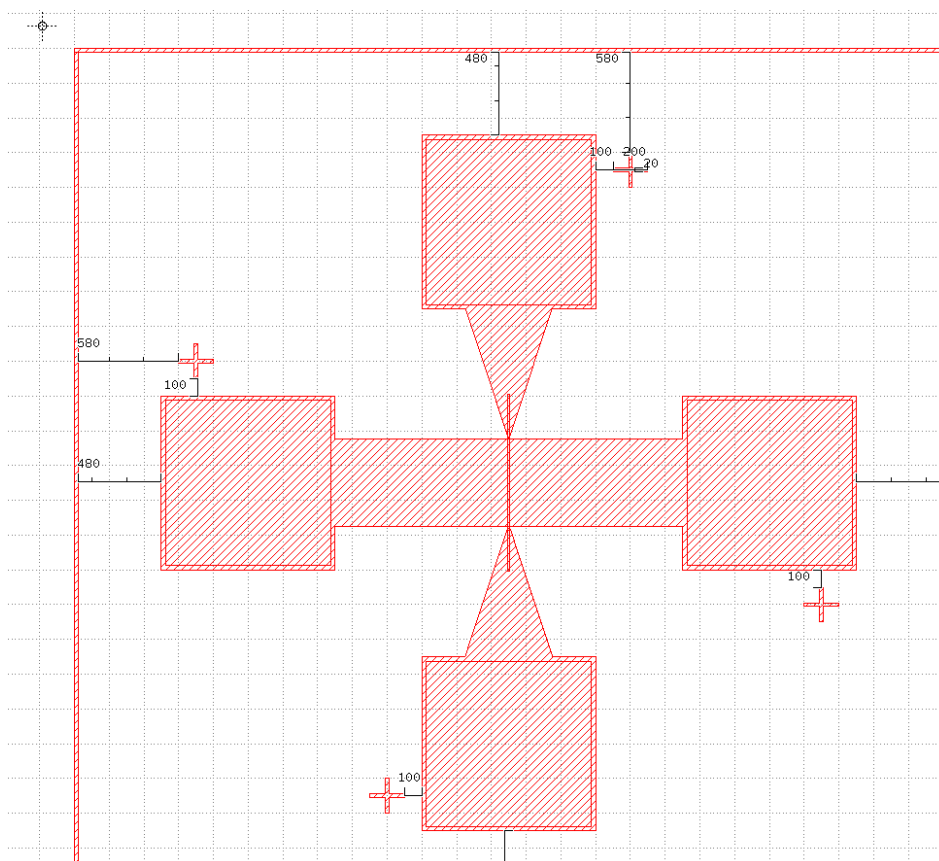
Οι παραπάνω διαστάσεις προέκυψαν ως εξής:

- Η απόσταση μεταξύ 2 γειτονικών devices τέθηκε ίση με $1000\mu\text{m}=1\text{mm}$, έτσι ώστε να είναι εύκολα διακριτά με το μάτι και να μπορέσουν στο τέλος του process να κοπούν με dicing saw.
- Η απόσταση κάθε device από την κοντινότερη εξωτερική πλευρά του border τέθηκε ίση με $500\mu\text{m}$, έτσι ώστε να συνεχίσει να ισχύει το παραπάνω.



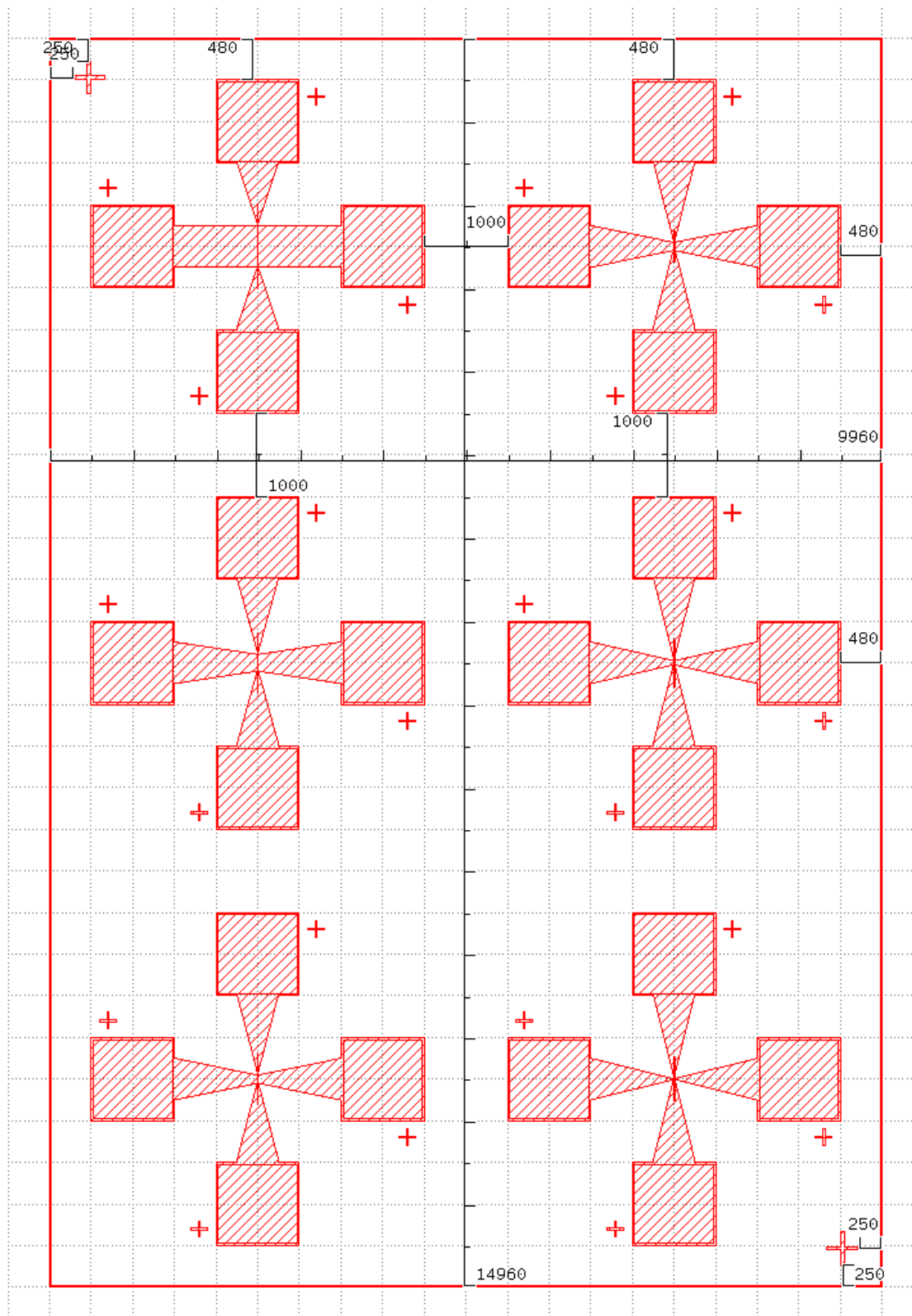
Εικόνα 34: Αποστάσεις μεταξύ των devices και του πλαισίου του dye.

Κάθε device ήταν αναγκαίο να συνοδεύεται από σταυρούς ευθυγράμμισης (alignment marks), οι οποίοι εξασφαλίζουν την σωστή σχετική θέση του εκάστοτε layer λιθογραφίας σε σχέση με τα layers που ήδη έχουν σχηματιστεί πάνω στο δείγμα μας. Αυτοί τοποθετήθηκαν σε 4 άκρες του κάθε device σε απόσταση 100 μ m από αυτό και άλλα 100 μ m από το νοητό περίγραμμα του, των 4mm $\times$ 4mm. Το κάθε ορθογώνιο παραλληλόγραμμο του σταυρού είχε διαστάσεις 200 μ m $\times$ 200 μ m.



Εικόνα 35: Σχετική θέση των 4 σταυρών ευθυγράμμισης κάθε device.

Τέλος τοποθετήθηκαν 2 μεγαλύτεροι σταυροί σε κάθε dye σε απόσταση 250 μ m από το περιθώριο, ένας πάνω αριστερά και ένας κάτω δεξιά για αρχική ευθυγράμμιση χαμηλότερης ακρίβειας.



Εικόνα 36: Συνολική εικόνα ενός $15\text{mm} \times 10\text{mm}$ με πάχος πλέγματος $20\mu\text{m}$. (Οι μετρήσεις αφορούν την εσωτερική πλευρά του πλέγματος).

Αναγκαίο ήταν να μελετηθεί πόσα dyes χωρούσαν στην 4 ιντσών φωτομάσκα και πόσα από αυτά θα μπορούσαν να αποτυπωθούν στα δισκίδια των 3 ιντσών. Η εταιρεία στην οποία έγινε υποβολή της παραγγελίας είχε ως περιορισμό όλες οι δομές να απέχουν τουλάχιστον κατά 6mm = 6000μm από τα περιθώρια της μάσκας. Αυτό άφηνε τον εξής διαθέσιμο χώρο ανά τεταρτημόριο:

$$x_{available} = 5,08cm - 6mm = 4,48cm = 44800\mu m,$$

$$y_{available} = x_{available} = 44800\mu m.$$

$$N_x = \frac{x_{available}}{x_{dye}} = \frac{44800}{10000} = 4,48 \text{ άρα } \mathbf{4 \text{ dyes στον άξονα } x \text{ της μάσκας.}}$$

$$N_y = \frac{y_{available}}{y_{dye}} = \frac{44800}{15000} = 2,98 \text{ άρα } \mathbf{2 \text{ dyes στον άξονα } y \text{ της μάσκας.}}$$

Στην συνέχεια αποφασίστηκε η σχεδιαστική τεχνική της περιστροφής του κάθε layer από το προηγούμενο του κατά 90° αντιωρολογιακά. Το άλλο ενδεχόμενο που εξετάστηκε ήταν η απλή μετατόπιση του κάθε layer σε κάθε ένα τεταρτημόριο της μάσκας, η by translation υλοποίηση. Ωστόσο επειδή εξεταζόταν το ενδεχόμενο χρήσης του ¼ των δισκιδίων για την κατασκευή των devices, με την by translation υλοποίηση ορισμένες δομές παρέμεναν μη αξιοποιήσιμες (έμεναν εκτός δισκιδίου) κατά την ευθυγράμμιση δείγματος-φωτομάσκας. Έτσι αποφασίστηκε η by **Rotation** υλοποίηση των layers. Για την λιθογραφία του εκάστοτε layer, η μάσκα θα πρέπει να περιστραφεί κατά την ωρολογιακή φορά 90° σε σχέση με το προηγούμενο layer, κρατώντας σε σταθερή θέση το δείγμα.

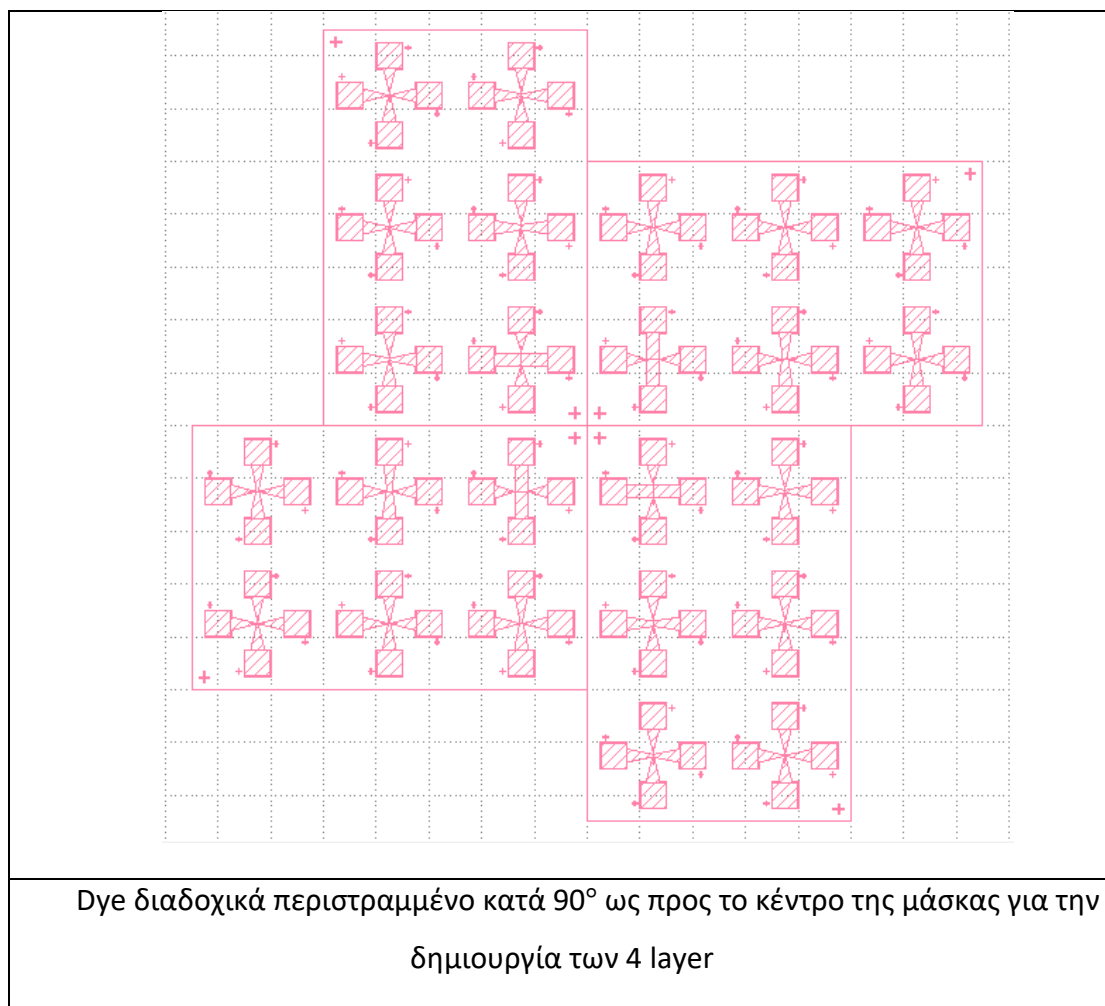
Τα βήματα που ακολουθήθηκαν μετά την κατασκευή του dye είναι τα παρακάτω:

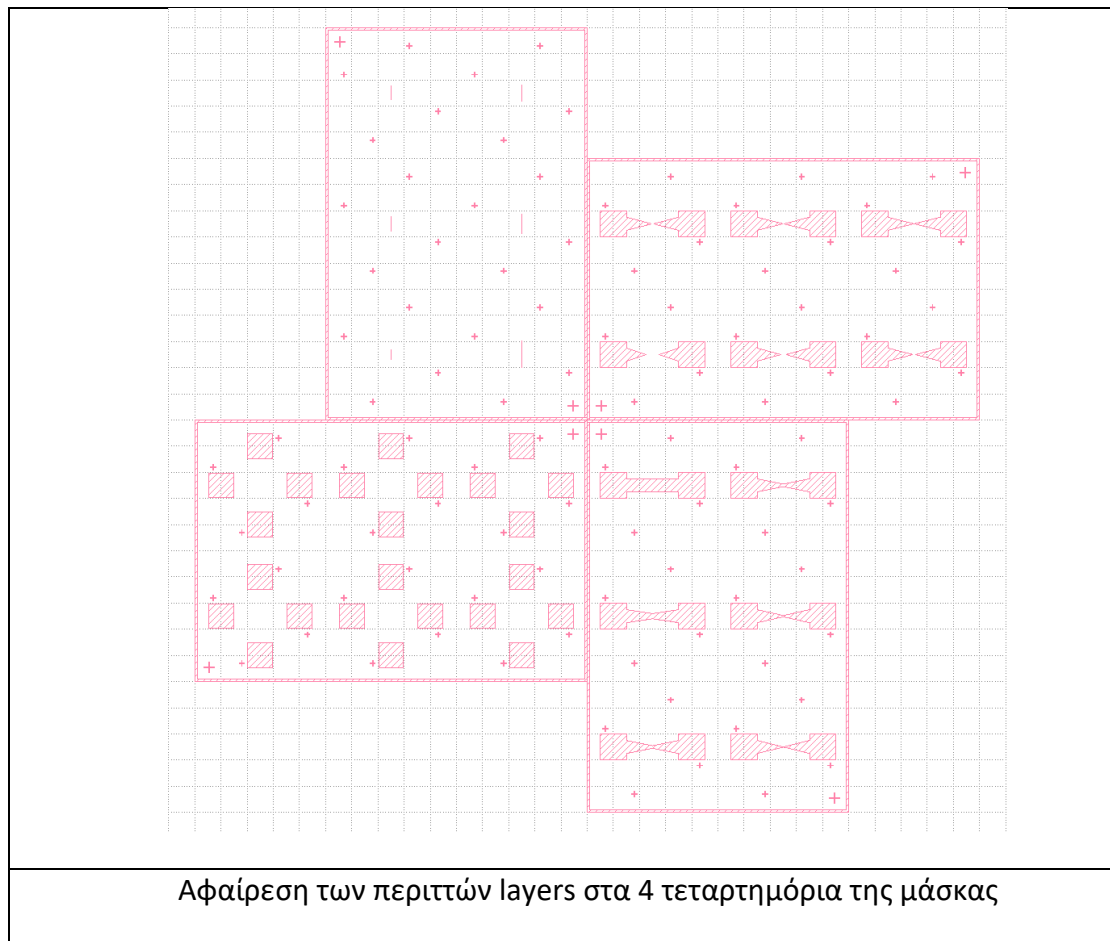
- Γέμισμα της κάτω δεξιάς άκρης της μάσκας με αντίγραφα του ενός dye σύμφωνα με τα N_x, N_y δηλαδή με 2 σειρές των 4 dye η κάθε μία. Αυτό το μέρος της μάσκας αποφασίστηκε να περιέχει το 1° layer, δηλαδή τους αγωγούς διέγερσης.
- Αντιγραφή, περιστροφή κατά 90° αριστερόστροφα γύρω από το κέντρο της μάσκας και επικόλληση των 8 αυτών dyes που δημιουργήθηκαν στο 1° layer. Έτσι πάνω δεξιά θα φανερωθεί το 2° layer, τους αγωγούς λήψης.

- Επανάληψη του παραπάνω βήματος άλλες 2 φορές. Πάνω αριστερά θα δημιουργηθεί το 3^ο layer με τα μαγνητικά υλικά και κάτω αριστερά το 4^ο layer με τα contact pads.
- Σε κάθε ¼ της μάσκας διαγράφουμε τα περιττά layers, δηλαδή αυτά που δεν ανήκουν εκεί σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαρρύθμιση της μάσκας (π.χ Στο κάτω δεξί τμήμα της μάσκας διαγράφουμε όλα τα layers εκτός του 1^{ου}).

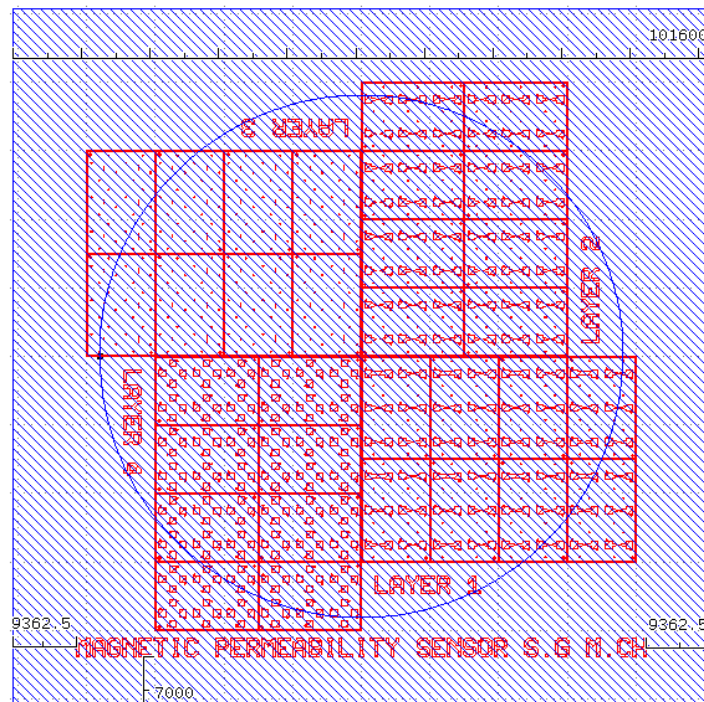
Παρακάτω παρατίθεται βοηθητικό φωτογραφικό υλικό για την οπτικοποίηση της διαδικασίας. Προσοχή: Αφορά την κατασκευή 6 devices ενός dye.

Πίνακας 4: Οπτικοποίηση των βημάτων της by Rotation υλοποίησης φωτομάσκας.





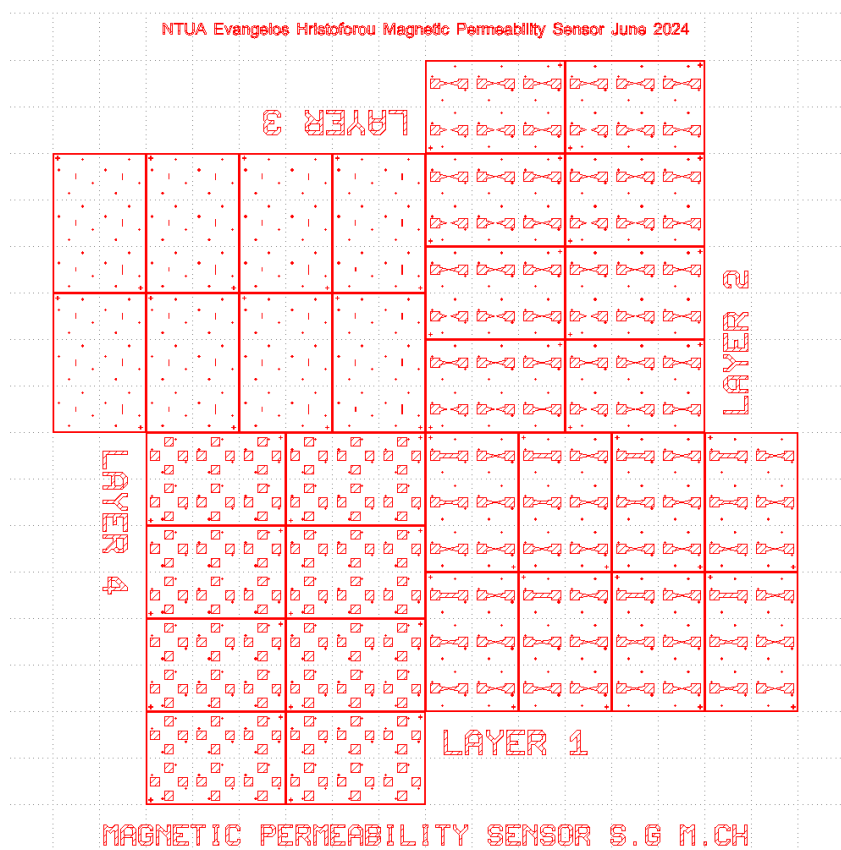
Μετά την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων προστέθηκαν κάποια διακριτικά (identifiers) για το κάθε layer καθώς και τίτλος για το συνολικό project (προφανώς εκτός του αξιοποιήσιμου χώρου). Παρακάτω φαίνεται η σχετική θέση δομών-περιθωρίου μάσκας και 3 inch wafer. Διαπιστώνεται ότι στο δείγμα αποτυπώνονται πέντε ολόκληρα dies σε μία επανάληψη του process.



Εικόνα 37: Σχετική θέση δομών-περιθωρίου φωτομάσκας-wafer. Τα μπλε μοτίβα είναι βοηθητικά και δείχνουν την μάσκα και το 3" wafer.

Για την υποβολή της παραγγελίας στην Delta Mask έπρεπε να καθοριστούν ορισμένες παράμετροι. Συγκεκριμένα αποφασίστηκαν τα εξής για την φωτομάσκα:

- Να είναι Bright Field (BF) δηλαδή τα πολύγωνα του υποβληθέντος αρχείου να είναι γεμισμένα με χρώμιο και ο υπόλοιπος χώρος να είναι διαφανής. Έτσι κατά την λιθογραφία δεν θα περάσει UV ακτινοβολία στον χώρο κάτω από τις δομές χρωμίου.
- Να είναι Chrome Up Wrong Reading δηλαδή κοιτώντας την μάσκα από την μεριά του χρωμίου τα μοτίβα να είναι καθρεπτισμένα σε σχέση με το σχεδιαστικό αρχείο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα κατά το αναποδογύρισμα της μάσκας, δηλαδή κοιτώντας την από την γυάλινη μεριά (CD) στην θέση που θα είναι κατά την τοποθέτηση της πάνω από το wafer, οι δομές να εμφανίζονται όπως και στο design file μέσα από το μικροσκόπιο. Έτσι οι δομές αποτυπώνονται στο δείγμα όπως ακριβώς και στο αρχείο κάτι που ήταν προσωπική προτίμηση. Άλλο ένα πλεονέκτημα ήταν η μη αναγκαιότητα καθρεπτισμού των γραμμών.
- Το υλικό της να είναι quartz και όχι γυαλί για λόγους αντοχής.



Εικόνα 38: Τελικό αρχείο υποβολής με τίτλο 4"/BF/CU/WR και κέντρο μάσκας το (0,0).



Εικόνα 39: Φωτομάσκα φωτογραφισμένη Chrome Down.

4 Κατασκευή

4.1 Βήματα Process

Έχοντας ελέγξει τις δομές της μάσκας, αποφασίστηκε το process να επαναληφθεί σε 2 δείγματα, σε ένα wafer πυριτίου με επίστρωση διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 και σε ένα quartz των 3 ιντσών. Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στα 2 διαφορετικά δείγματα ήταν σχεδόν ίδιες εκτός από ορισμένα σημεία που θα επισημανθούν. Παρατίθενται ονομαστικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την κατασκευή των devices στον κενό χώρο του Δημόκριτου.

1. Καθαρισμός δειγμάτων με ακετόνη, προπανάλη και piranha.
2. Αρνητική Λιθογραφία του 1^{ου} layer.
3. Εναπόθεση Αλουμινίου πάχους 100nm.
4. Liftoff με ακετόνη και προπανάλη (Σχηματισμός 1^{ου} layer).
5. Εναπόθεση διηλεκτρικού υλικού SiO_2 πάχους 100nm.
6. Αρνητική Λιθογραφία του 2^{ου} layer.
7. Εναπόθεση Αλουμινίου πάχους 100nm.
8. Liftoff με ακετόνη και προπανάλη (Σχηματισμός 2^{ου} layer).
9. Αρνητική Λιθογραφία του 3^{ου} layer.
10. Εναπόθεση του μαγνητικού υλικού πάχους 100nm.
11. Liftoff με ακετόνη και προπανάλη (Σχηματισμός 3^{ου} layer).
12. Αρνητική Λιθογραφία του 4^{ου} layer.
13. Εγχάραξη με SF6.

Στο επόμενο τμήμα που περιέχει την εκτέλεση των προαναφερθέντων βημάτων θα παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από ορισμένα devices που θα επισημαίνονται. Οι διαστάσεις που έχουν σημειωθεί είναι ενδεικτικές και μια συνολικότερη αποτίμηση του αποτελέσματος γίνεται μετά το 8^ο βήμα.

4.2 Βήμα 1^ο: Καθαρισμός δειγμάτων

Στην αρχή του process και τα 2 δείγματα υποβάλλονται σε διαλύματα ακετόνης και ισοπροπανόλης για τον καθαρισμό τους και σε ένα διάλυμα ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4$) αναλογίας 1:1, γνωστό και ως piranha, το οποίο απομακρύνει οργανικά υπολείμματα.

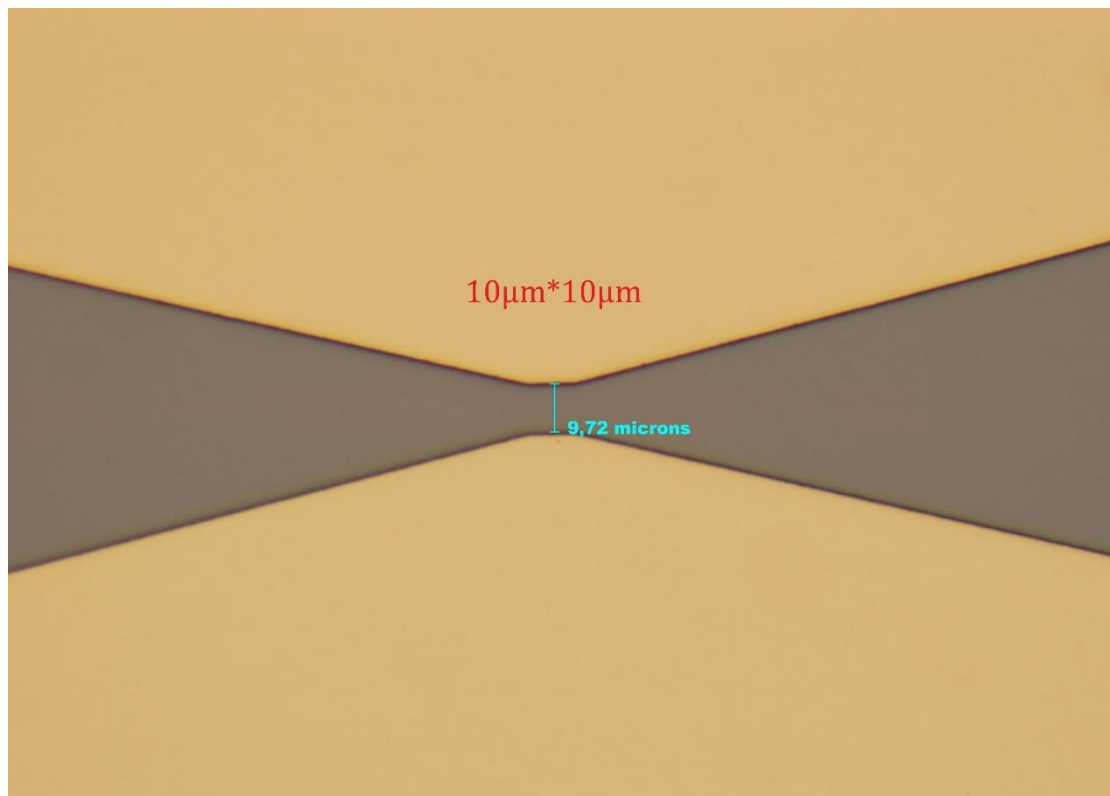
4.3 Βήμα 2^ο: Αρνητική Λιθογραφία (1^ο Layer)

Η 1^η λιθογραφία αφορά τον αγωγό διέγερσης του κάθε device που βρίσκεται στο layer 1 της μάσκας. Η διαδικασία έχει ως αρχή τον καθαρισμό των δισκιδίων με τον λεγόμενο promoter HMDS, μία χημική ουσία η οποία απομακρύνει τα εναπομείναντα μόρια OH και αυξάνει την υδροφοβικότητα των wafers. Για την εξάπλωση της, τα δείγματα τοποθετούνται στον spin coater για 30 sec στις 3000RPM. Στην συνέχεια τοποθετείται η photoresist ρητίνη (AZ5214E) στα δείγματα και τοποθετούνται πάνω στον spin coater για 30 sec στις 3000 RPM, ο οποίος μέσω της περιστροφικής του κίνησης εξαπλώνει την ρητίνη σε ολόκληρη την επιφάνεια των δειγμάτων. Στο τέλος των παραπάνω διαδικασιών επιτυγχάνεται πάχος ρητίνης 1,4μm. Τα δείγματα ψήνονται σε φούρνο στους 110°C.

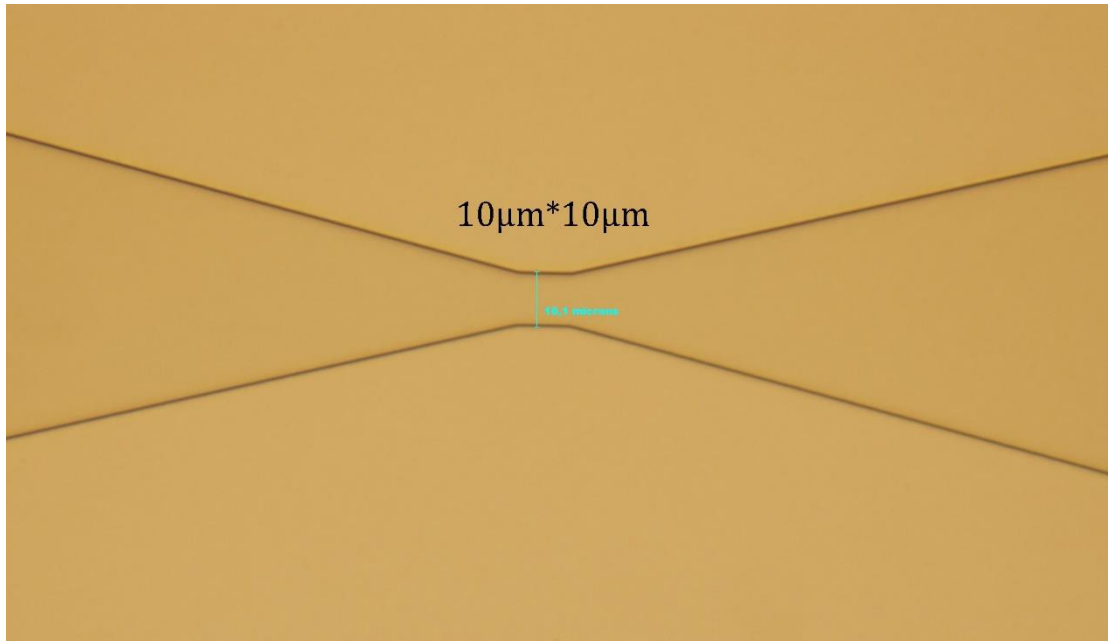
Στην συνέχεια τοποθετούμε την μάσκα στο μηχάνημα λιθογραφίας MA6 και το δείγμα στην βάση του. Το τεταρτημόριο στο οποίο θα δημιουργούσαν τα devices μας να είναι το κάτω δεξιά, δηλαδή στο ίδιο του layer 1 της μάσκας. Εφόσον βρισκόμαστε στην 1^η λιθογραφία οι σταυροί ευθυγράμμισης δεν μας είναι χρήσιμοι ακόμα, απλά προσέχουμε το layer 1 να πιάνει τον μεγαλύτερο δυνατό χώρο στο δείγμα και συγχρόνως να επιτυγχάνεται επαρκές κενό μεταξύ μάσκας και δείγματος έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διέλευση UV ακτινοβολίας σε ανεπιθύμητα σημεία. Χρησιμοποιήθηκε μήκος κύματος φωτός $\lambda = 320\text{nm}$ για 50 sec.

Μετά την έκθεση τους στην UV ακτινοβολία, τα δείγματα μεταφέρθηκαν με προσοχή χωρίς να έρθουν σε επαφή με συμβατικό φωτισμό μέχρι το hot plate στο οποίο ψήθηκαν για 90 sec και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε flat UV exposure για άλλο 1,5 λεπτό στο μηχάνημα MGB3 μήκους κύματος 365nm. Με την παραπάνω διαδικασία, στις περιοχές που ήρθαν σε επαφή με τον UV φωτισμό, η ρητίνη πολυμερίζεται, σκληραίνει και γίνεται πιο δύσκολο να διαλυθεί. Αντιθέτως, στις

περιοχές που δεν ήρθαν σε επαφή, δηλαδή όλα τα σημεία στα οποία υπήρχε χρώμιο στην μάσκα, βρίσκεται ρητίνη η οποία διαλύεται στην ουσία του developer. Στο διάλυμα του developer AZ726MIF έμειναν τα δείγματα για 60 sec. Έτσι, στα 2 δείγματα μετά την απομάκρυνση της ανεπιθύμητης ρητίνης, δημιουργούνται όλες οι δομές του 1^{ου} layer της μάσκας. Εμφανίζεται έτσι το υπόστρωμα πυριτίου και quartz εκεί που θέλουμε να εναποτεθεί αλουμίνιο. Τέλος γίνεται καθαρισμός με απιονισμένο νερό και στέγνωμα με άζωτο.



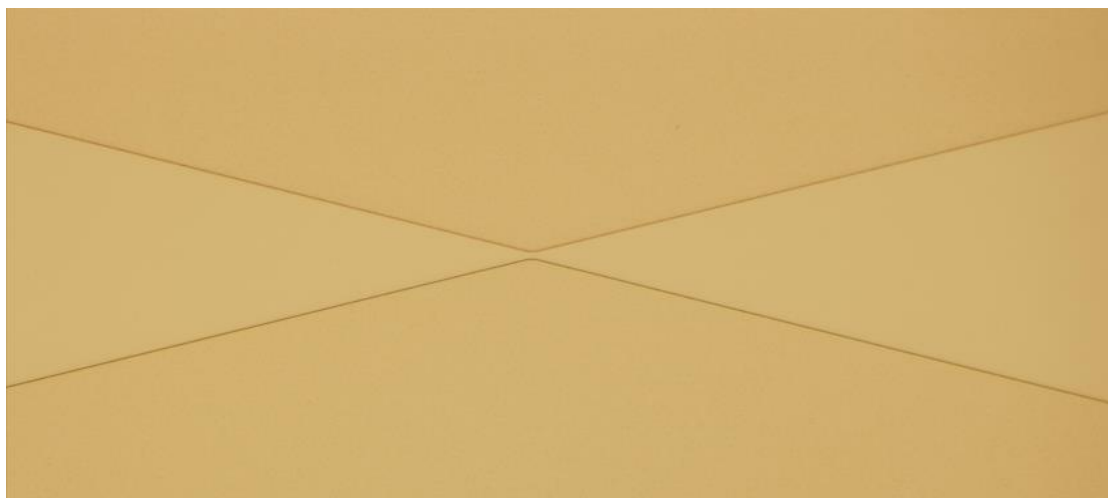
Εικόνα 40: Δείγμα πυριτίου μετά την 1^η λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50). (Στην σκοτεινή περιοχή έχουμε απουσία ρητίνης και φανέρωση του wafer).



Εικόνα 41: Δείγμα quartz μετά την λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).

4.4 Βήμα 3^ο: Εξάχνωση Αλουμινίου

Στο παρόν βήμα είχε αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο πάχους 100nm στο μηχάνημα Denton vacuum minigun. Μετά την δημιουργία του απαραίτητου κενού της τάξης των 10^{-6} Torr έγινε η εναπόθεση αλουμινίου στα 2 δείγματα. Τα δείγματα όντας καλυμμένα με αλουμίνιο σε όλη τους την επιφάνεια φαίνονται όπως παρακάτω:

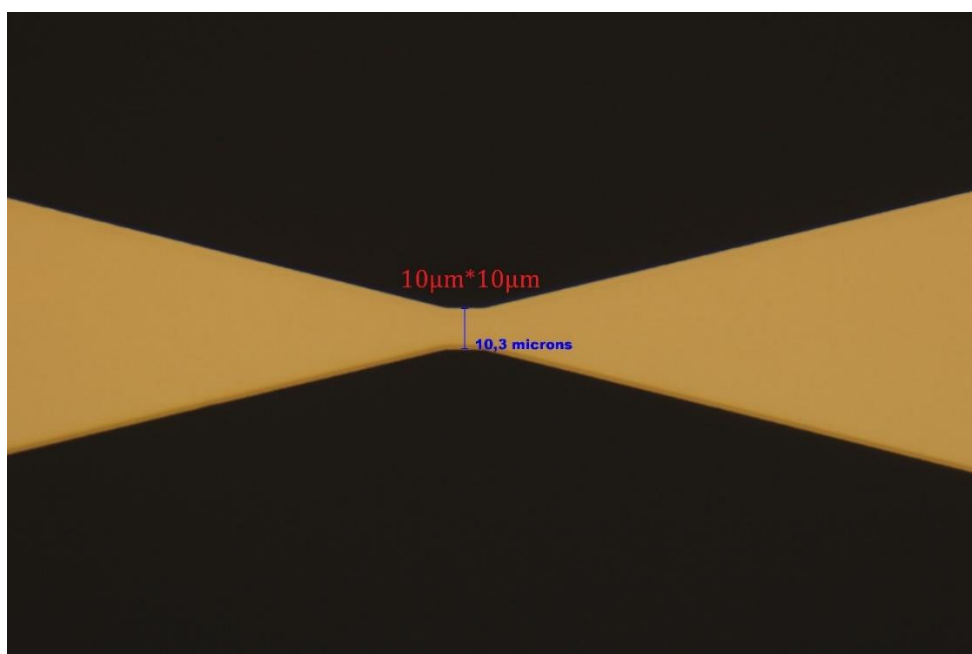


Εικόνα 42: Δείγμα πυριτίου μετά την εναπόθεση αλουμινίου, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).

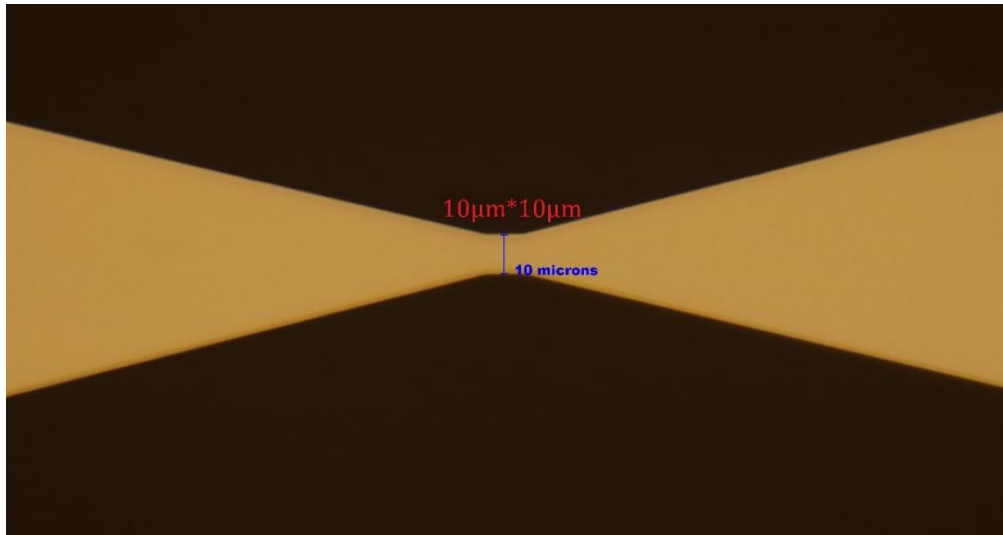
4.5 Βήμα 4^ο: Lift-off Αλουμινίου

Στόχος είναι η απομάκρυνση της ρητίνης που βρίσκεται στα σημεία εκτός των δομών μας, τα οποία πλέον έχουν καλυφθεί με αλουμίνιο. Αρχικά τα δείγματα τοποθετούνται σε δοχεία με ακετόνη, που διαλύει το photoresist που βρίσκεται κάτω από το αλουμίνιο. Εδώ υπάρχει μια διαφοροποίηση της διαδικασίας στα 2 δείγματα.

Το δείγμα υποστρώματος Si, αφού έχει καθίσει σε ακετόνη για 5 λεπτά, υποβάλλεται σε υπέρηχους για περίπου 5 λεπτά, με σκοπό την απομάκρυνση του αλουμινίου. Στο δείγμα υποστρώματος quartz δεν χρησιμοποιούμε υπέρηχους και αντί αυτού, το αφήνουμε περισσότερη ώρα στην ακετόνη. Μετά από 15 λεπτά “μουλιάσματος” και όσο βρίσκεται μέσα στο δοχείο, χρησιμοποιούμε τον υδροβολέα στοχοποιώντας τις περιοχές που έχει παραμείνει αλουμίνιο μέχρι αυτό να εξαφανιστεί. Τέλος τα 2 δείγματα τοποθετούνται σε δοχεία ισοπροπανόλης για την απομάκρυνση εναπομεινάντων υπολειμμάτων αλουμινίου και για την απομάκρυνση της ακετόνης. Τα στεγνώνουμε με άζωτο και τα αποτελέσματα του μικροσκοπίου είναι τα παρακάτω:



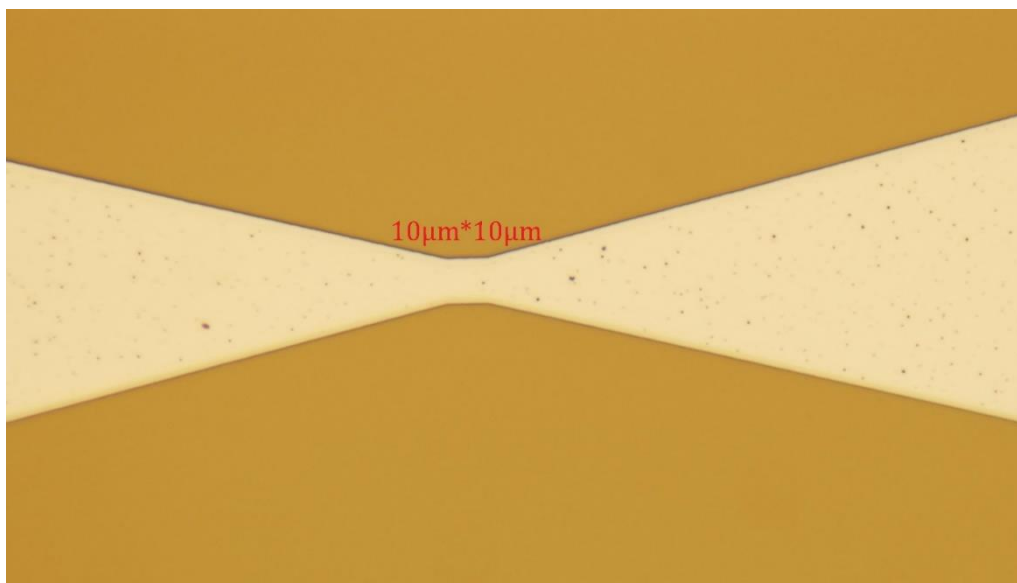
Εικόνα 43: Δείγμα πυριτίου μετά το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (φακός $\times 50$).



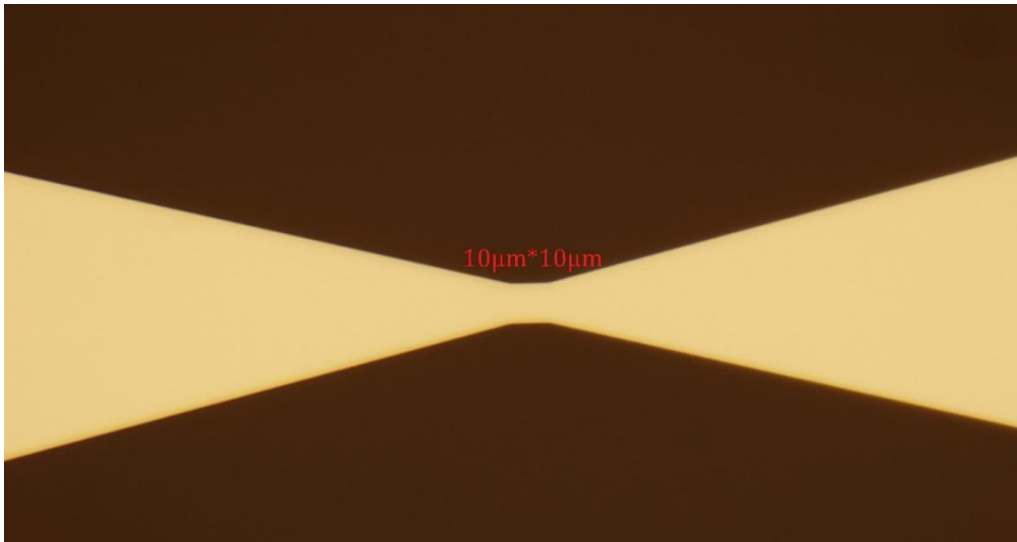
Εικόνα 44: Δείγμα quartz μετά το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (φακός $\times 50$).

4.6 Βήμα 5^ο: Εναπόθεση Διηλεκτρικού υλικού SiO_2

Στόχος είναι η κάλυψη του αγωγού διέγερσης έτσι ώστε να μην δημιουργείται επαφή με το μαγνητικό υλικό. Υπήρχε ο περιορισμός του πάχους του διηλεκτρικού υλικού, το οποίο πρέπει να είναι $\geq 100\text{nm}$, για την υπερκάλυψη του αλουμινίου 100nm . Για αυτή την διαδικασία χρησιμοποιήθηκε LTO στους 325°C και τα δείγματα έμειναν στον θάλαμο για 25 λεπτά και 30 sec. Μέσα στον θάλαμο τοποθετήθηκε και ένας μάρτυρας για την μελέτη συμπεριφοράς του διηλεκτρικού υλικού.



Εικόνα 45: Δείγμα πυριτίου μετά το LTO, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (φακός $\times 50$).



Εικόνα 46: Δείγμα quartz μετά το LTO, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).

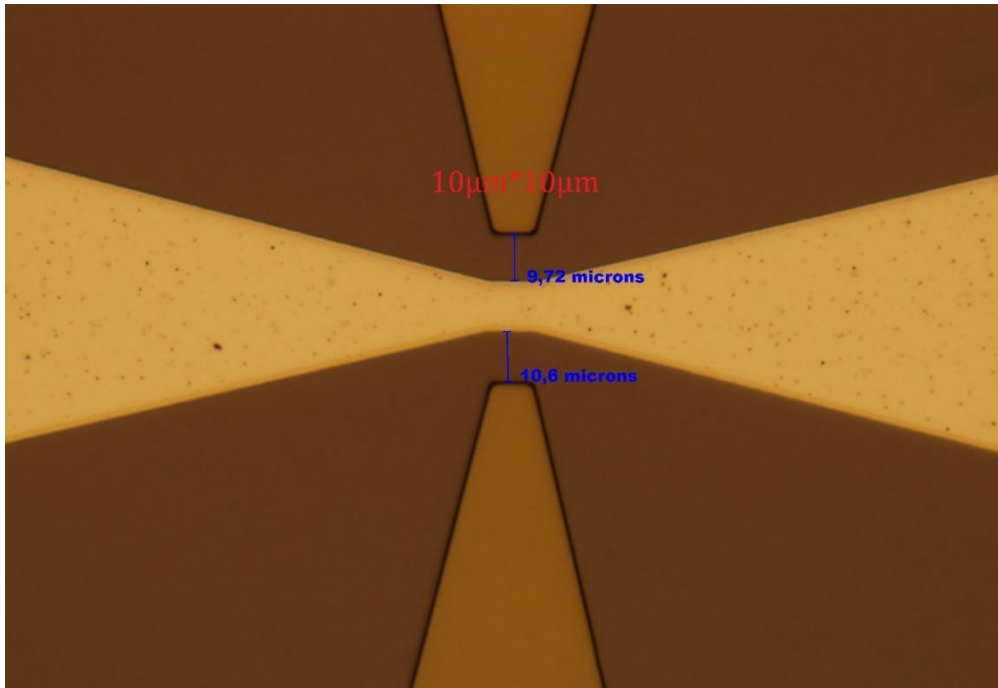
4.7 Βήμα 6^ο: Αρνητική Λιθογραφία (2^ο Layer)

Πριν την λιθογραφία στα δείγματα τοποθετείται promoter για την εξάλειψη υγρασίας. Στην συνέχεια τοποθετείται photoresist ρητίνη και γίνεται χρήση του spin coater για την εξάπλωση της. Ακολουθεί ψήσιμο σε φούρνο για 90 sec στους 110 °C.

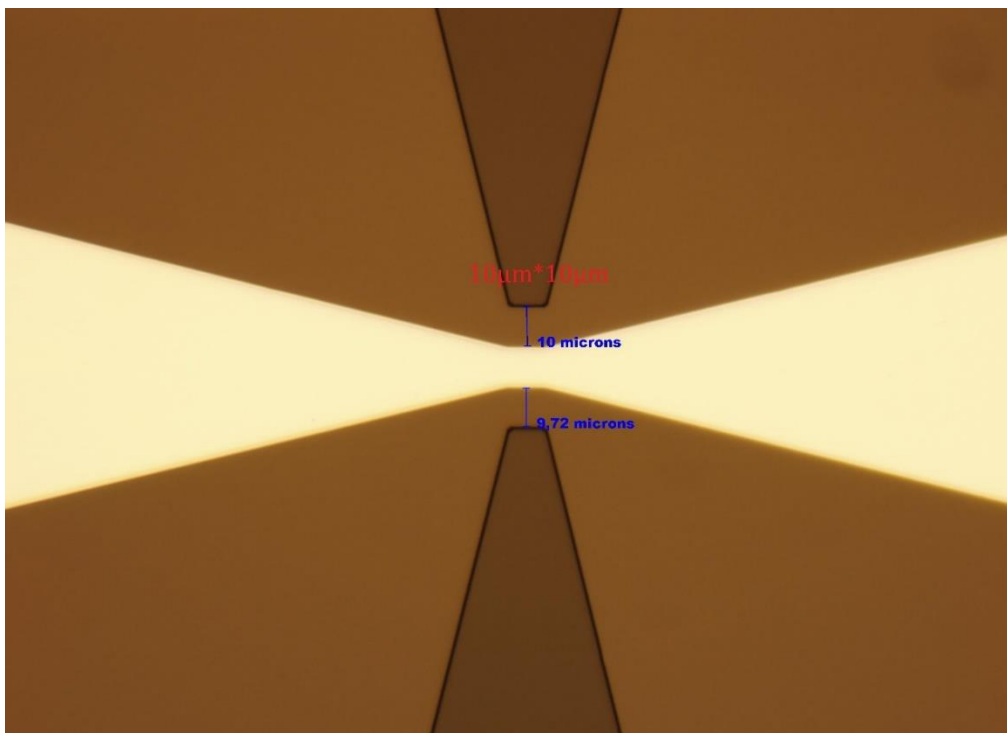
Για την δημιουργία του 2^{ου} layer των αγωγών λήψης θα πρέπει να περιστραφεί η μάσκα ωρολογιακά κατά 90° σε σχέση με την θέση που είχε στην 1^η λιθογραφία. Η σωστή θέση των υπαρχόντων δομών σε σχέση με τις καινούριες εξασφαλίζεται μέσω των σταυρών ευθυγράμμισης και άρα έτσι επιτυγχάνεται η ακριβής θέση του δείγματος αναφορικά με την μάσκα.

Η έκθεση των δειγμάτων σε UV γίνεται όπως πριν για 50 sec σε μήκος κύματος 320 nm.

Στην συνέχεια, κατά παρόμοιο τρόπο με την 1^η λιθογραφία τα δείγματα ψήνονται σε hot plate για 90 sec και για 3 λεπτά δέχονται flat UV exposure στα 365 nm. Τέλος τοποθετούνται στο διάλυμα του developer και διαλύεται η ανεπιθύμητη ρητίνη.



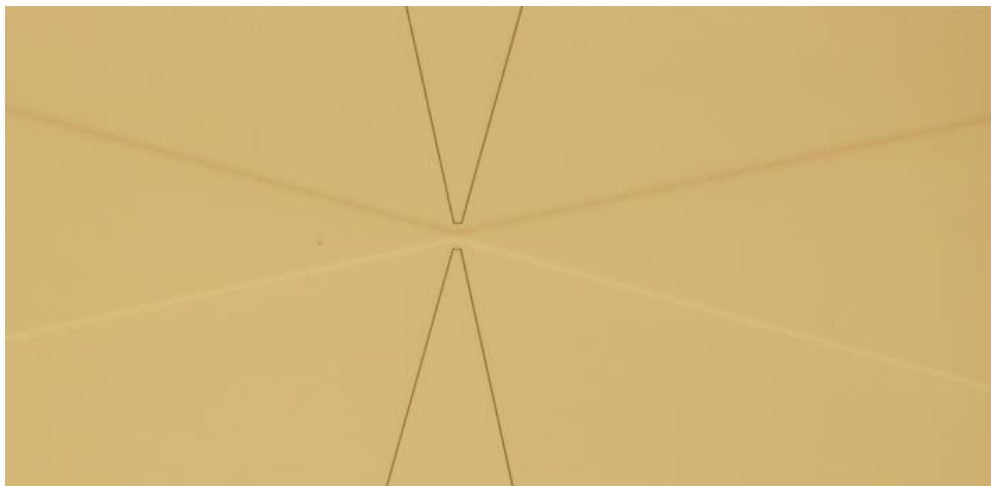
Εικόνα 47: Δείγμα πυριτίου 2^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).



Εικόνα 48: Δείγμα quartz 2^η Λιθογραφία, του device 10μm×10μm (φακός × 50).

4.8 Βήμα 7^ο: Εξάχνωση Αλουμινίου

Κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη φορά, το επιθυμητό πάχος του αλουμινίου είναι 100nm. Η εικόνα του καλυμμένου με αλουμίνιο δείγματος φαίνεται παρακάτω:

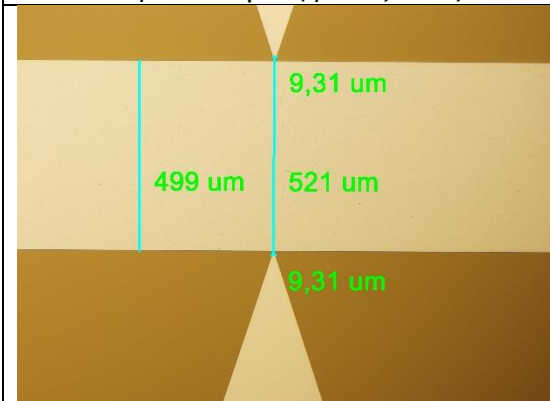
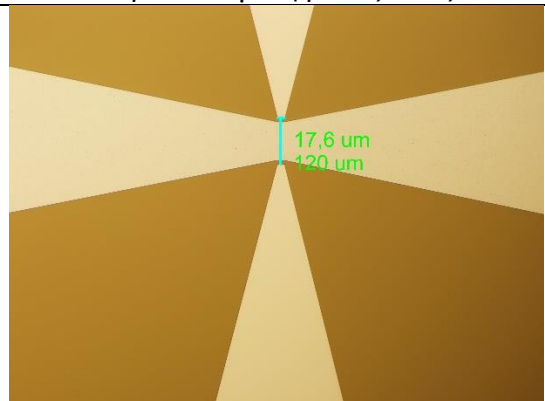


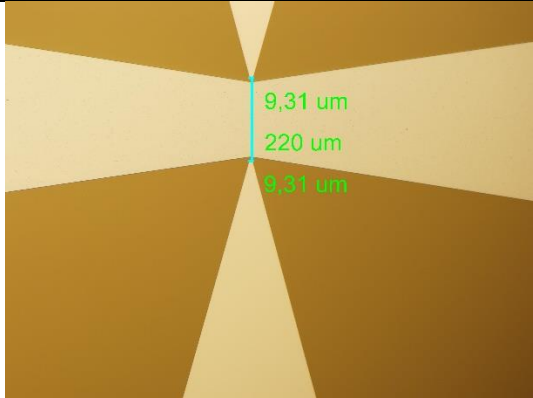
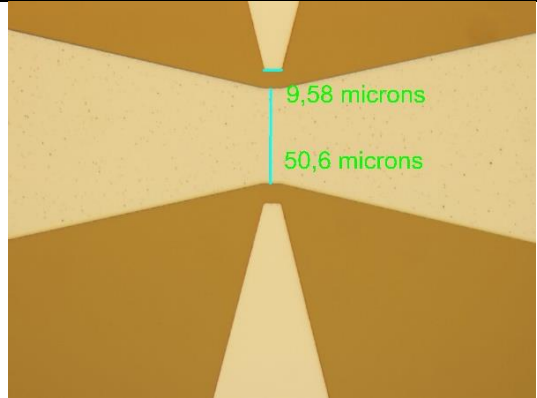
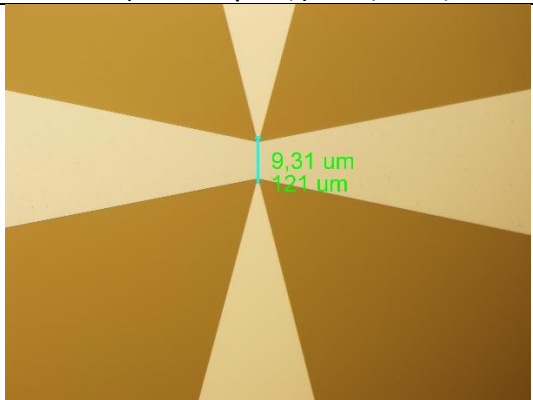
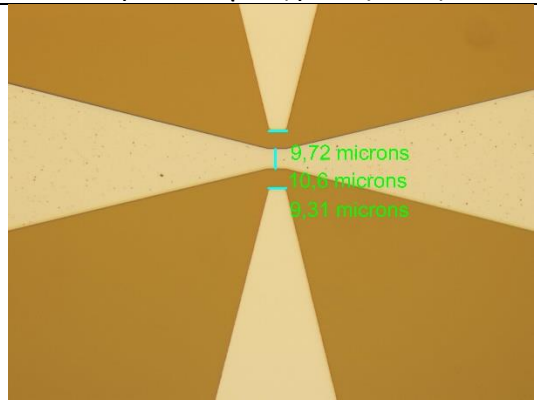
Εικόνα 49: Δείγμα πυριτίου πριν το lift-off, του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (φακός $\times 10$).

4.9 Βήμα 8^ο: Lift-off Αλουμινίου

Μετά την απομάκρυνση της ρητίνης με ακετόνη και την χρήση υπέρηχων στο δείγμα υποστρώματος πυριτίου και υδροβολέα στο δείγμα quartz, με αντίστοιχη διαδικασία όπως προηγουμένως απομακρύνεται το ανεπιθύμητο αλουμίνιο. Μετά τον καθαρισμό με ισοπροπανόλη, στην συνέχεια με απιονισμένο νερό και τέλος μετά από στέγνωμα με άζωτο τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 5: Συνολικός πίνακας για το wafer Si μετά το 2^ο Lift-off.

Device 1: περιοχή ενδιαφέροντος $500\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ (φακός $\times 10$)	Device 4: περιοχή ενδιαφέροντος $100\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ (φακός $\times 10$)
	

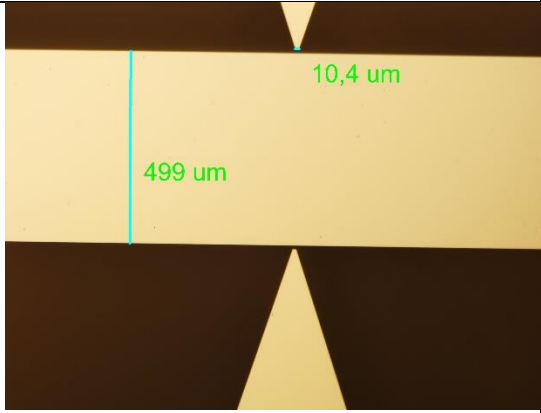
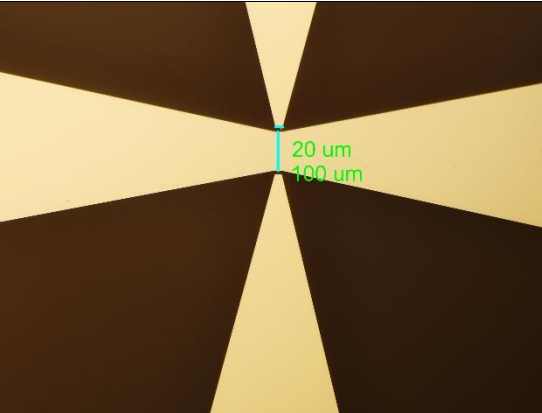
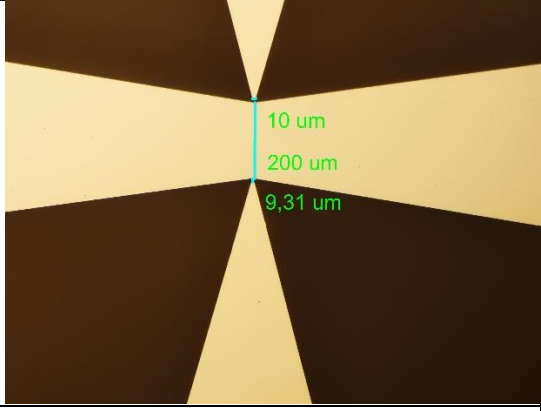
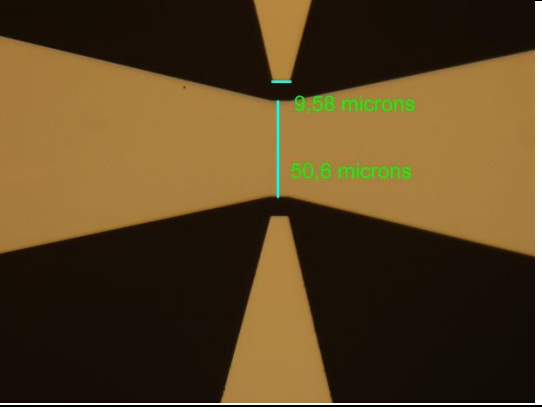
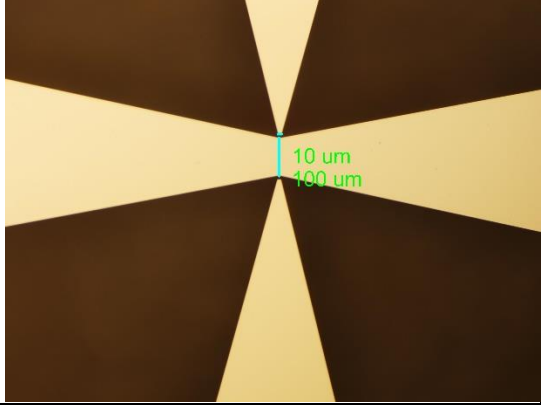
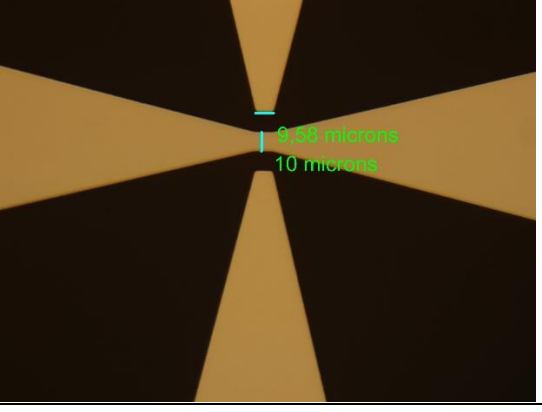
<i>Device 2: περιοχή ενδιαφέροντος 200μm× 10μm (φακός× 10)</i> 	<i>Device 5: περιοχή ενδιαφέροντος 50μm× 10μm (φακός× 50)</i> 
<i>Device 3: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm× 10μm (φακός× 10)</i> 	<i>Device 6: περιοχή ενδιαφέροντος 10μm× 10μm (φακός× 50)</i> 

Μετρήθηκαν οι διαστάσεις $L = 10\mu m$, $20\mu m$ στα παραπάνω 6 devices με σκοπό την σύγκριση των σχηματισμένων δομών με αυτές του χρωμίου της μάσκας.

- Η διάσταση $L = 10\mu m$ βάσει μετρήσεων προκύπτει $9,5\mu m \pm 0,26\mu m$.
- Η διάσταση $L = 20\mu m$ βάσει μετρήσεων προκύπτει $18,75\mu m \pm 0,51\mu m$.

Η διάσταση των $10\mu m$ μετρήθηκε στα $9,81\mu m \pm 0,13\mu m$ κατά την διαδικασία εξακρίβωσης διαστάσεων των δομών της μάσκας και άρα φαίνεται να έχει αποτυπωθεί μικρότερη στο δείγμα υποστρώματος πυριτίου.

Πίνακας 6: Συνολικός πίνακας για το wafer quartz μετά το 2^ο Lift-off.

<i>Device 1: περιοχή ενδιαφέροντος 500μm× 10μm (φακός× 10)</i> 	<i>Device 4: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm× 20μm (φακός× 10)</i> 
<i>Device 2: περιοχή ενδιαφέροντος 200μm× 10μm (φακός× 10)</i> 	<i>Device 5: περιοχή ενδιαφέροντος 50μm× 10μm (φακός× 50)</i> 
<i>Device 3: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm× 10μm (φακός× 10)</i> 	<i>Device 6: περιοχή ενδιαφέροντος 10μm× 10μm (φακός× 50)</i> 

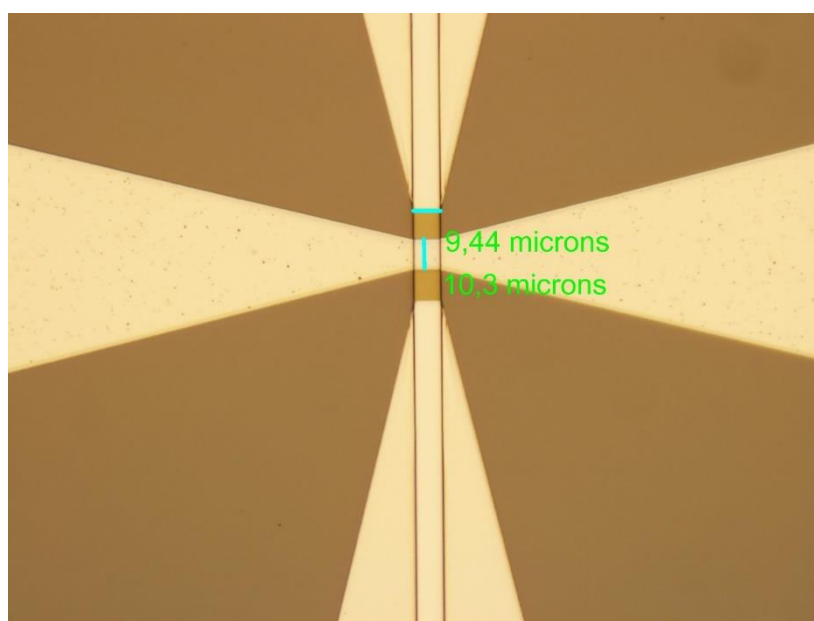
Φαίνεται ότι και στα 2 δείγματα οι μετρούμενες διαστάσεις των L είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στην μάσκα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι οι ακμές των αγωγών λήψης έχουν χάσει την οξύτητά τους (έχουν γίνει πιο στρογγυλές) κατά το liftoff κάτι που επηρεάζει τον τρόπο λήψης μέτρησης των παραπάνω

διαστάσεων. Ένας άλλος λόγος στον οποίο μπορεί να αποδοθεί η δημιουργία μικρότερων δομών είναι το μη επαρκές κενό που διατηρεί σε επαφή το δείγμα με την μάσκα που έχει ως αποτέλεσμα την διέλευση UV ακτινοβολίας σε σημεία που θα έπρεπε να είναι καλυμμένα από το αδιαφανές χρώμιο.

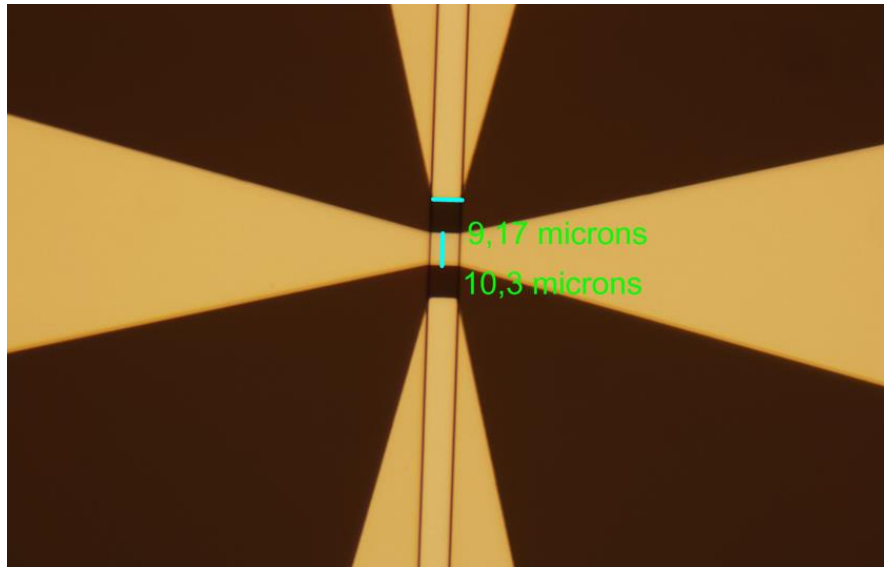
Με την λήψη παραπάνω μετρήσεων θα γίνει ξεκάθαρο αν οι δομές στο δείγμα υποστρώματος πυριτίου SiO_2 είναι μικρότερες από αυτές στο quartz. Αυτό ενδέχεται να έχει προκύψει από αποσβενόμενες ανακλάσεις φωτός που διεγείρουν ανεπιθύμητα κομμάτια ρητίνης στο 1^ο δείγμα οι οποίες δεν συμβαίνουν στο quartz αφού είναι αδιαφανές.

4.10 Βήμα 9^ο: Αρνητική Λιθογραφία (3^ο Layer)

Η 3^η λιθογραφία αφορά το 3^ο layer της φωτομάσκας, στο οποίο βρίσκονται τα τμήματα του μαγνητικού υλικού για κάθε device. Η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων είναι ταυτόσημη με τις προηγούμενες δύο λιθογραφίες. Η φωτομάσκα περιστρέφεται άλλες 90° ωρολογιακά σε σχέση με την θέση που είχε κατά την 2^η λιθογραφία και η σωστή σχετική θέση δείγματος και μάσκας εξασφαλίζεται πάλι από τους σταυρούς ευθυγράμμισης και από τα πλαίσια του κάθε dye. Η εικόνα του μικροσκοπίου των 2 δειγμάτων φαίνεται παρακάτω:



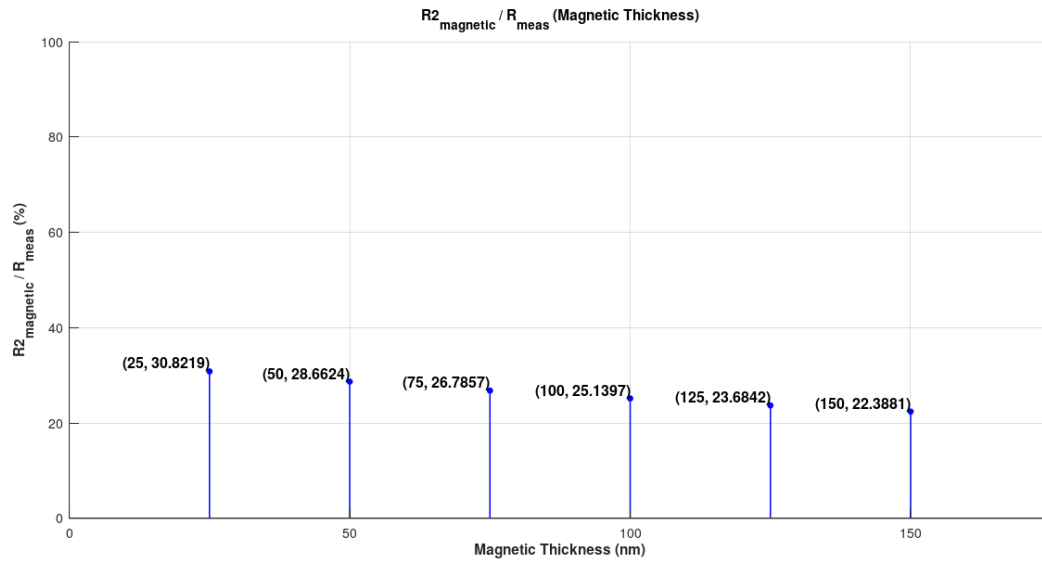
Εικόνα 50: Δείγμα πυριτίου 3^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).



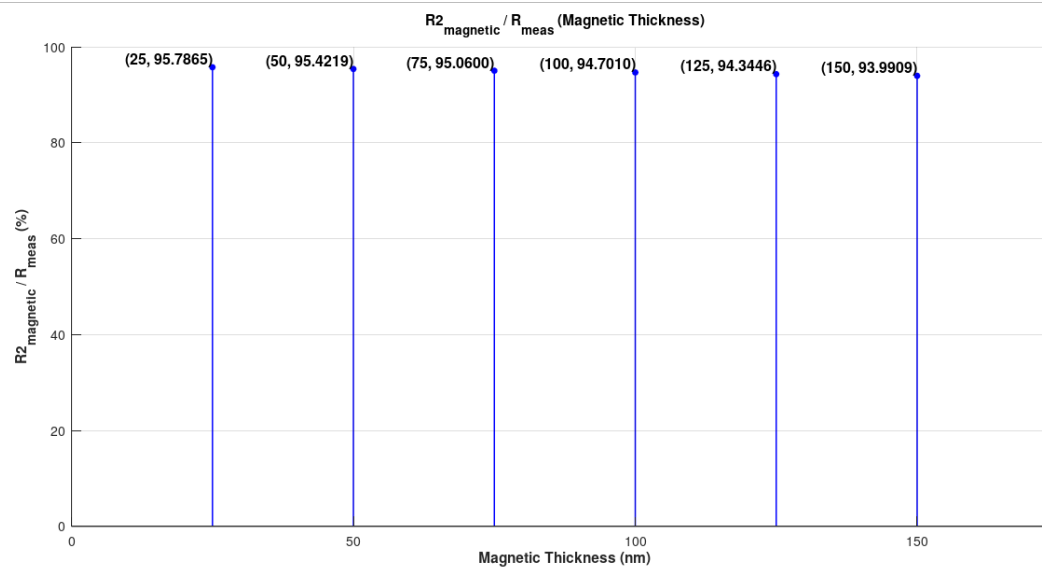
Εικόνα 51: Δείγμα quartz 3^η Λιθογραφία, του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).

4.11 Βήμα 10^ο: Εξάχνωση Μαγνητικού υλικού

Στους υπολογισμούς του 3^{ου} κεφαλαίου που αφορούσαν το ποσοστό μεταβολής της συνολικής αντίστασης, το πάχος του μαγνητικού υλικού είχε θεωρηθεί ίσο με 100nm. Είναι αναμενόμενο ότι η μείωση αυτού του πάχους προκαλεί μία αύξηση της αντίστασης του μαγνητικού υλικού, κάτι που όπως έχει προαναφερθεί είναι επιθυμητό. Ωστόσο η τιμή των 100nm είχε επιλεγεί με σκοπό την εξασφάλιση της καλής επαφής μεταξύ μαγνητικού υλικού και αλουμινίου και την διατήρηση της συνέχειας του μαγνητικού υλικού στα τμήματα αυξομείωσης του υψομέτρου σε κάθε device, τα οποία εμφανίζονται στα κενά μεταξύ των αγωγών διέγερσης και λήψης ($d_{gap} = 10\mu m$). Μελετήθηκε λοιπόν ο λόγος $\frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}}$ για διάφορες τιμές πάχους μαγνητικού υλικού, στα devices 1 και 6 που αντιπροσωπεύουν την πιο ευαίσθητη και την λιγότερη ευαίσθητη υλοποίηση αντίστοιχα.



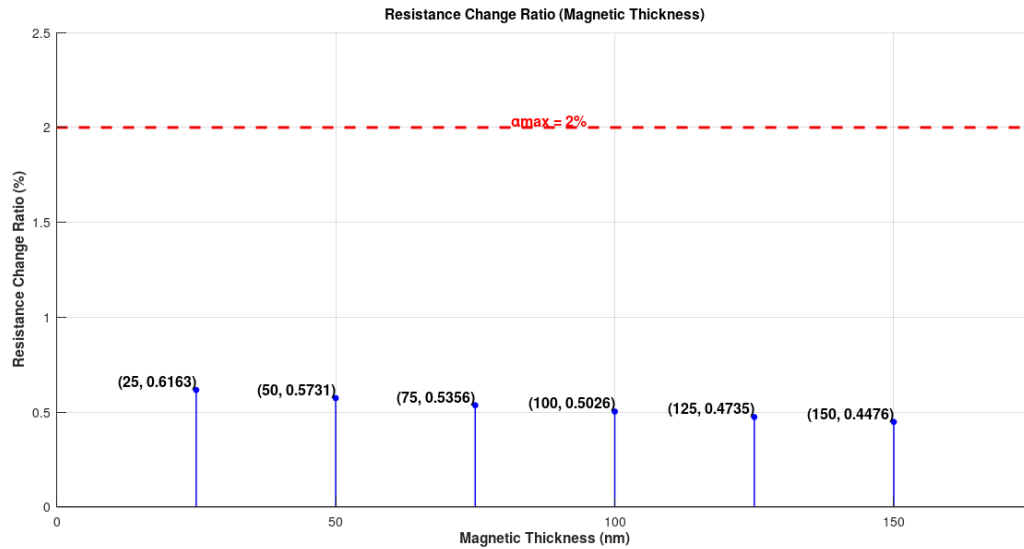
Εικόνα 52: Ποσοστό λόγου $\frac{R2_{\text{magnetic}}}{R_{\text{meas}}}$ στο Device 6 με περιοχή ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$.



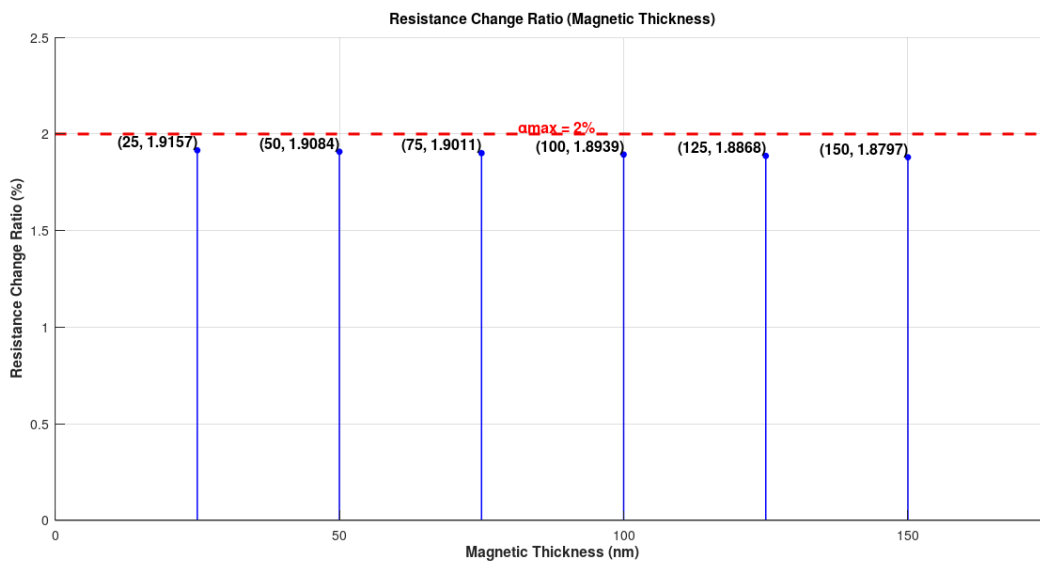
Εικόνα 53: Ποσοστό λόγου $\frac{R2_{\text{magnetic}}}{R_{\text{meas}}}$ στο Device 1 με περιοχή ενδιαφέροντος $500\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε γραφική παράσταση που δείχνει την σχέση μεταξύ ποσοστού μεταβολής συνολικής μετρούμενης αντίστασης ως προς διαφορετικά πιθανά πάχη μαγνητικού υλικού για το Device 6 με περιοχή ενδιαφέροντος $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$. Υπογραμμίζεται ότι η μέγιστη θεωρητική τιμή του ποσοστού μεταβολής είναι το 2% αφού:

$$\alpha = \frac{R'_{meas} - R_{meas}}{R_{meas}} 100\% = \frac{0,02 R_{2magnetic}}{R_{meas}} 100\% = 2\% \frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}}.$$



Εικόνα 54: Ποσοστό α για στο Device 6 με περιοχή ενδιαφέροντος 10μm × 10μm.



Εικόνα 55: Ποσοστό α για στο Device 1 με περιοχή ενδιαφέροντος 500μm × 10μm.

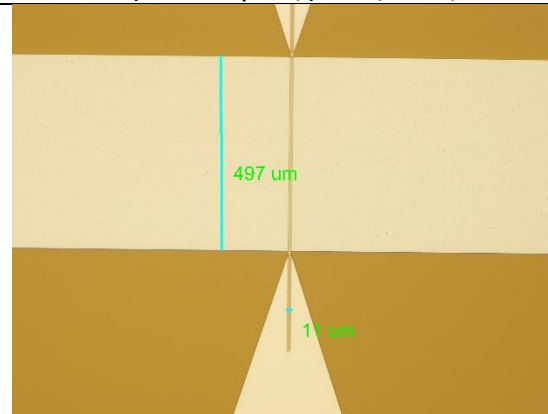
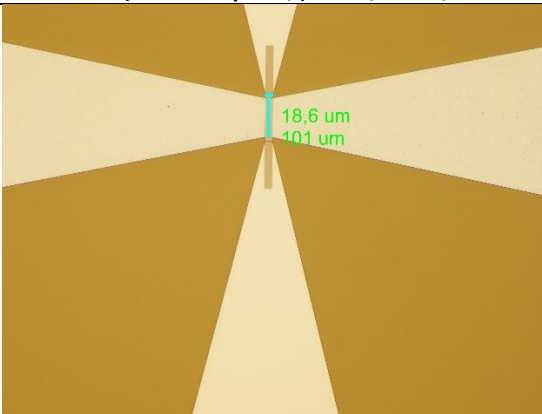
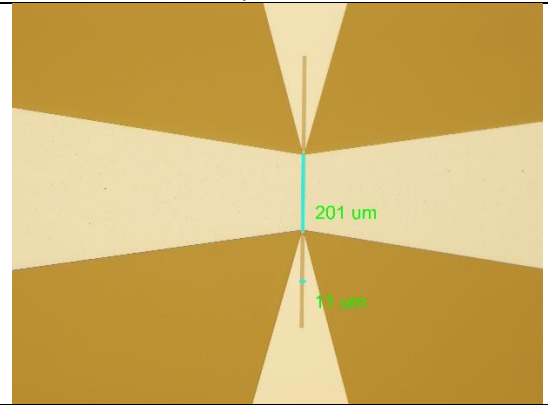
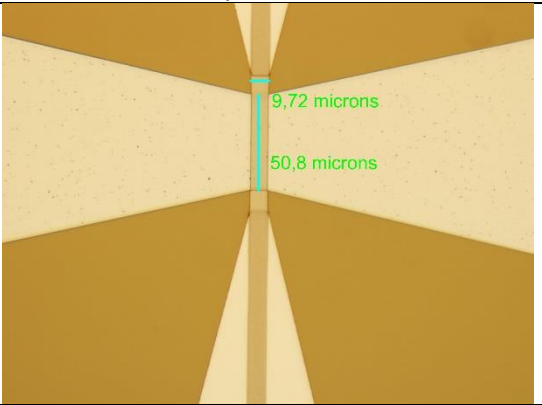
Έχοντας ως γνώμονα τα παραπάνω αποφασίστηκε **το πάχος του μαγνητικού υλικού να παραμείνει στα 100nm** όπως είχε σχεδιαστεί αρχικά, αφού η μεταβολή του λόγου $\frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}}$ και συνεπώς του ποσοστού μεταβολής α δεν είναι αρκετή ώστε να αξίζει το ρίσκο της αποτυχίας του process που υπάρχει στην περίπτωση που το πάχος είναι κάτω από 100nm.

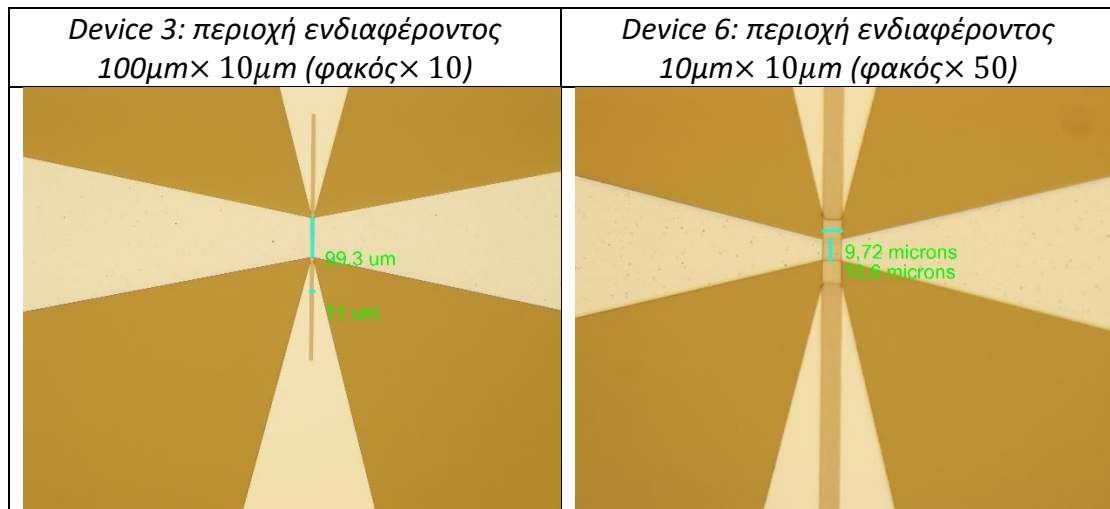
Η εναπόθεση του έγινε με χρήση του AJA International, Inc. ATC 2200-V Sputtering System με τις εξής παραμέτρους: Ισχύς 200W DC ($20 \frac{W}{cm^2}$), Πίεση Ar 3mTorr και συνολικό χρόνο 764sec (Ρυθμό Εναπόθεσης 0,131nm/sec) και περιστροφή υποστρώματος ίση με 80rpm.

4.12 Βήμα 11^ο: Lift-off Μαγνητικού υλικού

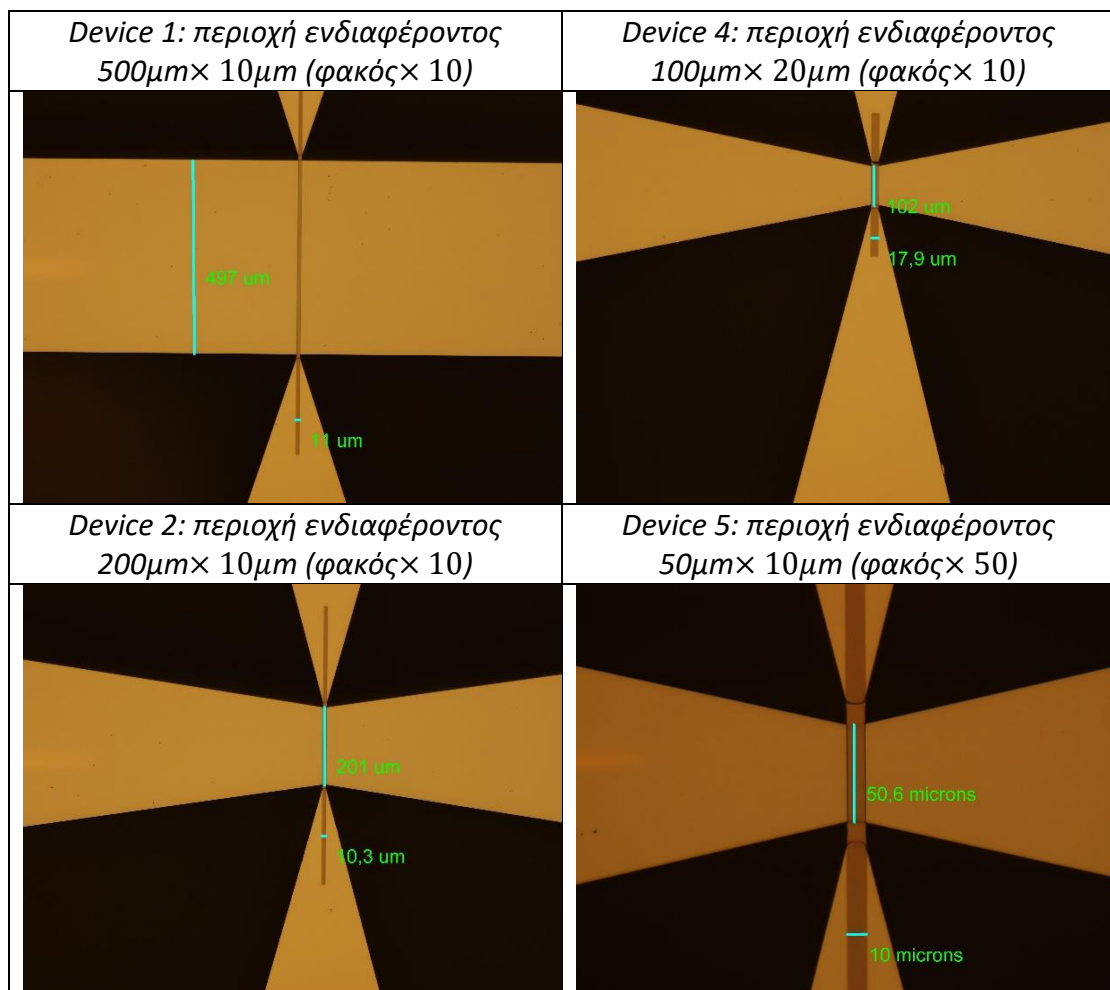
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το lift off είναι παρόμοια με προηγούμενως και για τα 2 δείγματα. Αρχικά τοποθετήθηκαν σε δοχείο με ακετόνη η οποία σε συνδυασμό με υπέρηχους απομάκρυνε την ρητίνη που είχε απομείνει από το στάδιο της λιθογραφίας. Στην συνέχεια έγινε χρήση ισοπροπανόλης για την απομάκρυνση της ακετόνης, απιονισμένου νερού για ξέβγαλμα των δειγμάτων και τέλος στέγνωμα με άζωτο.

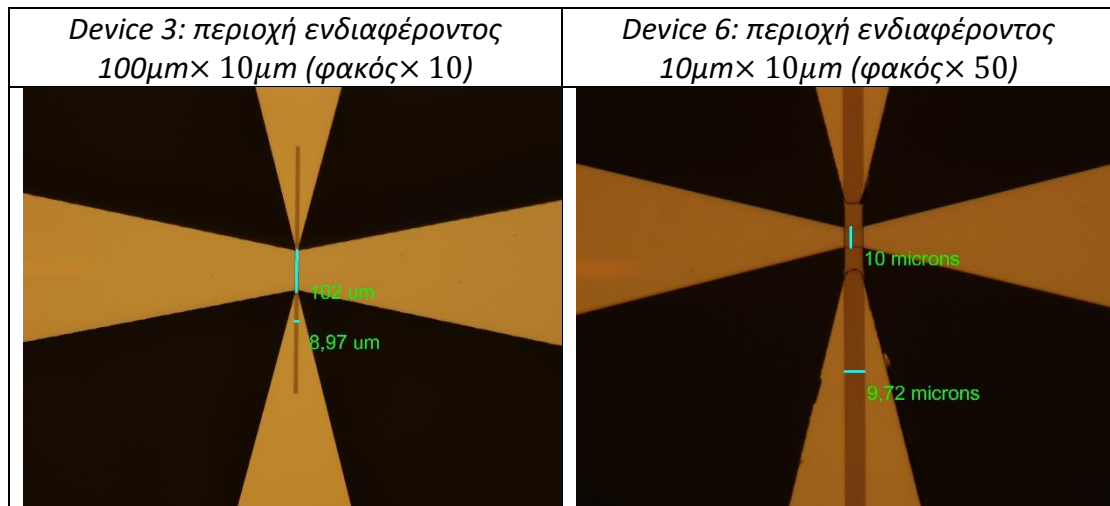
Πίνακας 7: Συνολικός πίνακας για το wafer Si μετά την εναπόθεση μαγνητικού υλικού.

Device 1: περιοχή ενδιαφέροντος 500μm× 10μm (φακός× 10)	Device 4: περιοχή ενδιαφέροντος 100μm× 20μm (φακός× 10)
	
Device 2: περιοχή ενδιαφέροντος 200μm× 10μm (φακός× 10)	Device 5: περιοχή ενδιαφέροντος 50μm× 10μm (φακός× 50)
	



Πίνακας 8: Συνολικός πίνακας για το wafer quartz μετά την εναπόθεση μαγνητικού υλικού.





4.13 Βήμα 12^ο: Αρνητική Λιθογραφία (4^ο Layer)

Μετά την ολοκλήρωση του 11^{ου} βήματος, σχηματίστηκαν οι απαραίτητες δομές για την λειτουργία των διατάξεων και απέμεινε η φανέρωση των επαφών του αγωγού διέγερσης, οι οποίες ήταν καλυμμένες με 100nm πάχους LTO από το 5^ο βήμα. Οι άλλες 2 επαφές είναι εκτεθειμένες σε αυτό το στάδιο. Έτσι κατά την διαδικασία της λιθογραφίας του 4^{ου} layer αρχικά καλύπτονται σε ολόκληρη την επιφάνεια τους τα δείγματα από ρητίνη με χρήση του spin coater και στην συνέχεια μετά την κατάλληλη ευθυγράμμιση της φωτομάσκας με τα δείγματα και την έκθεση σε UV ακτινοβολία 320nm μήκους κύματος για 50 δευτερόλεπτα, την περαιτέρω επεξεργασία της ρητίνης με τρόπο ταυτόσημο με τις προηγούμενες λιθογραφίες και τέλος με χρήση της ουσίας developer, απομακρύνεται η ανεπιθύμητη ρητίνη από όλα τα contact pads των συσκευών.

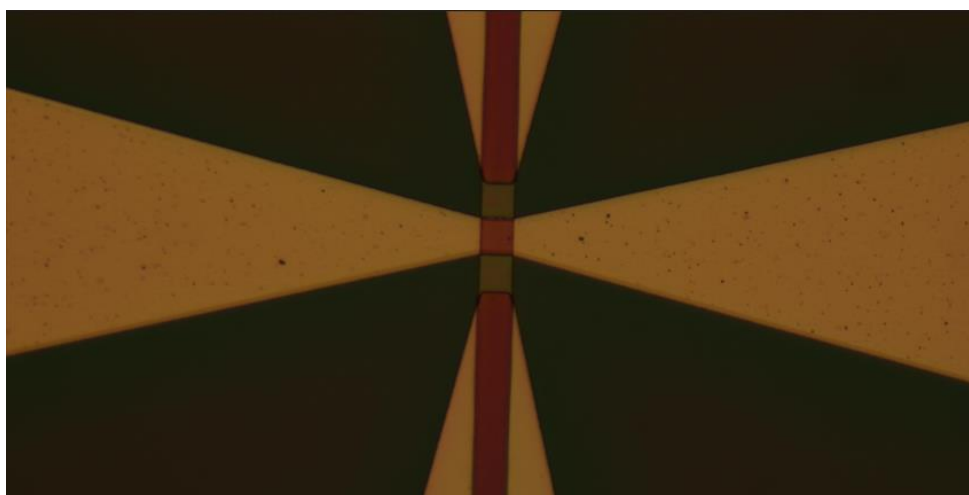
4.14 Βήμα 13^ο: Εγχάραξη με SF_6

Στο παρόν βήμα χρειάστηκε να βρεθεί μία διαδικασία η οποία θα μπορούσε να απομακρύνει τα 100nm πάχους διηλεκτρικού υλικού του 5^{ου} βήματος που βρίσκονται πάνω από τις επαφές του αγωγού διέγερσης και συγχρόνως να μην επηρεάζει το εκτεθειμένο αλουμίνιο των δύο επαφών που προορίζονται για την μέτρηση της αντίστασης. Η εγχάραξη με αέριο SF_6 αποφασίστηκε ότι είναι η κατάλληλη αφού με τον γνωστό ρυθμό εγχάραξης του LTO αρκούν **3 λεπτά** για την εξαφάνιση 100nm πάχους του, κάτι το οποίο επαληθεύτηκε και με την παρουσία ενός μάρτυρα που είχε

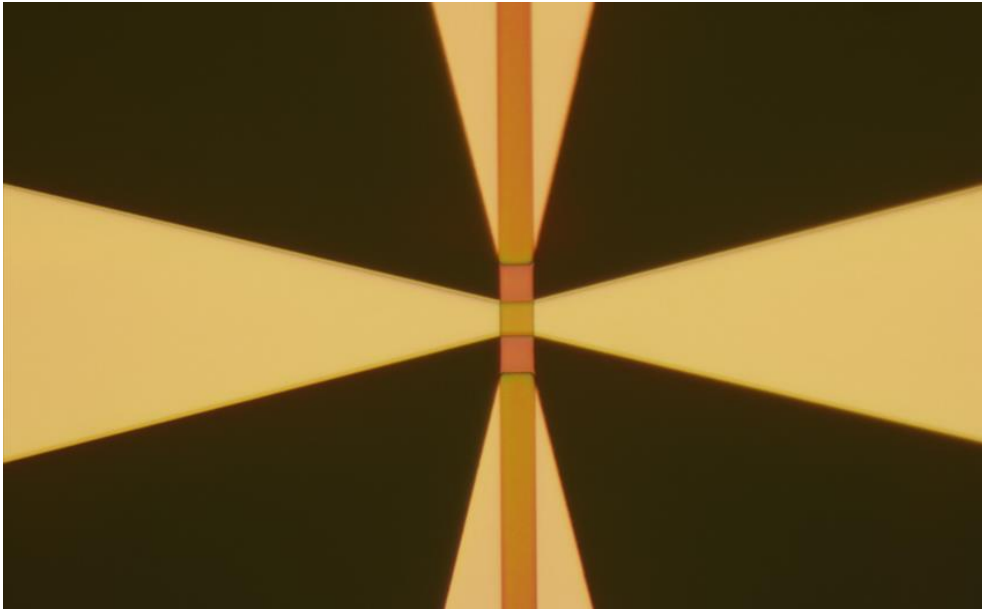
δημιουργηθεί από το 5° βήμα. Επίσης με ένα δείγμα από προηγούμενη αποτυχημένη διαδικασία μετά το lift off αλουμινίου του αγωγού διέγερσης και την υποβολή του σε εγχάραξη με SF_6 επιβεβαιώθηκε η μη-αλλοίωση των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων μέσω της διαδικασίας της μέτρησης της αντίστασης των αγωγών αλουμινίου πριν και μετά την εγχάραξη για 3 λεπτά και την παραμονή της σε στάσιμες τιμές.

Έτσι η κατασκευή ολοκληρώθηκε με αυτό το βήμα, αφού αποκτήθηκε πρόσβαση στις 4 επαφές που χρειάζονται για την διέγερση και την μέτρηση αντίστασης και συγχρόνως τον ρόλο μονωτικού υλικού μεταξύ των αγωγών λήψης και της υπό εξέταση επιφάνειας στην παρούσα φάση αποφασίστηκε να διατελέσει η ρητίνη που είχε παραμείνει από την τελευταία φωτολιθογραφία.

Το πάχος της ρητίνης που παρέμεινε μετά την εγχάραξη, μετρήθηκε με προφίλομετρία στα 600nm από τα 1,3μm που είχαν σχηματιστεί αρχικά.



Εικόνα 56: Δείγμα πυριτίου μετά το SF_6 , του device περιοχής ενδιαφέροντος 10μm×10μm (φακός × 50).



Εικόνα 57: Δείγμα quartz μετά το SF_6 , του device περιοχής ενδιαφέροντος $10\mu m \times 10\mu m$ (φακός $\times 50$).

5 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός και Ερμηνεία

5.1 Εισαγωγή στην πειραματική διάταξη

Οι πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρικού χαρακτηρισμού του Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» σε ένα από τα **devices τύπου 1** του wafer πυριτίου με **περιοχή ενδιαφέροντος 500μm*10μm** όπου είναι αναμενόμενη και η μεγαλύτερη ποσοστιαία αλλαγή αντίστασης (1,89% θεωρώντας μέγιστη μεταβολή αντίστασης μαγνητικού υλικού ίση με 2%).

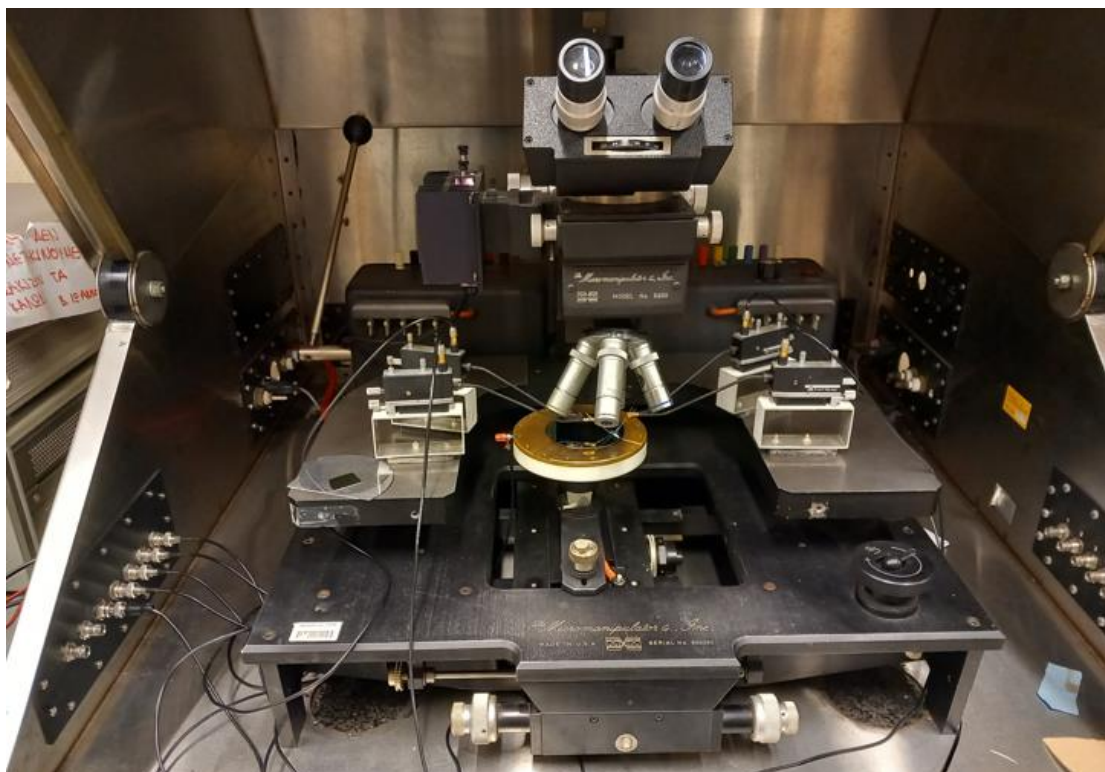
Αρχικά έγινε έλεγχος της ηλεκτρικής απομόνωσης του αγωγού διέγερσης με τους αγωγούς λήψης με χρήση του probe station και ενός ηλεκτρικού οργάνου ακριβείας που επιτρέπει την άσκηση ρεύματος ή τάσης με ταυτόχρονη μέτρηση ρεύματος ή τάσης (Source-Measure). Ένα probe τοποθετήθηκε σε ένα από τα δύο contact pads του αγωγού διέγερσης και ένα άλλο probe τοποθετήθηκε σε contact pad αγωγού λήψης. Στις άκρες των probe συνδέθηκαν καλώδια τύπου BNC με μηχανήμα KEITHLEY 2400 SourceMeter ρυθμισμένο για μέτρηση ρεύματος και εφαρμογή σταθερής τάσης. Σε περίπτωση που κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του device δεν υπήρξε κάποιο λάθος ή κάποιος απρόβλεπτος παράγοντας, η εφαρμογή τάσης μεταξύ των 2 προαναφερθέντων άκρων και η μέτρηση ρεύματος που διαρρέει αυτά θα πρέπει να είναι μηδενική. Πράγματι η εφαρμογή τάσης ίσης με 1V οδήγησε σε μέτρηση ρεύματος που ανήκε στα πλαίσια του θορύβου και άρα το device αυτό κρίθηκε αξιοποιήσιμο.

Έχοντας εξασφαλίσει την ηλεκτρική ακεραιότητα του device, στην συνέχεια μελετήθηκε η μεταβολή της αντίστασης R_{meas} που μπορούσε να επιτευχθεί με την διέλευση ρεύματος I_{line} από τον αγωγό διέγερσης. Η σχέση της έντασης του μαγνητικού πεδίου H που προκύπτει από το ρεύμα διέγερσης είναι αναλογική ως προς αυτό και άρα η γραφική παράσταση $R_{meas}(H) \sim R_{meas}(I_{line})$. Για τον υπολογισμό της, δύο probes τοποθετήθηκαν στον αγωγό διέγερσης και άλλα 2 στους αγωγούς λήψης. Η πόλωση του device γίνεται μέσω της διέλευσης ρεύματος από τον αγωγό διέγερσης και για αυτό από τα probes που είναι συνδεδεμένα με αυτόν θα

διέρχεται σταθερής έντασης DC ρεύμα I_{line} ενώ στο επίπεδο μέτρησης αντίστασης επιλέχθηκε να εφαρμοστεί σταθερή τάση $V_{meas} = 1V$ και να πραγματοποιείται μέτρηση του ρεύματος I_{meas} . Σε κατάσταση ηρεμίας ($I_{line} = 0$) το μετρούμενο ρεύμα I_{meas} ήταν ίσο με 3,1464mA το οποίο αντιστοιχεί σε τιμή αντίστασης $R_{meas} = 317,82 \Omega$.



Εικόνα 58: Πειραματική Διάταξη με τα 2 SourceMeters συνδεδεμένα με το probe station.



Εικόνα 59: Εξέταση ενός device με 4 probes: 2 για διέγερση και 2 για μέτρηση.

5.2 Μετρήσεις στο wafer πυριτίου

5.2.1 Χαρακτηρισμός του D1 (περιοχή ενδιαφέροντος 500μm*10μm)

Πίνακας 9: D1 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,1A]$ και σταδιακή αύξηση ανά 100mA.

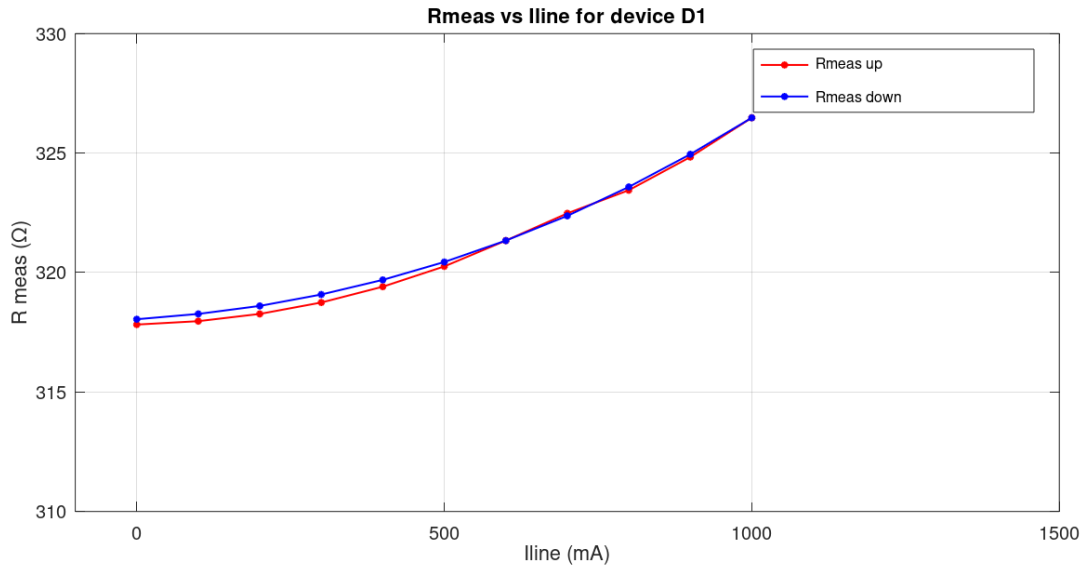
$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}i}}{R_{meas_{up}i-1}}(\%)$
0	3,1464	317,8235444	0	0
100	3,145	317,9650238	0,044515103	0,044515103
200	3,142	318,2686187	0,140038192	0,095480586
300	3,1373	318,745418	0,29005833	0,149810346
400	3,1308	319,4071803	0,498275201	0,207614667
500	3,1225	320,256205	0,76541233	0,26581265
600	3,112	321,3367609	1,105398458	0,337403599
700	3,101	322,4766204	1,464043857	0,354724282
800	3,0917	323,4466475	1,769253162	0,300805382
900	3,0785	324,8335228	2,20561962	0,42878025
1000	3,063	326,4773098	2,722820764	0,50603983

Πίνακας 10: D1 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,1A]$ και σταδιακή μείωση ανά 100mA.

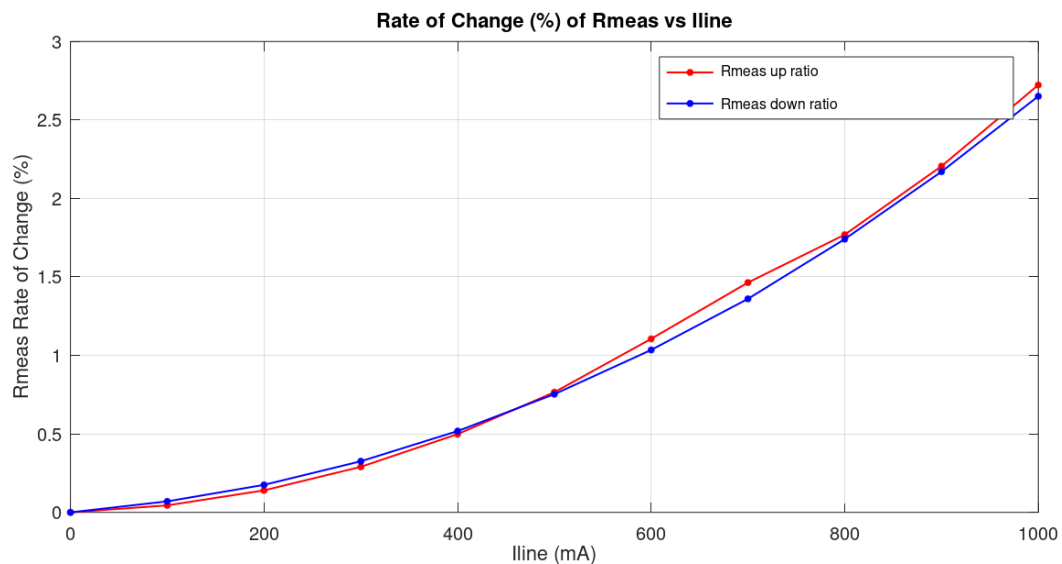
$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{down}}(mA)$	$R_{meas_{down}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{down}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{down}i}}{R_{meas_{down}i-1}}(\%)$
0	3,1442	318,0459258	0	0
100	3,142	318,2686187	0,070019	0,070019096
200	3,1387	318,6032434	0,175232	0,10513907
300	3,134	319,0810466	0,325463	0,149968092
400	3,128	319,6930946	0,517903	0,191815857
500	3,1207	320,4409267	0,753036	0,233921877
600	3,112	321,3367609	1,034704	0,279562982
700	3,102	322,3726628	1,360413	0,322372663
800	3,0904	323,5827077	1,740875	0,375355941
900	3,0774	324,9496328	2,170664	0,422434523
1000	3,063	326,4773098	2,650996	0,470127326

Επισημαίνεται ότι η ποσοστιαία μεταβολή της μετρούμενης αντίστασης φτάνει μέχρι το 2,72% και είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη (1,89%) για την θεωρηθείσα μέγιστη μεταβολή της αντίστασης του μαγνητικού υλικού ίση με 2%. Επίσης το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία αλλαγή της αντίστασης παρατηρείται στην μετάβαση από 900mA στα 1000mA είναι μια ένδειξη ότι το μαγνητικό υλικό δεν έχει φτάσει σε κορεσμό. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι η μεταβολή της αντίστασης του μαγνητικού υλικού που επιτυγχάνεται στις μετρήσεις

είναι μεγαλύτερη από το θεωρητικό μέγιστο $a_{max} = 2\%$ που είχε επιλεχθεί αλλά και από 2,72%, με την θεώρηση ότι η αλλαγή της οφείλεται αποκλειστικά στο φαινόμενο του AMR και όχι σε κάποιον άλλον παράγοντα όπως την αύξηση της θερμοκρασίας, το οποίο και θα διερευνηθεί στην συνέχεια.

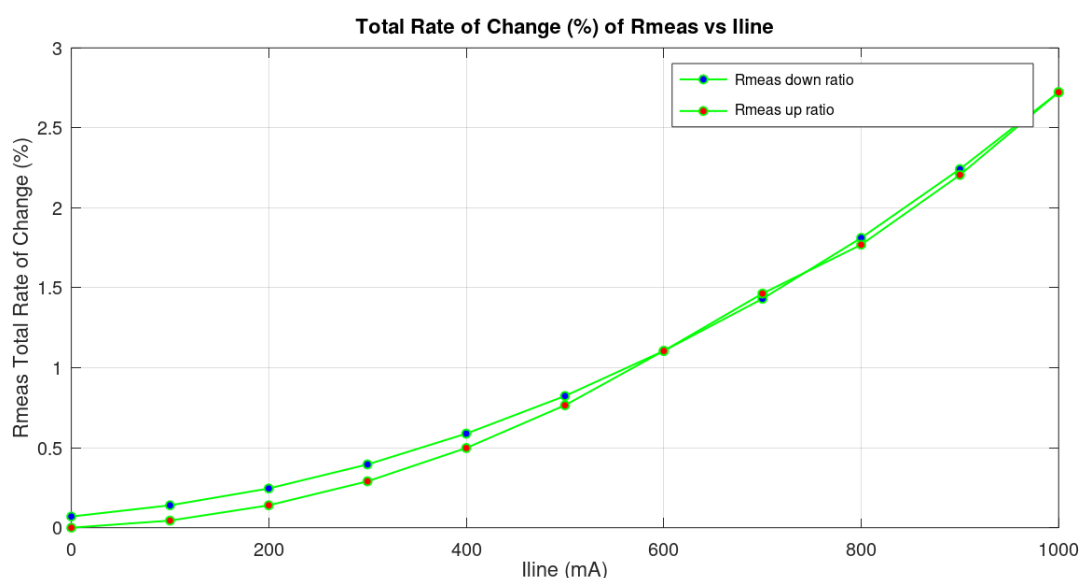


Εικόνα 60: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} στο D1 Si, συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.



Εικόνα 61: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} στο D1 Si, συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.

Σημαντική είναι επίσης η μελέτη του λόγου συνολικής μεταβολής της μετρούμενης αντίστασης ως προς την αρχική τιμή αντίστασης (εδώ $R_{initial} = 317,82\Omega$), δηλαδή μια συνολική μελέτη της παραπάνω διαδικασίας σε αντίθεση με την τμηματική ανάλυση που έγινε παραπάνω.



Εικόνα 62: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} στο D1 Si, ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος.

5.2.2 Επιβεβαίωση Μεταβολής της R_{meas} λόγω εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

Για την επιβεβαίωση της αιτίας της μεταβολής της αντίστασης και ότι αυτή οφείλεται όντως στην μαγνήτιση του permalloy και όχι αποκλειστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της διέλευσης ρεύματος από τον αγωγό διέγερσης, αποφασίστηκε να γίνει μέτρηση της αντίστασης R_{meas} για μηδενικό ρεύμα πόλωσης ($I_{line} = 0$) πριν και μετά την παρουσία εξωτερικού πεδίου από μαγνήτη. Η προσέγγιση του μαγνήτη με τον αισθητήρα τύπου D1 που εξετάστηκε παραπάνω έγινε όσο το wafer βρισκόταν στο probe station και σε επαφή με τα probes του, με αποτέλεσμα την περιορισμένη απόσταση στην οποία ήταν εφικτό να πλησιάσει. Στόχος ήταν να παρατηρηθεί μετρήσιμη μεταβολή στην αντίσταση R_{meas} του δείγματος D1 και συγχρόνως η μη διαταραχή των 2 probes με τα οποία πραγματοποιούνταν η μέτρηση, λόγω της μαγνήτισής τους.

Δοκιμάστηκαν 2 μαγνήτες, έστω $Magnet_A$ και $Magnet_B$ οι οποίοι πλησίασαν σε απόσταση γύρω στο 1cm πάνω από το D1. Η μέτρηση της αντίστασης έγινε όπως προηγουμένως, εφαρμόζοντας σταθερή τάση $V_{meas} = 1V$ και μετρώντας το ρεύμα I_{meas} (υπενθυμίζεται ότι $I_{line} = 0$).

Πίνακας 11: Μεταβολή της R_{meas} στο D1 Si, υπό την παρουσία μαγνητών.

Απουσία Μαγνήτη		$Magnet_A$			$Magnet_B$		
$I_{meas}(mA)$	$R_{initial}(\Omega)$	$I_{meas}(mA)$	$R_{meas}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}(\%)$	$I_{meas}(mA)$	$R_{meas}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}(\%)$
3,0831	324,38	3,067	326,051	0,524	3,063	326,477	0,656

Το παραπάνω πείραμα επιβεβαιώνει την αύξηση της αντίστασης με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου το οποίο είναι συνεπές και με τις αρχικές μετρήσεις. Η ποσοστιαία μεταβολή που υπολογίστηκε είναι επίσης εντός των αρχικών υποθέσεων και η μέγιστη τιμή της αναμένεται να είναι μεγαλύτερη, γεγονός που θα προσδιοριστεί κατά την κοπή των αισθητήρων από τα wafers και την προσέγγιση μαγνήτη σε μικρότερη απόσταση σε σχέση με το παραπάνω πείραμα λόγω των περιορισμών της πειραματικής διάταξης.

5.2.3 Επιβεβαίωση χρησιμότητας του D1 ως αισθητήρα

Για την απόδειξη της αρχικής υπόθεσης λειτουργίας της γενικότερης διάταξης ως σημειακός αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας, αποφασίστηκε στην παραπάνω διάταξη μέτρησης της αντίστασης του αισθητήρα τύπου D1 να μετρηθεί η μεταβολή της υπό την παρουσία ενός microwire CoFeSiB σε κοντινή απόσταση με αυτόν. Το σύρμα αυτό κρίθηκε κατάλληλο λόγω της μαλακής μαγνητικής του φύσης και άρα της αρχικής του μηδενικής τιμής μαγνήτισης, της εύκολης μαγνήτισης του που οφείλεται στην άμορφη του δομή η οποία λόγω της απουσίας κόκκων καθιστά ευκολότερη την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, της υψηλής του μαγνητικής διαπερατότητας και άρα της συσσώρευσης περισσότερων μαγνητικών γραμμών από το μαγνητικό πεδίο του αισθητήρα και τέλος λόγω των μικρών του διαστάσεων που το καθιστά ευκολότερο στον χειρισμό του. Τα πιο εμφανή αποτελέσματα στην μεταβολή της αντίστασης παρατηρήθηκαν κατά την τοποθέτηση του σύρματος ακριβώς πάνω στο device, σε σχέση με την μετρούμενη αντίσταση πριν και μετά από

αυτήν. Σε αυτή την φάση χρησιμοποιήθηκε ρεύμα διέγερσης ίσο με 900mA και $V_{meas} = 1V$.

Πίνακας 12: Μεταβολή της R_{meas} στο D1 Si κατά την τοποθέτηση σύρματος.

Για $I_{line} = 900mA, V_{meas} = 1V$						
Αρχική Κατάσταση		Παρουσία σύρματος			Απομάκρυνση σύρματος	
$I_{meas}(mA)$	$R_{initial}(\Omega)$	$I_{meas}(mA)$	$R_{meas}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}(\%)$	$I_{meas}(mA)$	$R_{meas}(\Omega)$
3,0333	329,673	3,075	325,203	-1,356	3,032	329,81

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις η επαφή του D1 με το σύρμα προκάλεσε μια πτώση στην αντίσταση ίση με $\Delta R_{meas} = -4,47\Omega$, που αντιστοιχεί σε ποσοστιαία μεταβολή της ίση με -1,356% και η απομάκρυνση του σύρματος φαίνεται να την αναιρεί σχεδόν πλήρως. Το γεγονός της μείωσης της μετρούμενης αντίστασης κατά την επαφή με το σύρμα είναι συνεπές με τις αρχικές υποθέσεις και η μεγάλη τιμή της ήταν ενθαρρυντικός παράγοντας για την μελέτη και των υπολοίπων devices του dye.

5.2.4 Χαρακτηρισμός του D3 (περιοχή ενδιαφέροντος 100μm*10μm)

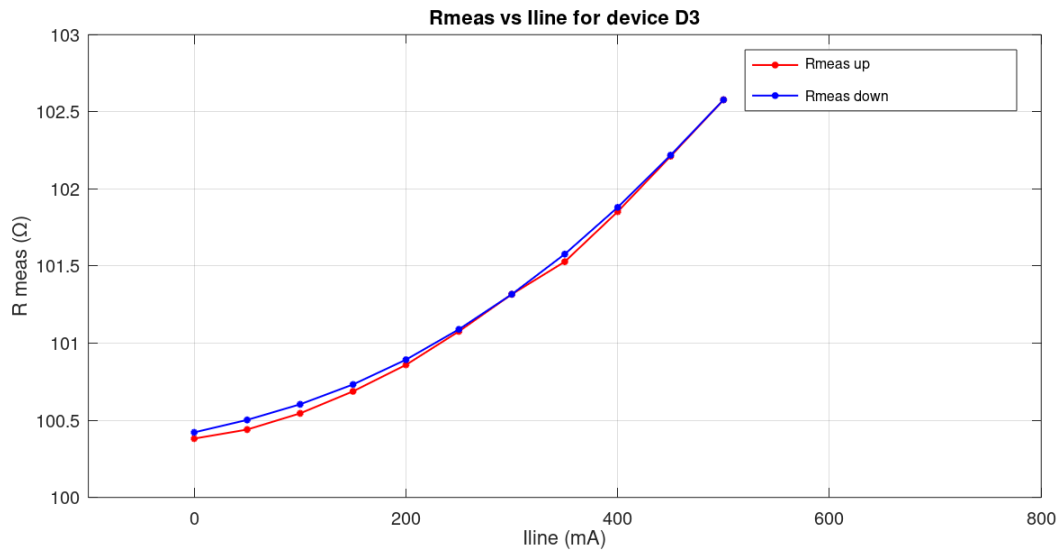
Επιλέχθηκε ένας αισθητήρας ενδιάμεσης ευαισθησίας ως μεταβατικό στάδιο μεταξύ του πιο ευαίσθητου D1 και των λιγότερο ευαίσθητων D5, D6. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς στο μέρος του σχεδιασμού, για μέγιστη μεταβολή της αντίστασης μαγνητικού υλικού ίση με 2% αναμένεται συνολική μεταβολή στην μετρούμενη αντίσταση ίση με 1,54%. Σε αντίθεση με προηγουμένως, η μέγιστη ένταση ρεύματος I_{line} που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα 500mA, καθώς για μεγαλύτερα ρεύματα αυξανόταν ο κίνδυνος τοπικού "καψίματος" στο σημείο επαφής της ακίδας του probe με το contact pad του αγωγού διέγερσης. Ο θετικός ακροδέκτης της πηγής ρεύματος επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στο αριστερό contact pad, στο οποίο και δημιουργούταν τα προαναφερθέντα τοπικά καψίματα.

Πίνακας 13: D3 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,500mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.

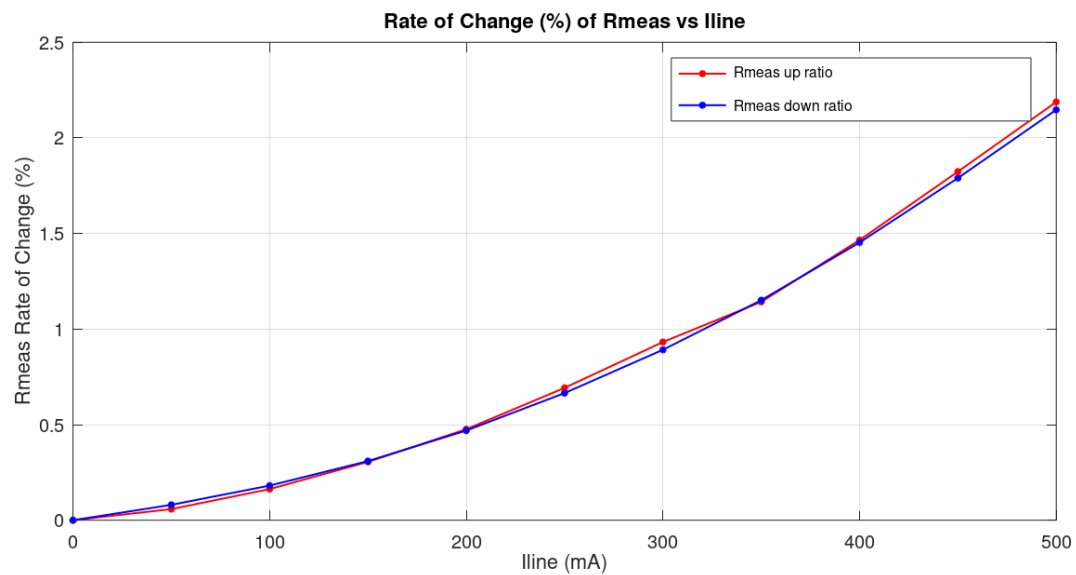
$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}i}}{R_{meas_{up}i-1}}(\%)$
0	9,962	100,3814495	0	0
50	9,9562	100,4399269	0,058255158	0,058255158
100	9,9458	100,5449536	0,162882825	0,104566752
150	9,9317	100,687697	0,305083722	0,141969653
200	9,9148	100,8593214	0,476055997	0,170452253
250	9,8935	101,0764643	0,692373781	0,215292869
300	9,87	101,3171226	0,932117528	0,238095238
350	9,8495	101,5279963	1,142189959	0,208132393
400	9,8181	101,8527006	1,465660362	0,31981748
450	9,7836	102,2118648	1,823459667	0,352630933
500	9,7487	102,5777796	2,187984039	0,357996451

Πίνακας 14: D3 Si, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,500mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.

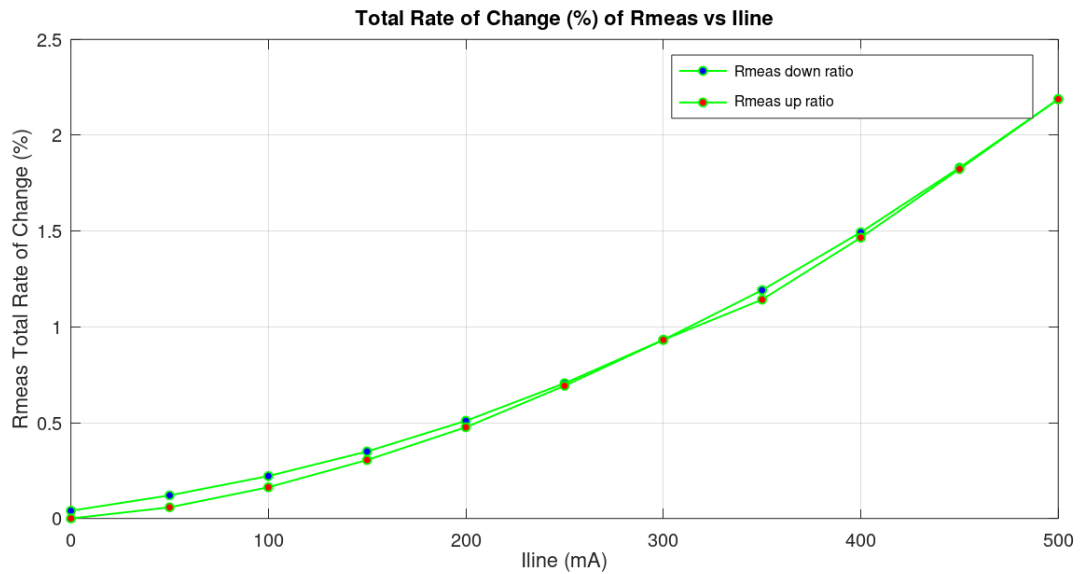
$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{down}}(mA)$	$R_{meas_{down}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{down}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{down}i}}{R_{meas_{down}i-1}}(\%)$
0	9,958	100,4217714	0	0
50	9,95	100,5025126	0,08040201	0,08040201
100	9,94	100,6036217	0,181086519	0,100603622
150	9,9273	100,732324	0,309248235	0,127930051
200	9,9115	100,8929022	0,469151995	0,159410785
250	9,8922	101,0897475	0,665170538	0,195103213
300	9,87	101,3171226	0,891590679	0,224924012
350	9,8447	101,5774986	1,150873059	0,256991071
400	9,8154	101,8807181	1,452819039	0,298510504
450	9,7829	102,2191784	1,789857813	0,33221233
500	9,7487	102,5777796	2,146952927	0,350816006



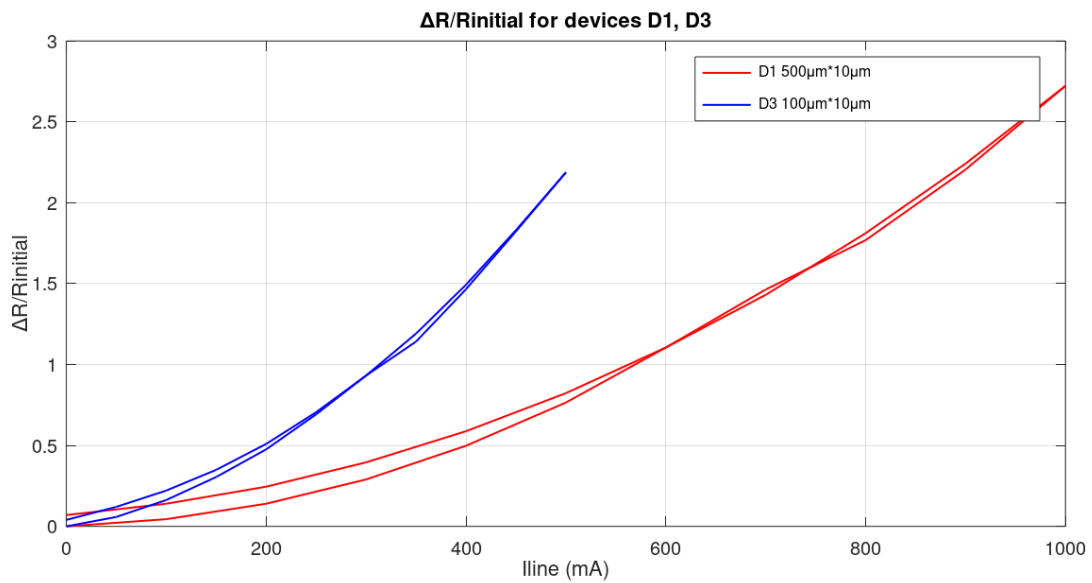
Εικόνα 63: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.



Εικόνα 64: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.



Εικόνα 65: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D3 Si.



Εικόνα 66: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για τα D1, D3 Si.

Για την ερμηνεία των παραπάνω αποτελεσμάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν:

- Η σχέση εξάρτησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου με την διατομή του λεπτού υμενίου του αγωγού διέγερσης από τον οποίο διέρχεται το ρεύμα.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από το ρεύμα διέγερσης και πως αυτή επηρεάζει τις μετρήσεις της αντίστασης του layer που βρίσκεται πάνω από τον αγωγό διέγερσης.

- Οι διαφορετικοί λόγοι $\frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}}$ των 2 διαφορετικών γεωμετριών (94,7% και 77,22% για το D1 και το D3 αντίστοιχα).

Στην περίπτωση του D3, η μικρότερη διατομή του αγωγού διέγερσης σε σχέση με αυτήν του D1 (100μm*100nm έναντι 500μm*100nm) έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ισχυρότερης έντασης μαγνητικού πεδίου για δεδομένη τιμή ρεύματος διέγερσης. Έτσι για δεδομένη τιμή του I_{line} είναι αναμενόμενη μεγαλύτερη ένταση του μαγνητικού πεδίου, άρα ισχυρότερη μαγνήτιση του μαγνητικού υλικού και άρα μεγαλύτερη μεταβολή της αντίστασης $R_{2magnetic}$.

Ωστόσο η μικρότερη διατομή ενός αγωγού ευνοεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών, το οποίο ερμηνεύεται μέσω του φαινομένου Joule, σύμφωνα με το οποίο η θερμότητα W που εκλύεται εξαιτίας της διέλευσης ρεύματος I από μία αντίσταση R είναι ίση με $W = I^2 R$. Αυτό επαληθεύεται στο υπό εξέταση παράδειγμα αφού $R_{excitation_{D1}} = 2\Omega$ ενώ $R_{excitation_{D3}} = 3,2\Omega$. Είναι επίσης γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνοδεύεται και από αύξηση της αντίστασης ενός μεταλλικού αγωγού, γεγονός το οποίο πρέπει να συνυπολογιστεί στην ερμηνεία της μέτρησης της αντίστασης R_{meas} αφού τα layers διέγερσης και μέτρησης χωρίζονται μεταξύ τους με 100nm SiO_2 , που δεν στοχεύουν στην θερμική μόνωση αλλά στην ηλεκτρική.

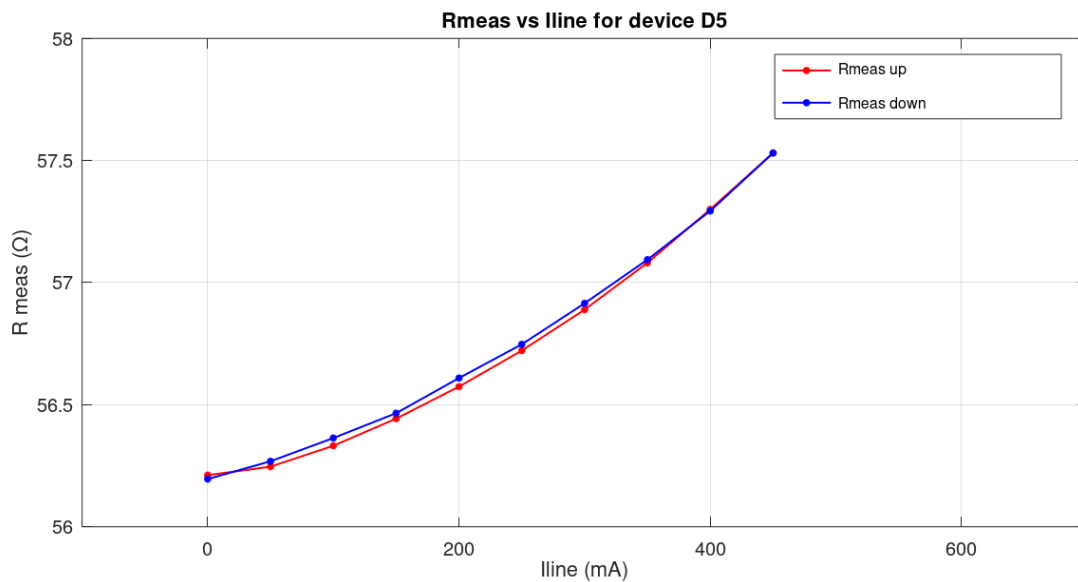
5.2.5 Χαρακτηρισμός του D5 (περιοχή ενδιαφέροντος 50μm*10μm)

Πίνακας 15: D5 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,450mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.

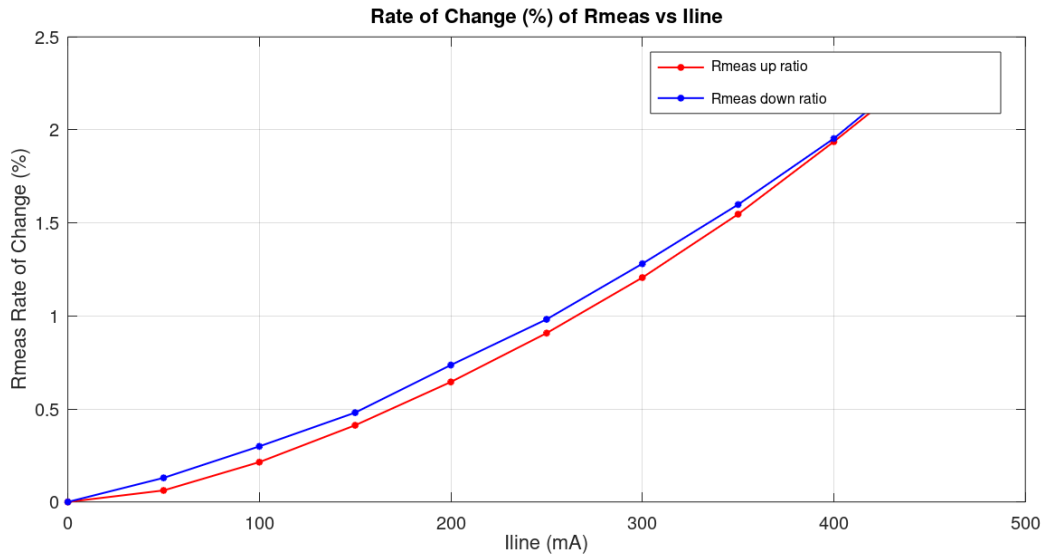
$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}} (\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}} (\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up_i}}}{R_{meas_{up_{i-1}}}} (\%)$
0	1,779	56,21135469	0	0
50	1,7779	56,24613308	0,061870746	0,061870746
100	1,7752	56,33168094	0,214060388	0,152095539
150	1,7717	56,44296438	0,41203364	0,197550375
200	1,7676	56,57388549	0,644942295	0,231952931
250	1,763	56,72149745	0,907543959	0,260918888
300	1,7578	56,88929343	1,206053021	0,295824326
350	1,7519	57,08088361	1,546891946	0,336777213
400	1,7452	57,30002292	1,936740775	0,383910154
450	1,7382	57,53077897	2,347255782	0,402715453

Πίνακας 16: D5 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,450mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.

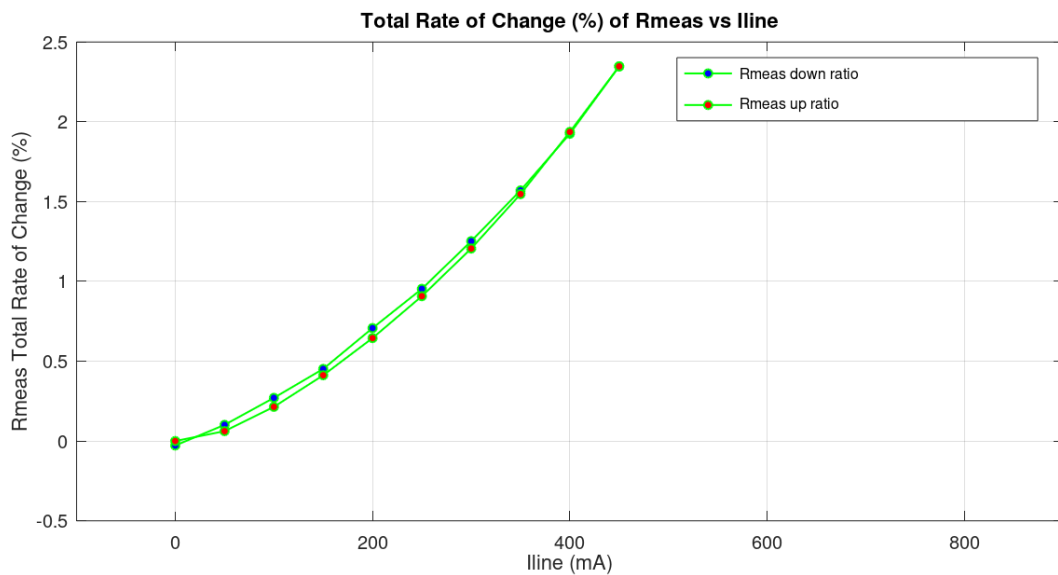
$I_{line}(mA)$	$I_{meas\,down}(mA)$	$R_{meas\,down}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas\,down}}{R_{meas\,initial}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas\,down\,i}}{R_{meas\,down\,i-1}}(\%)$
0	1,7795	56,19556055	0	0
50	1,7772	56,26828719	0,129417061	0,129417061
100	1,7742	56,36343141	0,298726186	0,169090294
150	1,771	56,46527386	0,479954828	0,180688876
200	1,7665	56,60911407	0,735918483	0,254741013
250	1,7622	56,74724776	0,981727386	0,244013165
300	1,757	56,91519636	1,280591918	0,295959021
350	1,7515	57,0939195	1,598629746	0,314016557
400	1,7454	57,29345709	1,953706887	0,349490088
450	1,7382	57,53077897	2,376021171	0,414221609



Εικόνα 67: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.



Εικόνα 68: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.



Εικόνα 69: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D5 Si.

5.2.6 Χαρακτηρισμός του D6 (περιοχή ενδιαφέροντος 10μm*10μm)

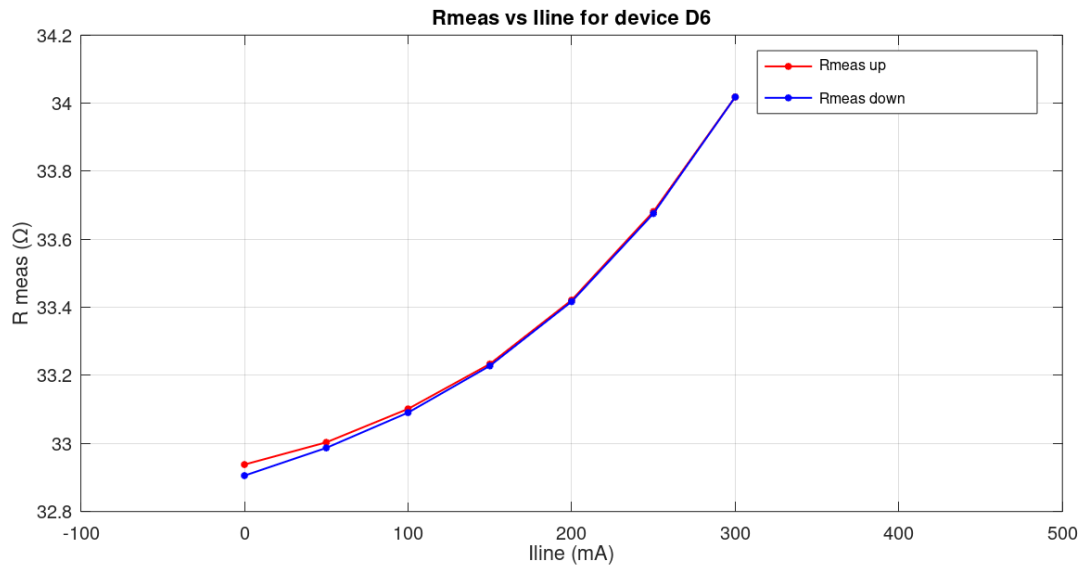
Πίνακας 17: D6 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.

$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up_i}}}{R_{meas_{up_{i-1}}}}(\%)$
0	3,036	32,93807642	0	0
50	3,03	33,00330033	0,198019802	0,198019802
100	3,021	33,10162198	0,49652433	0,297914598

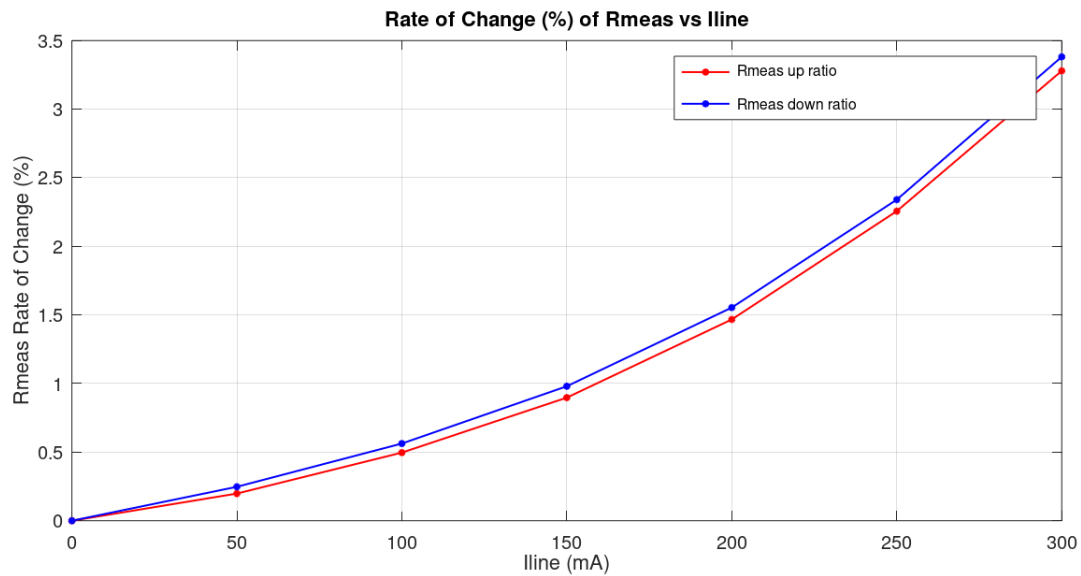
150	3,009	33,23363244	0,897308076	0,398803589
200	2,9921	33,42134287	1,467196952	0,564820694
250	2,969	33,6813742	2,256652071	0,778039744
300	2,9396	34,01823377	3,279357736	1,000136073

Πίνακας 18: D6 Si, Για $V_{meas} = 0,1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή μείωση ανά 50mA.

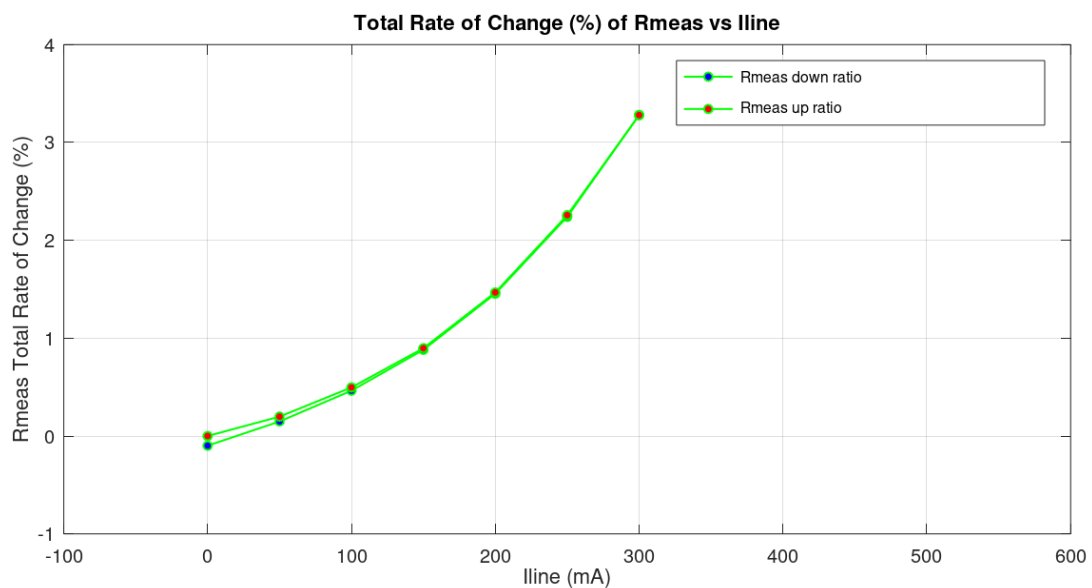
$I_{line}(mA)$	$I_{meas\,down}(mA)$	$R_{meas\,down}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas\,down}}{R_{meas\,initial}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas\,down\,i}}{R_{meas\,down\,i-1}}(\%)$
0	3,039	32,90556104	0	0
50	3,0315	32,98697015	0,247402276	0,247402276
100	3,022	33,09066843	0,562541363	0,31436135
150	3,0095	33,22811098	0,980229274	0,415351387
200	2,9925	33,41687552	1,553884712	0,568086884
250	2,9695	33,67570298	2,340461357	0,774541169
300	2,9396	34,01823377	3,381412437	1,01714519



Εικόνα 70: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθινουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.



Εικόνα 71: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων και φθίνουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.



Εικόνα 72: Ποσοστιαία μεταβολή R_{meas} ως προς την αρχική τιμή $R_{initial}$ συναρτήσει αυξανόμενων και φθίνουσών θετικών τιμών ρεύματος στο D6 Si.

Η μέγιστη μεταβολή της αντίστασης R_{meas} φτάνει έως και το 3,3% το οποίο φαίνεται να υποδεικνύει την επίδραση της θερμοκρασίας στις μετρήσεις του D6. Υπενθυμίζεται ότι ο λόγος $\frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}} = 25,14\%$. Άρα αν η μέγιστη μεταβολή του λόγου προερχόταν αποκλειστικά από την μαγνήτιση του permalloy και ήταν ίση με 3,3% προκύπτει ότι η αντίσταση $R_{2magnetic}$ θα έπρεπε να μεταβληθεί κατά $\frac{3,3}{25,14} *$

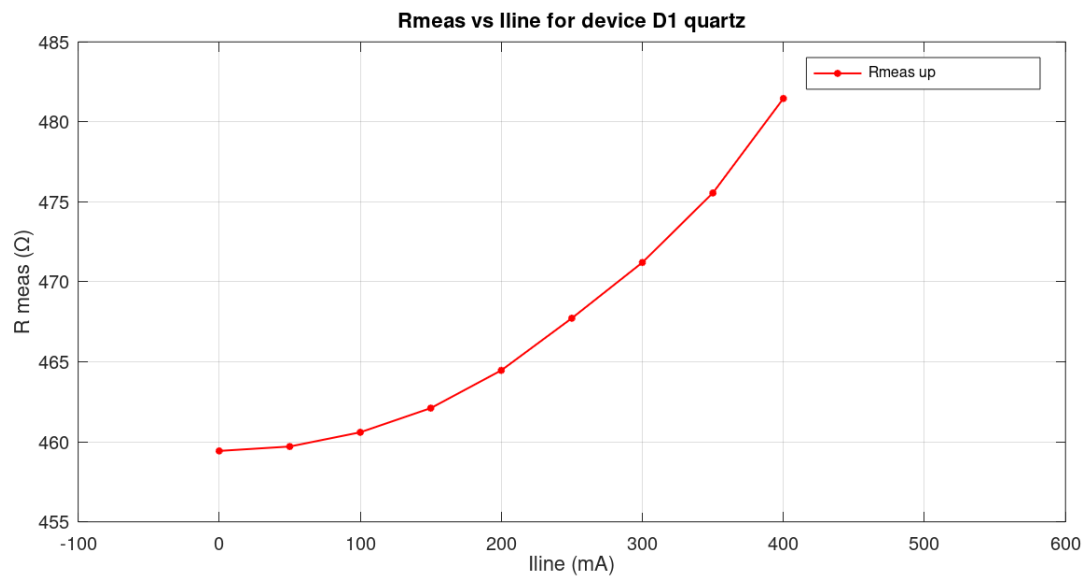
100% = 13,12%, ποσοστό μεταβολής πολύ μεγαλύτερο από αυτά που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία του permalloy.

5.3 Μετρήσεις στο wafer quartz

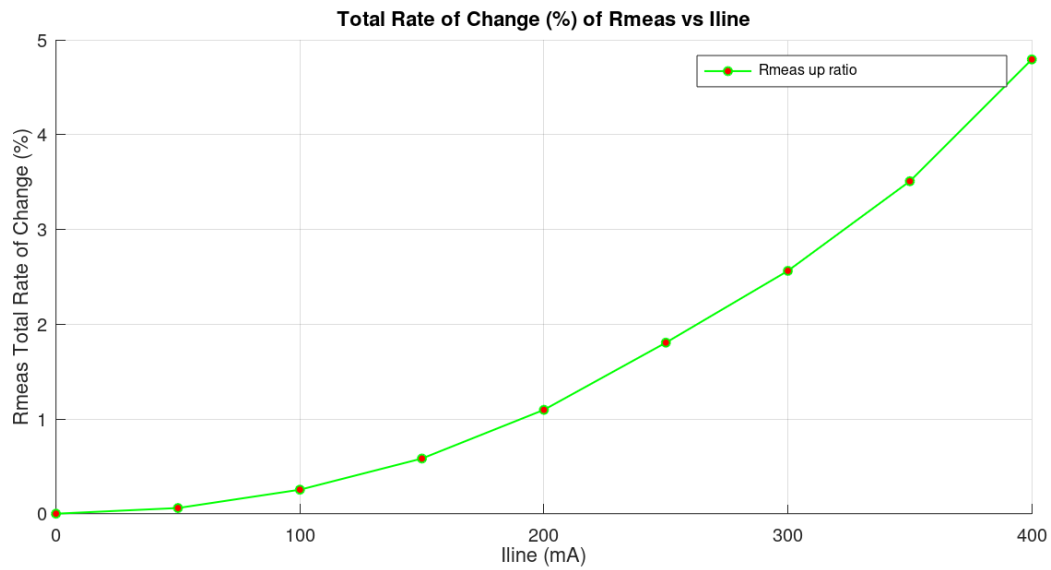
5.3.1 Χαρακτηρισμός του D1 (περιοχή ενδιαφέροντος 500μm*10μm)

Πίνακας 19: D1 quartz, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,400mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.

$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}}(\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}i}}{R_{meas_{up}j-1}}(\%)$
0	2,1766	459,4321419	0	0
50	2,1753	459,7067071	0,059761872	0,059761872
100	2,1711	460,5960112	0,253327806	0,193450325
150	2,164	462,1072089	0,582255083	0,328096118
200	2,153	464,4681839	1,096144914	0,510915002
250	2,138	467,7268475	1,805425631	0,701590271
300	2,1222	471,2091226	2,563377627	0,744510414
350	2,1028	475,556401	3,509606239	0,922579418
400	2,077	481,4636495	4,795377949	1,242176216



Εικόνα 73: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D1 quartz.

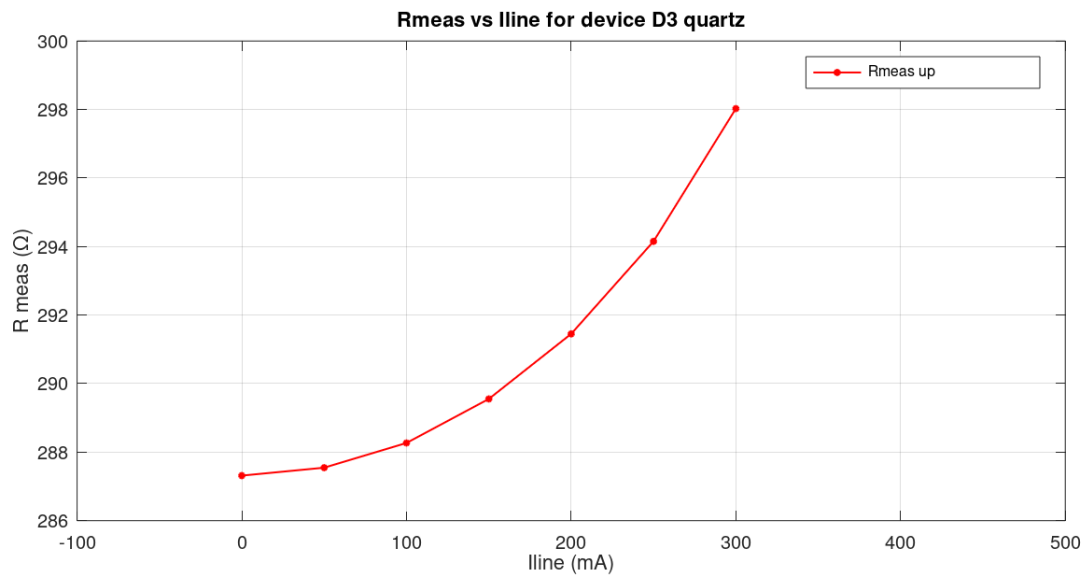


Εικόνα 74: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D1 quartz.

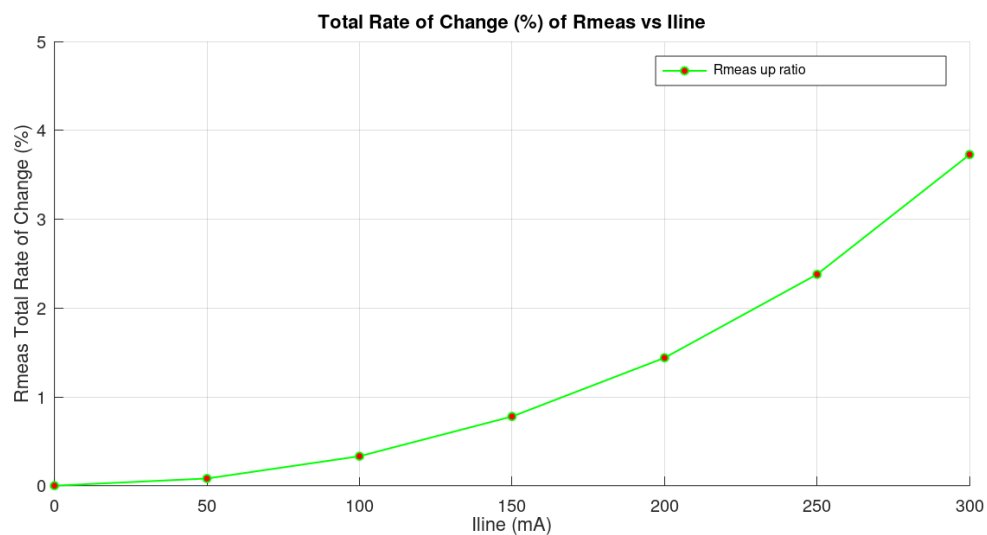
5.3.2 Χαρακτηρισμός του D3 (περιοχή ενδιαφέροντος 100μm*10μm)

Πίνακας 20: D3 quartz, Για $V_{meas} = 1V$, $I_{line} = [0,300mA]$ και σταδιακή αύξηση ανά 50mA.

$I_{line}(mA)$	$I_{meas_{up}}(mA)$	$R_{meas_{up}} (\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up}}}{R_{meas_{initial}}} (\%)$	$\frac{\Delta R_{meas_{up_i}}}{R_{meas_{up_{i-1}}}} (\%)$
0	3,4805	287,3150409	0	0
50	3,4777	287,5463669	0,080512983	0,080512983
100	3,469	288,2675123	0,331507639	0,250792736
150	3,4536	289,5529303	0,778897382	0,445911513
200	3,4311	291,451721	1,439771502	0,655766372
250	3,3996	294,1522532	2,379691728	0,926579598
300	3,3554	298,0270609	3,728318531	1,317279609



Εικόνα 75: Μετρούμενη αντίσταση R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D3 quartz.

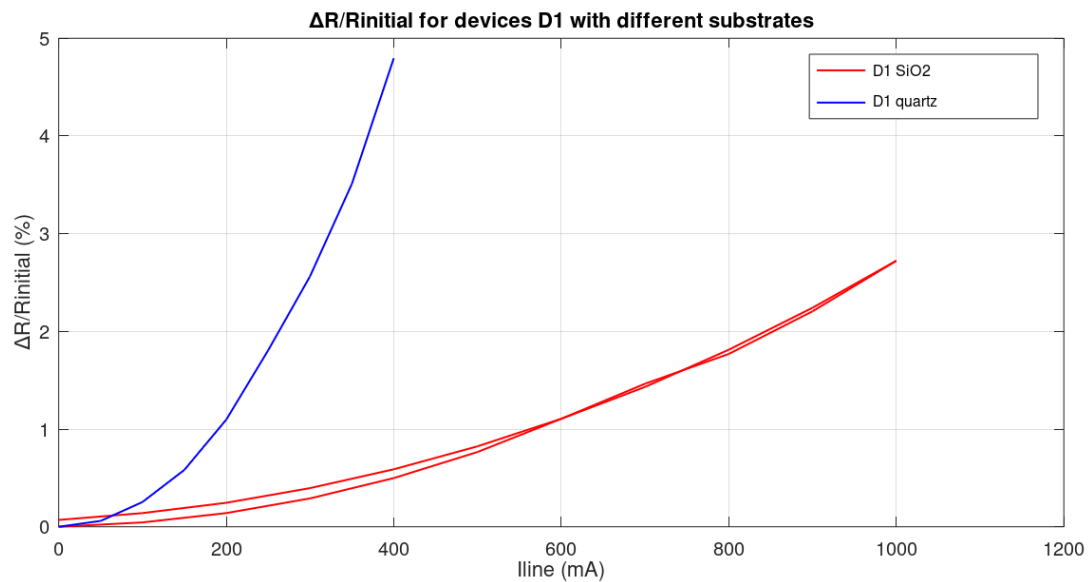


Εικόνα 76: Ποσοστιαία μεταβολή αντίστασης R_{meas} συναρτήσει αυξανόμενων θετικών τιμών ρεύματος στο D3 quartz.

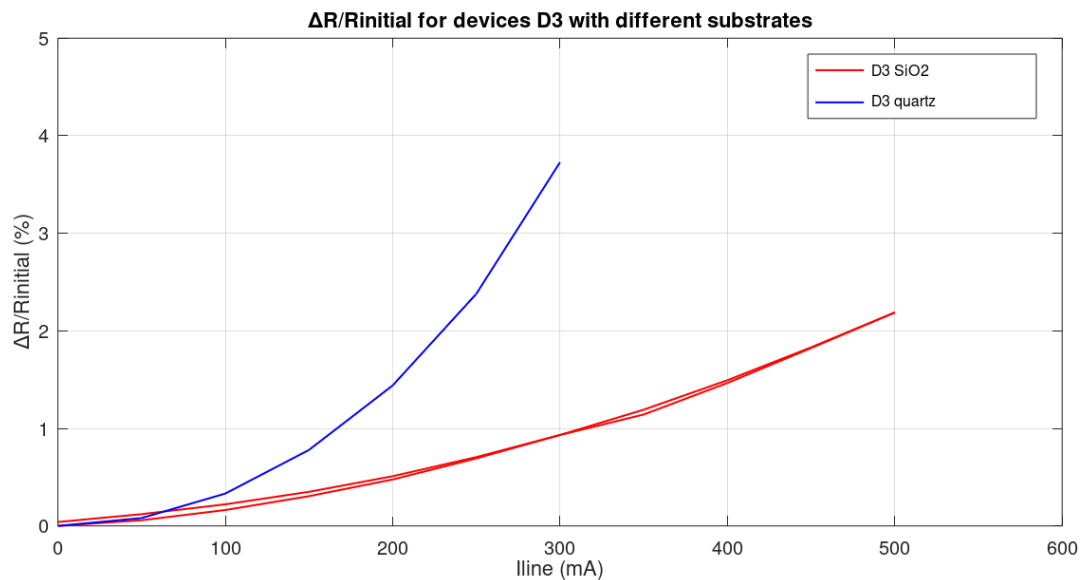
Στις παραπάνω μετρήσεις παρατηρήθηκε αργοπορία στην σταθεροποίηση του ρεύματος I_{meas} και άρα στην R_{meas} , κάτι το οποίο δεν συνέβη στις αντίστοιχες μετρήσεις του wafer πυριτίου. Επίσης η ποσοστιαία μεταβολή της μετρούμενης αντίστασης είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες μετρήσεις στα devices του wafer πυριτίου για τις ίδιες τιμές ρεύματος διέγερσης (και άρα την ίδια ένταση παραγόμενου πεδίου). Τα 2 παραπάνω δεδομένα φαίνεται να υποδεικνύουν την

εντονότερη επίδραση της θερμοκρασίας στην λήψη των μετρήσεων στα devices που βρίσκονται στο quartz σε σχέση με τα αντίστοιχα του πυριτίου.

5.4 Σύγκριση ίδιων devices σε διαφορετικά wafers



Εικόνα 77: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για devices τύπου D1 για τους 2 τύπους υποστρώματος.

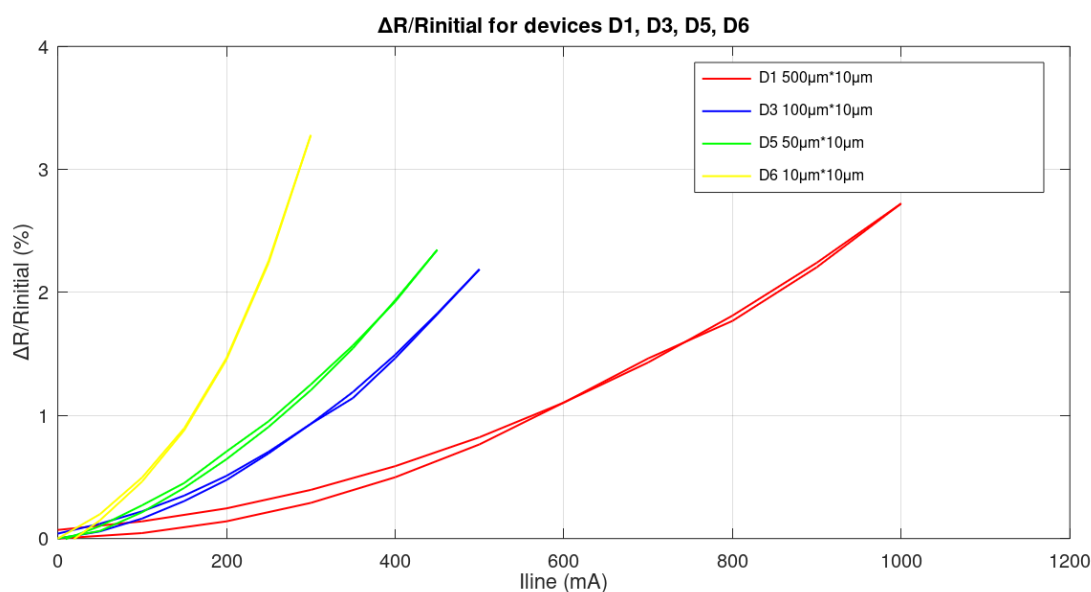


Εικόνα 78: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για devices τύπου D3 για τους 2 τύπους υποστρώματος.

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το γεγονός ότι το ίδιο device σε 2 διαφορετικά υποστρώματα για ίδια τιμή ρεύματος I_{line} και άρα για την ίδια ένταση πεδίου παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή φανερώνει την επιρροή της θερμοκρασίας στις μετρήσεις. Ο λόγος που στο υπόστρωμα quartz αναπτύσσεται μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει να κάνει με την χαμηλότερη θερμική του αγωγιμότητα του σε σχέση με το wafer πυριτίου με υπόστρωμα SiO_2 . Αυτή η αποτυχία του quartz αποδεικνύεται πολύτιμη καθώς επιβεβαιώνει την σημαντική συμβολή της θερμοκρασίας στην μετρούμενη αντίσταση, υπογραμμίζει μια εγγενή αδυναμία της γενικότερης διάταξης και την σημασία της σωστής επιλογής τύπου wafer.

Η διαφορά στα ποσοστά μεταβολής εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερη στο D1 quartz συγκριτικά με το D3 quartz και οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό αντίστασης μαγνητικού υλικού. Έτσι η ίδια διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή στην συνολική μετρούμενη αντίσταση στο D1 quartz. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται θα πρέπει να μελετηθούν με θερμική κάμερα, η οποία δεν ήταν άμεσα διαθέσιμη.

5.5 Σύγκριση devices στο wafer πυριτίου



Εικόνα 79: Σύγκριση των λόγων μεταβολής αντίστασης για τα D1, D3, D5, D6.

Πίνακας 21: Πίνακας Απαραίτητων μεγεθών για ερμηνεία ποσοστιαίων λόγων μεταβολής.

Device	Περιοχή ενδιαφέροντος	$\frac{R_{2magnetic}}{R_{meas}}$	$R_{excitation}(\Omega)$	$\max \frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}$	
D1	500μm*10μm	94,77%	2	$I_{line} = 1000mA$	2,72%
D3	100μm*10μm	77,22%	3,2	$I_{line} = 500mA$	2,18%
D5	50μm*10μm	62,77%	4	$I_{line} = 450mA$	2,34%
D6	10μm*10μm	25,14%	6,9	$I_{line} = 300mA$	3,28%

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε όλες τις παραπάνω μετρήσεις είναι υπαρκτός ο θερμοκρασιακός παράγοντας (βλέπε για D6) και η πρόκληση είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού της μεταβολής που προκαλεί. Προκύπτει το εύλογο ερώτημα αν το ποσοστά της μεταβολής της αντίστασης μπορεί να οφείλονται μόνο στην αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή η ένταση του μαγνητικού πεδίου να μην προκαλεί κάποιο ΔR_{AMR} .

Η διαφορά θερμοκρασίας ΔT που παρατηρείται στο επίπεδο μετρήσεων σχετίζεται με το ρεύμα διέγερσης I_{line} και τις απώλειες Joule του αγωγού διέγερσης που είναι ίση με $W_{heat} = I_{line}^2 R_{excitation}$. Θα γίνει η υπόθεση ότι ίσες απώλειες Joule οδηγούν σε παρόμοιο ΔT , ότι στο πυρίτιο λόγω της καλύτερης θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται μόνο το τμήμα που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον αγωγό διέγερσης, δηλαδή το μαγνητικό υλικό με σκοπό την απόδειξη ότι τα μετρούμενα ποσοστά δεν γίνεται να προέρχονται μόνο από την αύξηση θερμοκρασίας.

Για να αποδειχθεί αυτό πρέπει να γίνει **σύγκριση στιγμιότυπων μετρήσεων κατά τα οποία ανόμοια ρεύματα προκαλούν τις ίδιες απώλειες θερμότητας** στα 4 διαφορετικά devices.

Έστω το στιγμιότυπο όπου $I_{line_1} = 400mA$ στο D1 κατά το οποίο εκλύονται:

$$W_{heat} = 2 * (400mA)^2 = 320 * 10^{-3}J = 0,32J$$

Για τα υπόλοιπα 3 devices βρίσκεται η τιμή του ρεύματος για την οποία ισχύει:

$$I_{line_i} = \sqrt{\frac{W_{heat}}{R_{excitation_i}}}$$

Πίνακας 22: Στιγμιότυπο ίσων απωλειών Joule στα devices Si.

Device	Περιοχή ενδιαφέροντος	$I_{line}(mA)$	$R_{excitation}(\Omega)$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}$
D1	500μm*10μm	400	2	0,49%
D3	100μm*10μm	316	3,2	1%
D5	50μm*10μm	282	4	1,13%
D6	10μm*10μm	215	6,9	1,65%

Το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την αντίσταση $R_{2magnetic}$ οδηγεί στην εξής σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_{meas}(T)}{R_{0meas}} &= \frac{\Delta R_{2magnetic}}{R_{0meas}} = \frac{R_{2magnetic}(T) - R_{20magnetic}}{R_{0meas}} \\ &= \frac{R_{20magnetic}}{R_{0meas}} \alpha_{magnetic} \Delta T \end{aligned}$$

Όπου $\alpha_{magnetic}$: σταθερά θερμοκρασιακού παράγοντα και ΔT : η μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς την αρχική θερμοκρασία. Έτσι για κάθε device προκύπτει:

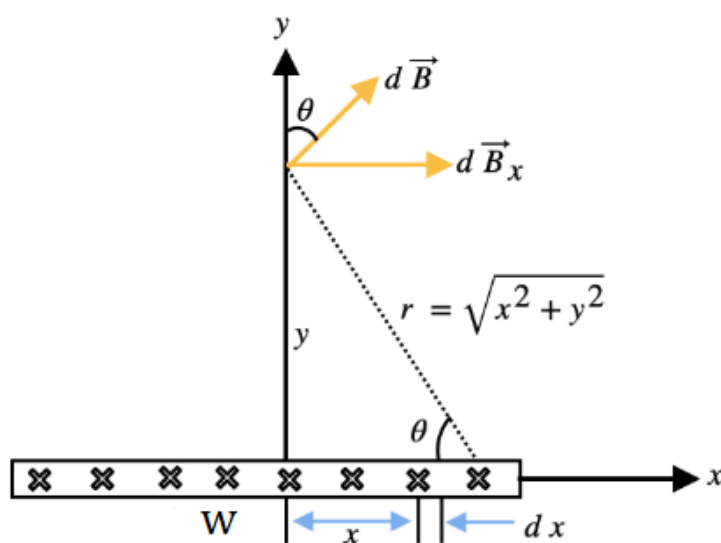
Πίνακας 23: Σχέσεις ποσοστιαίας μεταβολής λόγω εμφάνισης ΔT .

Device	$\frac{\Delta R_{meas}(T)}{R_{initial}}$	multiplier
D1	$0,95\alpha_{magnetic}\Delta T$	0
D3	$0,78\alpha_{magnetic}\Delta T$	$\times 0,82$
D5	$0,63\alpha_{magnetic}\Delta T$	$\times 0,8$
D6	$0,25\alpha_{magnetic}\Delta T$	$\times 0,4$

Οι παραπάνω σχέσεις υποδηλώνουν ότι για την ίδια διαφορά θερμοκρασίας ΔT είναι αναμενόμενες υποπολλαπλάσιες ποσοστιαίες μεταβολές του λόγου $\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}$, σύμφωνα με τον συντελεστή multiplier. Είναι προφανές ότι αυτό δεν συμβαίνει στο

επιλεγμένο στιγμιότυπο, αφού πχ εξετάζοντας τα D3, D5 με την πιο παρόμοια γεωμετρία ακόμα και αν η μεταβολή του D3 προέρχεται αποκλειστικά από την αύξηση της θερμοκρασίας, ισχύει ότι $1\% \times 0,8 = 0,8\% < 1,13\%$. Έτσι αποκλείεται οι παραπάνω μετρήσεις της ποσοστιαίας μεταβολής να οφείλονται αμιγώς στην αύξηση θερμοκρασίας. Παράλληλα, φαίνεται να επιβεβαιώνει την σχέση αναλογίας της παραγόμενης έντασης πεδίου με την χωρική πυκνότητα του ρεύματος διέγερσης. Ακολουθεί ανάλυση της έντασης πεδίου σε ένα λεπτό απέραντο αγωγίμο υμένιο αμελητέου πάχους.

Εφόσον το $W \in [10\mu m, 500\mu m]$, το thickness = 100nm σε όλα τα devices σημαίνει ότι το W είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερο του thickness και άρα το πάχος θα θεωρηθεί αμελητέο στην παρακάτω ανάλυση. Υπολογίζεται δηλαδή το μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από την διέλευση ρεύματος από ένα απέραντο ως προς z υμένιο αμελητέου πάχους.



Εικόνα 80: Μαγνητικό πεδίο απέραντου υμενίου αμελητέου πάχους, πλάτους W που διαρρέεται από συνολικό ρεύμα I.

Το dB προκύπτει ως επαλληλία πολλών ρευμάτων έντασης dI που διαρρέουν νοητά σύρματα αμελητέου πάχους. Κάθε ένα σύρμα προκαλεί πεδίο $dB = \frac{\mu dI}{2\pi r}$, σύμφωνα με τον γνωστό τύπο για απέραντο ευθύγραμμο λεπτό αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα I. Αν θεωρηθεί ότι το ρεύμα I είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο πλάτος W του αγωγού προκύπτει ότι $dI = \frac{I}{W} dx$. Άρα ισχύει ότι:

$$dBx = dB \sin \theta = \frac{\mu}{2\pi\sqrt{(x^2 + y^2)}} \times \frac{I}{W} \times \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx = \frac{\mu I y}{2\pi W (x^2 + y^2)} dx$$

$$Bx = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{\mu I y}{2\pi W (x^2 + y^2)} dx = \frac{\mu I}{\pi W} \arctan\left(\frac{W}{2y}\right)$$

Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται υπολογισμός της συνιστώσας y του πεδίου ως εξής:

$$By = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{\mu I x}{2\pi W (x^2 + y^2)} dx = \frac{\mu I}{\pi W} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \frac{x}{(x^2 + y^2)} dx = 0$$

Από τα παραπάνω ισχύει:

$$Hx = \frac{I}{\pi W} \arctan\left(\frac{W}{2y}\right)$$

Στις γεωμετρίες που έχουν σχεδιαστεί στην διπλωματική εργασία το W όπως προαναφέρθηκε $\in [10\mu m, 500\mu m]$, ενώ το y αφορά την απόσταση μεταξύ του μαγνητικού υλικού και του αγωγού διέγερσης, η οποία είναι ίση με το πάχος του διηλεκτρικού υλικού, δηλαδή $100nm$. Έτσι ο λόγος $\frac{W}{2y} \in [50, 2500]$ και άρα $\arctan\left(\frac{W}{2y}\right) \cong \frac{\pi}{2}$. Έτσι η ένταση του πεδίου στην συνιστώσα x είναι περίπου ίση με:

$$Hx = \frac{I}{\pi W} \left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{I}{2W}$$

Εκφράζεται η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του πλάτους W όταν αυτό είναι σταθερό και της έντασης του επαγόμενου πεδίου. **Επιπλέον, η σχέση αυτή επιβεβαιώνει την παρατήρηση που έγινε κατά τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των devices περί ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου για ίσο ρεύμα διέγερσης I_{line} και την ελάττωση της διατομής του αγωγού διέγερσης.**

Ωστόσο η παραπάνω σχέση αφορά λεπτό υμένιο απέραντου μήκους (εδώ το μήκος είναι $2000\mu m$) και σταθερό W , το οποίο ισχύει μόνο στο D1 όπου $W=500\mu m$. Έτσι δεν μπορεί να γίνει προσδιορισμός του H με αυτήν, αλλά φανερώνει την εξάρτηση του από την χωρική πυκνότητα του ρεύματος J (αν δεν θεωρηθεί αμελητέο το πάχος του υλικού) και όχι απλά από την ένταση του ρεύματος I_{line} . Η χωρική πυκνότητα J που δημιουργείται στην διατομή κάτω από την περιοχή ενδιαφέροντος είναι:

$$J_{line} = \frac{I_{line}}{A_{excitation}} = \frac{I_{line}}{W \times thickness}$$

Πίνακας 24: Υπολογισμός J_{line} στο σιγμιότυπο ίσων απωλειών Joule.

Device	Περιοχή ενδιαφέροντος	$I_{line}(mA)$	$J_{line}(\frac{mA}{\mu m^2})$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}$
D1	500 μm *10 μm	400	8	0,49%
D3	100 μm *10 μm	316	31,6	1%
D5	50 μm *10 μm	282	56,4	1,13%
D6	10 μm *10 μm	215	215	1,65%

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η σημαντική αύξηση της ποσοστιαίας μεταβολής οφείλεται στην αύξηση της χωρικής πυκνότητας του ρεύματος διέγερσης.

Έγινε αναζήτηση των σημείων λειτουργίας στα οποία έχει επιτευχθεί μεταβολή της αντίστασης μαγνητικού υλικού ίση με 2%, δηλαδή ίση με την αρχική υπόθεση του σταδίου του σχεδιασμού.

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας απαραίτητων μεγεθών για $\Delta R2_{magnetic} = 2\%R2_{magnetic}$.

Για $\Delta R2_{magnetic} = 2\%R2_{magnetic}$					
Device	Περιοχή ενδιαφέροντος	$I_{line}(mA)$	$J_{line}(\frac{mA}{\mu m^2})$	$\frac{\Delta R_{meas}}{R_{initial}}$	$W_{heat}(J)$
D1	500 μm *10 μm	830	16,6	1,9%	1,37
D3	100 μm *10 μm	400	40	1,56%	0,512
D5	50 μm *10 μm	315	63	1,26%	0,4
D6	10 μm *10 μm	110	110	0,5%	0,08

Διαπιστώνεται λοιπόν ότι εκτός από την χαμηλότερη ένταση απαιτούμενου ρεύματος διέγερσης, εκλύεται λιγότερη θερμότητα προς το υπόστρωμα και προς το επίπεδο μέτρησης αντίστασης.

6 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Η μετρούμενη αντίσταση στα devices που σχεδιάστηκαν εξαρτάται από την ένταση του πεδίου που δημιουργείται και από την διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται:

$$R_{meas} = R_{meas}(H, T)$$

Το γεγονός της διπλής αυτής εξάρτησης εισάγει την μεταβλητή της θερμοκρασίας σε κάθε μέτρηση, γεγονός μη καταστροφικό για την λειτουργία των αισθητήρων, αφού η αύξηση του ρεύματος διέγερσης I_{line} προκαλεί αύξηση και στην ένταση του πεδίου και στην θερμοκρασία. Η αύξηση τόσο του ενός όσο και του άλλου μεγέθους προκαλεί αύξηση και της μετρούμενης αντίστασης. Σε περίπτωση που ίσχυε το ανάποδο και η αύξηση της έντασης του πεδίου συνοδευόταν από μείωση της αντίστασης, θα ήταν πολύ δύσκολος, ίσως και ακατόρθωτος, ο προσδιορισμός της ωφέλιμης μεταβολής στην αντίσταση που προέρχεται από το πεδίο. Υπενθυμίζεται ότι κατά την αλληλεπίδραση με εξωτερικό πεδίο μαγνήτη η μετρούμενη αντίσταση ανέβηκε.

Την ύπαρξη της σχέσης εξάρτησης από το πεδίο $R_{meas}(H)$ την αποδεικνύουν 4 βασικές ενδείξεις. Η πρώτη ένδειξη αφορά την αύξηση της μετρούμενης αντίστασης υπό την παρουσία ενός μαγνήτη σε μεγάλη απόσταση αναφορικά με τις διαστάσεις του αισθητήρα, άνω του ενός εκατοστού. Η αύξηση της αντίστασης του D1 ήταν έως και 0,65% σε συγκριτικά μεγάλη απόσταση όπως προαναφέρθηκε. Η δεύτερη και πιο σημαντική ένδειξη προκύπτει από το πείραμα επιβεβαίωσης της χρησιμότητας του D1 ως αισθητήρα, κατά το οποίο η τοποθέτηση του σύρματος μαλακού μαγνητικού υλικού ακριβώς πάνω στον αισθητήρα προκάλεσε πτώση της αντίστασης κατά 1,35%. Η χρήση ρεύματος 900mA είχε ήδη προκαλέσει μια μεταβολή της αντίστασης ίση με 2,2%, από την οποία το 1,35% αφαιρέθηκε κατά την τοποθέτηση του μικροσύρματος. Αυτό υποδηλώνει ότι **το ποσοστό που οφείλεται στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερο από 1,35%** αφού αφενός η αντίστοιχη πτώση δεν μπορεί να σχετίζεται με την θερμοκρασία και αφετέρου η παρουσία του σύρματος αποκλείεται να αναιρεί πλήρως το μαγνητικά επιβαλλόμενο ΔR . Η τρίτη ένδειξη αφορά την μη επαναφορά της αντίστασης στην αρχική της τιμή μετά την ολοκλήρωση

ενός κύκλου αύξησης και μείωσης του ρεύματος διέγερσης. Αυτή η παρατήρηση φαίνεται να αποδεικνύει την υστερητική συμπεριφορά του permalloy και το γεγονός ότι η γωνία μεταξύ μαγνήτισης και ρεύματος μέτρησης δεν επιστρέφει στην αρχική της τιμή που είχε πριν από την έναρξη των μετρήσεων. Τέλος, η τέταρτη ένδειξη αφορά την αδυναμία ερμηνείας των ποσοστιαίων μεταβολών της αντίστασης αν αυτές οφειλόταν αποκλειστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο σχεδιασμός των δομών και της αλληλουχίας των διαδικασιών που εκτελέστηκαν αποδείχθηκε αρκετά αποτελεσματικός. Τα 13 βήματα του process κρίνονται ικανά για την κατασκευή δομών αντίστοιχων με αυτές της διπλωματικής εργασίας, αφού εξασφάλισαν την δομική ακεραιότητα των devices όπως την ηλεκτρική συνέχεια στο επίπεδο μέτρησης αντίστασης, την ηλεκτρική απομόνωση των δύο επιπέδων, την ελαχιστοποίηση των αντιστάσεων επαφής μαγνητικού υλικού – αλουμινίου και την διέλευση αρκετά μεγάλης έντασης ρεύμα.

Ωστόσο, όπως είναι λογικό προέκυψαν κάποια εμπόδια και πορίσματα τα οποία δεν είχαν προβλεφθεί από την φάση του σχεδιασμού. Το κυριότερο μειονέκτημα της γενικότερης γεωμετρίας είναι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την πόλωση του αισθητήρα, που έχει ως αποτέλεσμα την μη ωφέλιμη αύξηση της μετρούμενης αντίστασης. Αποδείχθηκε ότι **το wafer quartz δεν είναι το κατάλληλο υπόστρωμα** για την δημιουργία τέτοιου είδους αισθητήρων καθώς η χαμηλότερη θερμική του αγωγιμότητα σε σχέση με το πυρίτιο δεν επιτρέπει την αποτελεσματική διάχυση της θερμότητας, με συνέπεια την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο της διέγερσης και της λήψης σήματος. Για την μείωση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις μετρήσεις ίσως πρέπει να προτιμηθεί ένα μη-αγώγιμο υπόστρωμα με καλύτερη θερμική αγωγιμότητα (και όχι πολύ ακριβότερο) από του πυριτίου με SiO_2 πχ AlN με στόχο την καλύτερη διασπορά της θερμότητας. Επίσης μπορεί να γίνει αλλαγή του διηλεκτρικού υλικού SiO_2 που εξασφαλίζει την ηλεκτρική μόνωση των δύο layers με εναλλακτικό υλικό το οποίο θα εξασφαλίζει συγχρόνως και θερμική μόνωση.

Για την ολοκλήρωση της μελέτης του αισθητήρα χρειάζονται ακόμα αρκετές διαδικασίες. Η πρώτη ενέργεια που πρέπει να γίνει είναι **η κοπή των δισκιδίων** με στόχο την πρόσβαση σε κάθε ένα από τα έξι devices που υπάρχουν στο dye και την απαλλαγή από τους περιορισμούς της τωρινής διάταξης μετρήσεων του probe

station. Στην συνέχεια, πρέπει να σχεδιαστεί ένα κατάλληλο **housing** για τους αισθητήρες το οποίο θα πρέπει να τηρεί τις εξής προϋποθέσεις: πιθανότατα με silver paste να δίνει στον χρήστη πρόσβαση στις 4 επαφές κάθε device, το πάχος του που θα μεσολαβεί μεταξύ του device και του υπό εξέταση δοκιμίου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ο προσανατολισμός της σχισμής να είναι τέτοιος ώστε να ευνοεί την απομάκρυνση μαγνητικών γραμμών και τέλος η πίσω όψη του device να έρχεται σε απευθείας επαφή με επιφάνεια που θα απάγει καλά την θερμότητα, όπως έκανε το chuck του probe station. Απαραίτητος είναι επίσης ο πλήρης χαρακτηρισμός του μαγνητικού υλικού για τις ανάγκες του οποίου θα πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη διάταξη που θα παράγει ομοιόμορφο και σταθερής έντασης μαγνητικό πεδίο. Ταυτόχρονα με την εφαρμογή του πεδίου θα πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις της αντίστασης για τον ακριβή προσδιορισμό της σχέσης $R_{meas}(H)$. Πολύ σημαντικός είναι **ο προσδιορισμός του εύκολου άξονα μαγνήτισης** ο οποίος θα γίνει εξετάζοντας την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου η οποία προκαλεί την μεγαλύτερη αντίσταση $\max(R_{meas})$ για την χαμηλότερη ένταση πεδίου.

Έχοντας χαρακτηρίσει πλήρως ηλεκτρικά τα devices, θα πρέπει να εξεταστεί η χρησιμότητα τους και ως αισθητήρες μαγνητικής διαπερατότητας. Η σάρωση επιφανειών φερρομαγνητικών υλικών συνιστάται να γίνει σε δοκίμια γνωστής τιμής μαγνητικής διαπερατότητας. Σε αυτή την φάση θα πρέπει να μετρηθεί το ΔR_{meas} συναρτήσει των μ των υλικών, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και στην συνέχεια μια καλή ιδέα θα ήταν η πρόκληση κάποιας ατέλειας στο υλικό πχ με τοπική θέρμανση με χρήση δινορρευμάτων και η επανάληψη της μέτρησης. Όλες αυτές οι μετρήσεις θα πρέπει μελλοντικά να αντιστοιχηθούν και σε σημειακές μετρήσεις εναπομενουσών τάσεων του υλικού σύμφωνα με την καμπύλη MASC. Τέλος, η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου κυκλώματος ενίσχυσης της τάσης εξόδου του αισθητήρα χρειάζεται για την ολοκλήρωση αυτού του μεγάλου εγχειρήματος.

7 Βιβλιογραφία

- [1] E. Hristoforou, "Multi-layer thin film stress sensor for non-destructive testing of ferromagnetic materials," U.S. Patent 62/536,499, filed July 25, 2017.
- [2] H. W. F. Sung and C. Rudowicz, "Physics behind the magnetic hysteresis loop—a survey of misconceptions in magnetism literature," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 260, no. 1–2, pp. 250–260, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0304-8853(02)01339-2.
- [3] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to magnetic materials, Second edition. Piscataway: IEEE Press, 2009. doi: 10.1002/9780470386323.
- [4] J. C. Mallinson, *Magnetoresistive Heads: Physical Phenomena*. Elsevier, 2002. ISBN: 0-08-0431526.
- [5] P. Ripka, Ed., Magnetic sensors and magnetometers, Second edition. Norwood, MA: Artech House, 2021.
- [6] S. Tumanski, Handbook of Magnetic Measurements, 0 ed. CRC Press, 2016. doi: 10.1201/b10979.
- [7] P. A. Zezyulina *et al.*, "Effect of Perpendicular Anisotropy and Eddy Currents on the Microwave Performance of Single-Layer and Multi-Layer Permalloy Films," *IEEE Magn. Lett.*, vol. 7, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/LMAG.2016.2597230.
- [8] J. Lenz and S. Edelstein, "Magnetic sensors and their applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 631–649, Jun. 2006, doi: 10.1109/JSEN.2006.874493.
- [9] E. Mangiorou *et al.*, "Revisiting the universality law in magnetically detected residual stresses in steels," *AIP Adv.*, vol. 14, no. 2, p. 025126, Feb. 2024, doi: 10.1063/9.0000766.
- [10] G. M. Unniachanparambil, R. Rane, and S. V. Kulkarni, "Influence of compressive stress on the magnetic characteristics of grain-oriented material under non-sinusoidal excitation," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 590, p. 171148, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171148.

[11] J. Chopra, "Analysis of Lithography Based Approaches in Development of Semiconductors," *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 61–72, Dec. 2014, doi: 10.5121/ijcsit.2014.6604.

[12] Τσαλαμέγκας Ι. and Ρουμελιώτης Ι., ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα, vol. Τόμος Α'.

[13] Τσαλαμέγκας Ι. and Ρουμελιώτης Ι., ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα, vol. Τόμος Β'.

[14] S. Hannusch, E. Peretzki, K. Schich, T. Lehmann, and J. Ihlemann, "Strain measurements with fibre Bragg grating sensors under inhomogeneous deformations," 2021, doi: 10.21935/TLS.V3I1.138.

[15] S. Zurek, Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation, 1st ed. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2017.: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/b22374.

[16] K. G. N. B. Abeywickrama, T. Daszczyński, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, "Determination of Complex Permeability of Silicon Steel for Use in High-Frequency Modeling of Power Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 4, pp. 438–444, Apr. 2008, doi: 10.1109/TMAG.2007.914857.

[17] J. M. D. Coey, Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge University Press, 2010. ISBN: 978-0521816144.

[18] S. Borodulina, A. Kulachenko, M. Nygård, and S. Galland, "Stress-strain curve of paper revisited," *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, vol. 27, no. 2, pp. 318–328, May 2012, doi: 10.3183/npprj-2012-27-02-p318-328.

[19] E. Hristoforou, "Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. R15–R47, Feb. 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/2/201.

[20] E. Hristoforou, A. Ktena, P. Vourna, and K. Argiris, "Dependence of magnetic permeability on residual stresses in alloyed steels," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 4, p. 047201, Apr. 2018, doi: 10.1063/1.4994202.

- [21] M. Vázquez, Ed., *Magnetic Nano- and Microwires: Design, Synthesis, Properties and Applications*. Woodhead Publishing, 2015. ISBN: 978-0081001646.
- [22] J. W. Gardner, *Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021. ISBN: 978-960-7219-93-0.
- [23] "Basics of Data Squeeze," Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania. [Online]. Available: <https://www.physics.upenn.edu/~heiney/datasqueeze/basics.html>.
- [24] "Lithography Process Overview," iMicroMaterials. [Online]. Available: <https://imicromaterials.com/technical/lithography-process-overview>.
- [25] "Bragg's Law," DoITPoMS, University of Cambridge. [Online]. Available: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/xray-diffraction-2/bragg_law.php.
- [26] R. Jenkins and R. L. Snyder, *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1996 ISBN: 978-0-471-51339-3.