



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Κατασκευή και χαρακτηρισμός μικρογεννητριών για τη συλλογή  
της μηχανικής ενέργειας του περιβάλλοντος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Μπόσιος

**Επιβλέπων Καθηγητής ΣΗΜΜΥ:**

Δημήτρης Τσαμάκης

**Επιβλέπουσα Ερευνήτρια ΕΚΕΦΕ "Δ":**

Ελένη Μακαρώνα

Αθήνα, Ιούλιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Κατασκευή και χαρακτηρισμός μικρογεννητριών για τη συλλογή  
της μηχανικής ενέργειας του περιβάλλοντος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Μπόσιος

**Επιβλέπων Καθηγητής ΣΗΜΜΥ:** Δημήτρης Τσαμάκης

**Επιβλέπουσα Ερευνήτρια ΕΚΕΦΕ “Δ”:** Ελένη Μακαρώνα

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Ιουλίου 2016

.....  
Δημήτρης Τσαμάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ελένη Μακαρώνα  
Εντεταλμένη Ερευνήτρια,  
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος

.....  
Ιωάννης Ξανθάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Γεώργιος Κ. Μπόσιος

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

Copyright © Μπόσιος Κ. Γεώργιος, Αθήνα 2016

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός μικρογεννητριών πυριτίου υλοποιημένες με τεχνολογίες μικροηλεκτρομηχανικής (MEMS) για τη συλλογή μηχανικής ενέργειας από το περιβάλλον. Ο σκοπός των συλλεκτών ενέργειας είναι η μετέπειτα ολοκλήρωσή τους σε ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος, καθιστώντας τα έτσι ενεργειακά αυτόνομα. Στο πλαίσιο της εργασίας κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι μικρογεννητριών. Ο πρώτος τύπος αποτελείται από μία πρόβολο πυριτίου με μάζα αδράνειας από πυρίτιο και ένα πιεζοηλεκτρικό υμένιο ZnO κατά μήκος της προβόλου. Ο δεύτερος τύπος μικρογεννητριών κατασκευάστηκε πάνω σε δισκίο πυριτίου και αποτελείται από λεπτή μεμβράνη πυριτίου με μάζα αδράνειας από πυρίτιο και πιεζοηλεκτρικό υμένιο ZnO στη μία πλευρά της μεμβράνης. Οι φυσικές συχνότητες ταλάντωσης των μικρογεννητριών προσομοιώθηκαν, αλλά και προσδιορίστηκαν πειραματικά με διάφορες μεθόδους διέγερσης σε ιδιοκατασκευές που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των μικρογεννητριών με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

**Λέξεις Κλειδιά:** Συλλογή ενέργειας, Μικρογεννήτριες, MEMS, Οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), Ακουστική διέγερση



## Abstract

This thesis presents the fabrication and characterization of Si-based microgenerators realized with conventional microelectromechanical (MEMS) processes and used for harvesting ambient mechanical energy from the environment. The purpose of energy harvesters is to be integrated into low power electronic circuits in order to render them energetically autonomous. During this thesis, two different types of microgenerators were fabricated and studied. The first type consists of a silicon cantilever, a silicon proof mass and a ZnO piezoelectric layer deposited along the cantilever's length. The second type of microgenerators consists of a thin silicon membrane, a silicon proof mass and a ZnO piezoelectric layer on the top side of the membrane. The natural frequencies of the microgenerators were simulated as well as determined with the use of a custom-built setup employing various types of mechanical stimulation. Finally, the electrical characterization of the microgenerators was conducted in order to assess their performance.

**Keywords:** Energy harvesting, Microgenerators, MEMS, Zinc oxide (ZnO), Acoustic excitation





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας (INN) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών “Δημόκριτος”. Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσά μου, Δρ. Ελένη Μακαρώνα, Εντεταλμένη Ερευνήτρια του INN.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας Καθηγητή Δημήτριο Τσαμάκη, καθώς και τον Καθηγητή Ι. Ξανθάκη για τις χρήσιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις τους.

Παράλληλα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Διευθυντή Ερευνών του INN Δρ. Χρήστο Τσάμη για τις καίριες υποδείξεις του τόσο κατά την πορεία της εργασίας, όσο και κατά το τελικό στάδιο της συγγραφής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους τεχνικούς του ερευνητικού ινστιτούτου για την πολύτιμη βοήθειά τους στην κατασκευή των μικρογεννητριών, καθώς και για την προθυμία τους να επιλύσουν απορίες που παρουσιάζονταν κατά την υλοποίηση της εργασίας.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ .....	17
1.1 Εισαγωγή .....	17
1.2 Μέσα αποθήκευσης ενέργειας .....	18
1.2.1 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας .....	18
1.2.2 Αρχή λειτουργίας ηλεκτροχημικού πυκνωτή .....	20
1.2.3 Σύγκριση των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας .....	20
1.3 Μετάδοση ισχύος .....	21
1.4 Συλλογή μηχανικής ενέργειας από το περιβάλλον .....	23
1.4.1 Ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες .....	24
1.4.2 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες .....	25
1.4.3 Πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες .....	26
1.4.4 Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες .....	27
1.4.5 Σύγκριση των γεννητριών .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΙΕΖΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	31
2.1 Εισαγωγή .....	31
2.2 Τανυστές και ελαστικότητα υλικών .....	31
2.2.1 Ο τανυστής τάσης (stress tensor) .....	31
2.2.2 Ο τανυστής παραμόρφωσης (strain tensor) .....	32
2.2.3 Ελαστικότητα .....	33
2.3 Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου .....	35
2.3.1 Εκτροπή αιωρούμενης προβόλου .....	35
2.3.2 Φυσική συχνότητα ταλάντωσης αιωρούμενης προβόλου .....	36
2.4 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο .....	41
2.4.1 Βασικές εξισώσεις .....	42
2.5 Κρυσταλλική δομή ZnO .....	43
2.5.1 Τεχνικές ανάπτυξης και εναπόθεσης ZnO .....	45
2.5.2. Πιεζοηλεκτρισμός σε νανοδομές .....	46
2.6 Μικροηλεκτρομηχανικοί (MEMS) πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου .....	47
2.7 Σύνθετοι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας .....	51

2.8 Σύνοψη .....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	53
3.1 Εισαγωγή .....	53
3.2 Διαδικασίες κατασκευής μικρογεννητριών .....	53
3.2.1 Θερμική οξείδωση .....	53
3.2.2 LPCVD - Εναπόθεση νιτριδίου του πυριτίου .....	54
3.2.3 Λιθογραφία.....	55
3.2.4 Ξηρή εγχάραξη με πλάσμα.....	56
3.2.5 Ανισοτροπική εγχάραξη KOH .....	57
3.2.6 Θερμική εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron beam evaporation).....	58
3.2.7 Τεχνική Ιοντοβολής (Sputtering).....	59
3.3 Πιεζογεννήτριες μεμβρανών με μάζα αδράνειας .....	60
3.3.1 Καθαρισμός υποστρώματος και προστασία από τις περαιτέρω διαδικασίες ....	62
3.3.2 Σχηματοποίηση μάζας αδράνειας .....	62
3.3.3 Εναπόθεση ηλεκτροδίων για την κατασκευή μεταλλικών επαφών .....	62
3.3.4 Εναπόθεση πιεζοηλεκτρικού υλικού .....	64
3.3.5 Βαθμονόμηση υγρής εγχάραξης KOH.....	64
3.4 Διαδικασία κατασκευής πιεζογεννητριών με αιωρούμενη πρόβολο .....	68
3.5 Προσομοίωση μικρογεννητριών με το πρόγραμμα Comsol.....	70
3.5.1 Αιωρούμενη πρόβολος με μάζα αδράνειας.....	70
3.5.2 Μεμβράνες με μάζα αδράνειας .....	72
3.6 Σύνοψη .....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	76
4.1 Εισαγωγή .....	76
4.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	76
4.2.1 Οπτική ανίχνευση .....	77
4.2.2 Οπτική διάταξη .....	78
4.2.3 Διέγερση μικρογεννητριών .....	80
4.3 Μηχανικός χαρακτηρισμός μικρογεννητριών τύπου αιωρούμενης προβόλου .....	80
4.3.1 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης το ηχείο .....	80
4.3.2 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης τους υπερήχους .....	83
4.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μικρογεννητριών τύπου αιωρούμενης προβόλου .....	86
4.5 Μηχανικός χαρακτηρισμός μεμβρανών με μάζα αδράνειας .....	89

4.5.1 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης το ηχείο .....	89
4.5.2 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης τους υπερήχους .....	91
4.6 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μεμβρανών με μάζα αδράνειας .....	94
4.7 Συμπεράσματα.....	99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	100

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση μπαταρίας με φορτίο .....	18
Εικόνα 1.2: Είδη αποφόρτισης μπαταρίας.....	19
Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροχημικού πυκνωτή.....	20
Εικόνα 1.4: Αποφόρτιση πυκνωτή .....	20
Εικόνα 1.5: Γράφημα Ragone για τη σύγκριση μέσων αποθήκευσης ενέργειας.....	21
Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας .....	25
Εικόνα 1.7: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροστατικής γεννήτριας .....	26
Εικόνα 1.8: Σχηματική απεικόνιση πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας .....	27
Εικόνα 1.9: Οι 4 θεμελιώδεις λειτουργίες των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών: (a) λειτουργία κάθετης επαφής - διαχωρισμού, (b) λειτουργία πλευρικής ολίσθησης, (c) λειτουργία μονού ηλεκτροδίου, (d) λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων...	28
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των συντελεστών του τανυστή τάσης σε έναν κύβο .....	32
Εικόνα 2.2: Βοηθητικά σχήματα για την επεξήγηση του τανυστή παραμόρφωσης.....	32
Εικόνα 2.3: Εκτροπή προβόλου υπό την επίδραση φορτίου στην άκρη .....	35
Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση διμορφικής προβόλου με και χωρίς μάζα αδράνειας .....	40
Εικόνα 2.5: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε κρύσταλλο χαλαζία.....	41
Εικόνα 2.6: Οι τρεις κρυσταλλικές δομές του ZnO: (a) rocksalt (κυβική συμμετρία), (b) Zinc blende (κυβική συμμετρία) και (c) wurtzite (εξαγωνική συμμετρία).....	44
Εικόνα 2.7: Δομή wurtzite του ZnO και οι παράμετροι πλέγματος a,c .....	44
Εικόνα 2.8: Διάγραμμα που δείχνει τη σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρισμού, της φωτονικής διέγερσης και των ημιαγωγών, καθώς και πιθανές εφαρμογές του κλάδου. ....	47
Εικόνα 2.9: Φωτογραφίες συλλέκτη ενέργειας από SEM: (a) μπροστά πλευρά, (b) πίσω πλευρά.....	48
Εικόνα 2.10: Σχέδιο συλλέκτη ενέργειας .....	48
Εικόνα 2.11: Κατασκευασμένες γεννήτριες .....	48

Εικόνα 2.12: 3D μοντέλο πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας - ZnO .....	49
Εικόνα 2.13: Σχηματική απεικόνιση των 2 συσκευών και φωτογραφία μετά την κατασκευή τους.....	50
Εικόνα 2.14: (a) Σχηματική απεικόνιση συλλέκτης ενέργειας, (b) Κατασκευασμένη γεννήτρια .....	51
Εικόνα 2.15: Μικρογεννήτρια με 5 προβόλους και κοινή μάζα αδράνειας .....	52
Εικόνα 3.1: Επιμέρους βήματα σε μια αντίδραση E.X.A.....	55
Εικόνα 3.2: Στάδια λιθογραφίας .....	56
Εικόνα 3.3: Παραγωγή ιόντος από πρόσκρουση .....	57
Εικόνα 3.4: Αρχή της εκκένωσης αερίων.....	57
Εικόνα 3.5: Ανισοτροπική εγχάραξη σε πυρίτιο προσανατολισμού <100>.....	58
Εικόνα 3.6: Αρχή λειτουργίας εξάχνωσης e-beam .....	59
Εικόνα 3.7: Διάταξη DC sputtering .....	60
Εικόνα 3.8: Μάσκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μεμβρανών .....	62
Εικόνα 3.9: Επιμέρους στάδια για τη δημιουργία του πάνω ηλεκτροδίου .....	63
Εικόνα 3.10: Υδατόλουτρο που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία του growth.....	64
Εικόνα 3.11: Σχηματική απεικόνιση θήκης .....	65
Εικόνα 3.12: Θήκη στήριξης - προστασίας δισκίου .....	65
Εικόνα 3.13 Θερμαντική εστία με δυνατότητα μαγνητικής ανάδευσης .....	66
Εικόνα 3.14: Θερμοστάτης .....	66
Εικόνα 3.15: Απεικόνιση γωνιών δείγματος από το οπτικό μικροσκόπιο. ....	66
Εικόνα 3.16: Όργανο μέτρησης του προφίλ επιφανειών (Profilometer) .....	67
Εικόνα 3.17: Βάθος εγχάραξης σε σχέση με το χρόνο .....	68
Εικόνα 3.18: Roughness δείγματος χρόνου εγχάραξης 120 min.....	68
Εικόνα 3.19: Μάσκα ξηρής εγχάραξης.....	69
Εικόνα 3.20: Αριθμός στοιχείων πλέγματος σε σχέση με την 1 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα.....	72
Εικόνα 3.21: Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου για την 1 <sup>η</sup> και 2 <sup>η</sup> συχνότητα.....	72
Εικόνα 3.22: Ταλάντωση μεμβράνης για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> mode.....	74
Εικόνα 3.23: Μεταβολή συχνοτήτων με το πάχος της μεμβράνης .....	74
Εικόνα 3.24: Συχνότητα μεμβρανών συναρτήσει της μάζας αδράνειας .....	75
Εικόνα 4.1: Μετρητική διάταξη .....	77
Εικόνα 4.2: Βασική αρχή λειτουργίας συμβολόμετρου .....	78
Εικόνα 4.3: Βασική αρχή λειτουργίας διάταξης μέτρησης ανακλώμενης δέσμης .....	78
Εικόνα 4.4: Οπτική διάταξη μέτρησης .....	79

Εικόνα 4.5: Σήματα εξόδου PSD (κίτρινο-πράσινο) και διαφορικό σήμα (μωβ) σε ηρεμία.....	80
Εικόνα 4.6: Σήματα εξόδου PSD και διαφορικό σήμα σε συνθήκες συντονισμού .....	80
Εικόνα 4.7: Απόκριση μικρογεννήτριας σε διαφορετικές ισχύς (μεγέθυνση στη 2 <sup>η</sup> συχνότητα) .....	81
Εικόνα 4.8: Απόκριση συχνοτήτων δύο διαφορετικών device.....	82
Εικόνα 4.9: Περιοχή 50-400 των Device A2-B4.....	82
Εικόνα 4.10: Σύγκριση μετρήσεων στον πάγκο με το πάτωμα (Device B4).....	83
Εικόνα 4.11: Σύγκριση των 2 διαφορετικών μεθόδων διέγερσης (Device B4) .....	83
Εικόνα 4.12: Διάταξη μέτρησης σε συνθήκες κενού .....	84
Εικόνα 4.13: Μανόμετρο .....	84
Εικόνα 4.14: Μείωση πίεσης σε σχέση με το χρόνο .....	85
Εικόνα 4.15: Απόκριση μικρογεννήτριας (Device B4) σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης.....	85
Εικόνα 4.16: Μικρογεννήτρια πάνω σε PCB.....	86
Εικόνα 4.17: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στους υπερήχους .....	87
Εικόνα 4.18: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στο ηχείο .....	88
Εικόνα 4.19: Μεμβράνη κολλημένη σε DIP.....	89
Εικόνα 4.20: Επίδραση της απόστασης του ηχείου στο πλάτος της ταλάντωσης .....	90
Εικόνα 4.21: Απόκριση μεμβράνης $d_{mem}=22\mu m$ .....	90
Εικόνα 4.22: Απόκριση μεμβράνης $d_{mem}=17\mu m$ .....	90
Εικόνα 4.23: Απόκριση μεμβράνης $d_{mem}=15\mu m$ .....	91
Εικόνα 4.24: Σύγκριση διέγερσης ηχείου-υπερήχων για μεμβράνη $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$ .....	92
Εικόνα 4.25: Απόκριση μεμβράνης $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$ στους US .....	92
Εικόνα 4.26: Απόκριση μεμβράνης $d_{mem}=20 \pm 3\mu m$ σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης.....	93
Εικόνα 4.27: Μεταβολή των συχνοτήτων με την πίεση, $d_{mem}=20 \pm 3\mu m$ .....	93
Εικόνα 4.28: Ενεργειακό διάκενο πριν και αμέσως μετά την επαφή του μετάλλου με τον ημιαγωγό .....	95
Εικόνα 4.29: Επαφή των ακίδων του prober με τους ακροδέκτες της γεννήτριας.....	96
Εικόνα 4.30: Διάταξη ηλεκτρικού χαρακτηρισμού (Prober-Παλμογράφος-Γεννήτρια) .....	96
Εικόνα 4.32: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στο ηχείο.....	97
Εικόνα 4.31: α) Πιεζογεννήτρια σε υπόστρωμα Karton με ZnO, κατασκευασμένη με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες όπως στις μικρογεννήτριες πυριτίου και β) τάση εξόδου της πιεζογεννήτριας σαν αποτέλεσμα μηχανικής παραμόρφωσης.....	98

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Παραδείγματα εκμεταλλεύσιμης ενέργειας.....	24
Πίνακας 1.2: Μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα κάθε τύπου γεννήτριας .....	29
Πίνακας 1.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μηχανισμών συλλογής κινητικής ενέργειας .....	30
Πίνακας 2.1: Σταθερές για την ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου .....	39
Πίνακας 3.1: Συνοπτική περιγραφή διαδικασίας παραγωγής μεμβρανών .....	61
Πίνακας 3.2: Ρυθμίσεις Profilometer .....	66
Πίνακας 3.3: Μέτρηση Profilometer – Βάθος εγχάραξης .....	67
Πίνακας 3.4: Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής γεννητριών με πρόβολο .....	70
Πίνακας 3.5: Τιμές μεταβλητών αναλυτικού μοντέλου και προσομοίωσης .....	71
Πίνακας 3.6: Σύγκριση ποιότητας πλέγματος (meshing) αιωρούμενης προβόλου .....	71
Πίνακας 3.7: Σύγκριση προσομοίωσης με αναλυτική λύση .....	72
Πίνακας 3.8: Σύγκριση ποιότητας πλέγματος (meshing) μεμβράνης.....	73
Πίνακας 3.9: Παράμετροι προγράμματος προσομοίωσης .....	73
Πίνακας 4.1: Συχνότητες ταλάντωσης μεμβρανών με πηγή διέγερσης τα ηχεία .....	91



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Η συλλογή ενέργειας (energy harvesting) είναι η μετατροπή της περιρρέουσας ενέργειας του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια<sup>1</sup>. Έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, αλλά σε τελείως διαφορετική κλίμακα. Ενώ η παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα μετριέται με MW ισχύος, η συλλογή ενέργειας βρίσκεται στην κλίμακα των  $\mu\text{W}$  ή  $\text{mW}$ , δηλαδή συστήματα με πολύ μικρότερη δυνατότητα παραγωγής ισχύος. Η εξέλιξη των συστημάτων συλλογής ενέργειας οδηγείται από τη ραγδαία ανάπτυξη των αυτόνομων, ασύρματων, ηλεκτρονικών συστημάτων. Ένα κλασσικό παράδειγμα τέτοιων συστημάτων αποτελούν οι κόμβοι ασύρματων αισθητήρων, όπου ο μεγάλος συνδυασμός αυτών δημιουργεί ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάθε κόμβος του δικτύου αποτελείται συνήθως από έναν ή περισσότερους αισθητήρες, ένα ραδιοπομποδέκτη με κεραία, ένα μικροελεγκτή, ένα κύκλωμα για τη σύνδεση με τους αισθητήρες και μία πηγή ενέργειας. Εφόσον το σύστημα είναι εξ ορισμού ασύρματο χωρίς τη δυνατότητα σύνδεσης σε πηγή ενέργειας, η απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία του πρέπει να παρέχεται τοπικά. Συνήθως αυτή η ενέργεια παρέχεται από μία μπαταρία που αποτελεί μία βολική και χαμηλού κόστους λύση. Παρ' όλα αυτά, οι μπαταρίες παρέχουν μία περιορισμένη ποσότητα ενέργειας και απαιτούν περιοδική αλλαγή ή επαναφόρτιση. Οι ανώτερου τύπου μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Λιθίου μπορούν να παρέχουν μέχρι και  $800 \text{ Wh/l}$  (watt hours per litre). Αν μια ηλεκτρονική συσκευή με μια μπαταρία όγκου  $1\text{cm}^3$  κατανάλωνε κατά μέσο όρο  $100\mu\text{W}$ , η διάρκεια ζωής της συσκευής θα ήταν 8000 ώρες ή 333 μέρες, δηλαδή περίπου 1 χρόνο. Βέβαια, η περίπτωση αυτή αποτελεί ένα αισιόδοξο σενάριο αφού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ολική χωρητικότητα εξαιτίας της πτώσης τάσης καθώς και ο όγκος ενός ασύρματου κόμβου δεν θα ξεπερνάει το  $1\text{cm}^3$  με αποτέλεσμα η μπαταρία να καταλαμβάνει τον περισσότερο χώρο. Τέλος η αντικατάσταση των μπαταριών προϋποθέτει την εύκολη πρόσβαση στο ασύρματο σύστημα, γεγονός που μπορεί να μην είναι εφικτό ή μπορεί να έχει αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων

τροφοδοσίας αυτών των συσκευών. Υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού:

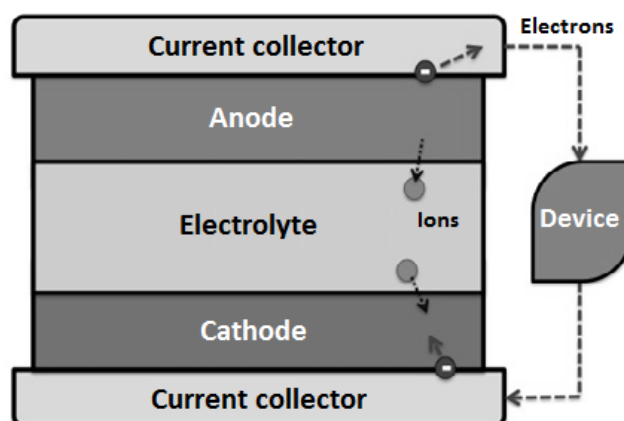
- 1) Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής πυκνότητας των αποθηκευτικών μέσων
- 2) Ανάπτυξη νέων μεθόδων διανομής ισχύος στους κόμβους του συστήματος
- 3) Ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέπουν τη συλλογή ενέργειας τοπικά στον κόμβο

## 1.2 Μέσα αποθήκευσης ενέργειας

Οι βασικότερες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των αυτονόμων ασύρματων αισθητήρων είναι οι μπαταρίες και οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές<sup>2</sup>.

### 1.2.1 Αρχή λειτουργίας μπαταρίας

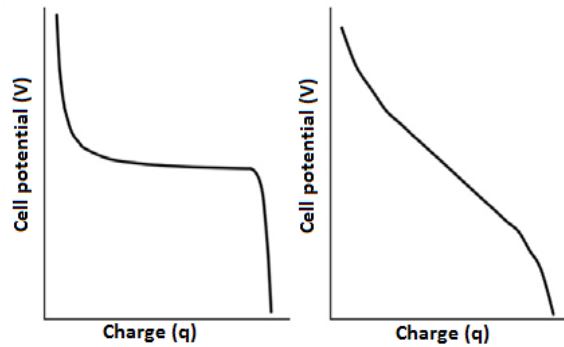
Οι μπαταρίες είναι γαλβανικά στοιχεία στα οποία η χημική ενέργεια από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αξιοποιηθεί εξωτερικά. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ηλεκτρολυτικού συνδέσμου που επιτρέπει τη μετακίνηση των ιόντων των διαλυμάτων, χωρίς όμως να αναμιγνύονται. Σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, αναπτύσσεται μια ηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εξαιτίας των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν. Με τη σύνδεση ενός φορτίου στα άκρα, συνεχίζουν να πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις και τα ιόντα ταξιδεύουν κατά μήκος του ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση μπαταρίας με φορτίο

Μία αυθόρμητη ροή ηλεκτρονίων προκύπτει στο εξωτερικό κύκλωμα, από το ηλεκτρόδιο με το πιο αρνητικό δυναμικό προς το ηλεκτρόδιο με το πιο θετικό, με αποτέλεσμα να

τροφοδοτείται το φορτίο, π.χ. μια συσκευή (Εικόνα 1.1). Αν η μπαταρία είναι επαναφορτιζόμενη, συμβαίνουν οι αντίθετες αντιδράσεις έχοντας εισαγωγή ενέργειας αντί για φορτίο. Ανάλογα με τις αντιδράσεις που συμβαίνουν, η αποφόρτιση της μπαταρίας διαφέρει (Εικόνα 1.2), οδηγώντας σε διαφορετικές τάσεις εξόδου (V), σχετικά πάντα με το φορτίο (q) που αφαιρείται από την μπαταρία.



Εικόνα 1.2: Είδη αποφόρτισης μπαταρίας

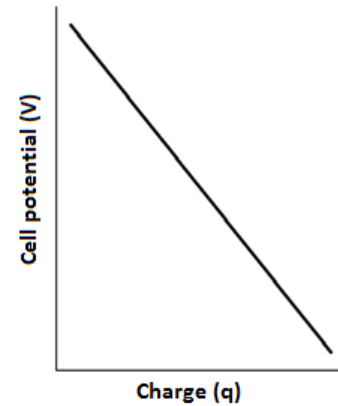
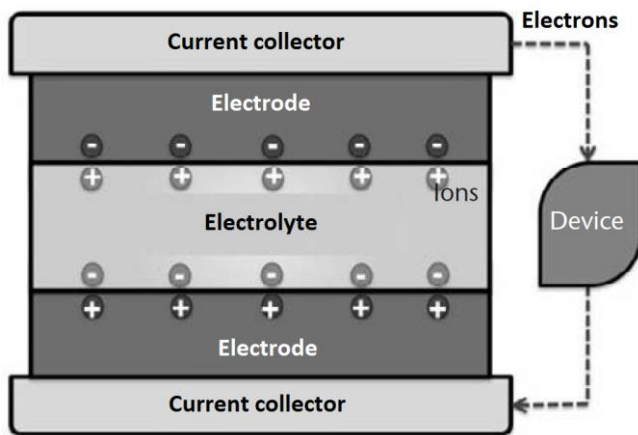
Από τη μεταξύ τους σχέση μπορεί να καθοριστεί η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να ληφθεί από την μπαταρία ως εξής

$$E = \int Vdq \quad (1.1)$$

Η μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι συνήθως το joule (J) ή η watt-hour (Wh). Το συνολικό ποσό του φορτίου που μπορεί να εξαχθεί από την μπαταρία, ή πόσο μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό της, είναι γνωστό ως χωρητικότητα και η μονάδα μέτρησης είναι το αμπερώριο (Ah) ή το κουλόμπ (C). Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παρέχει η μπαταρία μετριέται σε watt (W) και εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνουν οι εσωτερικές αντιδράσεις ή οι διεπιφανειακές αντιστάσεις. Επίσης μπορεί να χαρακτηριστεί η ενεργειακή συμπεριφορά της μπαταρίας από το ρυθμό απόδοσής της, υπολογίζοντας το χρόνο (σε ώρες) που χρειάζεται για την πλήρη αποφόρτισή της. Για παράδειγμα αν μια μπαταρία χρειάζεται 10 ώρες για να αποφορτιστεί τελείως, τότε ο ρυθμός αποφόρτισης είναι C/10, ενώ μια αποφόρτιση 2C σημαίνει ότι η μπαταρία εξαντλήθηκε σε μισή ώρα. Η χημική σύσταση της μπαταρίας ως επίσης και τα υπόλοιπα στοιχεία της θα καθορίσουν την τάση λειτουργίας της και την συνολική ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει. Επιπλέον, άλλα μεγέθη που χαρακτηρίζουν μία μπαταρία είναι η διάρκεια ζωής της (ή για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οι κύκλοι φόρτισης), η ασφάλεια και το κόστος της.

### 1.2.2 Αρχή λειτουργίας ηλεκτροχημικού πυκνωτή

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές, που συχνά αναφέρονται ως υπερπυκνωτές (supercapacitors), αποτελούν έναν πρακτικό τρόπο αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Έχουν παρόμοια κατασκευή με τις μπαταρίες, αλλά είναι συνήθως συμμετρικοί, έχοντας δύο ηλεκτρόδια άνθρακα. Με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του πυκνωτή, τα ιόντα του ηλεκτρολύτη διαχωρίζονται και μετακινούνται προς τις αντίθετα φορτισμένες επιφάνειες των ηλεκτροδίων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροχημικού πυκνωτή Εικόνα 1.4: Αποφόρτιση πυκνωτή

Επειδή ο μηχανισμός της αποθήκευσης ενέργειας είναι καθαρά ηλεκτροστατικός, η τάση του πυκνωτή μεταβάλλεται γραμμικά με το αποθηκευμένο φορτίο (Εικόνα 1.4). Η χωρητικότητα του πυκνωτή (C), με μονάδα μέτρησης το farad (F), προκύπτει από την ακόλουθη σχέση

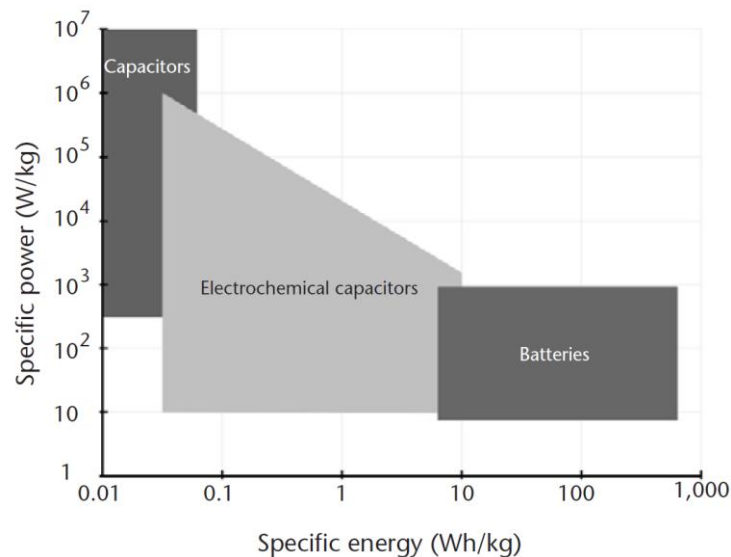
$$C = \frac{q}{V} \quad (1.2)$$

Εξαιτίας της έλλειψης αντιδράσεων οξειδοαναγωγής (όπως στις μπαταρίες) δεν συμβαίνουν, θεωρητικά, μη αντιστρέψιμα φαινόμενα κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Επομένως, οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές θα μπορούσαν να λειτουργούν επ' αόριστον, ενώ συχνά έχουν παρουσιαστεί στην πράξη κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης πάνω από 1 εκατομμύριο φορές.

### 1.2.3 Σύγκριση των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας

Η πυκνότητα της ενέργειας και της ισχύος για συγκεκριμένες συσκευές αποθήκευσης συνοψίζονται στο γράφημα Ragone της Εικόνας 1.5. Παρ' ότι η απόδοση της κάθε συσκευής έχει κανονικοποιηθεί ως προς το βάρος, τα διαγράμματα της κάθε συσκευής είναι αρκετά

συνεπή όταν κανονικοποιούνται ως προς τον όγκο. Η σχετική ενέργεια των μπαταριών είναι από μία μέχρι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτροχημικών πυκνωτών, οι οποίοι περιέχουν ενέργεια μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των κεραμικών ή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Για την πυκνότητα ισχύος όμως, συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Οι κεραμικοί και οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, ακολουθούμενοι από τους ηλεκτροχημικούς και τέλος τις μπαταρίες.



Εικόνα 1.5: Γράφημα Ragone για τη σύγκριση μέσω αποθήκευσης ενέργειας

### 1.3 Μετάδοση ισχύος

Εκτός από την αποθήκευση ενέργειας σε έναν ασύρματο κόμβο, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να μεταδοθεί ισχύς στον κόμβο από μία κοντινή πηγή ενέργειας<sup>3</sup>. Είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί η αποδοτικότητα των μεθόδων μετάδοσης, χρησιμοποιώντας σαν κριτήρια την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις η ισχύς που λαμβάνει ο κόμβος είναι περισσότερο συνάρτηση του πόση ισχύ μεταφέρεται παρά του μεγέθους του δέκτη (κεραία) του κόμβου.

Η πιο κοινή μέθοδος, εκτός των καλωδίων, μετάδοσης ισχύος σε ενσωματωμένα ηλεκτρονικά είναι μέσω τη χρήσης RF (Radio Frequency) ακτινοβολίας. Πολλές παθητικές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως η ηλεκτρονική κάρτα (eID), τροφοδοτούνται μέσω μίας κοντινής πηγής ενέργειας, όπου μεταδίδει RF ενέργεια στην παθητική συσκευή. Η συσκευή με τη σειρά της, χρησιμοποιεί την ενέργεια που έλαβε για να τροφοδοτήσει τα ηλεκτρονικά στοιχεία της. Η λύση αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά, εφόσον υπάρχει ένας ανιχνευτής υψηλής ισχύος ή άλλη

πηγή σε πολύ κοντινή απόσταση από την ασύρματη συσκευή. Από την άλλη μεριά, είναι λιγότερο αποδοτική στις περιπτώσεις δικτύων ad-hoc, καθώς μια μεγάλη περιοχή πρέπει να υποβληθεί σε RF ακτινοβολία προκειμένου να τροφοδοτηθούν όλοι οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας ένα πολύ απλό μοντέλο και αμελώντας τις πιθανές αντανάκλασεις του χώρου ή τις ενδεχόμενες παρεμβολές, η ισχύς που λαμβάνει ένας ασύρματος κόμβος δίνεται από τη σχέση 1.3.

$$P_r = \frac{P_0 \lambda^2}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

όπου  $P_0$  είναι η μεταδιδόμενη ισχύς,  $\lambda$  το μήκος κύματος του σήματος και  $R$  η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Ας υποθέσουμε ότι η μέγιστη απόσταση του πομπού από οποιονδήποτε κόμβο είναι 5 μέτρα και η ισχύς που μεταδίδεται βρίσκεται στο εύρος συχνοτήτων 2.4-2.485 GHz. Οι κανονισμοί περιορίζουν την ισχύ που μεταδίδεται από τους πομπούς, σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, σε 1 watt ή λιγότερο. Με αυτές τις παραμέτρους η ισχύς που λαμβάνει ένας κόμβος σε απόσταση 5 μέτρων είναι 50μW, η οποία είναι πιθανώς στα όρια του να είναι πραγματικά χρήσιμη. Επίσης, σε εσωτερικό περιβάλλον η ισχύς θα μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από  $1/R^2$ , με ένα πιο πιθανό νούμερο να είναι το  $1/R^4$ . Τέλος, προκειμένου να τροφοδοτηθεί ένα πυκνό δίκτυο ασύρματων συσκευών, ο χώρος θα πρέπει να κατακλυστεί από RF ακτινοβολία, γεγονός που σημαίνει ότι θα παραβιαστούν ορισμένοι περιορισμοί ασφαλείας.

Άλλοι τρόποι μετάδοσης ισχύος σε ασύρματους κόμβους περιλαμβάνουν ηχητικούς εκπομπούς, καλώδια και φως ή ακτίνες laser. Η διανομή ενέργειας μέσω καλωδίων μπορεί να είναι αποδοτική σε ορισμένες περιπτώσεις. Για παράδειγμα κατά το σχεδιασμό ενός "smart home", μπορούν να συμπεριληφθούν στα σχέδια και η καλωδίωση για τους αισθητήρες που θα βρίσκονται στο χώρο. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι αισθητήρες τοποθετούνται σε έναν ήδη υπάρχον χώρο και η επικοινωνία γίνεται ασύρματα. Η ενέργεια των ακουστικών κυμάτων έχει πολύ μικρότερη πυκνότητα ισχύος από αυτή που απαιτείται συνήθως. Ένα ηχητικό κύμα των 100dB έχει ισχύ μόνο 0.96μW/cm<sup>2</sup>. Η χρήση laser ή κάποιας άλλης εστιασμένης πηγής φωτός θα αποτελούσε επιλογή για την τροφοδότηση του κάθε κόμβου. Όμως για να επιτευχθεί αυτό ελεγχόμενα, η διανομή φωτεινής ενέργειας θα έπρεπε να γίνεται απευθείας σε κάθε κόμβο, πράγμα εξαιρετικά πολύπλοκο και αρκετά ακριβό. Μόνο άμα ο χώρος που υπάρχουν οι αισθητήρες είναι ήδη αρκετά φωτεινός, τότε αυτός ο τρόπος μετάδοσης αποκτά νόημα.

## 1.4 Συλλογή μηχανικής ενέργειας από το περιβάλλον

Με τη μετατροπή της ενέργειας που υπάρχει στο περιβάλλον, ο συλλέκτης ενέργειας μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ για όλη τη διάρκεια ζωής του ασύρματου συστήματος, το οποίο είναι επίσης ελεύθερο να ενσωματωθεί ή να τοποθετηθεί στο βέλτιστο σημείο για την καλύτερη λειτουργία του. Η συλλογή ενέργειας συνήθως εκμεταλλεύεται τις μηχανικές, τις θερμικές, τις πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθώς και την ηλιακή ενέργεια. Η συλλογή κινητικής ενέργειας μετατρέπει την κίνηση, συχνά σε μορφή δονήσεων, σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι βαθμίδες θερμοκρασίας μπορούν να αξιοποιηθούν χρησιμοποιώντας θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ενώ η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται με τα φωτοβολταϊκά. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να αιχμαλωτίσει την ενέργεια από τα ραδιοκύματα, αλλά είναι αρκετά μικρής ισχύος εκτός αν εκπέμπεται με ειδικό τρόπο. Η πρόκληση για τη συλλογή ενέργειας είναι η μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος, από το εκάστοτε περιβάλλον που βρίσκεται η γεννήτρια. Για παράδειγμα οι συλλέκτες ενέργειας που βασίζονται στις δονήσεις, πρέπει να είναι συντονισμένοι στις συχνότητες που υπάρχουν στο περιβάλλον που πρόκειται να τοποθετηθούν, το οποίο συχνά σημαίνει ότι θα χρειάζεται διαφορετικός σχεδιασμός του συλλέκτη ενέργειας ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί. Προφανώς, είναι προτιμότερο τέτοιες γεννήτριες να μπορούν να προσαρμοστούν για να ανταπεξέλθουν σε ένα εύρος συχνοτήτων, αντί για μεμονωμένες συχνότητες.

Η μηχανική ενέργεια (υπό μορφή τάσεων ή δονήσεων) υπάρχει σε αφθονία στο περιβάλλον και η συλλογή της μπορεί να γίνει από τον βηματισμό των ανθρώπων μέχρι τις δονήσεις των κινητήρων ενός αεροπλάνου, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.<sup>4</sup> Ακόμη και το ανθρώπινο σώμα παράγει μηχανική ενέργεια μέσω διαφόρων κινήσεων όπως χειρονομίες, καρδιακοί παλμοί, ροή αίματος, κ.ά. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα για τη μηχανική ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί από την καθημερινή μας ζωή.

Φυσικές πηγές		Τεχνητές πηγές	
Περιβάλλον	Ανθρώπινη κίνηση/ Δραστηριότητες σώματος	Μεταφορές & Βιομηχανία	Υποδομές

Άνεμος, ροή νερού, θαλάσσια και ακουστικά κύματα	Αναπνοή, καρδιακή πίεση, ροή αίματος, περπάτημα, κινήσεις άκρων, ομιλία	Αεροσκάφη, αυτοκίνητα, τρένα, ελαστικά, φρένα, στροβιλοκινητήρες, θόρυβος	Αυτοκινητόδρομος, γέφυρες, σπίτια, σωλήνες νερού & αερίου, σύστημα AC
--	---	---	---

Πίνακας 1.1: Παραδείγματα εκμεταλλεύσιμης ενέργειας

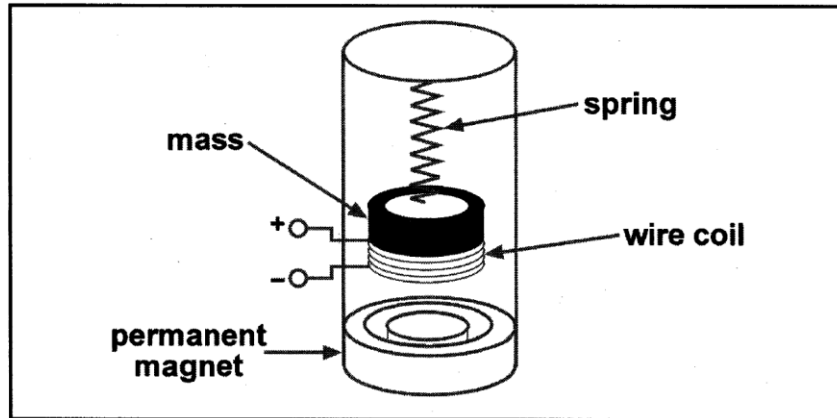
Η ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί από αυτές τις κινήσεις μπορεί να τροφοδοτήσει όλες τις ασύρματες συσκευές, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή βιοεμφυτεύματα, καθιστώντας τα ενεργειακά αυτόνομα. Μπορεί επίσης να φορτίσει τις μπαταρίες όλων των προσωπικών "έξυπνων" συσκευών. Επιπλέον οι μικροσυσκευές τα τελευταία χρόνια χρειάζονται όλο και λιγότερη ισχύ, συνήθως στην κλίμακα των  $\mu W$  ή  $mW$ , εξαιτίας της χρήσης προηγμένων υλικών και βελτιώσεων στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής. Σαν αποτέλεσμα, οι πιεζοηλεκτρικές μικρογεννήτριες με επαρκές μέγεθος μπορούν να τροφοδοτήσουν αυτή την κλίμακα ενέργειας.

Υπάρχουν τέσσερις κύριες μέθοδοι για τη μετατροπή της μηχανικής κίνησης σε ηλεκτρικό σήμα. Αυτές είναι η ηλεκτρομαγνητική (επαγωγή), η ηλεκτροστατική (χωρητική), η πιεζοηλεκτρική και η τριβοηλεκτρική. Όλες αυτοί οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τους αδρανειακούς αισθητήρες καθώς και για τους ενεργοποιητές (actuators).

#### 1.4.1 Ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι η εμφάνιση ηλεκτρισμού εξαιτίας ενός μαγνητικού πεδίου και ανακαλύφθηκε το 1831 από τον Michael Faraday. Συγκεκριμένα είναι το φαινόμενο ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει ο αγωγός αυτός. Στις ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες, χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες για την παραγωγή ισχυρού μαγνητικού πεδίου και ένα πηνίο χρησιμοποιείται σαν αγωγός. Είτε ο μόνιμος μαγνήτης είτε το πηνίο είναι σταθερά σε ένα πλαίσιο, ενώ το άλλο είναι συνδεδεμένο με τη μάζα αδράνειας. Η σχετική μετατόπιση που προκαλείται από τις δονήσεις, θέτει όλο το μηχανισμό σε λειτουργία και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.



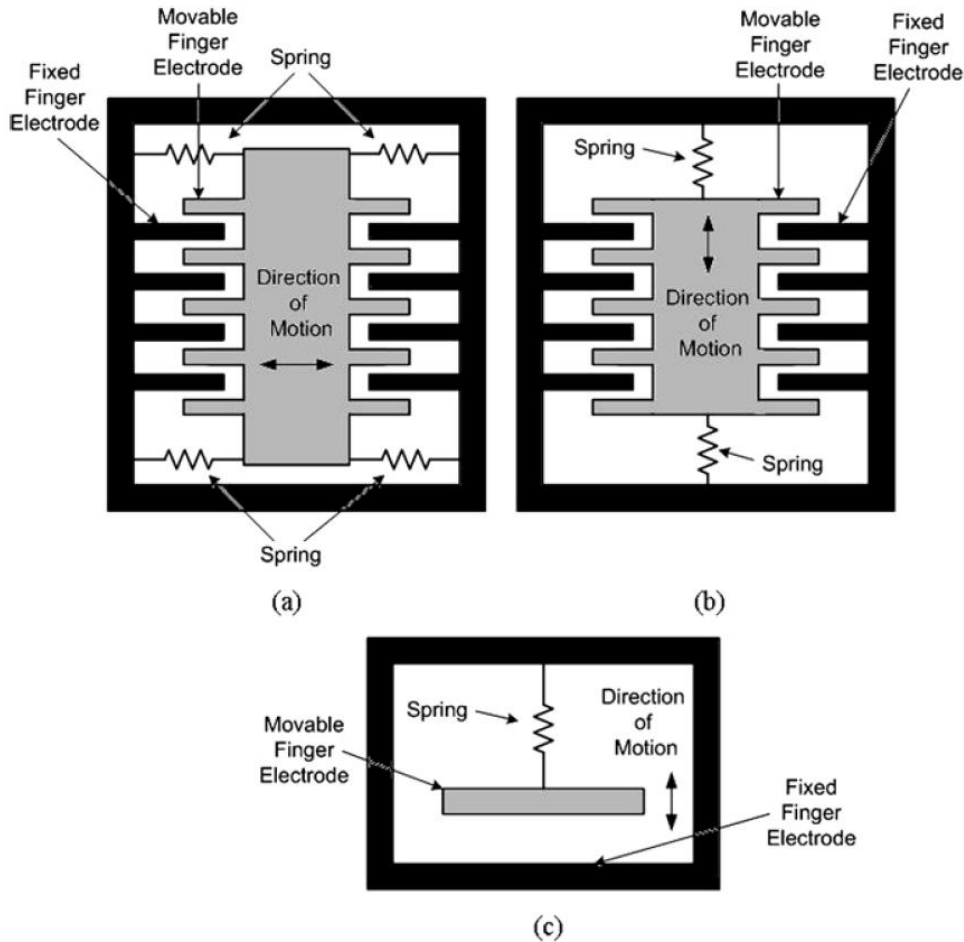


Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας

Η επαγόμενη τάση, γνωστή και ως ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), είναι ανάλογη με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου, την ταχύτητα της σχετικής κίνησης και του πλήθους των σπειρών του πηνίου. Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες χαρακτηρίζονται από υψηλά ρεύματα εξόδου και μικρές τάσεις. Επίσης αποδίδουν καλύτερα σε μεγάλες διαστάσεις παρά στη μικροκλίμακα, εξαιτίας της αδύναμης ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης που δημιουργείται από τις μεθόδους κατασκευής των MEMS.

#### 1.4.2 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες

Η βάση της ηλεκτροστατικής γεννήτριας είναι ο μεταβλητός πυκνωτής. Η χωρητικότητα της συσκευής μεταβάλλεται ανάλογα με τις δονήσεις που δέχεται, μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών. Αν το ηλεκτρικό φορτίο στον πυκνωτή είναι περιορισμένο, μέρος αυτού θα μεταφερθεί από τον πυκνωτή προς μια συσκευή αποθήκευσης καθώς η χωρητικότητα θα μειώνεται. Με αυτόν τον τρόπο η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες κατηγοριοποιούνται σε τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ του εξωτερικού πλαισίου και των ηλεκτροδίων που κινούνται (Εικόνα 1.7a). Στη δεύτερη περίπτωση μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των κινούμενων και των ακίνητων ηλεκτροδίων (Εικόνα 1.7b) ενώ για στην τρίτη περίπτωση μεταβάλλεται το κενό ανάμεσα σε δύο μεγάλες πλάκες ηλεκτροδίων (Εικόνα 1.7c).



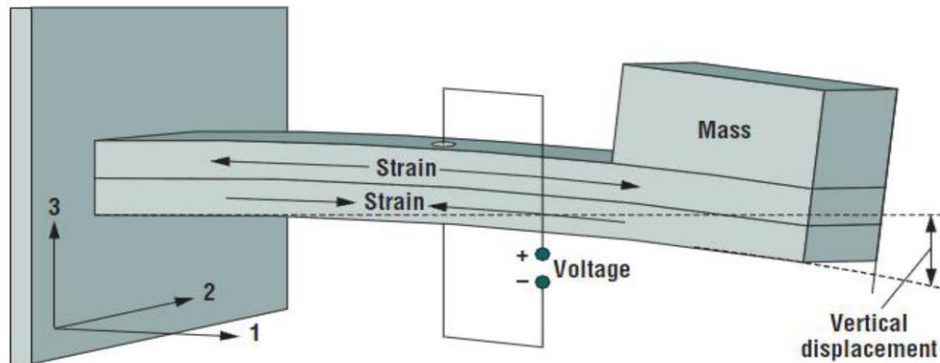
Εικόνα 1.7: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροστατικής γεννήτριας

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα για ολοκλήρωση στη μικροηλεκτρονική. Εφόσον η διαδικασία κατασκευής τους είναι παρόμοια με αυτή των VLSI, οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες μπορούν να υλοποιηθούν με την τεχνολογία VLSI χωρίς δυσκολίες. Από την άλλη μεριά, το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν μια αρχική τάση ή φορτίο προκειμένου να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους. Επιπλέον η αντίσταση εξόδου τους είναι συχνά μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην είναι κατάλληλα για να λειτουργούν ως τροφοδοτικά. Παρόλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση μπαταριών και να χρησιμοποιήσουν την ίδια την μπαταρία για να αντλήσουν το αρχικό τους φορτίο.

### 1.4.3 Πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την ικανότητα να παραμορφώνονται παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου ή να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν παραμορφώνονται μηχανικά<sup>5</sup>. Το φαινόμενο αυτό, όπως θα εξηγηθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, οφείλεται στο διαχωρισμό

των φορτίων εντός συγκεκριμένων κρυσταλλικών δομών και τελικά τη δημιουργία ηλεκτρικών δίπολων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή ενέργειας από πιεζοηλεκτρισμό είναι τα PZT, AlN, ZnO και PVDF.



Εικόνα 1.8: Σχηματική απεικόνιση πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας

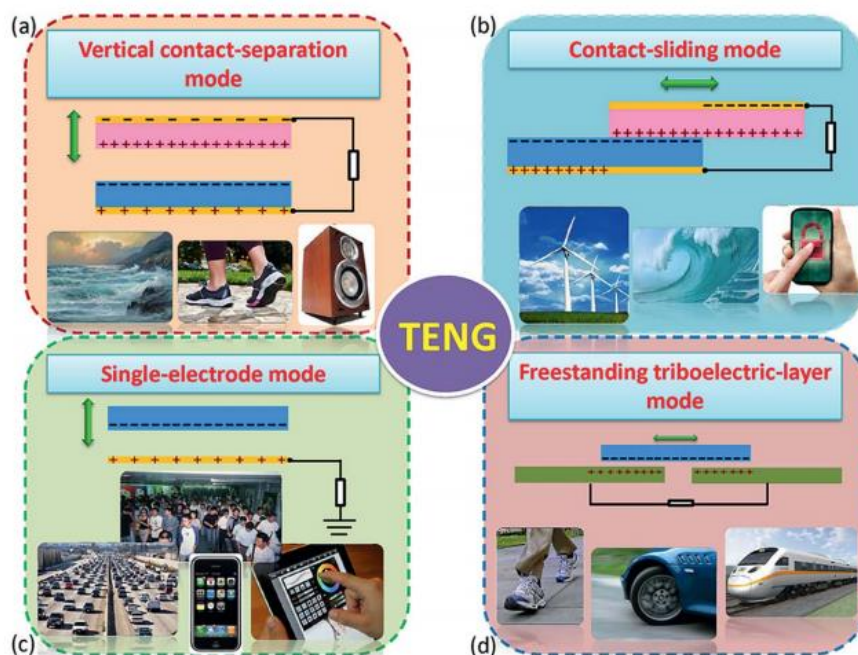
Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες έχουν την πιο απλή δομή μεταξύ των τριών γεννητριών που αναφέρθηκαν και μπορούν να παράγουν κατάλληλες τάσεις για τις ηλεκτρονικές συσκευές. Παρόλα αυτά, οι μηχανικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορεί να περιορίσουν τη συνολική απόδοση και την διάρκεια ζωής της γεννήτριας.

#### 1.4.4 Τριβοηλεκτρικές γεννήτριες

Ο τριβοηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο ένα υλικό αποκτά ηλεκτρικό φορτίο μετά την επαφή του με ένα διαφορετικό υλικό, εξαιτίας της τριβής. Για την αξιοποίηση αυτού του φαινομένου, κατασκευάστηκαν οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (triboelectric nanogenerator - TENG) οι οποίες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι τριβογεννήτριες βασίζονται στο συνδυασμό του στατικού ηλεκτρισμού και της ηλεκτροστατικής επαγωγής χρησιμοποιώντας κοινά υλικά της καθημερινής ζωής, όπως χαρτί, υφάσματα, PTFE, PDMS, Al, PVC κ.α. Η πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας φτάνει τα  $1200 \text{ W/m}^2$ , η πυκνότητα όγκου τα  $490 \text{ kW/m}^3$  και η απόδοση της μετατροπής ενέργειας το 50-85%.

Παρόλο που το φαινόμενο αυτό συναντάτε πολύ συχνά καθημερινά, ο μηχανισμός που κρύβεται πίσω από τη λειτουργία του βρίσκεται ακόμη υπό μελέτη. Γενικά πιστεύεται ότι όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή, δημιουργείται ένας χημικός δεσμός μεταξύ ορισμένων τμημάτων των δύο επιφανειών, με τα φορτία να κινούνται από το ένα υλικό στο άλλο προκειμένου να εξισώσουν το ηλεκτροχημικό τους δυναμικό. Τα μεταφερόμενα φορτία

μπορεί να είναι ηλεκτρόνια ή ιόντα/μόρια. Μετά το διαχωρισμό τους, μερικά από τα συνδεδεμένα άτομα έχουν την τάση να κρατούν επιπλέον ηλεκτρόνια και άλλα έχουν την τάση να δίνουν ηλεκτρόνια, παράγοντας έτσι, πιθανώς, τριβοηλεκτρικά φορτία πάνω στις επιφάνειες. Η παρουσία αυτών των φορτίων στις διηλεκτρικές επιφάνειες μπορεί να είναι η δύναμη που οδηγεί τα ηλεκτρόνια να ρέουν στο ηλεκτρόδιο προκειμένου να εξισορροπηθεί το ηλεκτρικό δυναμικό που δημιουργήθηκε. Επομένως, με βάση αυτή την αρχή οι τριβογεννήτριες χωρίστηκαν σε τέσσερις λειτουργίες (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Οι 4 θεμελιώδεις λειτουργίες των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών: (α) λειτουργία κάθετης επαφής - διαχωρισμού, (β) λειτουργία πλευρικής ολίσθησης, (γ) λειτουργία μονού ηλεκτροδίου, (δ) λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων

Στη λειτουργία κάθετης επαφής - διαχωρισμού χρησιμοποιούνται δύο διηλεκτρικά υμένα τα οποία τοποθετούνται το ένα απέναντι στο άλλο και υπάρχουν ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της διάταξης. Η φυσική επαφή των δύο υλικών δημιουργεί αντίθετα φορτισμένες επιφάνειες. Όταν υπάρξει διαχωρισμός των δύο επιφανειών, δημιουργείται μια πτώση ηλεκτρικού δυναμικού.

Στη λειτουργία της πλευρικής ολίσθησης, χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη με την πρώτη περίπτωση. Όταν τα δύο διηλεκτρικά υμένα βρίσκονται σε επαφή, μια σχετική ολίσθηση παράλληλα με την επιφάνεια δημιουργεί, επίσης, τριβοηλεκτρικά φορτία στις δύο επιφάνειες. Επομένως δημιουργείται μια πλευρική πόλωση κατά το μήκος της κατεύθυνσης

ολίσθησης, η οποία οδηγεί τα ηλεκτρόνια να ρέουν προς το άνω και κάτω ηλεκτρόδιο, προκειμένου να εξισορροπήσουν το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργήθηκε.

Οι δύο προηγούμενες λειτουργίες έχουν δύο ηλεκτρόδια τα οποία συνδέονται στο φορτίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, το αντικείμενο το οποίο αποτελεί μέρος της τριβογεννήτριας, δεν μπορεί να συνδεθεί ηλεκτρικά στο φορτίο επειδή είναι ένα φορητό αντικείμενο, όπως ένας άνθρωπος την ώρα που κινείται σε ένα πάτωμα. Προκειμένου να συλλεχθεί η ενέργεια σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται η λειτουργία του μονού ηλεκτροδίου, στην οποία το αντίστοιχο κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης είναι γειωμένο.

Σύμφωνα με την τελευταία λειτουργία, ένα κινούμενο αντικείμενο είναι φυσικά φορτισμένο λόγω της επαφής του με τον αέρα ή άλλα αντικείμενα, όπως για παράδειγμα τα παπούτσια με τα οποία περπατάμε. Τα ηλεκτρικά φορτία παραμένουν στις επιφάνειες για ώρες, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω επαφή ή τριβή καθώς η πυκνότητα φορτίου αγγίζει τη μέγιστη τιμή της. Άρα αν κατασκευαστεί ένα συμμετρικό ζεύγος ηλεκτροδίων, κάτω από ένα διηλεκτρικό στρώμα, η προσέγγιση και η απομάκρυνση του κινούμενου αντικειμένου από τα ηλεκτρόδια, δημιουργεί μία ασύμμετρη κατανομή φορτίου στο μέσο, η οποία αναγκάζει την κίνηση των ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, προκειμένου να εξισορροπηθεί η διαφορά δυναμικού που δημιουργήθηκε.

#### 1.4.5 Σύγκριση των γεννητριών

Μια χρήσιμη σύγκριση μεταξύ των τριών πρώτων γεννητριών είναι η πυκνότητα ενέργειας που υπάρχει σε κάθε μία και παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.2.

Τύπος	Βασική εξίσωση	Πρακτικό μέγιστο	Θεωρητικό μέγιστο
Ηλεκτρομαγνητικός	$E_{\max} = \frac{B^2}{2\mu_0}$	4 mJ/cm <sup>3</sup>	400 mJ/cm <sup>3</sup>
Ηλεκτροστατικός	$E_{\max} = \frac{1}{2} \epsilon E^2$	4 mJ/cm <sup>3</sup>	44 mJ/cm <sup>3</sup>
Πιεζοηλεκτρικός	$E_{\max} = \frac{\sigma_y^2 k^2}{2Y}$	17.7 mJ/cm <sup>3</sup>	335 mJ/cm <sup>3</sup>

Πίνακας 1.2: Μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα κάθε τύπου γεννήτριας

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε τύπου γεννήτριας.

<b>Τύπος</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Ηλεκτρομαγνητικός	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν χρειάζεται εξωτερική πηγή τάσης</li> <li>• Μεγάλο ρεύμα εξόδου</li> <li>• Απουσία μηχανικών περιορισμών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δύσκολη ενσωμάτωση στη διαδικασία κατασκευής των MEMS</li> <li>• Κακή απόδοση στη μικροκλίμακα</li> <li>• Μικρή τάση εξόδου (0.1V)</li> </ul>
Ηλεκτροστατικός	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή τάση εξόδου (2-10V)</li> <li>• Εύκολο να ενσωματωθούν στη διαδικασία κατασκευής των MEMS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απαιτείται εξωτερική πηγή τάσης</li> <li>• Υψηλή αντίσταση εξόδου</li> <li>• Μηχανικοί περιορισμοί</li> <li>• Μικρό ρεύμα εξόδου</li> </ul>
Πιεζοηλεκτρικός	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν απαιτείται εξωτερική πηγή τάσης</li> <li>• Συμβατά με την τεχνολογία MEMS</li> <li>• Υψηλή τάση εξόδου</li> <li>• Απουσία μηχανικών περιορισμών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα λεπτά υμένια έχουν μικρό συντελεστή σύζευξης</li> <li>• Μεγάλη αντίσταση εξόδου</li> <li>• Μικρό ρεύμα εξόδου</li> <li>• Οι τεχνικές μικροκατασκευής δεν είναι συμβατές με την τεχνολογία CMOS</li> </ul>
Τριβοηλεκτρικός	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή τάση εξόδου</li> <li>• Ευκολία κατασκευής</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρό ρεύμα εξόδου</li> <li>• Χαμηλή ανθεκτικότητα</li> </ul>

Πίνακας 1.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μηχανισμών συλλογής κινητικής ενέργειας

Εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας ενέργειας και των υψηλών τάσεων εξόδου του πιεζοηλεκτρισμού, επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να κατασκευαστούν πιεζογεννήτριες τεχνολογίας MEMS, με σκοπό την ενεργειακή αυτονόμηση αισθητήρων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΙΕΖΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

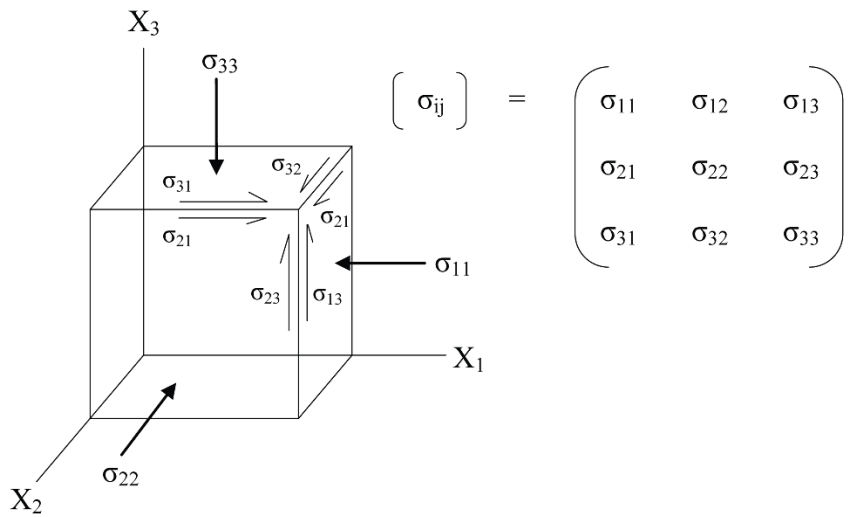
Στο κεφάλαιο αυτό εισάγονται τα βασικά στοιχεία θεωρίας που διέπουν τη λειτουργία μιας πιεζοηλεκτρικής μικρογεννήτριας τύπου αιωρούμενης προβόλου. Αρχικά αναλύεται η θεωρία της ελαστικότητας. Ο λόγος είναι η καλύτερη κατανόηση των μηχανικών τάσεων κατά τη παραμόρφωση της προβόλου, καθώς επίσης επειδή το πρόγραμμα της προσομοίωσης (COMSOL Multiphysics) χρησιμοποιεί τις βασικές εξισώσεις αυτής της θεωρίας για την επίλυση των προβλημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό των φυσικών συχνοτήτων της αιωρούμενης προβόλου με μάζα αδράνειας. Τέλος, παρουσιάζεται η θεωρία του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού υλικού (ZnO) που χρησιμοποιήθηκε στις μικρογεννήτριες.

### **2.2 Τανυστές και ελαστικότητα υλικών**

#### **2.2.1 Ο τανυστής τάσης (stress tensor)**

Ο τανυστής είναι μία πολυδιάστατη παράταξη αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της φυσικής κατάσταση ή των ιδιοτήτων ενός υλικού<sup>6</sup>.

Η τάση ορίζεται ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Αν πάρουμε έναν κύβο ενός υλικού και το υποβάλουμε σε ένα τυχαίο φορτίο, μπορούμε να μετρήσουμε τις τάσεις που δημιουργούνται στις διάφορες κατευθύνσεις. Οι μετρήσεις αυτές εκφράζονται μέσω ενός τανυστή 2<sup>ος</sup> τάξης, τον τανυστή τάσης.

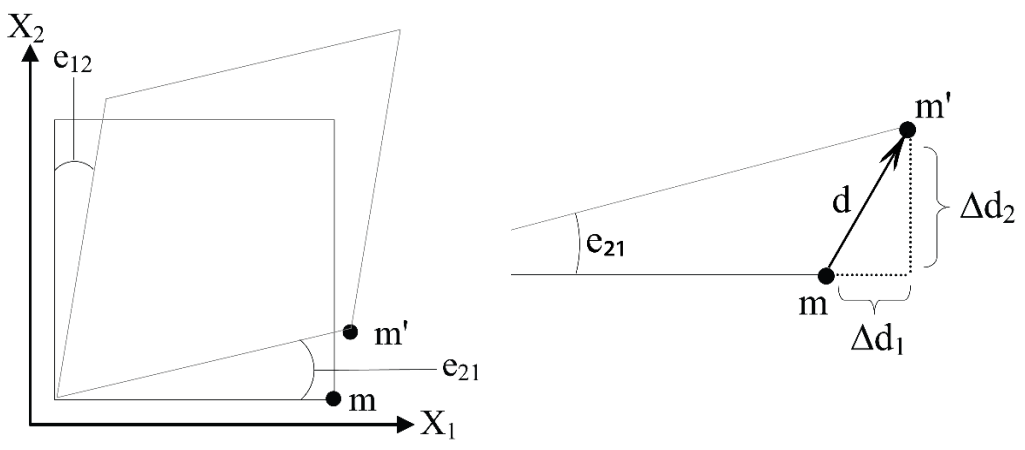


Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των συντελεστών του τανυστή τάσης σε έναν κύβο  
Μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του τανυστή τάσης είναι ότι είναι συμμετρικός, δηλαδή

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

### 2.2.2 Ο τανυστής παραμόρφωσης (strain tensor)

Η παραμόρφωση ορίζεται ως η σχετική μετατόπιση της θέσης των σημείων που βρίσκονται μέσα σε ένα σώμα, το οποίο έχει υποβληθεί σε παραμόρφωση. Το κλασικό παράδειγμα δύο διαστάσεων είναι αυτό ενός τετραγώνου το οποίο έχει παραμορφωθεί σε παραλληλόγραμμο.



Εικόνα 2.2: Βοηθητικά σχήματα για την επεξήγηση του τανυστή παραμόρφωσης

Ας εξετάσουμε την κίνηση ενός σημείου που βρίσκεται στη γωνία του τετραγώνου ( $m$ ) και μετατοπίζεται στη θέση ( $m'$ ). Για να έχει αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε μόνο τις απειροελάχιστα μικρές παραμορφώσεις. Ονομάζουμε το αρχικό πλάτος της πλευράς του τετραγώνου  $X_1$ . Επίσης η συνιστώσα της μετατόπισης ( $d$ ) του  $m$  στο  $m'$  στον  $X_1$  άξονα  $\Delta d_1$ ,



ενώ τη συνιστώσα του  $d$  στον  $X_2$  άξονα  $\Delta d_2$ . Ένας απλός τρόπος να μετρηθεί η παραμόρφωση είναι να συγκριθούν τα μεγέθη  $\Delta d_1 - X_1$ ,  $\Delta d_2 - X_1$ , κλπ. Αυτή η ποσότητα μπορεί να απεικονιστεί ως  $e_{11}$

$$\lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta d_1}{\Delta X_1} \right) = \left( \frac{\partial d_1}{\partial X_1} \right) = e_{11}$$

ή στη γενικότερη μορφή της

$$\lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta d_i}{\Delta X_j} \right) = \left( \frac{\partial d_i}{\partial X_j} \right) = e_{ij}$$

Από τη στιγμή που η  $\Delta d_2$  είναι πολύ μικρή, ισχύει

$$\frac{\Delta d_2}{\Delta X_1} \approx \frac{\Delta d_2}{\Delta X_1 + \Delta d_1} = \tan \theta$$

Για πολύ μικρές γωνίες ισχύει ότι  $\tan \theta = \theta$  με αποτέλεσμα  $e_{21} = \theta$ . Αν τώρα αντί για παραμόρφωση του αρχικού τετραγώνου είχαμε περιστροφή γύρω από τον κύριο άξονά του τότε οι τιμές  $e_{ij}$ , με  $i \neq j$ , θα ήταν πάλι μη μηδενικές. Γι' αυτό το λόγο, η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται από τον τανυστή  $\varepsilon_{ij}$ , όπου έχει αφαιρεθεί η άκαμπτη περιστροφή του σώματος. Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} - \tilde{\omega}_{ij}$$

Όπου  $\tilde{\omega}_{ij}$  είναι η περιστροφή του σώματος, χωρίς παραμόρφωση και  $e_{ij}$  ο τανυστής παραμόρφωσης.

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(e_{ij} + e_{ji})$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = 1/2(e_{ij} - e_{ji})$$

Για την περίπτωση των δύο διαστάσεων ισχύει:

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \\ \frac{1}{2}(e_{21} + e_{12}) & e_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}(e_{12} - e_{21}) \\ \frac{1}{2}(e_{21} - e_{12}) & 0 \end{pmatrix}$$

Ο τανυστής  $\varepsilon_{ij}$  είναι ένας συμμετρικός τανυστής και ο  $\tilde{\omega}_{ij}$  ένας αντισυμμετρικός τανυστής. Η κύρια διαγώνιος του  $\tilde{\omega}_{ij}$  είναι πάντα μηδενική.

### 2.2.3 Ελαστικότητα

Σε αντίθεση με την τάση και την παραμόρφωση, η ελαστικότητα αποτελεί εγγενή ιδιότητα ενός υλικού. Η ελαστικότητα είναι η ιδιότητα της "αντιστρεπτής παραμόρφωσης". Αν η παραμόρφωση ενός σώματος, που βρίσκεται υπό μηχανική τάση, δεν υπερβεί ένα

συγκεκριμένο όριο που ονομάζεται όριο ελαστικότητας, το σώμα θα επιστρέψει στην αρχική του μορφή όταν αφαιρεθεί η τάση που του ασκείται. Αν η τιμή της τάσης ( $\sigma$ ) είναι μικρή, τότε η τιμή της παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ) είναι γραμμικώς ανάλογη της τάσης και μπορεί να γραφτεί ως

$$\varepsilon = s\sigma \quad (2.1)$$

όπου  $s$  είναι η σταθερά ελαστικότητας. Για να συσχετιστούν δύο τανυστές 2<sup>ης</sup> τάξης, χρειάζεται ένας τανυστής 4<sup>ης</sup> τάξης.

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl}$$

Για να υπολογιστεί ο  $\varepsilon_{ij}$  ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ξεκινούσαμε ως εξής:

$$\varepsilon_{11} = s_{1111}\sigma_{11} + s_{1112}\sigma_{12} + \dots + s_{1132}\sigma_{32} + s_{1133}\sigma_{33}$$

Για την περίπτωση του τρισδιάστατου αντικειμένου υπάρχουν 81 στοιχεία σε ένα τανυστή 4<sup>ης</sup> τάξης. Όμως και οι δύο οι τανυστές τάσης και παραμόρφωσης είναι συμμετρικοί με αποτέλεσμα ο καθένας να έχει μόνο 6 διαφορετικά στοιχεία. Χρειάζονται επομένως μόνο 6 εξισώσεις για να υπολογιστεί ο  $\varepsilon_{ij}$  από τον  $\sigma_{ij}$  και σε κάθε εξίσωση θα υπάρχουν 6 ανεξάρτητοι όροι. Άρα, δεν μπορεί να υπάρχουν παρά πάνω από 36 ανεξάρτητες τιμές στην  $s_{ijkl}$ . Αν το υλικό που πρόκειται να παραμορφωθεί είναι ιστροπικό, δηλαδή το υλικό που συμπεριφέρεται το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις, χρειάζονται μόνο 2 τιμές. Αυτές είναι το μέτρο του Young (Young's Modulus  $E$ ) και το μέτρο διάτμησης (Shear Modulus  $G$ ). Όλοι οι συντελεστές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει αυτών ως εξής:

$$s_{11} = 1/E$$

$$2(s_{11} - s_{12}) = 1/G$$

ή εναλλακτικά

$$s_{12} = \nu/E$$

όπου  $\nu$  είναι ο λόγος Poisson

$$\nu = (E/2G) - 1 \quad (2.2)$$

Επομένως, για ένα ιστροπικό υλικό ισχύει:

$$\varepsilon_1 = (1/E)(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3))$$

$$\varepsilon_2 = (1/E)(\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3))$$

$$\varepsilon_3 = (1/E)(\sigma_3 - \nu(\sigma_2 + \sigma_1))$$

$$\varepsilon_4 = (1/G)\sigma_4$$

$$\varepsilon_5 = (1/G)\sigma_5$$

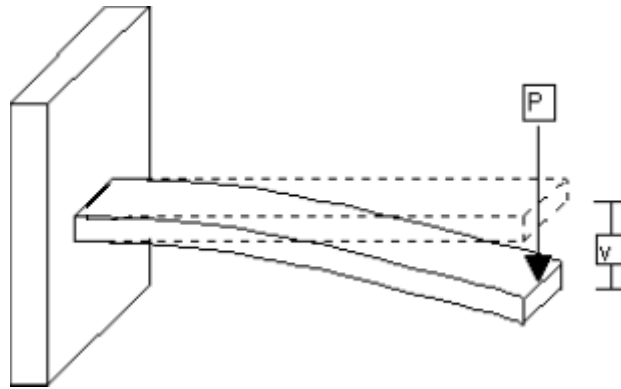
$$\varepsilon_6 = (1/G)\sigma_6$$

## 2.3 Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου

Μία οριζόντια πρόβλος υπό την επίδραση μιας κάθετης δύναμης θα παραμορφωθεί σε σχήμα καμπύλης<sup>78</sup>. Όταν η δύναμη αφαιρεθεί, η πρόβλος θα τείνει να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση. Όμως εξαιτίας της αδράνειας θα συνεχίσει να βρίσκεται σε κίνηση και η πρόβλος θα ταλαντώνεται στις φυσικές της συχνότητες.

### 2.3.1 Εκτροπή αιωρούμενης προβόλου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αν το ελεύθερο άκρο μιας αιωρούμενης προβόλου υποβληθεί σε σημειακό φορτίο  $P$ , η πρόβλος θα εκτραπεί σε σχήμα καμπύλης. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μετατόπιση,  $y(x)$ .



Εικόνα 2.3: Εκτροπή προβόλου υπό την επίδραση φορτίου στην άκρη

Αν υποθέσουμε ότι η πρόβλος υφίσταται μικρές παραμορφώσεις, βρίσκεται στη γραμμική ελαστική περιοχή και έχει ομοιόμορφη διατομή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις.

Η καμπυλότητα της προβόλου,  $k$ , ισούται με τη δεύτερη παράγωγο της μετατόπισης

$$k = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Η καμπυλότητα μπορεί επίσης να συσχετιστεί με τη ροπή κάμψης (bending moment),  $M$ , και τη καμπτική δυσκαμψία (flexural rigidity),  $EI$

$$k = \frac{M}{EI}$$

όπου με  $E$  συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας της προβόλου και με  $I$  η ροπή αδράνειας. Η ροπή κάμψης μπορεί να συσχετιστεί με τη διατμητική δύναμη,  $V$ , και το πλευρικό φορτίο,  $q$ , πάνω στην πρόβλο. Επομένως ισχύει ότι

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} V = EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} q = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (2.3a, 2.3b, 2.3c)$$

Για το φορτίο της Εικόνας 2.3, το κατανεμημένο φορτίο, η διατμητική δύναμη και η ροπή κάμψης είναι αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} q(x) &= 0 \\ V(x) &= P \\ M(x) &= -PL \left(1 - \frac{x}{L}\right) \end{aligned}$$

Η λύση της (2.3a) είναι επομένως

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \int_{x=0}^x M(x) dx = -\frac{PL}{EI} \left(x - \frac{x^2}{2L}\right) \\ y(x) &= \int_{x=0}^x \frac{\partial v}{\partial x} dx = -\frac{PL}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6L}\right) \end{aligned}$$

Με τη μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο της προβόλου να ισούται με:

$$y(L) = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Φυσική συχνότητα ταλάντωσης αιωρούμενης προβόλου

Αν υποθέσουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας, η αδράνεια και το πάχος είναι σταθερά κατά μήκος της προβόλου, η εξίσωση που περιγράφει τη ταλάντωση είναι

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} = -\rho \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

όπου  $\rho$  είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους (ή γραμμική πυκνότητα μάζας) της προβόλου<sup>9</sup>. Ο καλύτερος τρόπος για να λυθεί η εξίσωση (2.5) είναι με τη χρήση της μεθόδου χωριζομένων μεταβλητών. Ας υποθέσουμε ότι η μετατόπιση μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, με το ένα να εξαρτάται από τη θέση και το άλλο από το χρόνο.

$$y(x, t) = X(x)T(t) \quad (2.6)$$

όπου η συνάρτηση  $X$  είναι ανεξάρτητη του χρόνου και η  $T$  ανεξάρτητη της θέσης. Τότε η εξίσωση (2.5) παίρνει τη μορφή

$$EI \frac{\partial^4 (X(x)T(t))}{\partial x^4} = -\rho \frac{\partial^2 (X(x)T(t))}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Διαιρώντας την (2.7) με  $\rho X(x)T(t)$  παίρνουμε

$$\frac{EI}{\rho X(x)} \frac{\partial^4 X(x)}{\partial x^4} = - \frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{dt^2} \quad (2.8)$$

Από τη στιγμή που το αριστερό μέλος της εξίσωσης (2.8) δεν αλλάζει με τη μεταβολή του  $t$ , το δεξί μέλος πρέπει να είναι σταθερό. Με ανάλογο τρόπο, καθώς το δεξί μέλος της (2.8) δεν αλλάζει με τη μεταβολή του  $x$ , το αριστερό μέλος πρέπει να είναι σταθερό. Επειδή και τα δύο μέλη είναι σταθερά, η εξίσωση (2.6) είναι έγκυρη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος χωριζομένων μεταβλητών. Ας συμβολίσουμε αυτή τη σταθερά ως  $\omega_n^2$ . Θα δείξουμε ότι το  $\omega_n^2$  είναι ένα πραγματικό μέγεθος και οι  $\omega_n$ , αποτελούν τις φυσικές συχνότητες της προβόλου.

Η εξίσωση (2.8) μπορεί να γραφτεί ως δύο διαφορικές εξισώσεις

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k_n^4 X = 0 \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega_n^2 T = 0 \quad (2.9b)$$

$$k_n^4 = \frac{\omega_n^2 \rho}{EI} \quad (2.9c)$$

Προκειμένου να λυθεί η (2.9a) απαιτούνται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες της προβόλου.

$y(0, t) = X(0) = 0$	μηδενική μετατόπιση
$\frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial X(0)}{\partial x} = 0$	μηδενική κλίση
$\frac{\partial^2 y(L, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 X(L)}{\partial x^2} = 0$	μηδενική ροπή κάμψης
$\frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 X(L)}{\partial x^3} = 0$	μηδενική διατμητική δύναμη

Οι οριακές συνθήκες πηγάζουν από την κατάσταση που βρίσκονται τα άκρα της. Το σταθερό άκρο πρέπει να έχει μηδενική μετατόπιση και μηδενική κλίση από τη στιγμή που είναι στερεωμένο. Το ελεύθερο άκρο δεν μπορεί να έχει ροπή κάμψης ούτε διατμητική δύναμη. Η γενική λύση της εξίσωσης (2.9a) είναι ένας γραμμικός συνδυασμός τριγωνομετρικών εξισώσεων.

$$X(x) = C_1 [\cos(k_n x) + \cosh(k_n x)] + C_2 [\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] + C_3 [\sin(k_n x) + \sinh(k_n x)] + C_4 [\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιώντας την πρώτη οριακή συνθήκη, βρίσκουμε το  $C_1$

$$X(0) = 0 = 2C_1 \rightarrow C_1 = 0$$

Παραγωγίζοντας μια φορά την (2.10) και χρησιμοποιώντας τη δεύτερη οριακή συνθήκη, βρίσκουμε το  $C_3$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X(x)}{\partial x} &= C_2[-\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] + C_3[\cos(k_n x) + \cosh(k_n x)] \\ &\quad + C_4[\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] \\ \frac{\partial X(0)}{\partial x} &= 0 = 2C_3 \rightarrow C_3 = 0 \end{aligned}$$

Οι ανώτερες παράγωγοι της εξίσωσης (2.10) σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες παράγουν τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = C_2[-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)] + C_4[-\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)] = 0 \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial^3 X(x)}{\partial x^3} = C_2[\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)] + C_4[-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)] = 0 \quad (2.11b)$$

Με συνδυασμό των εξισώσεων (2.11a) και (2.11b) έχουμε

$$C_4 = C_2 \frac{-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)}{\sin(k_n L) + \sinh(k_n L)} \quad (2.12)$$

Επομένως για την αιωρούμενη πρόβολο, η εξίσωση (2.10) περιορίζεται σε

$$\begin{aligned} X_n(x) &= C_2 \left\{ [\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] + \left[ \frac{-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)}{\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)} \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot [\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] \right\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Οι σταθερές  $C_n$  παίρνουν αυθαίρετες τιμές. Προκειμένου όμως η δυναμική λύση της μετατόπισης να ισούται με τη στατική λύση (για  $t=0$ ), πρέπει η σταθερά  $C_2$  να ισούται με  $1/2$ .

Με αυτή την τιμή για τη σταθερά  $C_2$ ,  $X_n(0) = 0$  και  $X_n(L) = 1$ .

Η αντικατάσταση της εξίσωσης (2.12) στην (2.11a) ή στην (2.11b), οδηγεί στην εξίσωση συχνότητας της αιωρούμενης προβόλου.

$$\cos(k_n L) \cosh(k_n L) = -1 \quad (2.14)$$

Οι λύσεις της εξίσωσης (2.14) προκύπτουν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Οι πρώτες 6 τιμές απεικονίζονται στον Πίνακα 2.1 (η τιμή για  $k_n=0$  αγνοείται αφού αντιστοιχεί στην κατάσταση ηρεμίας της προβόλου).

n	$v_n = k_n L$
1	1.875104069
2	4.694091133
3	7.854757438
4	10.99554073
5	14.13716839

6	17.27875953
---	-------------

Πίνακας 2.1: Σταθερές για την ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου

Η εξίσωση (2.9b) σε συνδυασμό με την (1.9c) μπορεί να γραφτεί ως

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \left[ k_n^4 \frac{EI}{\rho} \right] T(t) = 0 \quad (2.15)$$

Η εξίσωση (2.8) ικανοποιείται από τη λύση

$$T(t) = D_1 \sin \left[ \left( k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \right) t \right] + D_2 \cos \left[ \left( k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \right) t \right] \quad (2.16)$$

Επομένως η φυσική συχνότητα ταλάντωσης δίνεται από τη σχέση

$$\omega_n = k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2.17)$$

Η συχνότητα φυσικής ταλάντωσης της αιωρούμενης προβόλου μπορεί να εκφραστεί και με βάση το μέτρο κάμψης ανά μονάδα πλάτους  $D_p = EI/w$ , χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.17), τον τύπο  $\omega = 2\pi f$  και τη σχέση  $v_n = k_n L$  ως εξής:

$$f_n = \frac{v_n^2}{2\pi L^2} \frac{1}{\sqrt{m}} \sqrt{D_p} \quad (2.18)$$

Όπου  $f_n$  είναι η n-οστή συχνότητα συντονισμού,  $v_n$  η ιδιοτιμή που προκύπτει από τον Πίνακα 2.1,  $L$  το μήκος της προβόλου,  $m = \rho_p t_p + \rho_s t_s$  η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και  $w$  το πλάτος της προβόλου. Αν η πρόβλος αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά (όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4) το μέτρο κάμψης της, εξαρτάται από τις τιμές των μέτρων του Young  $E_p$  και  $E_s$  και του πάχους του κάθε υλικού,  $t_p$  και  $t_s$  αντίστοιχα.

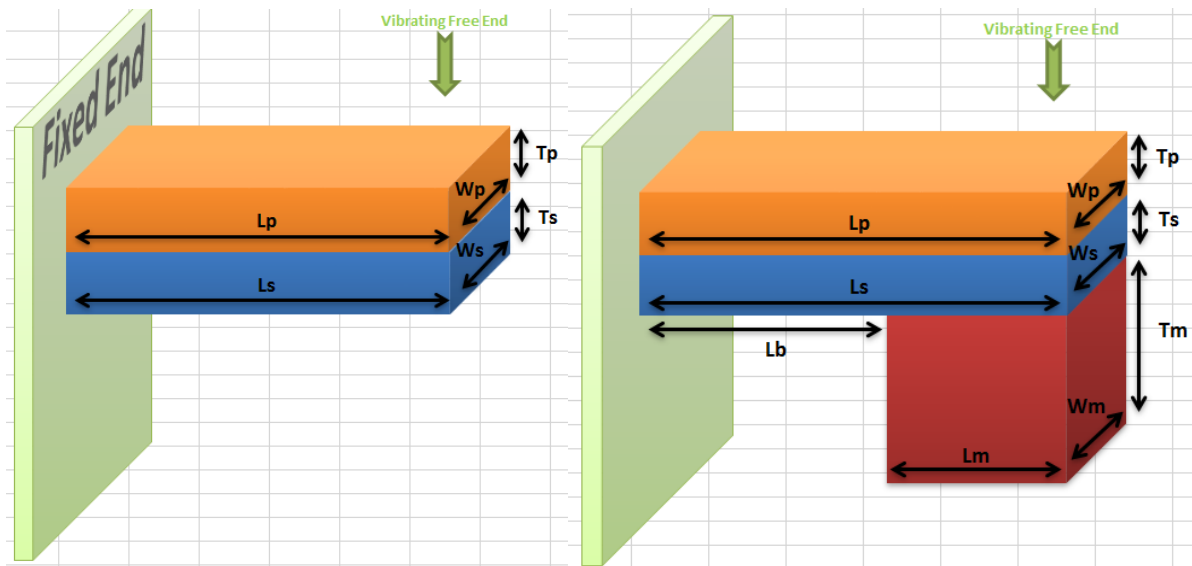
$$D_p = \frac{E_p^2 t_p^4 + E_s^2 t_s^4 + 2E_p E_s t_p t_s (2t_p^2 + 2t_s^2 + 3t_p t_s)}{12(E_p t_p + E_s t_s)} \quad (2.19)$$

Για να εξετάσουμε την αλλαγή στη συχνότητα συντονισμού εξαιτίας της προσθήκης μάζας αδράνειας στο ελεύθερο άκρο της προβόλου, η συχνότητα από τη σχέση (2.18) μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά σε όρους της ενεργού σταθεράς ελατηρίου (effective spring constant) και της ενεργού μάζας (effective mass) στο άκρο της προβόλου ως εξής:

$$f'_n = \frac{v_n'^2}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e + \Delta m}} \quad (2.20)$$

όπου  $v_n'^2 = v_n^2 \sqrt{0.236/3}$ ,  $K$  η ενεργός σταθερά ελατηρίου,  $M_e$  η ενεργός μάζα στο ελεύθερο άκρο της προβόλου και  $\Delta m$  η μάζα αδράνειας. Η σχέση που περιγράφει την ενεργό σταθερά ελατηρίου,  $K$  είναι:

$$K = \frac{3D_p w}{L^3} \quad (2.21)$$



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση διμορφικής προβόλου με και χωρίς μάζα αδράνειας. Επειδή η αξονική ταχύτητα διαφέρει κατά μήκος της προβόλου, η ενεργός μάζα στο άκρο της προβόλου είναι:

$$M_e = \int_0^w dy \int_0^L m \left( \frac{v(x)}{v(L)} \right)^2 dx = 0.236mwL \quad (2.22)$$

όπου  $v(x)$  είναι η αξονική ταχύτητα σε απόσταση  $x$  από το σταθερό άκρο και  $v(L)$  η ταχύτητα στο ελεύθερο άκρο. Σημειώνεται ότι στη σχέση (2.22) έχει αμεληθεί η διαφορά της ταχύτητας κατά το πλάτος της προβόλου.

Αν όμως η μάζα αδράνειας εκτείνεται σε μια περιοχή και όχι σε ένα σημείο στο άκρο της προβόλου, τότε μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγκεντρωτική δύναμη σημείου που εφαρμόζεται στο κέντρο της μάζας. Είναι γνωστό ότι για μάζα αδράνειας με ομοιόμορφη πυκνότητα, παραλληλόγραμμη συμμετρία και θέση στο ελεύθερο άκρο της προβόλου, το κέντρο μάζας της βρίσκεται σε απόσταση  $L_m/2$  από αυτό. Επομένως, η ενεργός σταθερά ελατηρίου στο σημείο αυτό,  $K'$ , σχετίζεται με την  $K$  μέσω της παρακάτω σχέσης



$$K' = K \left( \frac{l_s}{l_s - l_m/2} \right)^3 \quad (2.23)$$

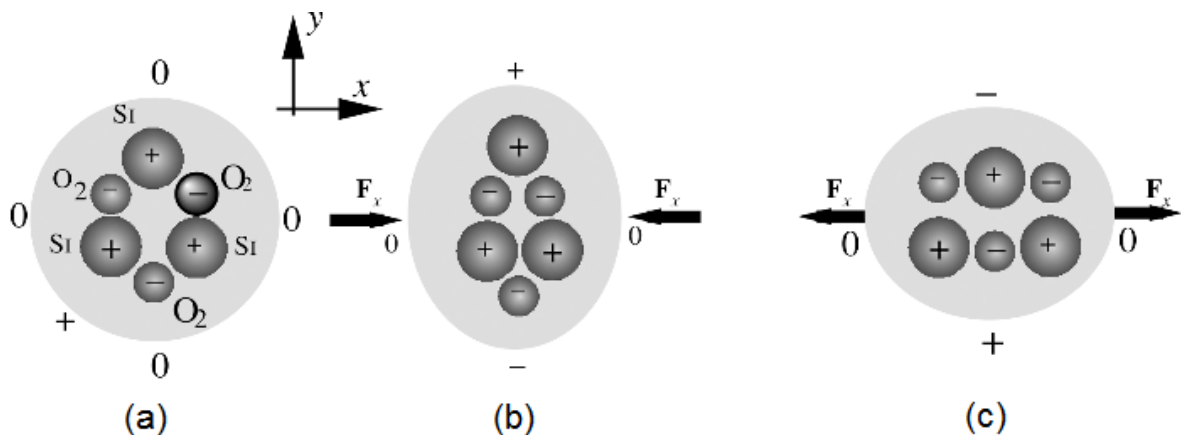
Και τελικά η συχνότητα συντονισμού μιας αιωρούμενης προβόλου με μάζα αδράνειας στο ελεύθερο άκρο της ισούται με

$$f'_n = \frac{v_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{0.236D_p w_s}{\left(l_s - \frac{l_m}{2}\right)^3 (0.236m w_s l_s + \Delta m)}} \quad (2.24)$$

## 2.4 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου από ένα κρυσταλλικό υλικό όταν υποβάλλεται σε πίεση ή τάση<sup>10</sup>. Το φαινόμενο εμφανίζεται στους φυσικούς κρυστάλλους, όπως είναι ο χαλαζίας (quartz - SiO<sub>2</sub>), σε κεραμικά υλικά τα οποία έχουν πολωθεί με τεχνικό τρόπο και σε ορισμένα πολυμερή, όπως είναι το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (polyvinylidene fluoride - PVDF). Ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Γάλλους φυσικούς Jacques και Pierre Curie, αλλά η χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές ήταν ελάχιστες μέχρι το 1917, όταν ο Γάλλος καθηγητής Paul Langevin χρησιμοποίησε πλάκες χαλαζία για την παραγωγή και την ανίχνευση ηχητικών κυμάτων στο νερό. Η δουλειά του καθηγητή οδήγησε στην εξέλιξη του σημερινού sonar.

Ένα απλό, αλλά ταυτόχρονα αρκετά επεξηγηματικό μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου προτάθηκε το 1927 από τον Alexander Meissner. Ο κρύσταλλος χαλαζία μοντελοποιείται υπό μορφή έλικας (Εικόνα 2.5), με ένα άτομο πυριτίου, Si και δύο άτομα οξυγόνου, O<sub>2</sub>, τα οποία εναλλάσσονται στην έλικα. Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται μια τομή του άξονα z.



Εικόνα 2.5: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε κρύσταλλο χαλαζία

Το κάθε κύτταρο του κρυστάλλου, αποτελείται από 3 άτομα Si, και 6 άτομα O. Τα άτομα του οξυγόνου εμφανίζονται σε ζευγάρια. Το κάθε άτομο Si κουβαλάει 4 θετικά φορτία και το κάθε ζεύγος ατόμων O, 4 αρνητικά φορτία (2 σε κάθε άτομο). Επομένως το κύτταρο του χαλαζία είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αν δεν του ασκείται κάποια πίεση ή τάση. Όταν του ασκείται κατά μήκος του άξονα x μια εξωτερική δύναμη,  $F_x$ , τότε το εξαγωνικό του πλέγμα παραμορφώνεται. Στην Εικόνα 2.5b παρουσιάζεται αυτή η παραμόρφωση, η οποία μετατοπίζει τα άτομα μέσα στον κρύσταλλο με τέτοιο τρόπο ώστε ένα θετικό φορτίο σχηματίζεται στην πλευρά του Si και ένα αρνητικό φορτίο στην πλευρά του ζεύγους O<sub>2</sub>, με αποτέλεσμα να εμφανίζει ο κρύσταλλος ηλεκτρικό φορτίο κατά μήκος του άξονα y. Αν στον κρύσταλλο ασκηθεί μία εφελκυστική δύναμη προς την κατεύθυνση x (Εικόνα 2.5c), τότε εμφανίζεται στον άξονα y φορτίο αντίθετης πολικότητας. Επομένως, με αυτό το απλό μοντέλο απεικονίζεται πώς ορισμένα κρυσταλλικά υλικά μπορούν να αναπτύξουν ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά τους, σε αντίδραση της μηχανικής τους παραμόρφωσης. Τέλος τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Δηλαδή, την παραμόρφωση του υλικού, όταν στα άκρα του εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση.

### 2.4.1 Βασικές εξισώσεις

Οι βασικές εξισώσεις ενός στατικού πιεζοηλεκτρικού υλικού απαρτίζονται από 4 σύνολα εξισώσεων: την εξίσωση μηχανικής ισορροπίας (2.25), την καταστατική εξίσωση (2.26), την εξίσωση γεωμετρικής συμβατότητας (2.27) και την εξίσωση Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο (2.28). Η κατάσταση μηχανικής ισορροπίας όταν δεν ασκείται δύναμη  $f_e^{(b)} = 0$  είναι

$$\nabla \cdot \sigma = f_e^{(b)} = 0 \quad (2.25a)$$

όπου  $\sigma$  είναι ο τανυστής τάσης, που συνδέεται με την παραμόρφωση  $\epsilon$ . Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  η ηλεκτρική μετατόπιση  $D$  χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες εξισώσεις

$$\begin{aligned} \sigma_p &= c_{pq} \epsilon_q - e_{kp} E_k \\ D_i &= e_{iq} \epsilon_q + \kappa_{ik} E_k \end{aligned} \quad (2.25b)$$

όπου  $c_{pq}$  είναι η γραμμική ελαστική σταθερά,  $e_{kp}$  ο γραμμικός πιεζοηλεκτρικός συντελεστής και  $\kappa_{ik}$  η διηλεκτρική σταθερά. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του κρυστάλλου ZnO με δομή βουρτσίτη, οι παραπάνω όροι γράφονται ως εξής

$$c_{pq} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(c_{11} - c_{12})}{2} \end{pmatrix} \quad (2.26a)$$

$$e_{kp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.26b)$$

$$\kappa_{ik} = \begin{pmatrix} \kappa_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{33} \end{pmatrix} \quad (2.26c)$$

Η εξίσωση συμβατότητας είναι ένας γεωμετρικός περιορισμός που πρέπει να ικανοποιείται από την παραμόρφωση  $\varepsilon_{ij}$  ως εξής

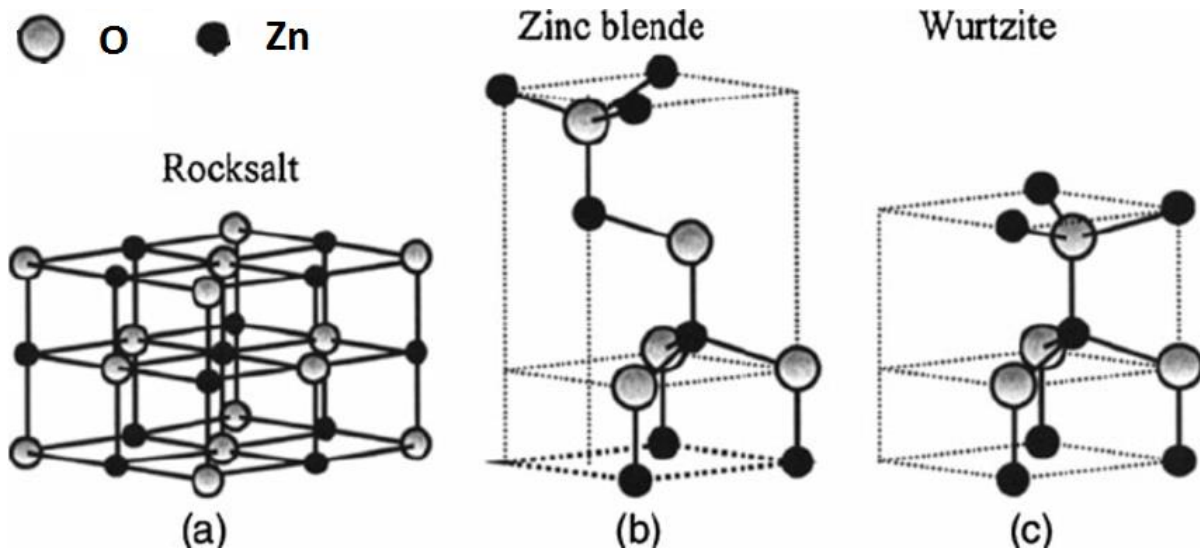
$$e_{ilm} e_{jpr} \frac{\partial^2 \varepsilon_{mp}}{\partial x_l \partial x_r} = 0 \quad (2.27)$$

όπου οι  $e_{ilm}$  και  $e_{jpr}$  είναι οι αντισυμμετρικοί τανυστές Levi-Civita. Τέλος, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση Gauss με δεδομένο ότι δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία  $p_e^{(b)}$

$$\nabla \cdot \vec{D} = p_e^{(b)} = 0 \quad (2.28)$$

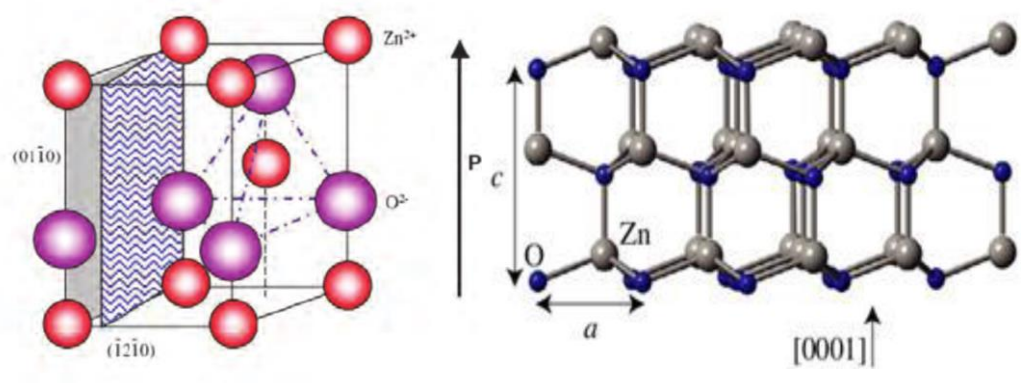
## 2.5 Κρυσταλλική δομή ZnO

Το οξείδιο του ψευδαργύρου είναι μια δυαδική, ανόργανη χημική ένωση που ανήκει στην II-VI κατηγορία ημιαγωγών<sup>4</sup>. Όπως οι περισσότερες ενώσεις αυτής της κατηγορίας, έτσι και το ZnO σχηματίζει κρυστάλλους της κυβικής δομής του σφαλερίτη (zinc blende) αλλά και της εξαγωνικής δομής του βουρτσίτη (wurtzite). Όπως είναι γνωστό, το ZnO έχει τρεις δυνατές κρυσταλλογραφικές δομές: wurtzite, zinc blende και ορυκτού άλατος (rocksalt), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Οι τρεις κρυσταλλικές δομές του ZnO: (a) rocksalt (κυβική συμμετρία), (b) Zinc blende (κυβική συμμετρία) και (c) wurtzite (εξαγωνική συμμετρία).

Σε συνθήκες περιβάλλοντος, η σταθερή θερμοδυναμική φάση είναι αυτή του βουρτσιίτη. Το ZnO με δομή σφαλερίτη είναι μετασταθές και μπορεί να σταθεροποιηθεί μόνο με ετερό-επιταξιακή (hetero-epitaxial) ανάπτυξη πάνω σε υποστρώματα με κυβική συμμετρία (π.χ. Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si). Μέσω υψηλών πιέσεων (10-15 GPa), η δομή βουρτσιίτη μπορεί να μετατραπεί και να πάρει τη δομή του ορυκτού άλατος. Η δομή του άλατος αποτελεί και αυτή μετασταθή φάση, αλλά μπορεί να παραμείνει σε περιβάλλον ατμοσφαιρικής πίεσης. Υπό συμβατικές συνθήκες, το ZnO έχει τη δομή βουρτσιίτη, η οποία χαρακτηρίζεται από εξαγωνική δομή με παραμέτρους  $a = 0.3296$  και  $c = 0.52065$  nm όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Δομή wurtzite του ZnO και οι παράμετροι πλέγματος a,c

Τα ανιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ) και τα κατιόντα ψευδαργύρου ( $Zn^{2+}$ ) σχηματίζουν μια τετραεδρική δομή η οποία δεν έχει κεντρική συμμετρία. Η δομή του ZnO μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνολο εναλλασσόμενων επιπέδων κατά μήκος του άξονα c. Παρόλο που η μοναδιαία κυψελίδα (unit cell) του ZnO είναι ουδέτερη, η κατανομή των ανιόντων και των κατιόντων

μπορεί να λάβει συγκεκριμένο σχηματισμό, όπως ορίζει η κρυσταλλογραφία, ώστε ορισμένες επιφάνειες μπορούν να τερματίζουν στο ένα ή στο άλλο είδος ιόντων, οδηγώντας σε θετικά ή αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες (πολικές επιφάνειες). Η πιο γνωστή πολική επιφάνεια είναι η επιφάνεια της βάσης. Τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα παράγουν θετικά φορτισμένες Zn-(0001) και αρνητικά φορτισμένες O-(000 $\bar{1}$ ) πολικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δίπολα και αυθόρμητη πόλωση κατά μήκος του άξονα c. Για να διατηρήσουν σταθερή δομή, οι πολικές επιφάνειες έχουν έδρες ή παρουσιάζουν τεράστιες επιφανειακές αναδομήσεις. Επίσης οι επιφάνειες αυτές περικλείονται από τις μη πολικές επιφάνειες (10 $\bar{1}$ 0) και (11 $\bar{2}$ 0). Εξαιτίας αυτής της πολικότητας και της έλλειψης κεντρικής συμμετρίας της δομής βουρτσίτη, καθίσταται δυνατή ή αξιοποίηση των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων του ZnO στο πεδίο των ηλεκτρικών γεννητριών για αυτόνομα συστήματα.

### 2.5.1 Τεχνικές ανάπτυξης και εναπόθεσης ZnO

Πολλές τεχνικές παραγωγής, όπως η φυσική ή χημική αέρια εναπόθεση (Physical Vapor Deposition ή Chemical Vapor Deposition) και η εναπόθεση παλμικού laser (pulsed laser deposition), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την απόκτηση υψηλής ποιότητας νανοραβδίων ZnO<sup>11</sup>. Όμως, οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν συχνά περίπλοκες διαδικασίες χρησιμοποιώντας εξεζητημένο και ακριβό εξοπλισμό. Από την άλλη μεριά, η ηλεκτροχημική εναπόθεση και οι υδροθερμικές μέθοδοι παραγωγής, αποδείχθηκαν ως εναλλακτικοί τρόποι για την παραγωγή μεγάλων και καλά προσανατολισμένων νανοραβδίων ZnO. Οι χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 100°C) και το χαμηλό κόστος αυτών των μεθόδων, τις καθιστά κατάλληλες για ολοκλήρωση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές σε πυρίτιο.

Η ανάπτυξη των νανοραβδίων ZnO είναι μια διαδικασία που ολοκληρώνεται σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα αποτελείται από την εναπόθεση στρώματος σπόρων (seed layer) στο καθαρισμένο υπόστρωμα ενώ το δεύτερο βήμα είναι η ανάπτυξη (growth) των νανοραβδίων ZnO πάνω στο στρώμα σπόρων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η υδροθερμική μέθοδος ανάπτυξης νανοραβδίων ZnO. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χημικές ενώσεις για την υδροθερμική μέθοδο είναι οι Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Zinc nitrate hexahydrate) και η Hexamethylenetetramine (HMTA). Το Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> παρέχει τα ιόντα Zn<sup>2+</sup> που απαιτούνται για την ανάπτυξη των νανοραβδίων ενώ τα μόρια του νερού που βρίσκονται στο διάλυμα παρέχουν τα ιόντα O<sup>2-</sup>. Παρόλο που η ακριβής επίδραση

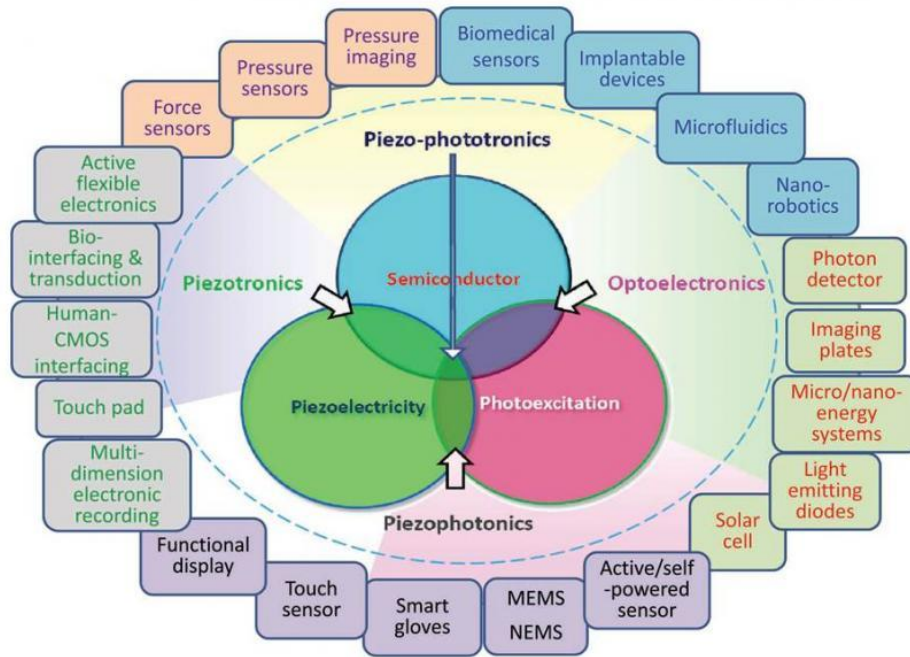
της ΗΜΤΑ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του νανοραβδίου ZnO δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη, πιστεύεται ότι δρα ως ασθενής βάση και υδρολύεται με αργό ρυθμό μέσα στο διάλυμα, παράγοντας OH<sup>-</sup>. Αν η ΗΜΤΑ διαλυόταν γρήγορα στο νερό, θα παρήγαγε μεγάλη ποσότητα OH<sup>-</sup> σε σύντομο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα τα ιόντα Zn<sup>2+</sup> θα μετατρέπονταν σε ίζημα πολύ γρήγορα εξαιτίας του υψηλού pH στο διάλυμα, το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα τη μη ανάπτυξη προσανατολισμένων νανοραβδίων ZnO.

### 2.5.2. Πιεζοηλεκτρισμός σε νανοδομές

Η μεγαλύτερη ανακάλυψη στις νανοδομές ZnO ήταν η ανάπτυξη νανοραβδίων πάνω σε υποστρώματα Si, και εύκαμπτων υλικών, τα οποία παρουσίαζαν πιεζοηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα τους, όταν βρισκόταν υπό μηχανική παραμόρφωση. Ο αρχικός χαρακτηρισμός των νανοραβδίων έγινε με την τεχνική AFM (atomic force microscopy). Συγκεκριμένα η ακίδα του AFM παραμόρφωνε την άκρη του νανοραβδίου και μέσω ειδικού κυκλώματος καταγραφόταν η πτώση τάσης στα άκρα του. Η πτώση τάσης που μετρήθηκε για πρώτη φορά ήταν 0.6V, τιμή ικανή για να παρέχει ορθή τάση πόλωσης σε μια συνηθισμένη δίοδο.

Η πρώτη νανογεννήτρια που χρησιμοποίησε νανοραβδία ZnO ως πιεζοηλεκτρικό υλικό, κατασκευάστηκε το 2007 από τον Z.L.Wang. Το πλεονέκτημα των νανοραβδίων είναι ότι μπορούν να διεγερθούν από πολύ μικρές δονήσεις και η συχνότητα διέγερσης να είναι από ένα έως πολλές χιλιάδες Hz, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για την συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται ευρύτατα σε συστήματα ανίχνευσης, σε ενεργοποιητές και στην συλλογή ενέργειας. Τα συμβατικά πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως το PZT και το PVDF είναι μονωτές με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η κατασκευή λειτουργικών ηλεκτρονικών ή οπτοηλεκτρονικών διατάξεων. Με τη χρήση όμως υλικών, όπως ZnO, GaN και CdS τα οποία παρουσιάζουν ταυτοχρόνως πιεζοηλεκτρικές και ημιαγώγιμες ιδιότητες, κατέστη δυνατή η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρισμού με οπτοηλεκτρονικές διαδικασίες διέγερσης, με αποτέλεσμα να επινοηθούν ορισμένα νέα πεδία.<sup>812</sup>



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα που δείχνει τη σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρισμού, της φωτονικής διέγερσης και των ημιαγωγών, καθώς και πιθανές εφαρμογές του κλάδου.

## 2.6 Μικροηλεκτρομηχανικοί (MEMS) πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου

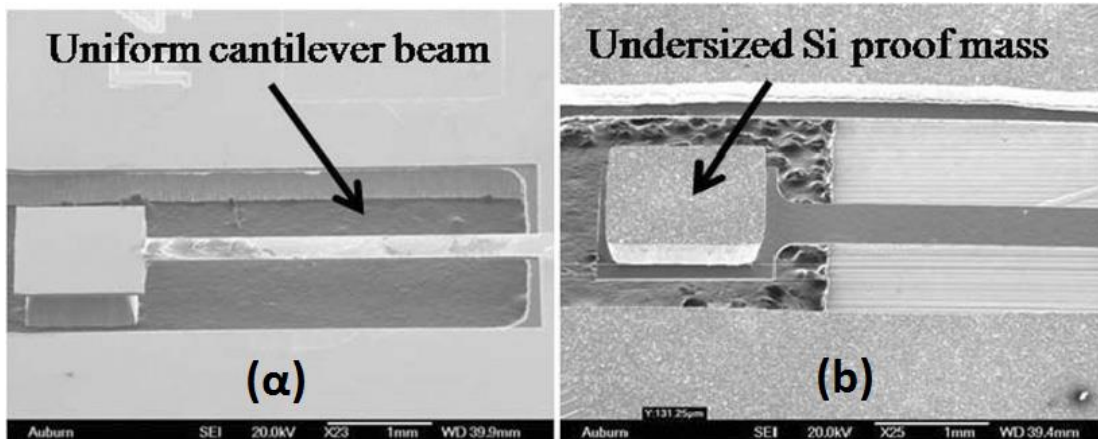
Η κατασκευή των περισσότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και διατάξεων βασίζεται στην τεχνολογία Si. Σαν αποτέλεσμα, οι πιεζογεννήτριες πυριτίου θα μπορούσαν να διεισδύσουν στην αγορά για την αυτονόμηση των συσκευών αυτών χωρίς περαιτέρω τροποποιήσεις των διαδικασιών παραγωγής. Επίσης από τη στιγμή που και το ZnO είναι συμβατό με την τεχνολογία CMOS, θα μπορούσε μία πιεζογεννήτρια να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος μιας ψηφίδας (chip) μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία. Για τους προαναφερθείς λόγους επιλέχθηκε το Si ως υπόστρωμα των μικρογεννητριών που κατασκευάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται γεννήτριες MEMS τύπου αιωρούμενης προβόλου καθώς και πιο σύνθετες δομές που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες.

Οι Shen et al.<sup>13</sup> σχεδίασαν ένα συλλέκτη ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου, με ενσωματωμένη μάζα αδράνειας από Si και πιεζοηλεκτρικό υλικό το PZT. Για την κατασκευή της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες διαδικασίες MEMS: υγρή οξείδωση, λιθογραφία και sputtering για τα ηλεκτρόδια. Η εναπόθεση του πιεζοηλεκτρικού υλικού έγινε

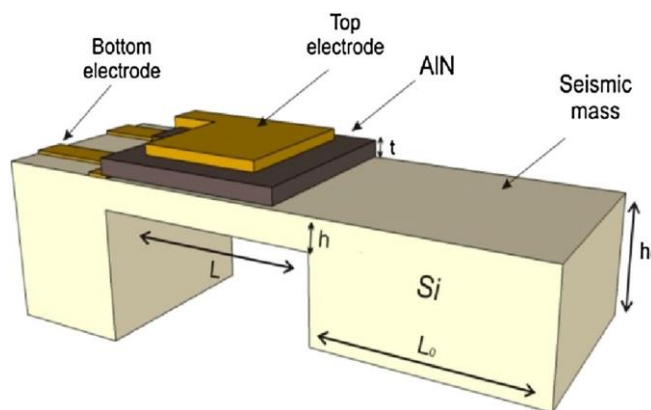


με τη μέθοδο sol-gel και το πάχος έφτασε το 1 $\mu$ m. Η απελευθέρωση της μάζας αδράνειας έγινε από την πίσω πλευρά με την τεχνική RIE (reactive ion etching). Οι διαστάσεις της προβόλου ήταν 4800 x 400 x 36  $\mu$ m<sup>3</sup> ενώ η μάζα αδράνειας 1360 x 940 x 456  $\mu$ m<sup>3</sup>. Η πειραματική απόδοση στο βέλτιστο φορτίο (6k $\Omega$ ) ήταν 160mV<sub>pk</sub> τάση εξόδου και 2.15 $\mu$ W ή 3272 $\mu$ W/cm<sup>3</sup> ισχύς εξόδου σε συχνότητα συντονισμού 461.15 Hz.

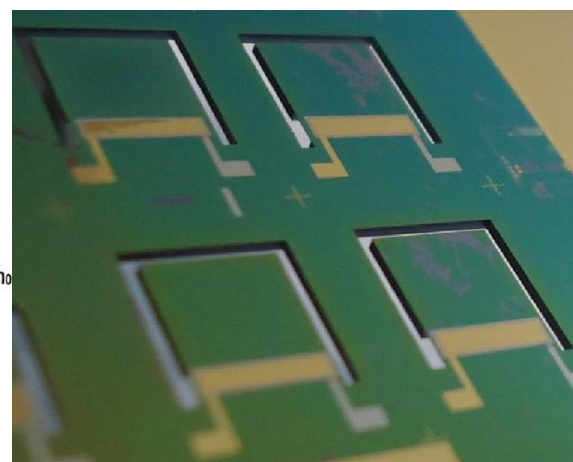


Εικόνα 2.9: Φωτογραφίες συλλέκτη ενέργειας από SEM: (a) μπροστά πλευρά, (b) πίσω πλευρά

Οι Dow et al.<sup>14</sup> σχεδίασαν και κατασκεύασαν δύο συλλέκτες ενέργειας χρησιμοποιώντας το νιτρίδιο του αλουμινίου (AlN) ως πιεζοηλεκτρικό υλικό για τη μετατροπή της ενέργειας από τυχαίες δονήσεις. Η κατασκευή τους έγινε χρησιμοποιώντας τεχνολογία MEMS σε 4'' δίσκιο SOI, με το AlN να είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, πάνω σε μία πρόβολο πυριτίου που διαθέτει μάζα αδράνειας (5600 x 5600  $\mu$ m<sup>2</sup>) στη μία άκρη. Η διαφορά των δύο συσκευών ήταν στο πάχος του υμενίου πυριτίου. Συγκεκριμένα η συσκευή 1 είχε υμένιο Si 20 $\mu$ m, 1 $\mu$ m SiO<sub>2</sub> και 350 $\mu$ m υπόστρωμα Si ενώ το η συσκευή 2 είχε υμένιο Si 45 $\mu$ m, 1 $\mu$ m SiO<sub>2</sub> και 400 $\mu$ m υπόστρωμα.



Εικόνα 2.10: Σχέδιο συλλέκτη ενέργειας

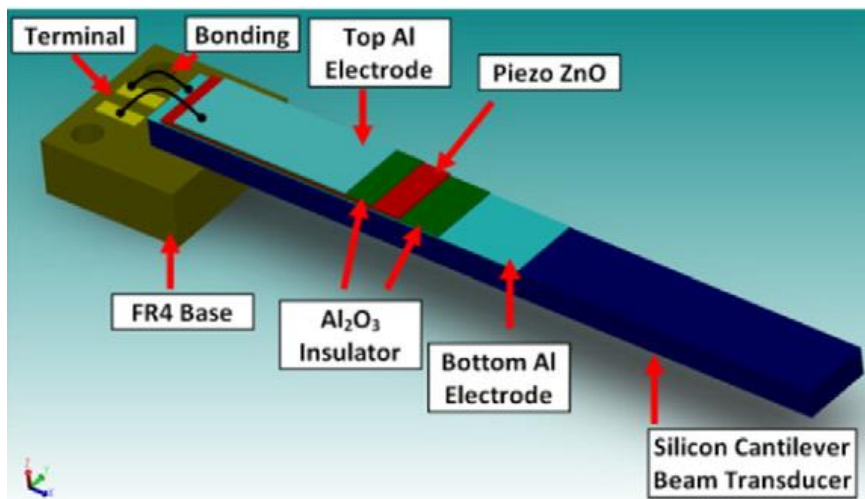


Εικόνα 2.11: Κατασκευασμένες γεννήτριες



Η μέγιστη ισχύς της συσκευής 1 ήταν  $10\mu\text{W}$  για διέγερση  $1\text{g}$  ενώ η ελάχιστη ισχύς ήταν  $1.7\mu\text{W}$  για  $0.2\text{g}$ . Η αντίσταση του φορτίου για μέγιστη ισχύ προσδιορίστηκε στο  $1\text{M}\Omega$ . Παρόλα αυτά, η συσκευή 1 δεν μπορούσε να αντέξει μεγαλύτερες επιταχύνσεις και έσπασε σε επιτάχυνση  $1.5\text{g}$ . Η μέγιστη ισχύς της συσκευής 2 όταν υποβλήθηκε σε επιτάχυνση  $2\text{g}$  ήταν  $34.78\mu\text{W}$  ενώ η αντίσταση φορτίου της, για μέγιστη ισχύ, προσδιορίστηκε στα  $495\text{k}\Omega$ . Οι ιδιοσυχνότητες των δύο συσκευών ήταν  $186\text{Hz}$  και  $572\text{Hz}$  για την πρώτη και τη δεύτερη αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι η παραγόμενη ισχύς ήταν ευθέως ανάλογη της επιτάχυνσης που δεχόταν η συσκευή, γεγονός που οφειλόταν στη μεγαλύτερη κάμψη της προβόλου.

Οι Prusakova et al. [3]<sup>15</sup> ανέπτυξαν συλλέκτη ενέργειας που χρησιμοποιεί το  $\text{ZnO}$  σαν πιεζοηλεκτρικό υλικό. Η δομή του αποτελείται από ένα υμένιο  $\text{ZnO}$  ανάμεσα σε δύο στρώματα μονωτικού (οξείδιο του αργιλίου -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και εξωτερικές επαφές αλουμινίου, τα οποία έχουν εναποτεθεί πάνω σε υπόστρωμα  $\text{Si}$ . Οι συνολικές διαστάσεις της προβόλου είναι  $32 \times 7 \times 0.5 \text{ mm}^3$ .

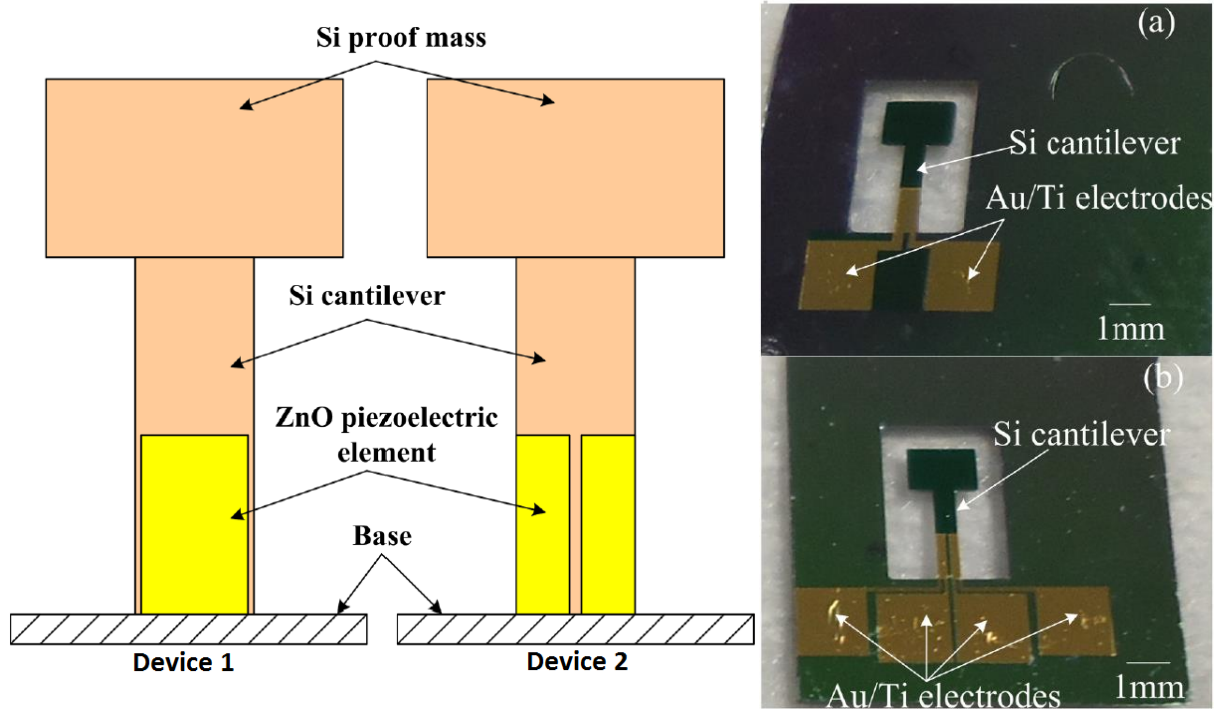


Εικόνα 2.12: 3D μοντέλο πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας -  $\text{ZnO}$

Η συχνότητα συντονισμού προσδιορίστηκε στα  $594.9\text{Hz}$  και η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) μετρήθηκε στα  $0.975\text{V}$ . Όπως ήταν αναμενόμενο, η τάση κλειστού κυκλώματος αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης φορτίου ενώ η μέγιστη τιμή της ισχύς εξόδου ήταν  $20\mu\text{W}$  σε αντίσταση εξόδου  $10\text{k}\Omega$ .

Οι Wang και Du [4]<sup>16</sup> σχεδίασαν και κατασκεύασαν δύο πιεζοηλεκτρικές MEMS γεννήτριες που αποτελούνται από μία πρόβολο πυριτίου, μάζα αδράνειας πυριτίου και πιεζοηλεκτρικό υμένιο από  $\text{ZnO}$ . Οι διαστάσεις της προβόλου και της μάζας αδράνειας είναι ίδιες και στις δύο συσκευές, δηλαδή  $2000 \times 500 \mu\text{m}^2$  και  $1500 \times 1000 \mu\text{m}^2$  αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο συσκευών είναι στις διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

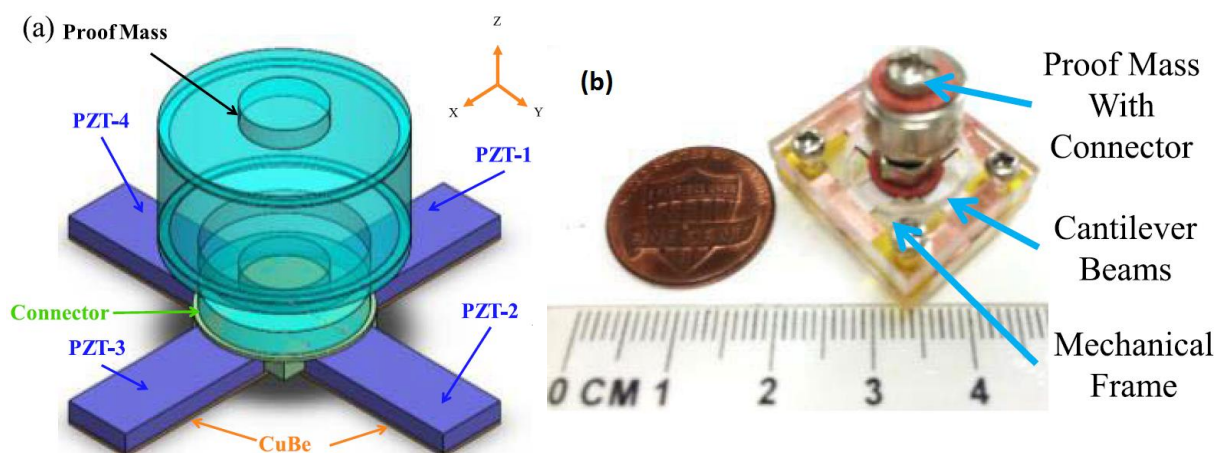
Συγκεκριμένα, το υμένιο ZnO της συσκευής 1 έχει διαστάσεις  $1000 \times 480 \times 1.4 \mu\text{m}^3$  ενώ η συσκευή 2 έχει δύο υμένια ZnO, το ένα δίπλα στο άλλο, διαστάσεων  $1000 \times 240 \times 1.4 \mu\text{m}^3$ . Από τις διαστάσεις των 2 συσκευών παρατηρείται ότι η επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 2.13: Σχηματική απεικόνιση των 2 συσκευών και φωτογραφία μετά την κατασκευή τους. Οι δύο συλλέκτες ενέργειας είχαν σχεδόν τις ίδιες συχνότητες συντονισμού με την συσκευή 1 να συντονίζεται στα 1300.1Hz ενώ η 2 στα 1313.4Hz. Η διαφορά στις συχνότητες συντονισμού μπορεί να προκλήθηκε από υπέρ-εγχάραξη (over etching) της προβόλου πυριτίου κατά τη διαδικασία DRIE. Όπως και στις προηγούμενες μικρογεννήτριες έτσι και εδώ υπήρχε αύξηση της τάσης εξόδου με την αύξηση της αντίστασης του φορτίου. Η μέγιστη τάση της συσκευής 2, με παραλληλία των δύο επιμέρους πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, ήταν 2.06V σε φορτίο 1 MΩ. Αντίστοιχα η μέγιστη τάση της συσκευής 1 για το ίδιο φορτίο ήταν 1.77V. Παρατηρήθηκε επίσης ότι για φορτίο από 0.1-1MΩ, η τάση εξόδου για παράλληλη σύνδεση είναι περίπου διπλάσια από αυτή του μονού πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, όπως ήταν αναμενόμενο. Τέλος χρησιμοποιώντας τον τύπο  $P_{load} = \frac{V_{pp}^2}{4R_{load}}$  υπολογίστηκε ότι η ισχύς εξόδου της συσκευής 2 παίρνει τη μέγιστη τιμή της ( $1.25\mu\text{W}$ ) για αντίσταση φορτίου 0.6MΩ και παράλληλη σύνδεση των δύο στοιχείων ενώ η συσκευή 1 είχε ισχύ εξόδου  $0.98\mu\text{W}$  σε φορτίο 0.38MΩ. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν με επιτάχυνση  $10\text{m/s}^2$  (περίπου 1g).

## 2.7 Σύνθετοι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας

Οι Hung et al.<sup>17</sup> σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα συλλέκτη ενέργειας τριών αξόνων, χρησιμοποιώντας μια μηχανική-πιεζοηλεκτρική διάταξη. Η πρωτότυπη γεννήτρια χρησιμοποιεί το νόμο του Νεύτωνα για την αδράνεια και το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκειμένου να μετατρέψει τις δονήσεις του περιβάλλοντος, σε όλους τους άξονες, σε ηλεκτρική τάση. Η κατασκευή της γεννήτριας αποτελείται από 3 μέρη: Τις 4 προβόλους από PZT/BeCu με πάχη 1/0.25 mm, πάνω και κάτω ακρυλικές πλάκες καθώς και το σύνδεσμο με τη μάζα αδράνειας. Ο χαρακτηρισμός της γεννήτριας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μηχανήματος δονήσεων (shaker).

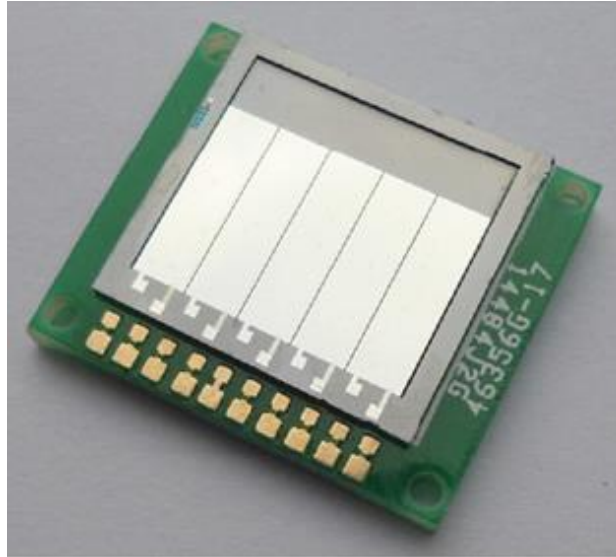


Εικόνα 2.14: (a) Σχηματική απεικόνιση συλλέκτης ενέργειας, (b) Κατασκευασμένη γεννήτρια

Οι συχνότητες συντονισμού που προέκυψαν από τις μετρήσεις ήταν 75 Hz με εξωτερική διέγερση στο x-y επίπεδο και 95Hz με εξωτερική διέγερση στο z επίπεδο. Με σύνδεση σε σειρά των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων PZT-1 και PZT-3 και διέγερση στον x άξονα 3.5g η μέγιστη τάση εξόδου ήταν 3.72V και η μέγιστη ισχύς εξόδου 1.11μW ή 3.81μW/cm<sup>3</sup>. Για την ίδια συνδεσμολογία αλλά διέγερση 3.8g στον z άξονα η μέγιστη τάση εξόδου ήταν 1.76V και η ισχύς 0.37μW ή 0.85μW/cm<sup>3</sup>.

Οι Zhao et al.<sup>18</sup> σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια μικρογεννήτρια που αποτελείται από 5 προβόλους συνδεδεμένες με κοινή μάζα αδράνειας. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποίησαν ήταν το AlN σε υπόστρωμα πυριτίου. Για την κατασκευή της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι MEMS, όπως sputtering για το πιεζοηλεκτρικό και DRIE για την εγχάραξη του πυριτίου. Η συχνότητα συντονισμού προσδιορίστηκε στα 230.8 Hz με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της κάθε προβόλου για διέγερση 0.2g να είναι από 252 έως 334mV. Η διαφορά που παρατηρήθηκε στις τάσεις οφειλόταν στην ανομοιομορφία του

πιεζοηλεκτρικού υλικού κατά μήκος της γεννήτριας. Η ισχύς της μεσαίας προβόλου, υπό το βέλτιστο φορτίο (350k $\Omega$ ), ήταν 0.053 και 0.653  $\mu$ W για διεγέρσεις 0.2g και 1g αντίστοιχα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με παράλληλη και σε σειρά σύνδεση των προβόλων.



Εικόνα 2.15: Μικρογεννήτρια με 5 προβόλους και κοινή μάζα αδράνειας

Για παράλληλη σύνδεση των 5 προβόλων η μικρογεννήτρια παρουσίασε τη μέγιστη ισχύ της που ήταν 3.249 $\mu$ W, ενώ για σύνδεση εν σειρά η ισχύς ήταν 0.902 $\mu$ W. Τέλος η γεννήτρια συνδέθηκε σε κύκλωμα ανόρθωσης τάσης, όπου παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην παραγόμενη ισχύ του κυκλώματος ( $P_{\text{parallel}} = 0.342\mu$ W και  $P_{\text{series}} = 0.276\mu$ W αντίστοιχα).

## 2.8 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα βασικά στοιχεία θεωρίας που διέπουν τη λειτουργία μιας πιεζοηλεκτρικής μικρογεννήτριας τύπου αιωρούμενης προβόλου. Επίσης έγινε εκτενής περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς και αναφορά του έργου άλλων ερευνητών πάνω στις πιεζογεννήτριες τύπου MEMS.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μικρογεννητριών<sup>8</sup>. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν δύο τύποι μικρογεννητριών. Ο πρώτος τύπος βασίστηκε στην τεχνολογία δισκίων SOI (silicon on insulator) και οδήγησε στην κατασκευή μικρογεννητριών τύπου αιωρούμενης προβόλου ενώ ο δεύτερος στην κατασκευή μεμβρανών με μάζα αδράνειας χρησιμοποιώντας δισκία DSP (dual side polished). Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους δύο τύπους μικρογεννητριών.

### 3.2 Διαδικασίες κατασκευής μικρογεννητριών

Ο καθαρός χώρος (cleanroom) είναι το περιβάλλον που λαμβάνει χώρα η κατασκευή των MEMS. Αποτελεί ένα ελεγχόμενο περιβάλλον που είναι σχεδιασμένο να μειώνει ή να εξαλείφει τη μόλυνση του χώρου. Ως μόλυνση θεωρείται ό,τι μπορεί να επέμβει στην παραγωγή και στη λειτουργία του προϊόντος. Οι κύριοι παράγοντες μόλυνσης είναι ο αέρας, το προσωπικό και οι διαδικασίες του χώρου, ο στατικός ηλεκτρισμός και τα αέρια που παράγονται από τις μεθόδους κατασκευής<sup>19</sup>. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι κύριες διεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των μικροδομών.

#### 3.2.1 Θερμική οξείδωση

Οξείδωση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα στρώμα οξειδίου παράγεται στην επιφάνεια του πυριτίου<sup>20</sup>. Αποτελεί μια από τις βασικότερες διαδικασίες κατά την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς χρησιμοποιείται ως μάσκα της εμφύτευσης ή της διάχυσης προσμίξεων μέσα στο πυρίτιο αλλά και για αδρανοποίηση και μόνωση της επιφάνειας. Οι χημικές αντιδράσεις που περιγράφουν την οξείδωση, ανάλογα με το περιβάλλον που πραγματοποιείται είναι οι εξής:

- $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$  Ξηρή οξείδωση
- $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$  Υγρή οξείδωση

Για την ανάλυση της συγκεκριμένης διαδικασίας χρησιμοποιείται το μοντέλο των Deal-Grove. Το μοντέλο βασίζεται στη φυσική αρχή ότι το οξυγόνο ή οι ατμοί H<sub>2</sub>O διαχέονται μέσα στο οξείδιο που έχει σχηματιστεί και αντιδρούν με το Si.

Σύμφωνα με τη θεωρία της οξειδωσης, για συγκέντρωση ισορροπίας στην εξωτερική επιφάνεια του οξειδίου C<sub>0</sub>, το πάχος του οξειδίου x σε σχέση με το χρόνο οξειδωσης t δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$x = \frac{D}{k} \left[ \sqrt{1 + \frac{2 \cdot C_0 \cdot k^2 \cdot (t + \tau)}{D \cdot C_1}} - 1 \right] \quad (3.1)$$

όπου με D συμβολίζεται ο συντελεστής διάχυσης, k ο επιφανειακός ρυθμός οξειδωσης και C<sub>1</sub> ο αριθμός των μορίων του οξειδωτικού μέσου ανά μονάδα όγκου του οξειδίου.

Αν d<sub>0</sub> το αρχικό πάχος του οξειδίου τότε  $\tau \equiv (d_0^2 + 2Dd_0/k)C_1/2DC_0$

Για μικρούς χρόνους η λύση προσεγγίζεται από τη γραμμική σχέση:

$$x \cong \frac{C_0 \cdot k}{C_1} (t + \tau) \quad (3.2)$$

Ενώ για μεγάλους χρόνους από την παραβολική σχέση:

$$x \cong \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot C_0}{C_1} (t + \tau)} \quad (3.3)$$

Αν οριστούν  $A = \frac{2 \cdot D}{k}$  και  $B = \frac{2 \cdot D \cdot C_0}{C_1}$  τότε οι εξισώσεις (3.2),(3.3) γράφονται αντίστοιχα για τη γραμμική περιοχή:

$$x = \frac{B}{A} (t + \tau)$$

και για την παραβολική περιοχή:

$$x^2 = B(t + \tau)$$

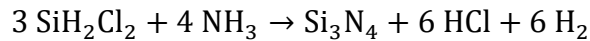
Το μοντέλο οξειδωσης των Deal και Grove, βρίσκεται σε εξαιρετικά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, τόσο για την υγρή όσο και την ξηρή οξείδωση για πιέσεις 0,2-1atm και θερμοκρασίες 700-1300°C. Αποκλίσεις υπάρχουν για SiO<sub>2</sub> με πάχος μικρότερο των 30nm που αναπτύχθηκαν σε ξηρό O<sub>2</sub>.

### 3.2.2 LPCVD - Εναπόθεση νιτριδίου του πυριτίου

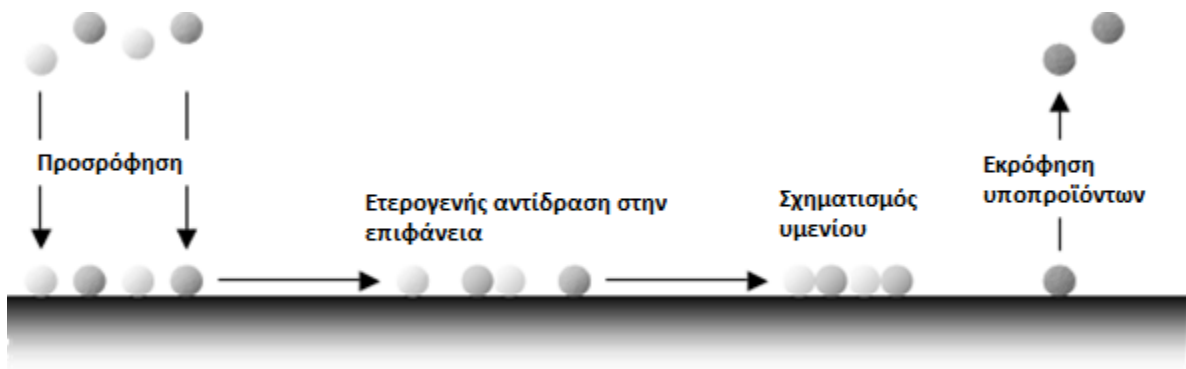
Η χημική εναπόθεση ατμών (Χ.Ε.Α) είναι μια τεχνική σύνθεσης υλικών από συστατικά τα οποία βρίσκονται σε αέρια κατάσταση και αντιδρούν σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα σε ένα

φούρνο-αντιδραστήρα, σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα πάνω σε επιλεγμένες επιφάνειες. Συγκεκριμένα η Χ.Ε.Α χαμηλής πίεσης νιτριδίου οδηγεί σε υμένια νιτριδίου με πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, μεγάλη κάλυψη στις άκρες, αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες αλλά και το πιο σημαντικό, χαμηλούς χρόνους εγχάραξης.<sup>21</sup>

Η διαδικασία εναπόθεσης Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> πραγματοποιείται σύμφωνα με την εξής χημική αντίδραση:



Αρχικά μεταφέρονται τα αντιδρώντα αέρια, διχλωροσιλάνη και αμμωνία στο φούρνο, όπου διαχέονται μέσα από ένα οριακό στρώμα (boundary layer) στην επιφάνεια του υποστρώματος. Στην συνέχεια ακολουθεί η προσρόφηση των αερίων στην επιφάνεια του υποστρώματος και η ετερογενής αντίδραση των αερίων με την στερεά επιφάνεια. Τέλος ακολουθεί η εκρόφηση από την επιφάνεια του υποστρώματος των υποπροϊόντων της αντίδρασης και η εξαγωγή τους από τον αντιδραστήρα<sup>22</sup>. Όλη η διαδικασία πραγματοποιείται στους 800°C και σε πίεση 230mTorr.



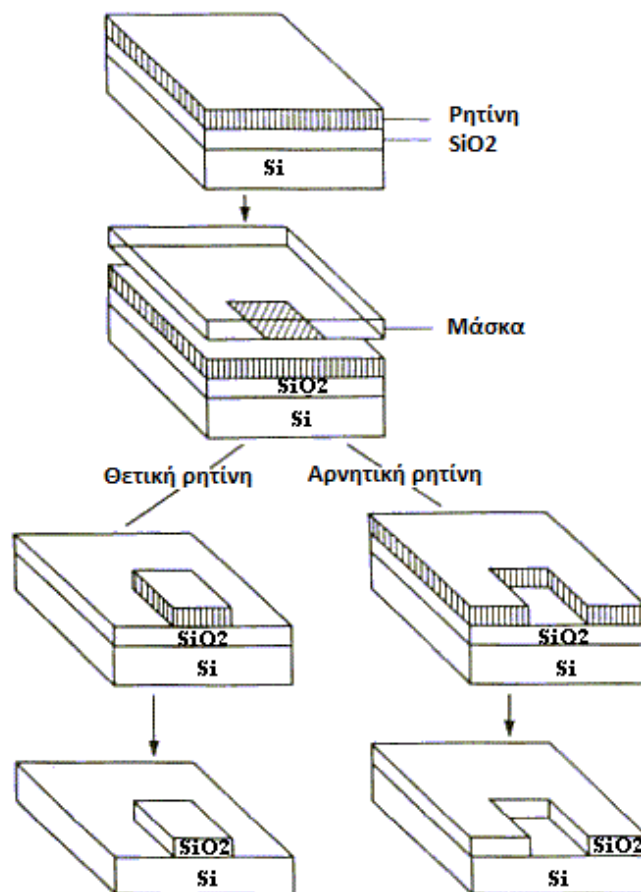
Εικόνα 3.1: Επιμέρους βήματα σε μια αντίδραση Ε.Χ.Α

### 3.2.3 Λιθογραφία

Λιθογραφία είναι η διαδικασία μεταφοράς δισδιάστατων γεωμετρικών σχημάτων από μια μάσκα, πάνω στην επιφάνεια του πυριτίου. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να επιτευχθεί η μεταφορά των λεπτομερειών της μάσκας πάνω στο πυρίτιο: με υπεριώδες φως (UV light), με ακτίνες Χ, με δέσμη ηλεκτρονίων (e-beam) και με δέσμη ιόντων. Για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στη βιομηχανία χρησιμοποιείται κυρίως η φωτογραφική μέθοδος με το υπεριώδες φως. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, στην επιφάνεια του δισκίου απλώνεται ομοιόμορφα ένα φωτοευαίσθητο υλικό (ρητίνη), σε υγρή κατάσταση. Το στρώμα της ρητίνης ξηραίνεται κατάλληλα (π.χ. σε φούρνο) και στη συνέχεια εκτίθεται στην UV ακτινοβολία μέσω της μάσκας. Η ρητίνη που χρησιμοποιείται είναι ευαίσθητη στην UV



ακτινοβολία με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η μοριακή της δομή κάτω από τις διαφανείς περιοχές της μάσκας. Ακολουθεί η διαδικασία της εμφάνισης, όπου τοποθετείται το δείγμα μέσα σε έναν οργανικό διαλύτη. Υπάρχουν δύο ειδών φωτοευαίσθητα υλικά, για θετική και για αρνητική λιθογραφία. Αν είναι "θετικό", τότε μετά την εμφάνιση θα μείνουν ανέπαφα τα τμήματα που δεν εκτέθηκαν στο φως και θα αφαιρεθούν τα υπόλοιπα. Αν είναι "αρνητικό", τότε θα συμβεί ακριβώς το αντίθετο. Έπειτα το δείγμα υποβάλλεται σε υγρή (π.χ. διάλυμα HCl ή BHF) ή/και ξηρή εγχάραξη (πλάσμα  $\text{SF}_6$ ) προκειμένου να αφαιρεθεί το  $\text{SiO}_2$  και το νιτρίδιο. Τέλος ακολουθεί εμφότιση σε ακετόνη για την απομάκρυνση της ρητίνης από το υπόλοιπο δείγμα (διαδικασία lift-off).



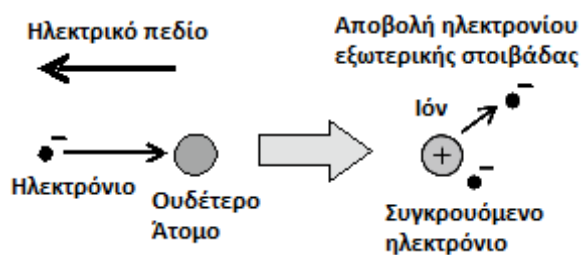
Εικόνα 3.2: Στάδια λιθογραφίας

### 3.2.4 Ξηρή εγχάραξη με πλάσμα

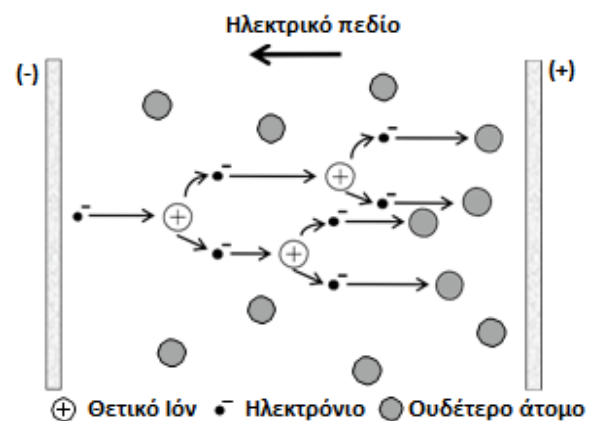
Το πλάσμα είναι ένα ιονισμένο αέριο στο οποίο υπάρχει σχεδόν ο ίδιος αριθμός από ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) και ιόντα<sup>23</sup>. Πρόκειται δηλαδή για μία ουδέτερη κατάσταση, αν το δει κανείς



μακροσκοπικά. Το πλάσμα έχει αγωγίμες ιδιότητες, αφού τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα του. Όταν εφαρμόζεται τάση σε δύο ηλεκτρόδια μέσα σε ένα θάλαμο εγχάραξης, τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο, αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια και συγκρούονται με τα άτομα και τα μόρια που υπάρχουν στο χώρο. Αν η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού του ατόμου ή του ιόντος στο οποίο προσκρούει, αποβάλλεται τότε το ηλεκτρόνιο της εξωτερικής του στοιβάδας. Σαν αποτέλεσμα, το ουδέτερο άτομο ή το μόριο μετατρέπεται σε ιόν (Εικόνα 3.3). Στη συνέχεια το ηλεκτρόνιο που αποβλήθηκε προστίθεται στο αρχικό ηλεκτρόνιο με συνέπεια να υπάρχουν τώρα 2 ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, συγκρούονται με άλλα μόρια και άτομα και παράγουν με τη σειρά τους νέα ιόντα και ηλεκτρόνια. Ο αριθμός των ιόντων και των ηλεκτρονίων αυξάνεται γεωμετρικά ώσπου τελικά ξεπερνούν μία οριακή τιμή πάνω από την οποία πραγματοποιείται εκκένωση του φορτίου και δημιουργείται το πλάσμα. Ο μηχανισμός αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.3: Παραγωγή ιόντος από πρόσκρουση



Εικόνα 3.4: Αρχή της εκκένωσης αερίων

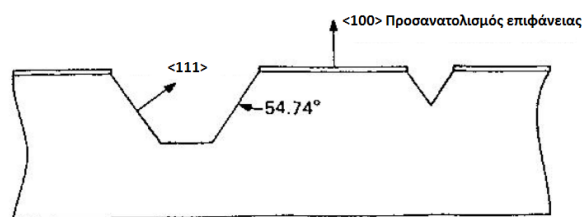
Στην ξηρή εγχάραξη το πλάσμα βομβαρδίζει την επιφάνεια του δείγματος, με τρόπο παρόμοιο με την τεχνική ιοντοβολής (sputtering). Επιπλέον ο βομβαρδισμός προσδίδει μια κατευθυντική συνιστώσα στη διαδικασία, με συνέπεια οι τεχνικές ξηρής εγχάραξης να χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κάθετων τοιχωμάτων. Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ραδιοσυχνότητες (RF) στο εύρος 10-15MHz.<sup>24</sup>

### 3.2.5 Ανισοτροπική εγχάραξη KOH

Η υγρή ανισοτροπική εγχάραξη είναι μια διαδικασία επιλεκτικής αφαίρεσης στρωμάτων πυριτίου χρησιμοποιώντας υγρά χημικής εγχάραξης, ο ρυθμός της οποίας εξαρτάται από την

κρυσταλλογραφική διεύθυνση του πυριτίου, την περιεκτικότητα και τη θερμοκρασία του διαλύματος όπου βυθίζεται το δείγμα. Οι πρώτες τεχνικές γύρω από την ανισοτροπική εγχάραξη αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1960, στα Bell Laboratories, κυρίως μέσω δοκιμών. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των χημικών εγχάραξης είναι ότι ο ρυθμός με τον οποίο εγχάρασσονται το πυρίτιο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό<sup>25</sup>. Συγκεκριμένα τα επίπεδα που είναι παράλληλα στην κρυσταλλογραφική διεύθυνση <100> έχουν παρόμοιο ή μικρότερο ρυθμό εγχάραξης από αυτά που είναι παράλληλα στην <110>, ενώ αυτά που είναι παράλληλα με την <111> εγχάρασσονται με πολύ μικρότερο ρυθμό (από 40 έως 400 φορές ανάλογα το διάλυμα). Επιπλέον ο ρυθμός εγχάραξης για όλα τα επίπεδα αυξάνεται με τη θερμοκρασία και η τραχύτητα των επιφανειών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, επομένως η εγχάραξη σε υψηλές θερμοκρασίες δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Στην πράξη όμως, επιλέγονται θερμοκρασίες της τάξης των 80-85°C για να αποφευχθεί η εξάτμιση του διαλύματος και η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας στο διάλυμα<sup>26</sup>.

Εξαιτίας αυτής της ανισοτροπίας, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν δομές που δεν θα ήταν εφικτές αλλιώς. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί ένα δισκίο πυριτίου προσανατολισμένο στο <100> επίπεδο με ένα στρώμα SiO<sub>2</sub> στην επιφάνεια του και ένα τετράγωνο άνοιγμα. Μετά την έκθεση του στο διάλυμα εγχάραξης, θα δημιουργηθεί ένα πηγάδι σε σχήμα κόλουρης πυραμίδας με τις πλευρές της να οριοθετούνται από τα επίπεδα <111> σε γωνία 54,74° σε σχέση με την επιφάνεια του πυριτίου.

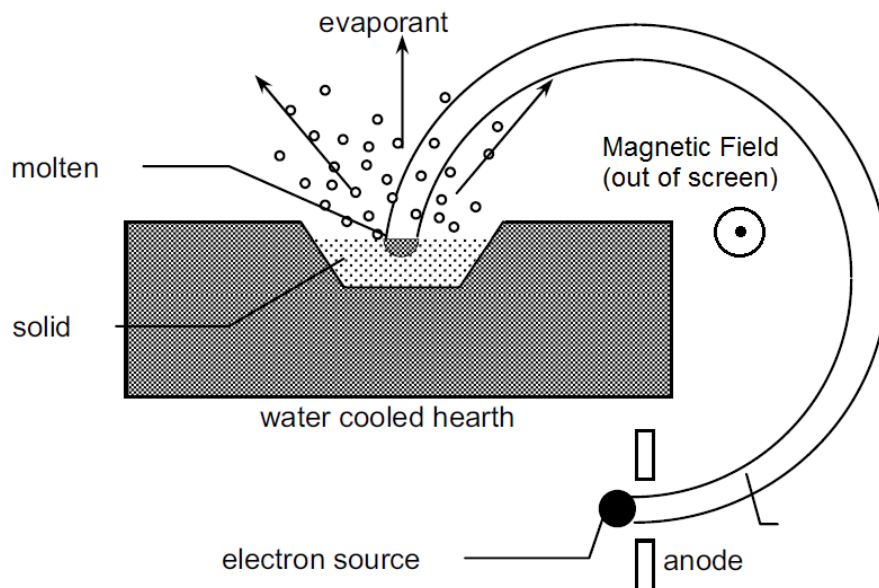


Εικόνα 3.5: Ανισοτροπική εγχάραξη σε πυρίτιο προσανατολισμού <100>

### 3.2.6 Θερμική εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron beam evaporation)

Στην εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων ένα “όπλο” ηλεκτρονίων εκπέμπει και επιταχύνει ηλεκτρόνια από ένα νήμα, συνήθως βολφραμίου<sup>27</sup>. Η εκπεμπόμενη δέσμη προσπίπτει στο κέντρο ενός μιας υδρόψυκτης θήκης που περιέχει το υλικό προς εξάχνωση (π.χ. αλουμίνιο, χαλκός). Η θήκη είναι υδρόψυκτη, επειδή η δέσμη των ηλεκτρονίων πρέπει να τήκει τοπικά

το υλικό και όχι την ίδια τη θήκη, το οποίο θα οδηγούσε σε μόλυνση του υμενίου. Σε περίπτωση που το υλικό έχει πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, τοποθετείται μέσα σε πυρίμαχο σκεύος ώστε να μονώνεται θερμικά από την υδρόψυκτη θήκη.



Εικόνα 3.6: Αρχή λειτουργίας εξάχνωσης e-beam

Η δέσμη ηλεκτρονίων διαγράφει καμπύλη τροχιά, συνήθως  $270^\circ$ , μέσω ενός μαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια προσπίπτει στη θήκη που βρίσκεται το υλικό προς εξάχνωση. Οι ατμοί από το υλικό συμπυκνώνονται στο υπόστρωμα, που έχει τοποθετηθεί απέναντι από τη θήκη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτού υμενίου.

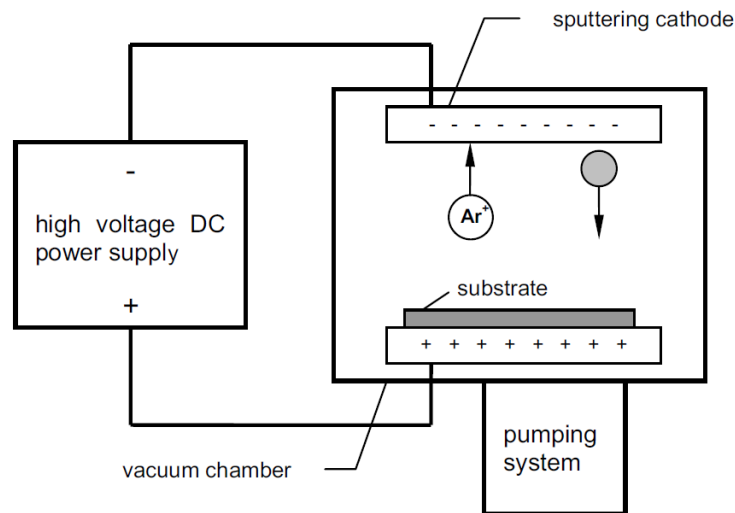
Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο σχετικά μικρός κώνος εκπομπής που μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιομορφίες αν το δείγμα είναι μεγάλο.

### 3.2.7 Τεχνική Ιοντοβολής (Sputtering)

Στην τεχνική sputtering το υλικό προς εναπόθεση, στόχος, εξατμίζεται εξαιτίας του βομβαρδισμού του με θετικά φορτισμένα ιόντα, συνήθως αργό.

Στο DC sputtering ο στόχος δρα ως αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, κάθοδος, η οποία χρησιμοποιείται για να επιταχυνθούν τα θετικά φορτισμένα ιόντα προς αυτή. Βασικό κριτήριο επομένως, είναι το υλικό προς εξάτμιση να είναι αγωγίμο. Αναλυτικά η διαδικασία είναι η ακόλουθη: Ένα αδρανές αέριο, όπως το αργό (Ar), τοποθετείται μέσα στο θάλαμο που βρίσκεται ο στόχος. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια υψηλή τάση ανάμεσα στην κάθοδο και των άνοδο και δημιουργείται πλάσμα λόγω ιοντισμού των ιόντων του αερίου. Ο στόχος του υλικού προς εναπόθεση τοποθετείται στην κάθοδο ενώ στην άνοδο τοποθετείται το

υπόστρωμα στο οποίο επιθυμούμε να γίνει η εναπόθεση. Τα θετικά ιόντα του πλάσματος επιταχύνονται προς το αρνητικά πολωμένο ηλεκτρόδιο όπου προσπίπτουν με μεγάλη ταχύτητα στον στόχο. Κατά την πρόσπτωση στον στόχο, εξάγονται άτομα του στόχου τα οποία με τη σειρά τους κινούνται μέσα στο θάλαμο και συμπυκνώνονται στην επιφάνεια του υποστρώματος.




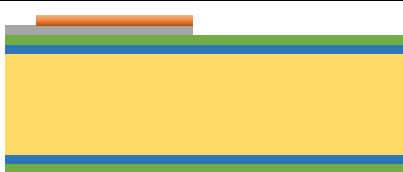
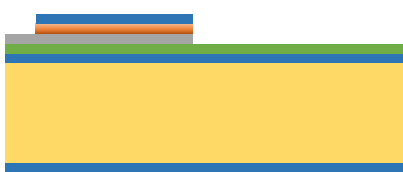
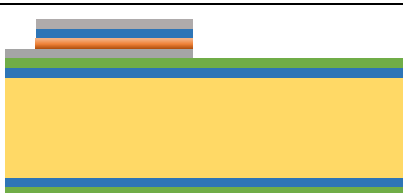
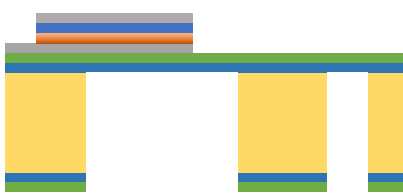







Εικόνα 3.7: Διάταξη DC sputtering

Βελτίωση της προηγούμενης τεχνικής, κυρίως ως προς τη δυνατότητα εναπόθεσης υλικών που δεν είναι αγωγικά, είναι το RF sputtering. Το ηλεκτρικό δυναμικό που εφαρμόζεται στον στόχο εναλλάσσεται από θετικό σε αρνητικό σε υψηλές συχνότητες, συνήθως πάνω από 50 kHz, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να αρχίσουν να ταλαντώνονται υπό την επίδραση του εναλλασσόμενου πεδίου και να έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να ιονίσουν τα άτομα του πλάσματος κοντά στο στόχο. Η συχνότητα η οποία χρησιμοποιείται συνήθως είναι τα 13.56MHz.

### 3.3 Πιεζογεννήτριες μεμβρανών με μάζα αδράνειας

Η κατασκευή των πιεζογεννητριών μεμβρανών με μάζα αδράνειας πραγματοποιήθηκε σε δισκία πυριτίου DSP διαμέτρου 3", τύπου η και πάχους  $(380 \pm 25)$   $\mu\text{m}$ . Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια της κατασκευής.

1. Καθαρισμός δισκίου σε διάλυμα Piranha 1:1	
2. Θερμική οξείδωση και εναπόθεση νιτριδίου	
3. Εναπόθεση μετάλλου για το σχηματισμό του κάτω ηλεκτροδίου	
4. Ανάπτυξη νανοδομημένου υμενίου ZnO ως πιεζοηλεκτρικό υλικό	
5. Εναπόθεση SiO2 ως μονωτικό στρώμα	
6. Εναπόθεση μετάλλου για τη δημιουργία του πάνω ηλεκτροδίου	
7. Εγχάραξη με KOH από την πίσω πλευρά για τη δημιουργία λεπτής μεμβράνης με μάζα αδράνειας	
 Si  SiO <sub>2</sub>  Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>  ZnO  Al/Au	

Πίνακας 3.1: Συνοπτική περιγραφή διαδικασίας παραγωγής μεμβρανών

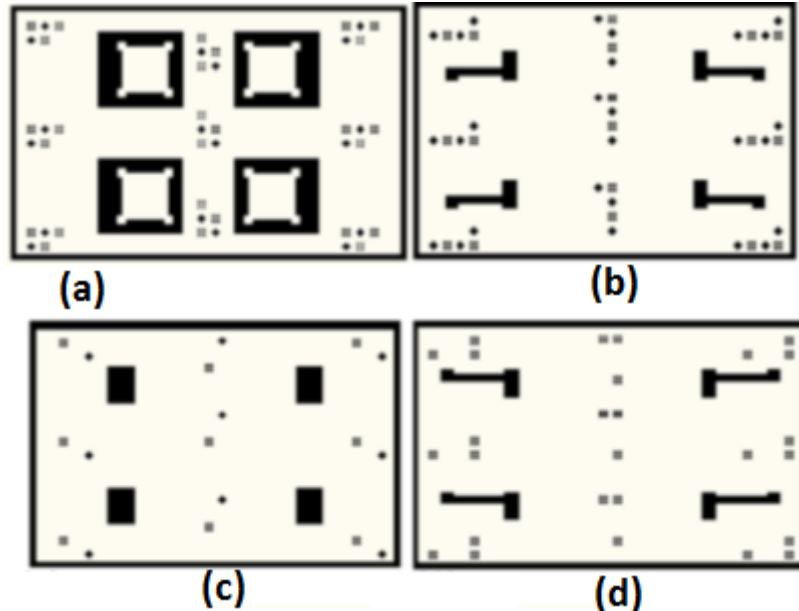
Αναλυτικότερα, η μικρογεννήτρια αποτελείται από μια λεπτή μεμβράνη πυριτίου που διαθέτει επιπλέον μάζα αδράνειας για μείωση των συχνοτήτων ταλάντωσης. Στο πάνω μέρος της μεμβράνης, υπάρχει νανοδομημένο υμένιο ZnO, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, το ένα Al και το άλλο Au. Επίσης μεταξύ του πάνω ηλεκτροδίου (Au) και του πιεζοηλεκτρικού υλικού μεσολαβεί ένα λεπτό στρώμα SiO<sub>2</sub> ο σκοπός του οποίου αναλύεται παρακάτω. Το process flow των πιεζογεννητριών μεμβρανών περιγράφεται λεπτομερώς στις επόμενες υποενότητες.

### 3.3.1 Καθαρισμός υποστρώματος και προστασία από τις περαιτέρω διαδικασίες

Αρχικά έγινε χημικός καθαρισμός με διάλυμα Piranha 1:1 ( $H_2SO_4 - H_2O_2$ ), προκειμένου να απομακρυνθούν από το wafer τα οργανικά υπολείμματα. Στη συνέχεια, έγινε ξηρή θερμική οξείδωση στους  $1050^\circ C$  για 1 ώρα και 18 λεπτά προκειμένου να σχηματιστεί οξείδιο ( $SiO_2$ ) πάχους  $1000\text{\AA}$ . Ακολούθησε εναπόθεση νιτριδίου ( $Si_3N_4$ ) και στις 2 πλευρές πάχους  $1000\text{\AA}$ .

### 3.3.2 Σχηματοποίηση μάζας αδράνειας

Η λιθογραφία για τη σχηματοποίηση της μάζας αδράνειας έγινε στην πίσω πλευρά του δισκίου, χρησιμοποιώντας τη μάσκα της Εικόνας 3.8a η οποία μαζί με τις υπόλοιπες κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του διδακτορικού του Γεώργιου Νιάρχου. Το υμένιο νιτριδίου του πυριτίου είναι απαραίτητο για την προστασία της πίσω πλευράς κατά τη διάρκεια της εγχάραξης με KOH. Μετά τη λιθογραφία έγινε ξηρή εγχάραξη με plasma  $SF_6$  προκειμένου να αφαιρεθεί το νιτρίδιο και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε διάλυμα BHF για την αφαίρεση του οξειδίου που βρισκόταν από κάτω.

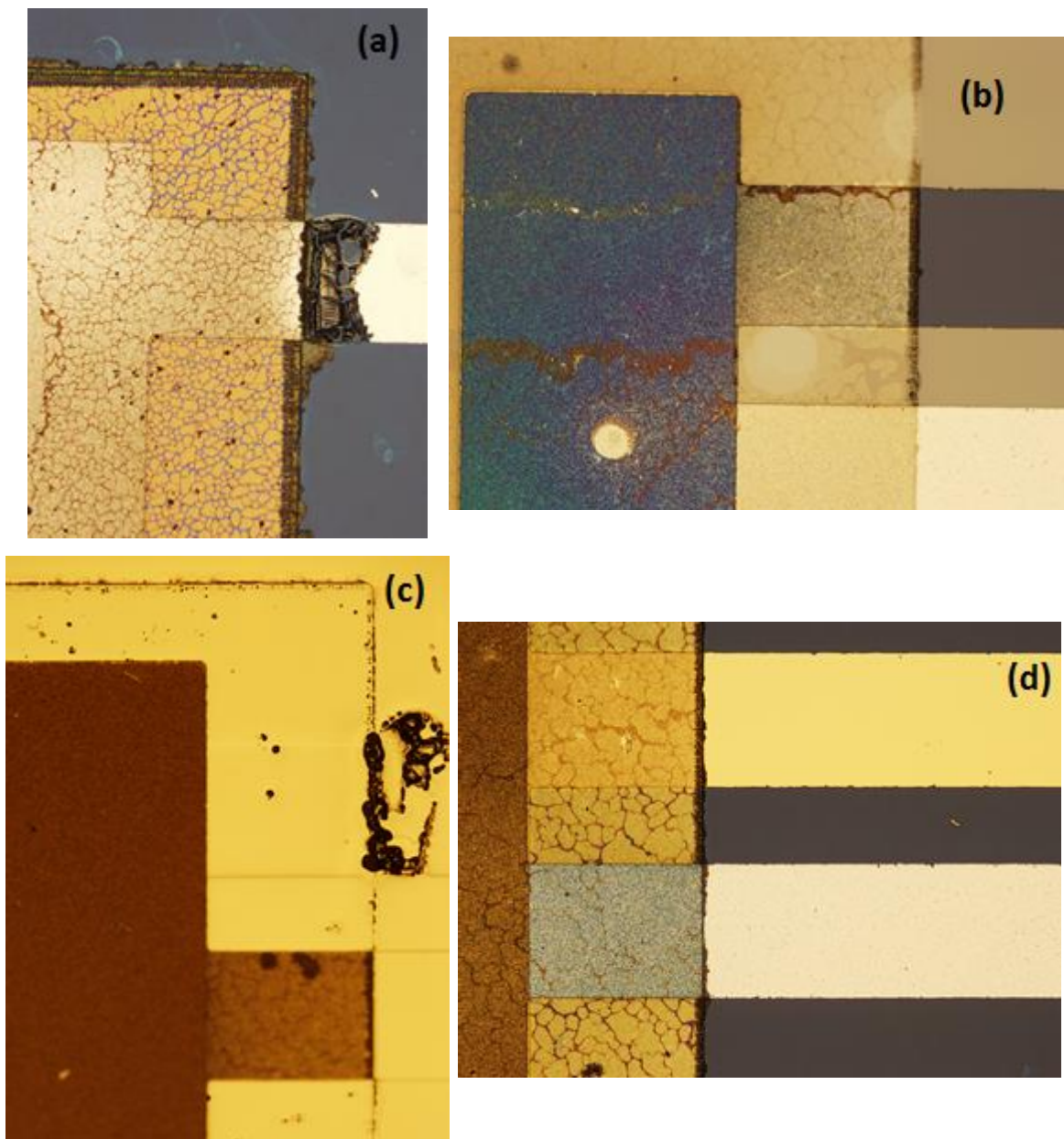


Εικόνα 3.8: Μάσκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μεμβρανών

### 3.3.3 Εναπόθεση ηλεκτροδίων για την κατασκευή μεταλλικών επαφών

Τα ηλεκτρόδια σχηματίστηκαν χρησιμοποιώντας τις μάσκες της Εικόνας 3.8b και 3.8d. Συγκεκριμένα η εναπόθεση του κάτω ηλεκτροδίου (Al) έγινε σε περιβάλλον καθαρού χώρου

χρησιμοποιώντας τη τεχνική της θερμικής εξάχνωσης. Η εναπόθεση του πάνω ηλεκτροδίου (Au) έγινε με την τεχνική sputtering σε διαφορετικό χώρο, αφενός για την αποφυγή ανεπιθύμητων προσμίξεων και αφετέρου επειδή στο ίδιο μηχάνημα μπορούσε να γίνει ταυτόχρονα η εναπόθεση του μονωτικού στρώματος SiO<sub>2</sub> μεταξύ του πάνω ηλεκτροδίου και του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ακολούθησε lift-off σε ακετόνη για περίπου 1 ώρα και στη συνέχεια χρήση του μηχανήματος υπερήχων για 5-10s για να φύγουν τα υπολείμματα ρητίνης. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζονται φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο για το σχηματισμό του πάνω ηλεκτροδίου.



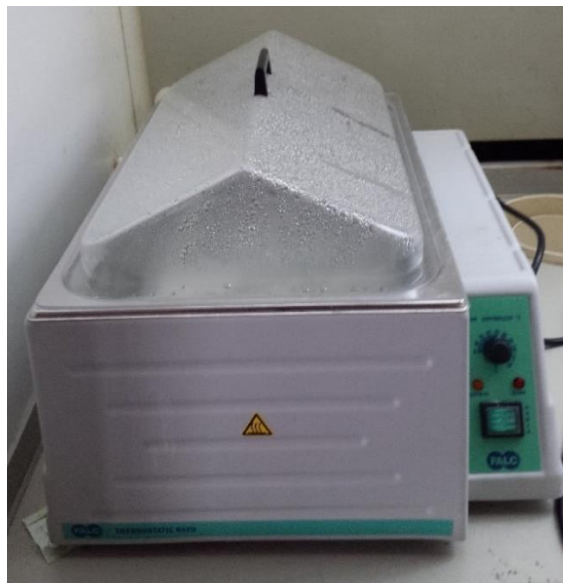
Εικόνα 3.9: Επιμέρους στάδια για τη δημιουργία του πάνω ηλεκτροδίου



Η Εικόνα 3.9(a) είναι πριν από την έναρξη της διαδικασίας για το σχηματισμό του πάνω ηλεκτροδίου. Η (b) είναι μετά τη λιθογραφία, όπου είναι εμφανές το “παράθυρο” που έχει ανοιχτεί για το πάνω ηλεκτρόδιο. Η (c) είναι μετά το sputtering Au αλλά πριν τη διαδικασία του lift-off και τέλος η (d) μετά τη διαδικασία lift-off.

### 3.3.4 Εναπόθεση πιεζοηλεκτρικού υλικού

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η ύπαρξη του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό ολοκληρώθηκε σε τρία στάδια. Αρχικά όπως και με όλες τις διαδικασίες MEMS έγινε λιθογραφία, από την μπροστινή πλευρά, για να ανοιχτεί το παράθυρο στο οποίο θα δημιουργηθεί το πιεζοηλεκτρικό υλικό (ZnO). Έπειτα ακολούθησε εναπόθεση λεπτού υμενίου ZnO (seeding layer) πάχους 100nm με την τεχνική sputtering. Στη συνέχεια τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο μικρομηχανικής για τη διαδικασία της υδροθερμικής ανάπτυξης (growth) προκειμένου το seeding layer να αναπτυχθεί στο τελικό υμένιο ZnO<sup>8</sup>. Συγκεκριμένα τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ισομοριακό διάλυμα Zinc Nitrate Hexahydrate και Hexamethylenetetramine (HMTA), συγκέντρωσης 400mM, για 1.5 ώρα, με τη θερμοκρασία του διαλύματος να παραμένει σταθερή στους 89°C.



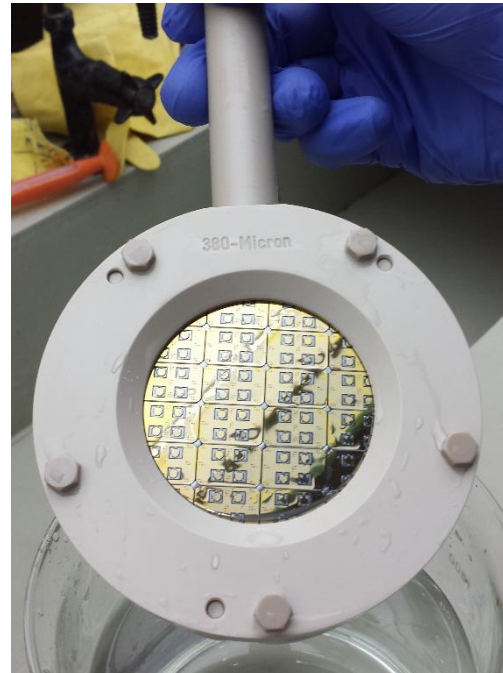
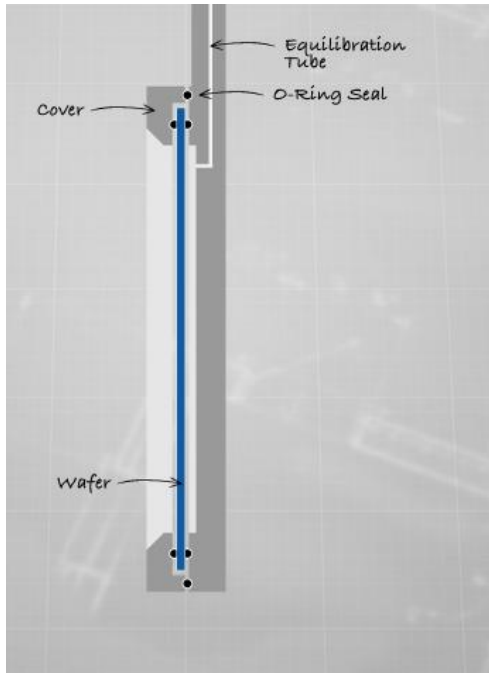
Εικόνα 3.10: Υδατόλουτρο που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία του growth

### 3.3.5 Βαθμονόμηση υγρής εγχάραξης KOH

Στην υγρή εγχάραξη, χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς δισκία SSP (single side polished) ως μάρτυρες για την βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της υγρής εγχάραξης.



Οι μάρτυρες είχαν υποβληθεί στις ακόλουθες διαδικασίες: οξείδωση, εναπόθεση νιτριδίου και λιθογραφία από τη μπροστινή πλευρά με τη μάσκα της μάζας αδράνειας. Για τη διαδικασία της υγρής εγχάραξης, το δισκίο τοποθετείται σε ειδικά διαμορφωμένη θήκη, από πολυμερικό υλικό (PEEK), η οποία αφήνει εκτεθειμένη μόνο την πίσω επιφάνεια, ενώ ειδικά O-Rings παρέχουν στεγανοποίηση στο υπόλοιπο wafer.



Εικόνα 3.11: Σχηματική απεικόνιση θήκης    Εικόνα 3.12: Θήκη στήριξης - προστασίας δισκίου

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων προκειμένου να βαθμονομηθεί το διάλυμα KOH και να επιτευχθεί ο προσδιορισμός του ρυθμού εγχάραξης του πυριτίου, καθώς και η τραχύτητα (roughness) των επιφανειών που εγχάραχθηκαν. Για τη μελέτη της υγρής εγχάραξης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα KOH 40% w/w σε σταθερή θερμοκρασία 85°C. Πριν την τοποθέτηση των δειγμάτων στο διάλυμα, προηγήθηκε εμβάπτιση σε HF 2% για χρόνο 40-60s προκειμένου να απομακρυνθεί το native οξείδιο που δημιουργήθηκε από την έκθεση των δειγμάτων στον αέρα. Κατά τη διάρκεια της εγχάραξης υπάρχει η δυνατότητα μαγνητικής ανάδευσης, ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιογένεια του διαλύματος καθ' όλη τη διάρκεια της.

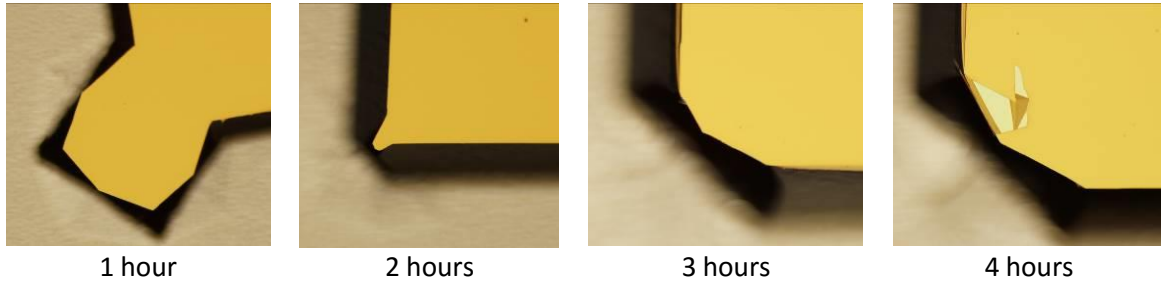


Εικόνα 3.13 Θερμαντική εστία με δυνατότητα μαγνητικής ανάδευσης



Εικόνα 3.14: Θερμοστάτης

Συνολικά κατασκευάστηκαν 4 δείγματα, το καθένα με διαφορετικό χρόνο εγχάραξης. Με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου λήφθηκαν οι φωτογραφίες της Εικόνας 3.15 όπου διακρίνεται το αποτέλεσμα, της παραμονής των δειγμάτων στο διάλυμα, στις ειδικά διαμορφωμένες τετράγωνες γωνίες της μάσκας.



1 hour

2 hours

3 hours

4 hours

Εικόνα 3.15: Απεικόνιση γωνιών δείγματος από το οπτικό μικροσκόπιο.

Στη συνέχεια με τη χρήση μηχανικών μεθόδων (Profilometer) μετρήθηκε το βάθος της εγχάραξης (D). Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

Speed: 0,1 mm/sec	Stylus Force: 0,1 mg	
Length: 0,5 mm	Filter level: 1 (4280 data points)	
Range: 400 μm	Profile type: (1)	

Πίνακας 3.2: Ρυθμίσεις Profilometer



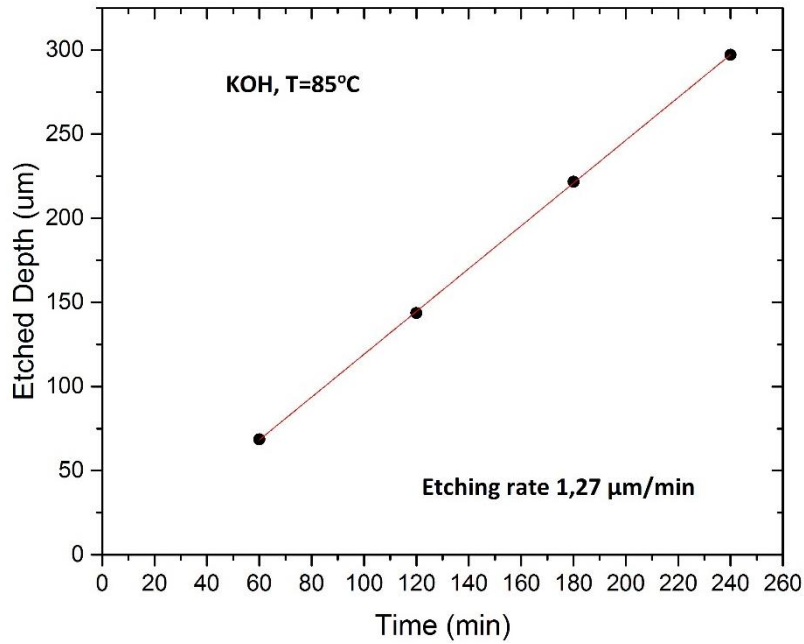
Εικόνα 3.16: Όργανο μέτρησης του προφίλ επιφανειών (Profilometer)

Συνολικά λήφθηκαν 6 μετρήσεις στο κάθε δείγμα για τον προσδιορισμό του βάθους εγχάραξης αλλά και της ομοιομορφίας. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

<b>Χρόνος εγχάραξης (min)</b>	<b>Βάθος εγχάραξης (μm)</b>
60	68,5 – 68,7
120	143,4 – 144,1
180	221,3 – 221,9
240	296,3 – 297,6

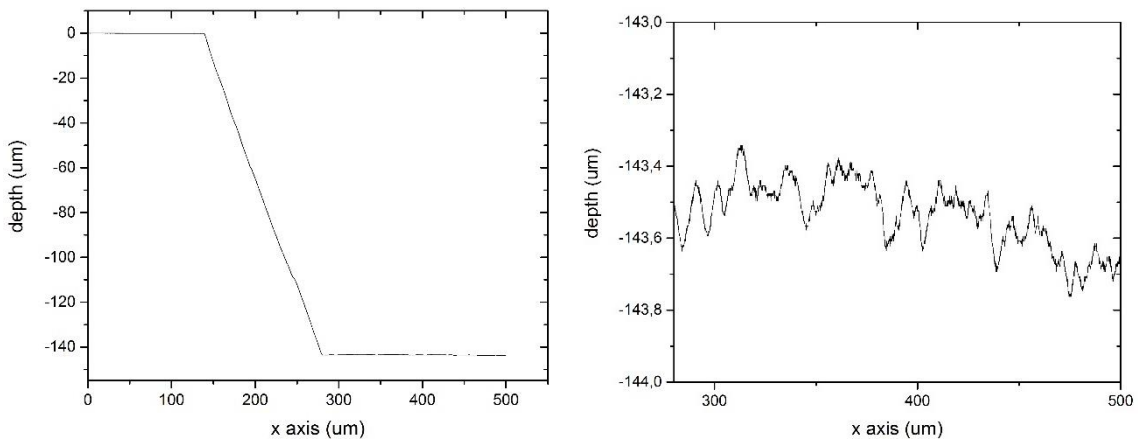
Πίνακας 3.3: Μέτρηση Profilometer – Βάθος εγχάραξης

Χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των στοιχείων του Πίνακα 3.3 προκύπτει ότι ο ρυθμός εγχάραξης, ο οποίος είναι  $1,27\mu\text{m}/\text{min}$ .



Εικόνα 3.17: Βάθος εγχάραξης σε σχέση με το χρόνο

Τελευταία παράμετρος που μετρήθηκε ήταν η τραχύτητα (roughness) των επιφανειών, στο βαθύτερο σημείο. Το roughness και για τους 4 διαφορετικούς χρόνους εγχάραξης, είναι μικρότερο των 0,2μm. Ενδεικτικά στην Εικόνα 3.18 απεικονίζεται η γραφική παράσταση από το Profilometer για χρόνο εγχάραξης 120 min και η μεγέθυνση στο βαθύτερο σημείο.

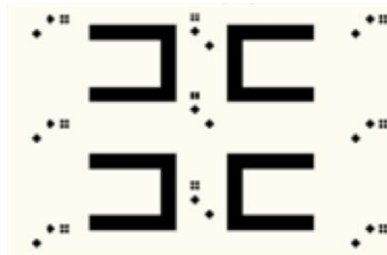


Εικόνα 3.18: Roughness δείγματος χρόνου εγχάραξης 120 min

### 3.4 Διαδικασία κατασκευής πιεζογεννητριών με αιωρούμενη πρόβολο

Η κατασκευή των γεννητριών με αιωρούμενη πρόβολο (cantilever) βασίζεται στην τεχνολογία SOI (Silicon on Insulator). Τα δισκία SOI αποτελούνται από ένα κρυσταλλικό υμένιο πυριτίου (πάχους μερικών μm) το οποίο έχει αναπτυχθεί πάνω σε SiO<sub>2</sub>. Κάτω από το οξείδιο του πυριτίου βρίσκεται το υπόστρωμα, το πάχος του οποίου είναι αυτό ενός δισκίου πυριτίου. Η

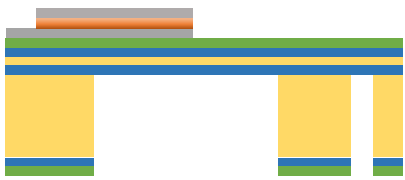
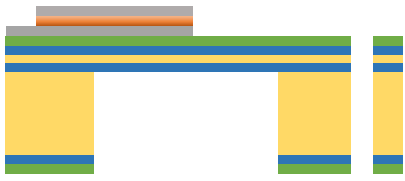





κατασκευή τους διαφέρει από αυτή των μεμβρανών στα ακόλουθα σημεία: (1) επιλέχθηκε να μην γίνει εναπόθεση του μονωτικού στρώματος μεταξύ του άνω ηλεκτροδίου και του πιεζοηλεκτρικού υλικού. (2) επειδή το θαμμένο οξείδιο λειτουργεί ως etch-stop κατά την εγχάραξη του πυριτίου με KOH η διαδικασία κατασκευής απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό καθώς δεν απαιτείται πλέον time-etching όπως στις μεμβράνες. (3) Απαιτείται ένα επιπλέον στάδιο, η ξηρή εγχάραξη από τη μπροστινή πλευρά με τη μάσκα της Εικόνας 3.19, προκειμένου να απελευθερωθεί πλήρως η δομή της προβόλου.



Εικόνα 3.19: Μάσκα ξηρής εγχάραξης

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.4), απεικονίζεται η διαδικασία κατασκευής των μικρογεννητριών.

1. Καθαρισμός δισκίου σε διάλυμα Piranha 1:1	
2. Θερμική οξείδωση και εναπόθεση νιτρίδιου	
3. Εναπόθεση μετάλλου για το σχηματισμό του κάτω ηλεκτροδίου	
4. Ανάπτυξη νανοδομημένου υμενίου ZnO ως πιεζοηλεκτρικό υλικό	
6. Εναπόθεση μετάλλου για τη δημιουργία του πάνω ηλεκτροδίου	

7. Εγχάραξη με KOH από την πίσω πλευρά για τη δημιουργία λεπτής μεμβράνης με μάζα αδράνειας				
8. Ξηρή εγχάραξη από την μπροστινή πλευρά για την απελευθέρωση της πρόβολου				
 Si	 SiO <sub>2</sub>	 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	 ZnO	 Al

Πίνακας 3.4: Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής γεννητριών με πρόβολο

### 3.5 Προσομοίωση μικρογεννητριών με το πρόγραμμα Comsol

Αρχικά προσομοιώθηκε η μικρογεννήτρια τύπου αιωρούμενης πρόβολου, καθώς υπήρχε στη βιβλιογραφία μέθοδος αναλυτικής λύσης με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει σύγκριση του μοντέλου με την αναλυτική λύση του. Στη συνέχεια με την ίδια λογική προσομοιώθηκαν οι μεμβράνες.

#### 3.5.1 Αιωρούμενη πρόβολος με μάζα αδράνειας

Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από μία δοκό, το ένα άκρο της οποίας είναι πακτωμένο και στο άλλο άκρο υπάρχει προσαρτημένη μία μάζα αδράνειας. Όπως απεδείχθη και στο κεφάλαιο 2, οι συχνότητες συντονισμού γι' αυτή τη δομή δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$f_n = \frac{v_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{0,236D_p w_s}{\left(1_s - \frac{l_m}{2}\right)^3 (0,236m w_s l_s + \Delta m)}} \quad (3.4)$$

όπου

Σύμβολο	Περιγραφή	Τιμή
$v_n$	η ν-οστή ιδιοτιμή της ταλάντωσης, για n=1 και n=2	1,8751 και 4,69409
$D_p$	μέτρο κάμψης, όπου εδώ είναι ίσο με: $D_p = \frac{E_p \cdot t_p^4 + E_s \cdot t_s^4 + 2E_p \cdot E_s \cdot t_p \cdot t_s \cdot (2t_p^2 + 2t_s^2 + 3t_p \cdot t_s)}{12 \cdot (E_p \cdot t_p + E_s \cdot t_s)}$	$3471,96 \cdot 10^{-9}$

$E_p$	μέτρο του Young για το πιεζοηλεκτρικό υλικό (ZnO),	129 GPa
$E_s$	μέτρο του Young για την πρόβολο (Si)	170 GPa
$t_p$	πάχος υμενίου - ZnO	1,5 $\mu\text{m}$
$t_s$	πάχος προβόλου - Si	5 $\mu\text{m}$
$m$	μάζα ανά μονάδα επιφάνειας της διμορφικής προβόλου, $m = \rho_p \cdot t_p + \rho_s \cdot t_s$	$20165 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^{-2}$
$l_s, w_s$	μήκος και πλάτος προβόλου	3000 $\mu\text{m}$ και 2000 $\mu\text{m}$
$l_m, w_m$	μήκος και πλάτος μάζας αδράνειας	2000 $\mu\text{m}$
$\rho_p$	πυκνότητα ZnO	$5680 \text{ kgm}^{-3}$
$\rho_s$	πυκνότητα Si	$2329 \text{ kgm}^{-3}$
$\Delta m$	μάζα αδράνειας, $\Delta m = \rho_m \cdot V_m$	$3,5866 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$
$\rho_m$	πυκνότητα μάζας αδράνειας (Si)	$2329 \text{ kgm}^{-3}$
$V_m$	όγκος της μάζας αδράνειας, $V_m = l_m \cdot w_m \cdot t_m$	$1,54 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$

Πίνακας 3.5: Τιμές μεταβλητών αναλυτικού μοντέλου και προσομοίωσης

Γνωρίζοντας επομένως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αιωρούμενης προβόλου, το μέτρο του Young και την πυκνότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, μπορούν να υπολογιστούν οι φυσικές συχνότητες ταλάντωσης.

Το μέτρο του Young για το οξείδιο του ψευδαργύρου ( $E=129\text{GPa}$ ) λήφθηκε από τη δημοσίευση του Wang,<sup>28</sup> οι τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών από το διδακτορικό του Νιάρχου και οι υπόλοιπες τιμές από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος προσομοίωσης.

Προκειμένου να συγκριθεί το μοντέλο της προσομοίωσης με την αναλυτική λύση πρέπει να καθοριστεί η ποιότητα πλέγματος (meshing quality) που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις.

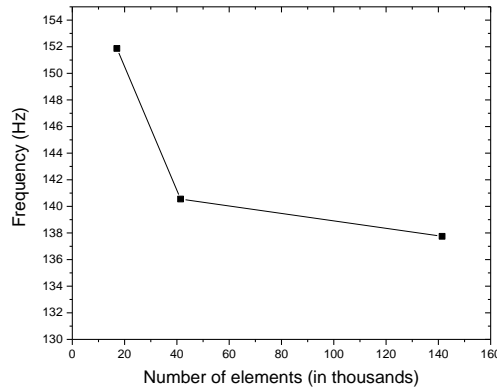
<b>Meshing Quality</b>	<b>1η συχνότητα (Hz)</b>	<b>% Διαφορά</b>	<b>2η συχνότητα (Hz)</b>	<b>% Διαφορά</b>	<b>Χρόνος Εκτέλεσης (s)</b>
coarse	151,87	-	1362,64	-	14
normal	140,55	7,45 %	909,83	33,23 %	41
fine	137,75	1,99 %	811,48	10,8 %	2940

Πίνακας 3.6: Σύγκριση ποιότητας πλέγματος (meshing) αιωρούμενης προβόλου

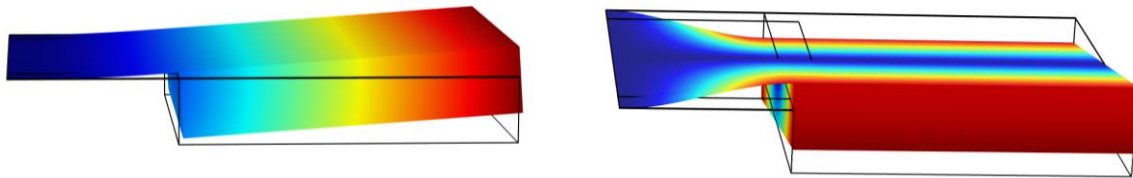
Από τον Πίνακα 3.6 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το meshing τόσο μειώνεται η διαφορά από τις προηγούμενες τιμές και το πρόβλημα συγκλίνει προς τη λύση του. Το μόνο αρνητικό στη



συνεχή αύξηση του meshing είναι η εκθετική αύξηση των χρόνων επίλυσης. Ενδεικτικά στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζεται η επίδραση του meshing στην 1<sup>η</sup> συχνότητα ταλάντωσης.



Εικόνα 3.20: Αριθμός στοιχείων πλέγματος σε σχέση με την 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα



Εικόνα 3.21: Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου για την 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> συχνότητα

Η αναλυτική λύση του προβλήματος της διμορφικής προβόλου με μάζα αδράνειας καθώς και η σύγκρισή της με τις τιμές της προσομοίωσης απεικονίζονται στον Πίνακα 3.7. Η διαφορά μεταξύ των δύο λύσεων είναι αρκετά μικρή και πιθανότατα θα μειωνόταν περαιτέρω για καλύτερες ποιότητες πλέγματος.

Συχνότητα	Αναλυτική τιμή (Hz)	Τιμή προσομοίωσης (Hz)	% Διαφορά
1	133,2	137,75	3,42 %
2	834,77	811,48	-2,79 %

Πίνακας 3.7: Σύγκριση προσομοίωσης με αναλυτική λύση

### 3.5.2 Μεμβράνες με μάζα αδράνειας

Επειδή τα υμένα  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Si}_3\text{N}_4$  είναι αρκετά λεπτά, δεν έχουν σημαντική επίδραση στις συχνότητες ταλάντωσης των μεμβρανών. Επομένως για μείωση του χρόνου εκτέλεσης και απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής επιλέχθηκε οι μεμβράνες να προσομοιωθούν ως να ήταν κατασκευασμένες από καθαρό πυρίτιο.

Προσομοιώθηκαν επομένως, λεπτές ορθογώνιες μεμβράνες με μάζα αδράνειας και υπολογίστηκαν οι φυσικές συχνότητες ταλάντωσής τους. Στον ακόλουθο πίνακα



αναγράφονται οι πρώτες 2 ιδιοσυχνότητες για διαφορετικές ποιότητες πλέγματος (meshing quality) και πάχος μεμβράνης ( $d_{mem}$ ) τα 20  $\mu m$ .

<b>Meshing Quality</b>	<b>1η συχνότητα (Hz)</b>	<b>% Διαφορά</b>	<b>2η συχνότητα (Hz)</b>	<b>% Διαφορά</b>	<b>Χρόνος Εκτέλεσης (s)</b>
coarse	17564	-	31201	-	11
normal	16551	5,77 %	29228	6,32 %	35
fine	16247	1,84 %	28637	2,02 %	883

Πίνακας 3.8: Σύγκριση ποιότητας πλέγματος (meshing) μεμβράνης

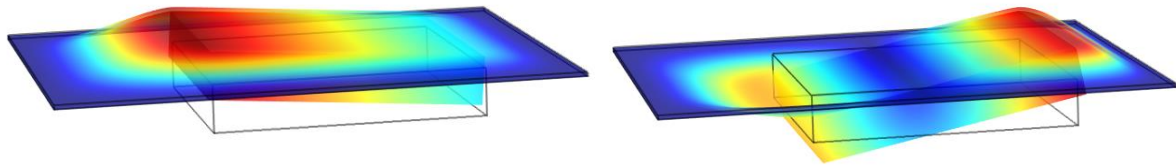
Παρατηρείτε ότι για fine meshing quality η ποσοστιαία διαφορά από την προηγούμενη τιμή είναι αρκετά μικρή ενώ ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης αυξήθηκε αισθητά. Περαιτέρω αύξηση της ποιότητας πλέγματος είχε σαν αποτέλεσμα εμφάνιση μηνύματος “out of memory”, σε υπολογιστή με 8GB μνήμη και CPU με 4 πυρήνες, μετά από χρόνο εκτέλεσης 35min. Σαν αποτέλεσμα για δοκιμές επιλέχθηκε το normal meshing, εξαιτίας του γρήγορου χρόνου εκτέλεσης, ενώ για τα τελικά αποτελέσματα επιλέχθηκε το fine meshing.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9. Οι ιδιότητες του πυριτίου λήφθηκαν από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος προσομοίωσης.

<b>Περιγραφή</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Proof_Mass_L	2000	$\mu m$
Proof_Mass_W	2000	$\mu m$
Proof_Mass_H	380	$\mu m$
Film_L	3300	$\mu m$
Film_W	3700	$\mu m$
Film_H	5-25	$\mu m$
Πυκνότητα Si	2329	$Kgm^{-3}$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) Si	170	GPa
Λόγος Poisson	0,28	-

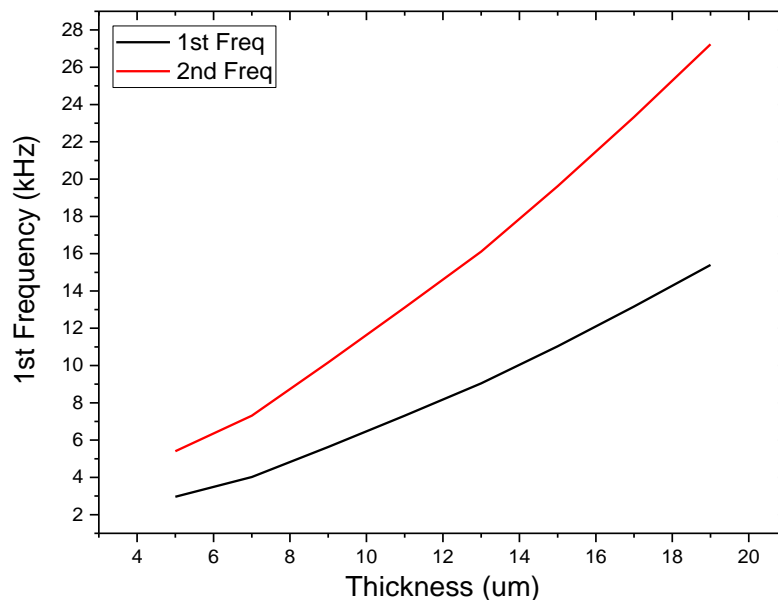
Πίνακας 3.9: Παράμετροι προγράμματος προσομοίωσης

Οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες, όπως αποτυπώνονται από το πρόγραμμα COMSOL απεικονίζονται στην Εικόνα 3.22.



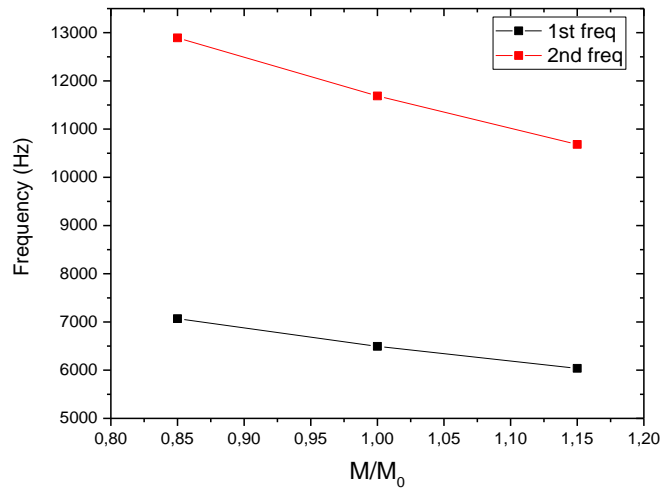
Εικόνα 3.22: Ταλάντωση μεμβράνης για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> mode

Μια πολύ σημαντική παράμετρος της προσομοίωσης είναι το πάχος της μεμβράνης καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις συχνότητες ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις 2 πρώτες συχνότητες εμφανίζονται στην Εικόνα 3.23. Από το γράφημα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μείωση του πάχους της μεμβράνης έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ιδιοσυχνοτήτων σε μικρότερες τιμές.



Εικόνα 3.23: Μεταβολή συχνοτήτων με το πάχος της μεμβράνης

Ο συνολικός όγκος της μάζας αδράνειας της προσομοίωσης είναι:  $V_0 = 2000^2 \cdot 380 = 152 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$ . Ισχύει επίσης ότι:  $\rho = \frac{M}{V} \rightarrow M = \rho V$ . Άρα η μάζα αδράνειας έχει βάρος  $M = 2330 \cdot 152 \cdot 10^{-11} = 0,0035416\text{g}$ . Επειδή όμως τα τοιχώματα των πραγματικών μεμβρανών δεν είναι κάθετα αλλά έχουν κλίση (εξαιτίας της εγχάραξης με KOH) ο συνολικός όγκος της μάζας αδράνειας είναι ελαφρώς μεγαλύτερος. Για το λόγο αυτό προσομοιώθηκαν μεμβράνες με όγκο  $V = \pm 15\%$ . Στο γράφημα της Εικόνας 3.24 φαίνεται η μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με τη το βάρος της μάζας αδράνειας.



Εικόνα 3.24: Συχνότητα μεμβρανών συναρτήσει της μάζας αδράνειας

### 3.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η διαδικασία κατασκευής των πιεζοηλεκτρικών μικρογεννητριών βασισμένων σε τεχνολογία MEMS πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου. Κατασκευάστηκαν δύο τύποι γεννητριών, οι μικρογεννήτριες τύπου αιωρούμενης προβόλου πάνω σε δισκία SOI και οι μικρογεννήτριες μεμβρανών πάνω σε δισκία DSP. Η κατασκευή τους απαιτεί μια σειρά από βήματα, τα οποία απαιτούν την ύπαρξη καθαρού χώρου και χημικών διεργασιών. Επίσης προσομοιώθηκαν και οι δύο τύποι μικρογεννητριών, για τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσής τους, προκειμένου να υπάρχει μία εικόνα του που κυμαίνονται οι συχνότητες αυτές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

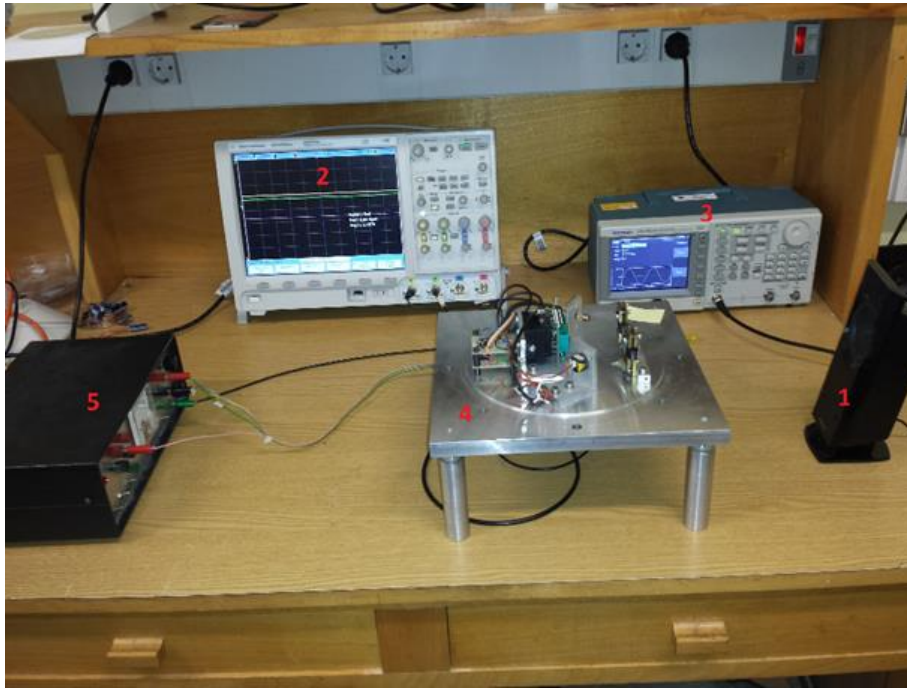
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό των μικρογεννητριών. Ο χαρακτηρισμός των μικρογεννητριών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο ήταν ο μηχανικός χαρακτηρισμός των δομών για τον καθορισμό των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσης τους. Το δεύτερο στάδιο ήταν ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός και η ανίχνευση του πιεζοηλεκτρικού σήματος που δημιουργείται σαν αποτέλεσμα της μηχανικής παραμόρφωσης των μικρομηχανικών δομών. Για τη διέγερση των μικρογεννητριών δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι. Ο πρώτος τρόπος ήταν μέσω ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ηχείων ενώ ο δεύτερος ήταν μέσω επαφής με κεφαλή υπερήχων. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε περιβάλλον κενού, για να καθοριστεί η επίδραση του αέρα στην ταλάντωση των δομών και κυρίως στις περιφερόμενες αποσβέσεις (damping).

### 4.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η λειτουργία της πειραματικής διάταξης χαρακτηρισμού βασίζεται στη διέγερση των μικρογεννητριών με ακουστικές ή μηχανικές δονήσεις και έπειτα την καταγραφή της ταλάντωσης που πραγματοποιούν, με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων τους.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζονται στην Εικόνα 4.1 και είναι οι ακόλουθες:

1. Ηχείο ή κεφαλή υπερήχων για τη διέγερση
2. Παλμογράφος Agilent Technologies DSO7104A
3. Γεννήτρια σημάτων Tektronix AFG3021B
4. Οπτική διάταξη laser
5. Τροφοδοτικό της οπτικής διάταξης



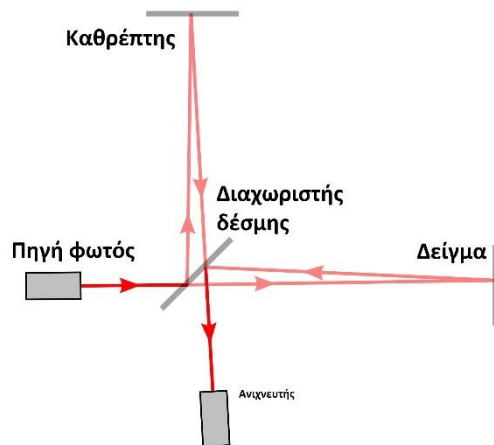
Εικόνα 4.1: Μετρητική διάταξη

#### 4.2.1 Οπτική ανίχνευση

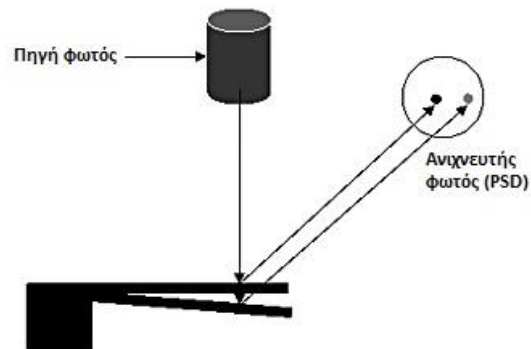
Υπάρχουν δύο κυρίως μέθοδοι οπτικής μέτρησης της ταλάντωσης: η συμβολομετρία (Interferometry) και η απ' ευθείας μέτρηση ανακλώμενης δέσμης.<sup>2529</sup>

Η συμβολομετρία βασίζεται στην αρχή της επαλληλίας να συνδυάζει κύματα στο ίδιο σημείο με τρόπο από τον οποίο θα προκύψουν συμπεράσματα για την αρχική κατάσταση των κυμάτων αυτών. Αυτό λειτουργεί επειδή όταν δύο κύματα της ίδιας συχνότητας συνδυάζονται, η ένταση του συνολικού σήματος θα καθορίζεται από τη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Αν τα δύο κύματα έχουν αρχικά την ίδια ένταση, το πλάτος του συμβαλλόμενου κύματος θα κυμαίνεται από μηδέν (καταστρεπτική συμβολή) έως το διπλάσιο του αρχικού (προσθετική συμβολή). Συνήθως χρησιμοποιείται μια πηγή μονοχρωματικού φωτός (laser), η δέσμη του οποίου χωρίζεται στα δύο. Κάθε μια από τις δέσμες διανύει διαφορετική διαδρομή ώσπου ενώνονται ξανά προτού φτάσουν στον φωτοανιχνευτή. Το ένα μισό οδηγείται στο δείγμα και ανακλάται από αυτό, ενώ το άλλο μισό οδηγείται σε ένα σταθερό κάτοπτρο. Στη συνέχεια οι δέσμες προσπίπτουν στο φωτοανιχνευτή. Η διαφορά φάσης των δύο κυμάτων εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής κάθε δέσμης. Καθώς το δείγμα ταλαντώνεται μεταβάλλεται η διαδρομή της μίας δέσμης με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται αναλόγως η ένταση του φωτός στο φωτοανιχνευτή. Η συμβολομετρία είναι μία πολύ ευαίσθητη τεχνική μέτρησης που παρέχει την άμεση μέτρηση της μετατόπισης. Αν

χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες για τη μετάδοση του φωτός είναι δυνατό να μετρηθεί απόκλιση της τάξης των  $0,1\text{\AA}$ . Η διάταξη της συμβολομετρίας απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Βασική αρχή λειτουργίας συμβολόμετρου



Εικόνα 4.3: Βασική αρχή λειτουργίας διάταξης μέτρησης ανακλώμενης δέσμης

Η τεχνική της απ' ευθείας μέτρησης ανακλώμενης δέσμης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, χρησιμοποιεί μια ακτίνα laser χαμηλής ισχύος και ένα φωτοανιχνευτή (PSD). Η δέσμη φωτός προσπίπτει υπό γωνία στο δείγμα και ανακλάται από την επιφάνειά του πάνω στο PSD. Καθώς το δείγμα ταλαντώνεται γύρω από μια θέση ισορροπίας, η προσπίπτουσα δέσμη διανύει απόσταση που μεταβάλλεται μέχρι να συναντήσει την επιφάνεια του δείγματος με αποτέλεσμα η ανακλώμενη δέσμη να προσπίπτει σε διαφορετικό σημείο στο PSD. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη ανίχνευσης, όπως μια γραμμική παράταξη φωτοανιχνευτών, η μεταβολή της δέσμης μετατρέπεται σε ανάλογη μεταβολή της εξόδου του ανιχνευτή.

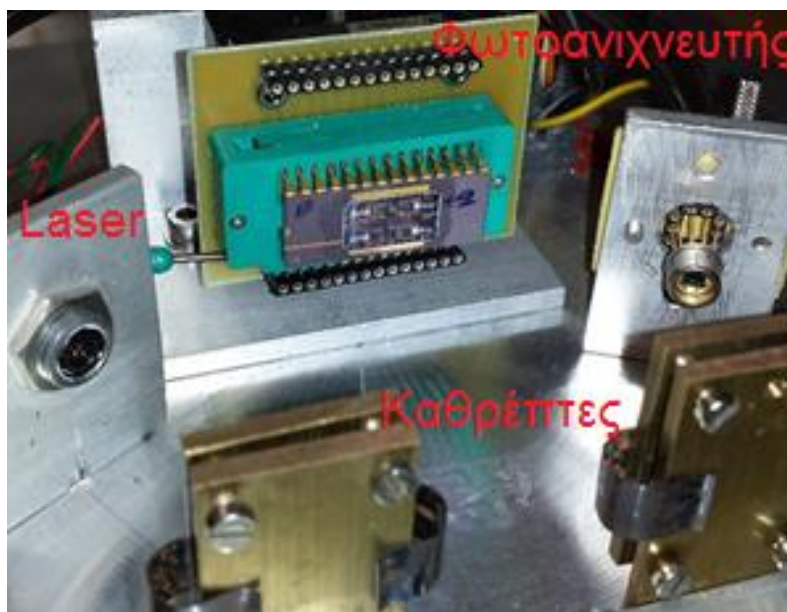
Εξαιτίας της απλότητας της 2<sup>ης</sup> μεθόδου και εφ' όσον δεν απαιτείται το ακριβές πλάτος της ταλάντωσης, αλλά μόνο η ανίχνευση των συχνοτήτων συντονισμού, επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος για το μηχανικό χαρακτηρισμό των μικρογεννητριών.

#### 4.2.2 Οπτική διάταξη

Η οπτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Δίοδος laser κόκκινου φωτός (670nm), ισχύος 0,8mW
- 2 ανακλαστικά κάτοπτρα
- Φωτοανιχνευτής και το κύκλωμα ενίσχυσης

Το laser διαθέτει ενσωματωμένο φακό εστίασης ώστε να εξασφαλίζεται η επαρκής μεταβολή του σήματος για να μπορούν να γίνουν αξιόπιστες μετρήσεις. Τα κάτοπτρα έχουν τη δυνατότητα μικρής περιστροφής στους 2 άξονες προκειμένου να καθίσταται εφικτή η εστίαση της δέσμης φωτός αφενός στο δείγμα και αφετέρου στο φωτοανιχνευτή. Ο φωτοανιχνευτής αποτελείται από μια φωτοδιόδο πυριτίου που διαθέτει 4 ανεξάρτητα αισθητήρια στοιχεία, ένα σε κάθε τεταρτημόριο με κοινή κάθοδο και τέσσερις διαφορετικές ανόδους. Τα τέσσερα αυτά στοιχεία είναι συνδεδεμένα ανά δύο ώστε να προκύπτει ένας διπλός ανιχνευτής. Το ρεύμα εξόδου της φωτοδιόδου είναι γραμμικά ανάλογο με την ένταση του φωτός που προσπίπτει πάνω της.

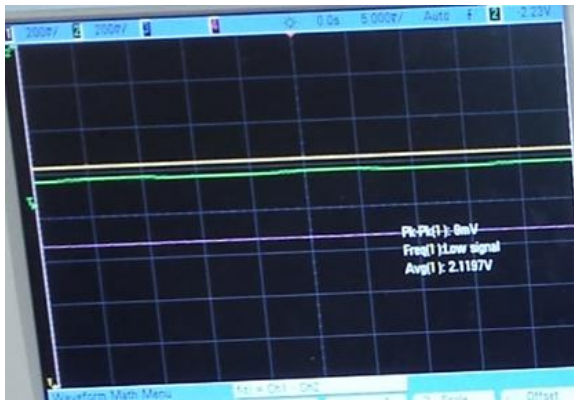


Εικόνα 4.4: Οπτική διάταξη μέτρησης

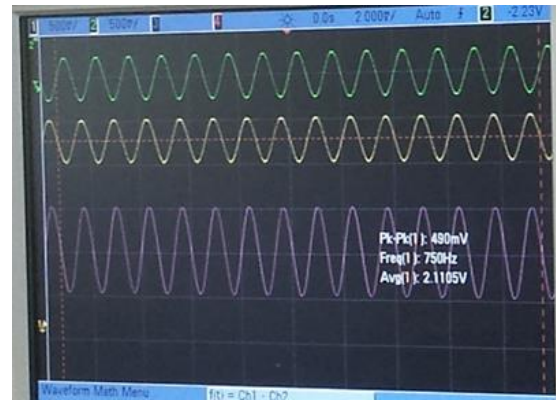
Η λειτουργία της διάταξης περιγράφεται ως εξής: Το μονοχρωματικό φως ξεκινάει από τη διόδο laser, ανακλάται πάνω στο πρώτο κάτοπτρο και προσπίπτει στο επιθυμητό σημείο πάνω στο δείγμα. Έπειτα ένα τμήμα του ανακλάται από το δείγμα, προσπίπτει στο δεύτερο κάτοπτρο και τελικά στο κέντρο του φωτοανιχνευτή. Όταν το δείγμα τίθεται σε ταλάντωση η δέσμη φωτός εκτρέπεται και ένα μεγαλύτερο ποσοστό της εισέρχεται στο ένα ή στο άλλο τεταρτημόριο με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε δύο εξόδους από τη φωτοδιόδο.

Χρησιμοποιώντας τις εσωτερικές λειτουργίες του παλμογράφου, αφαιρούνται τα 2 σήματα προκειμένου να ληφθεί το διαφορικό σήμα που μας ενδιαφέρει. Στην Εικόνα 4.6 απεικονίζονται τα 3 σήματα τη στιγμή που ένα δείγμα βρίσκεται σε συντονισμό.





Εικόνα 4.5: Σήματα εξόδου PSD (κίτρινο-πράσινο) και διαφορικό σήμα (μωβ) σε ηρεμία



Εικόνα 4.6: Σήματα εξόδου PSD και διαφορικό σήμα σε συνθήκες συντονισμού

### 4.2.3 Διέγερση μικρογεννητριών

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικοί τρόποι διέγερσης. Ο πρώτος έγινε με συμβατικά ηχεία υπολογιστή, ισχύος  $2,5W_{rms}$  σε κάθε κανάλι (μόνο το 1 κανάλι χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις) και συχνότητα απόκρισης 90Hz-20kHz. Ο δεύτερος τρόπος διέγερσης ήταν μέσω μιας κεφαλής υπερήχων (US) με κεντρική συχνότητα 40kHz.

## 4.3 Μηχανικός χαρακτηρισμός μικρογεννητριών τύπου αιωρούμενης προβόλου

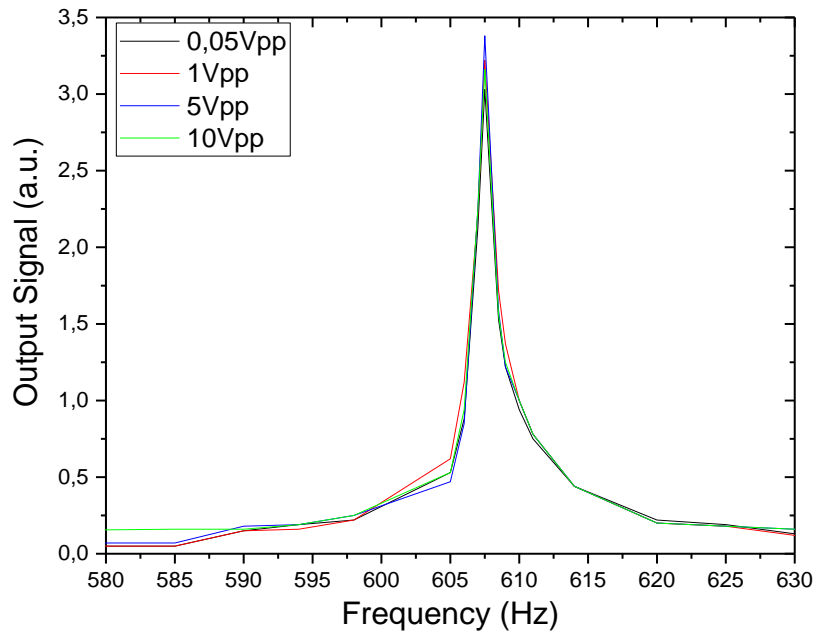
Μετά το πέρας της διαδικασίας κατασκευής τα δισκία κόπηκαν σε ψηφίδες (Dies) και ορισμένα από αυτά κολλήθηκαν πάνω σε DIP (dual in-line package). Έγινε μέτρηση των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσης των μικρογεννητριών και με τις 2 μεθόδους διέγερσης, καθώς επίσης και μετρήσεις σε περιβάλλον χαμηλής πίεσης.

### 4.3.1 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης το ηχείο

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων επιλέχθηκε τα ηχεία να τροφοδοτούνται με ημιτονικό σήμα, πλάτους  $1V_{pp}$  και απόσταση μεταξύ της μικρογεννήτριας και του ηχείου τα 30cm. Προκειμένου να επιλεχθούν αυτές οι τιμές πραγματοποιήθηκε το εξής πείραμα: Για την ίδια μικρογεννήτρια σαρώθηκε η περιοχή από 90 - 1100 Hz για 4 διαφορετικές ισχύς (Εικόνα 4.7)  $0,05V_{pp}$ ,  $1V_{pp}$ ,  $5V_{pp}$  και  $10V_{pp}$  που ήταν η μέγιστη τιμή εξόδου της γεννήτριας σημάτων. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος

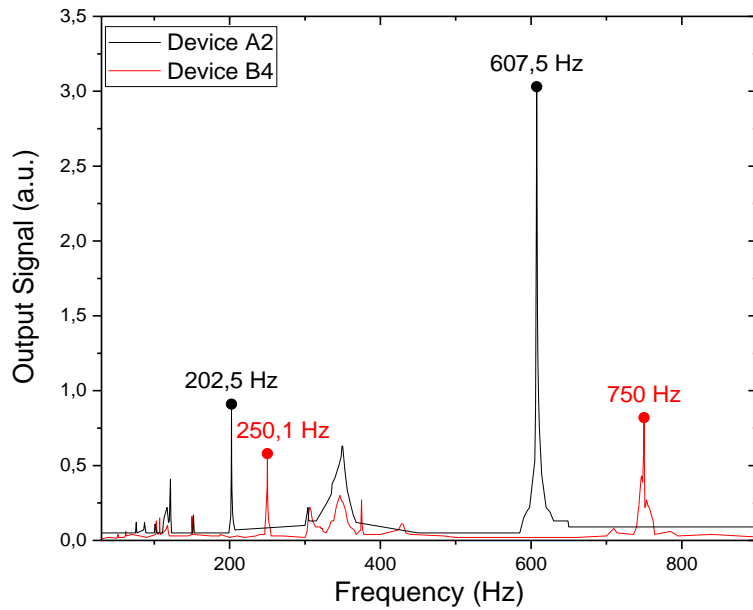


επηρεάζουν ελάχιστα μόνο το πλάτος συχνοτήτων και όχι τις ίδιες τις συχνότητες. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς τόσο πιο παραμορφωμένος είναι ο ήχος των ηχείων.



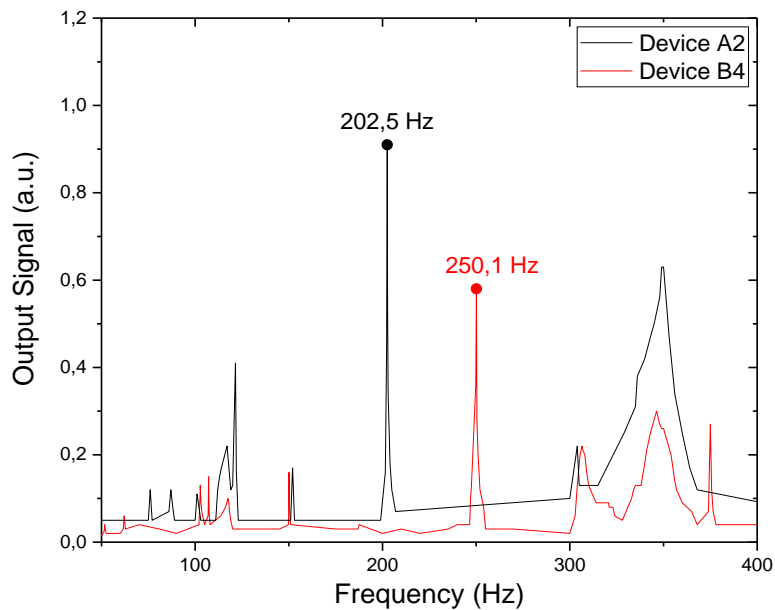
Εικόνα 4.7: Απόκριση μικρογεννήτριας σε διαφορετικές ισχύς (μεγέθυνση στη 2<sup>η</sup> συχνότητα)

Στην Εικόνα 4.8 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις δύο διαφορετικών μικρογεννητριών. Παρατηρείται ότι σε καθένα από αυτά εμφανίζονται δύο διαφορετικές κύριες κορυφές, που αποτελούν τις ιδιοσυχνότητές τους, καθώς και κάποιες ακόμη που σχεδόν ταυτίζονται. Εφόσον οι δύο μικρογεννήτριες προέρχονται από διαφορετικά wafer, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι κοινές κορυφές προκαλούνται από το περιβάλλον που βρίσκεται η οπτική διάταξη laser και δεν αποτελούν αμιγώς απόρροια της ηχητικής διέγερσης. Επίσης η διαφορά μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών της προσομοίωσης οφείλεται στην πιθανή διαφορά των τελικών διαστάσεων που έχουν οι διατάξεις, με πιο πιθανή αιτία την ανομοιομορφία που υπάρχει κατά την εγχάραξη του δισκίου με το KOH για την απελευθέρωση της μάζας αδράνειας. Μικρές μεταβολές στα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατάξεων επηρεάζουν τη συχνότητα συντονισμού, τόσο λόγω της διαφορετικής μάζας αδράνειας όσο και της σταθεράς  $K$ , η οποία καθορίζεται από το τελικό πάχος της προβόλου.



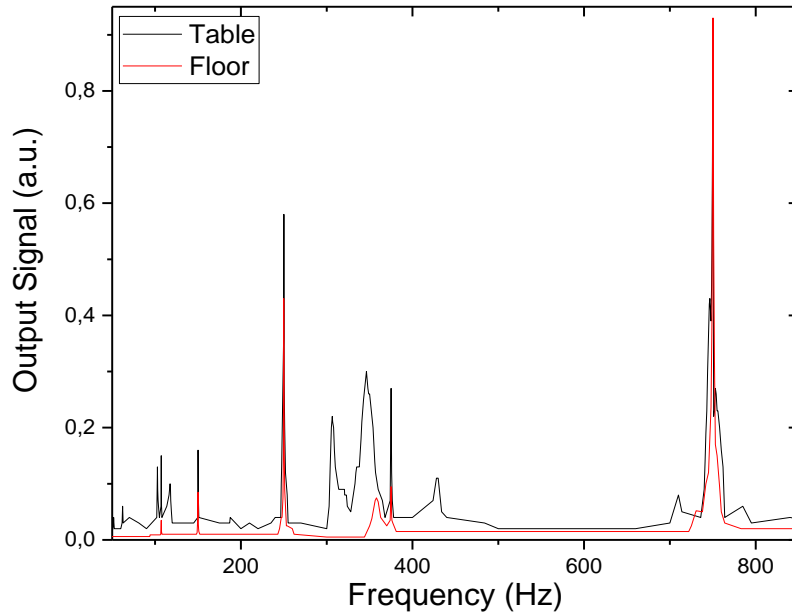
Εικόνα 4.8: Απόκριση συχνοτήτων δύο διαφορετικών device

Ακολουθεί η μεγέθυνση της Εικόνας 4.8 στις συχνότητες 50-400Hz ώστε να απεικονιστεί ευκρινέστερα η ταύτιση που υπάρχει σε συγκεκριμένες συχνότητες.



Εικόνα 4.9: Περιοχή 50-400 των Device A2-B4

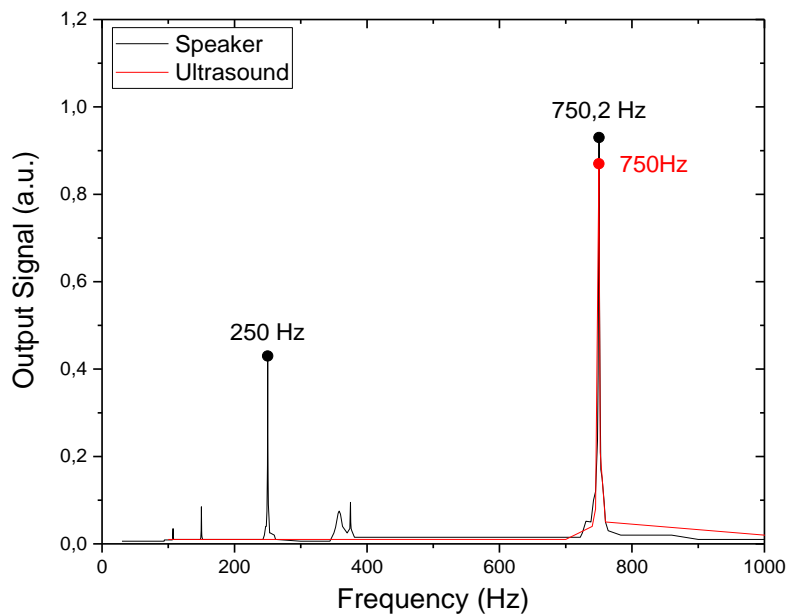
Η μετρική διάταξη αρχικά βρισκόταν πάνω σε ένα πάγκο (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1) αλλά παρατηρήθηκε ότι με την τοποθέτησή της στο έδαφος ή πάνω σε στηρίγματα από μαλακό υλικό (όπως π.χ. τσοχάκια) εξαλείφονταν ο θόρυβος, που οφειλόταν σε στοιχεία του πάγκου που δονούνταν, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Σύγκριση μετρήσεων στον πάγκο με το πάτωμα (Device B4)

#### 4.3.2 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης τους υπερήχους

Η κεφαλή υπερήχων τροφοδοτήθηκε με τάση  $10V_{pp}$  (η μέγιστη τάση που παρείχε η γεννήτρια σήματος) και έγινε σάρωση για συχνότητες 100Hz-40kHz. Εξαιτίας του μικρού της μεγέθους, τοποθετήθηκε σε επαφή με τη βάση του δείγματος (απόσταση περίπου 3 cm από το δείγμα). Αρχικά έπρεπε να επιβεβαιωθεί κατά πόσο οι μικρογεννήτριες ανταποκρίνονταν το ίδιο στις 2 μεθόδους διέγερσης.



Εικόνα 4.11: Σύγκριση των 2 διαφορετικών μεθόδων διέγερσης (Device B4)

Παρατηρείται ότι με την κεφαλή υπερήχων σαν διέγερση δεν ανιχνεύεται η 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης αλλά υπάρχει ταύτιση στη 2<sup>η</sup>. Αυτό συμβαίνει επειδή η κεντρική συχνότητα της κεφαλής υπερήχων είναι τα 40kHz με αποτέλεσμα σε τόσο μικρές συχνότητες η ισχύς της να είναι πάρα πολύ μικρή και να μην μπορεί να διεγείρει τη μικρογεννήτρια.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ατμοσφαιρική πίεση αλλά και σε συνθήκες κενού χρησιμοποιώντας τη διάταξη της Εικόνας 4.12 και πηγή διέγερσης την κεφαλή υπερήχων. Ο λόγος που έγιναν μετρήσεις σε συνθήκες πίεσης μικρότερης της ατμοσφαιρικής, ήταν για να προσδιοριστεί η επίδραση της πίεσης του χώρου στις συχνότητες και στο πλάτος της ταλάντωσης των μικρογεννητριών.

Για τη δημιουργία κενού χρησιμοποιήθηκε κλωβός αλουμινίου της οπτικής διάταξης, μανόμετρο Thermovac Tm 20 καθώς και η μηχανική αντλία η οποία είναι ικανή για συνθήκες κενού μέχρι 40mTorr (Εικόνα 4.12-13). Η ένδειξη του μανομέτρου ήταν σε μονάδες Torr (1atm = 760Torr), με αποτέλεσμα η καταγραφή των πιέσεων να γίνει σε αυτό το σύστημα.

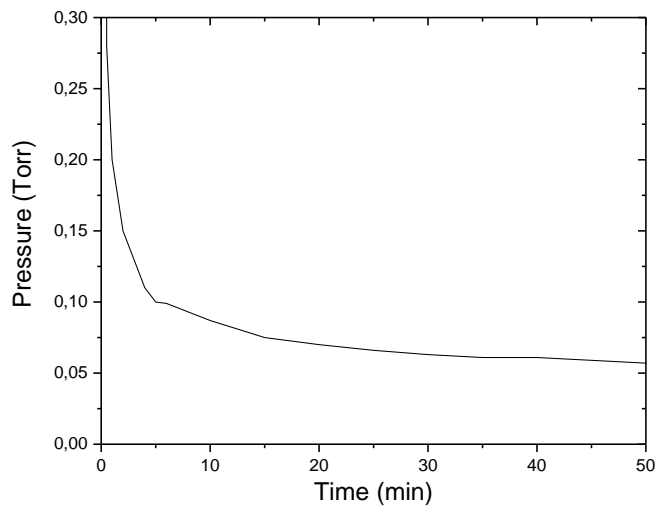


Εικόνα 4.12: Διάταξη μέτρησης σε συνθήκες κενού



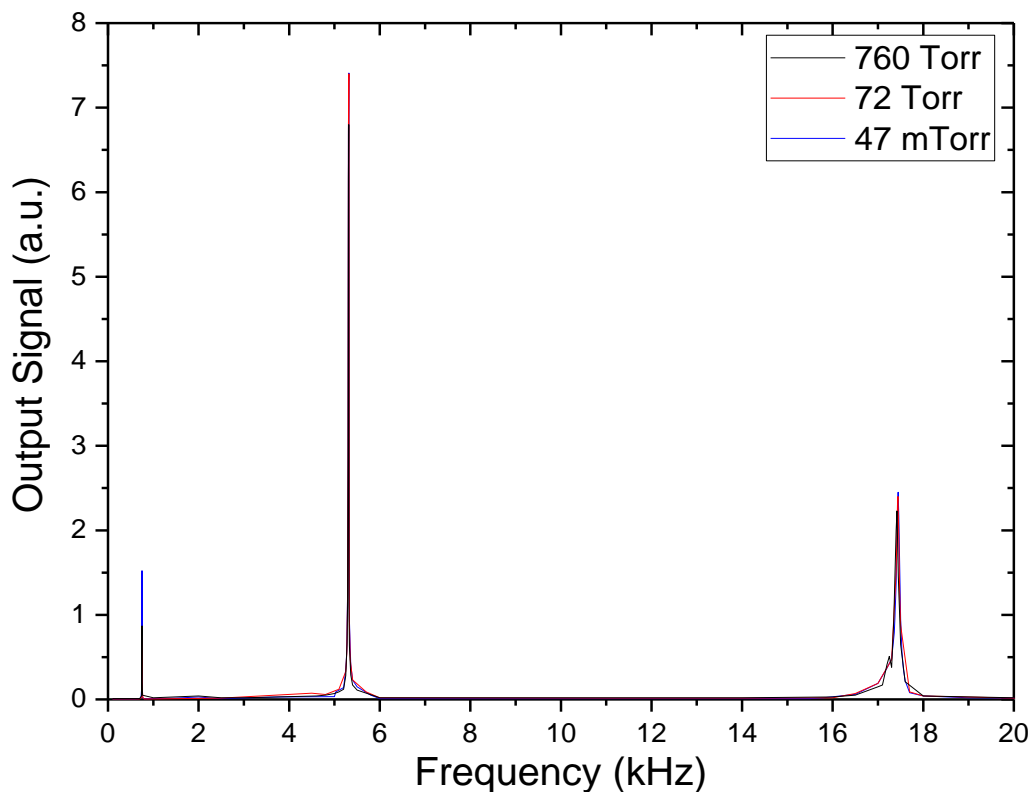
Εικόνα 4.13: Μανόμετρο

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την έναρξη της αντλίας η πτώση της πίεσης είναι ραγδαία το πρώτο λεπτό (από τα 760Torr στα 0,2Torr μέσα σε 1min) ενώ απαιτείται πολύς χρόνος για την επίτευξη πιέσεων της τάξης των 50mTorr. Στην Εικόνα 4.14 έχει γίνει μεγέθυνση του γραφήματος στις χαμηλές πιέσεις προκειμένου να απεικονιστεί η αλλαγή της πίεσης σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 4.14: Μείωση πίεσης σε σχέση με το χρόνο

Με το σύστημα κενού μετρήθηκαν 2 διαφορετικές μικρογεννήτριες προκειμένου να εντοπιστεί η επίδραση της πίεσης στις συχνότητες ταλάντωσης. Στην Εικόνα 4.15 απεικονίζεται η μικρογεννήτρια B4 (η πρώτη συχνότητα ταλάντωσής της δεν έχει ανιχνευτεί, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) για πιέσεις 760Torr, 72Torr και 47mTorr.



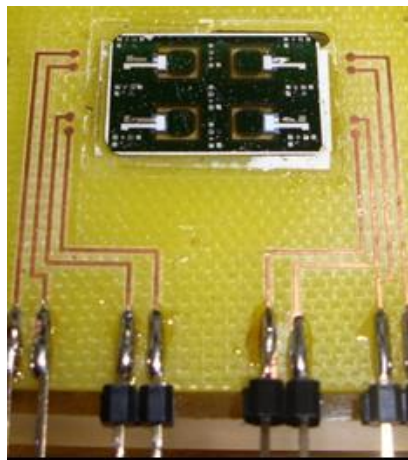
Εικόνα 4.15: Απόκριση μικρογεννήτριας (Device B4) σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης

Από το γράφημα των πιέσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι, για τη συγκεκριμένη περιοχή πιέσεων, η ελάττωση της πίεσης έχει ελάχιστη επίδραση ( $\Delta f/f < 0,1\%$ ) στις συχνότητες τις

οποίες ταλαντώνονται οι μικρογεννήτριες και επιδρά σε μικρό βαθμό στο πλάτος αυτών. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία.<sup>30</sup>

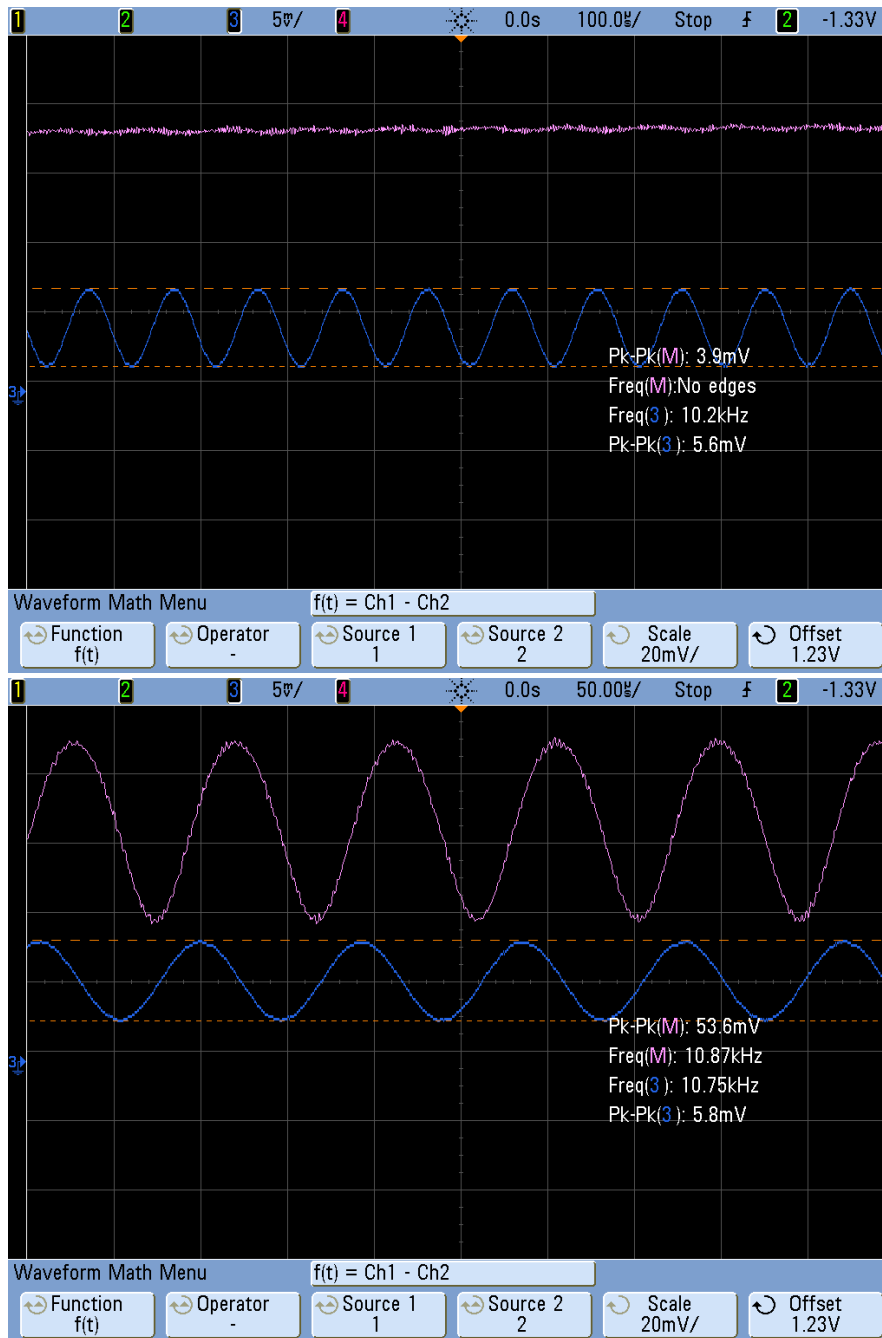
#### 4.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μικρογεννητριών τύπου αιωρούμενης προβόλου

Στην Εικόνα 4.16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συσκευασία (PCB) πάνω στην οποία τοποθετήθηκε μια από τις μικρογεννήτριες για να πραγματοποιηθεί ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός της.



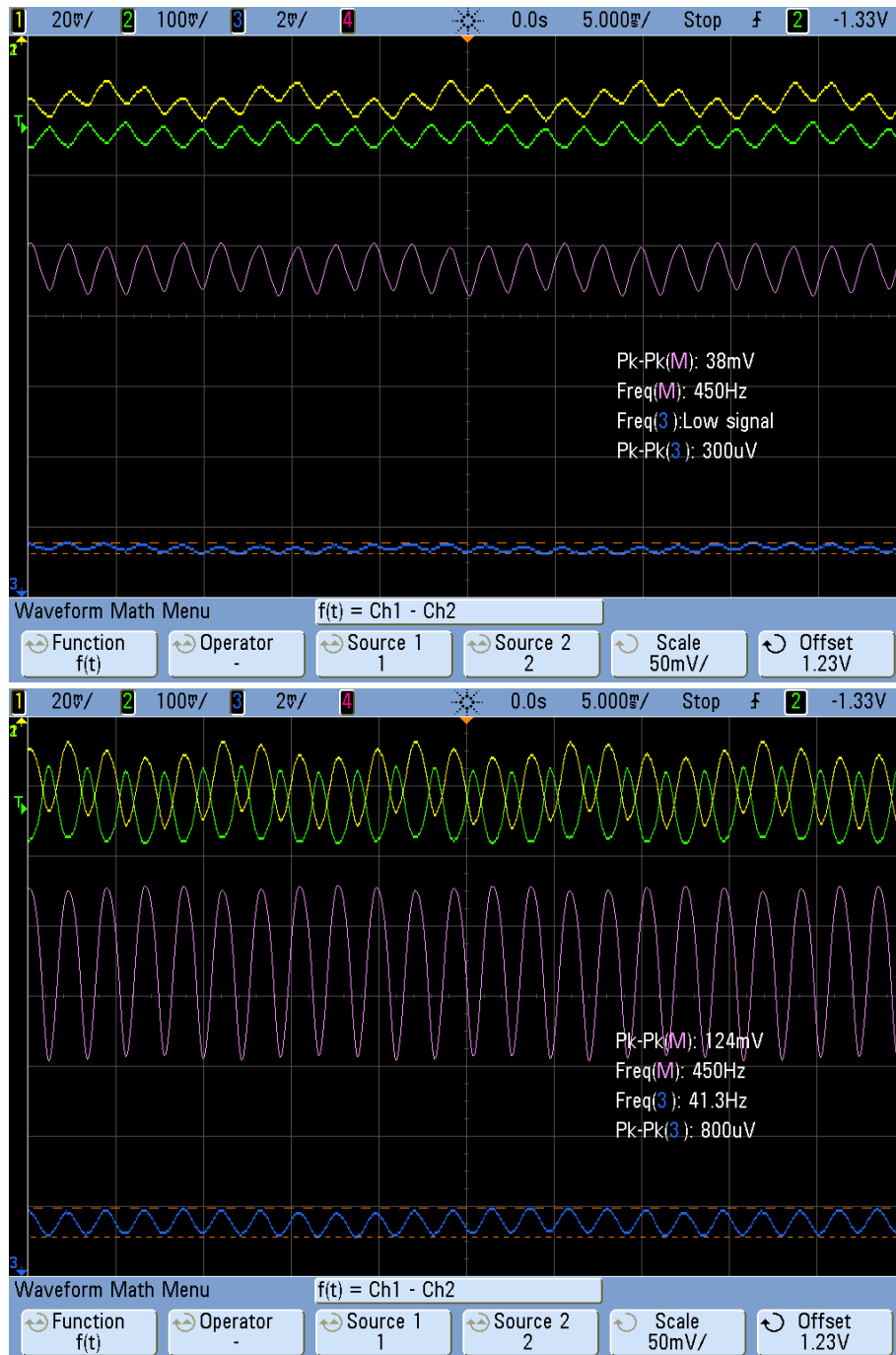
Εικόνα 4.16: Μικρογεννήτρια πάνω σε PCB

Αρχικά έπρεπε να προσδιοριστούν οι ιδιοσυχνότητες της συσκευής καθώς σε αυτές η ταλάντωσή είναι μέγιστη, με αποτέλεσμα το πιεζοηλεκτρικό υμένιο να κάμπτεται στο μέγιστο βαθμό. Συνδυάζοντας τις 2 μεθόδους διέγερσης (ηχείο και υπέρηχους) προέκυψε ότι χρησιμοποιώντας το ηχείο η συχνότητα μέγιστης ταλάντωσης ήταν τα 450Hz ενώ με τους υπέρηχους τα 10870Hz. Στην Εικόνα 4.17 απεικονίζεται η ταλάντωση της μικρογεννήτριας (μωβ σήμα) και το ηλεκτρικό σήμα εξόδου (μπλε σήμα). Η διέγερση πραγματοποιήθηκε με τη κεφαλή υπερήχων με ημιτονικό σήμα 10V<sub>pp</sub>. Η 1<sup>η</sup> εικόνα είναι σε συχνότητα μη συντονισμού (10200 Hz) και η 2<sup>η</sup> σε συχνότητα συντονισμού (10750 Hz). Σε όλο το εύρος των συχνοτήτων η ηλεκτρική απόκριση της μικρογεννήτριας ήταν ακριβώς η ίδια με το σήμα εισόδου των υπερήχων, χωρίς κανένα σημάδι που να υποδεικνύει πιεζοηλεκτρικό σήμα.



Εικόνα 4.17: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στους υπερήχους

Χρησιμοποιώντας το ηχείο σαν διέγερση λήφθηκαν οι γραφικές της Εικόνας 4.18. Η 1<sup>η</sup> αποτελεί την απόκριση της μικρογεννήτριας στη συχνότητα των 460Hz (μη συντονισμός) και η 2<sup>η</sup> την απόκριση στη συχνότητα συντονισμού (454Hz).



Εικόνα 4.18: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στο ηχείο

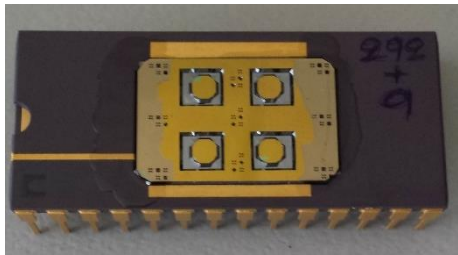
Όπως παρατηρείται από τις μετρήσεις, το σήμα εξόδου της γεννήτριας εμφανίζεται μεγαλύτερο στη συχνότητα συντονισμού. Όμως επειδή είναι ημιτονικό και η συχνότητά του είναι της τάξης των 40-60Hz εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σήμα εξόδου αποτελεί θόρυβο από το περιβάλλον ο οποίος ενισχύεται. Σε δεύτερη απόπειρα μέτρησης της συγκεκριμένης γεννήτριας με απενεργοποιημένες όλες τις γύρω συσκευές (για μείωση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου), δεν υπήρχε καμία διαφορά στο σήμα εξόδου μεταξύ των συνθηκών συντονισμού και μη. Μία εξήγηση για την απουσία σήματος είναι η επισκίαση των



φορέων που δημιουργούνται από το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, από τους ελευθέρους φορείς που υπάρχουν μέσα στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Ειδικότερα, το νανοδομημένο υμένιο αποτελείται από κάθετα νανοραβδία ZnO ενωμένα μεταξύ τους τα οποία όταν αναπτύσσονται με την υδροθερμική μέθοδο είναι n-τύπου. Η παρουσία οπών O<sub>2</sub> και προσμίξεων προκαλεί την εμφάνιση μιας μέτριας αγωγιμότητας στο νανοραβδίο και κατ' επέκταση σε ολόκληρο το υμένιο. Οι φορείς αυτοί καλύπτουν ελαφρώς τη παρουσία των πιεζοηλεκτρικών φορέων αλλά δεν την εξαφανίζουν. Επομένως το πιεζοηλεκτρικό δυναμικό υπάρχει, αλλά είναι αρκετά μειωμένο λόγω της αγωγιμότητας του νανοραβδίου.

#### 4.5 Μηχανικός χαρακτηρισμός μεμβρανών με μάζα αδράνειας

Όπως και με τις μικρογεννήτριες τύπου αιωρούμενης προβόλου, έτσι και οι μεμβράνες μετά το πέρας της διαδικασίας κατασκευής τους, κόπηκαν και τοποθετήθηκαν σε DIP για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις συχνοτήτων.



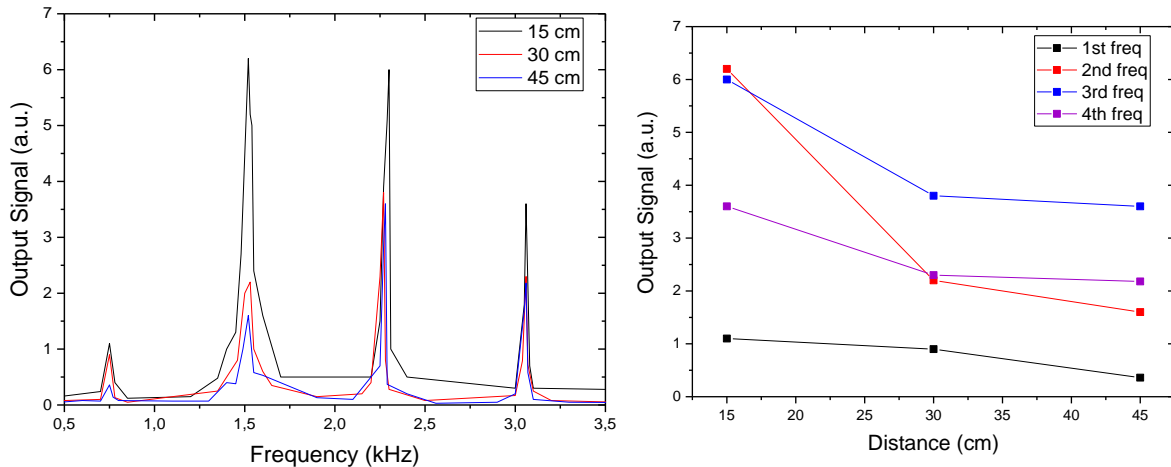
Εικόνα 4.19: Μεμβράνη κολλημένη σε DIP

Η διάταξη μέτρησης καθώς και οι τρόποι διέγερσης των μεμβρανών είναι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες.

##### 4.5.1 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης το ηχείο

Για την επιλογή των παραμέτρων (απόσταση ηχείου, είδος και πλάτος σήματος) εκτελέστηκαν πειράματα με διαφορετικές συνθήκες προκειμένου να καθοριστεί πως επιδρά η κάθε μια στα δείγματα. Όπως προέκυψε από τις μετρήσεις, το είδος του σήματος (ημιτονικό, τετραγωνικός παλμός) δεν επηρεάζει τις συχνότητες ταλάντωσης ούτε το πλάτος. Παρατηρήθηκε επίσης αύξηση στο πλάτος των ταλαντώσεων με την αύξηση του πλάτους του σήματος διέγερσης. Τέλος, η απόσταση του ηχείου έχει αντιστρόφως ανάλογη επίδραση στο πλάτος της ταλάντωσης και καμία επίδραση στις συχνότητες. Ενδεικτικά στην Εικόνα 4.20

απεικονίζεται η απόκριση ενός δείγματος για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ του ηχείου και της διάταξης μέτρησης.

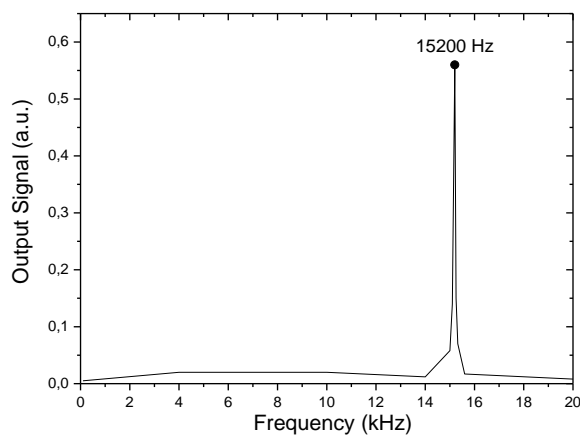


Εικόνα 4.20: Επίδραση της απόστασης του ηχείου στο πλάτος της ταλάντωσης

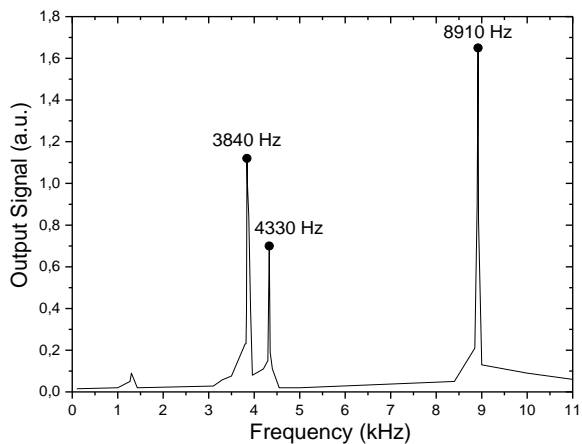
Εφ' όσον οι ανωτέρω παράμετροι δεν επηρεάζουν τις ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης αλλά το πλάτος αυτών, επιλέχθηκαν οι εξής τιμές προκειμένου να μειωθούν οι καταπονήσεις στις μεμβράνες αλλά ταυτοχρόνως να υπάρχει εμφανής διαφορά στις συχνότητες συντονισμού:

- Σήμα εισόδου ηχείων: Ημιτονικό
- Πλάτος σήματος εισόδου:  $1V_{pp}$
- Απόσταση ηχείου - δείγματος: 30cm

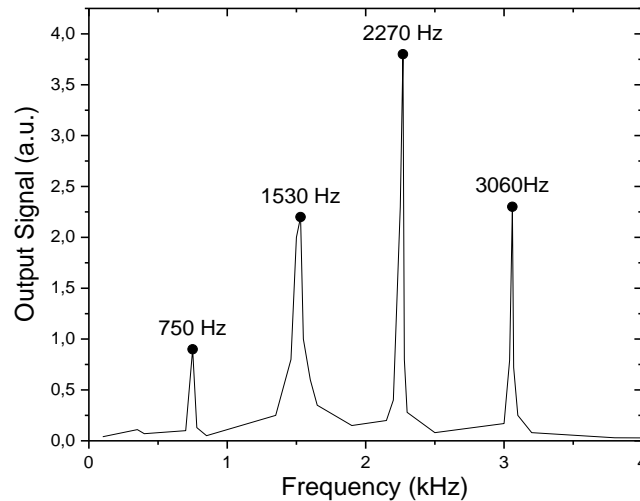
Όλες οι μεμβράνες που ακολουθούν προέρχονται από το ίδιο δισκίο με αρχικό  $t_{etch}=292min$ . Στη συνέχεια αφού κόπηκαν σε DIE συνεχίστηκε η εγχάραξη με KOH προκειμένου να επιτευχθούν μικρότερα πάχη. Ακολουθούν οι μετρήσεις 3 μεμβρανών με συνολικό  $t_{etch}$  301min, 305min και 306,5min αντίστοιχα, το πάχος των οποίων ( $d_{mem}$ ) μετρήθηκε στα  $22 \pm 3\mu m$ ,  $17 \pm 3\mu m$  και  $15 \pm 3\mu m$ .



Εικόνα 4.21: Απόκριση μεμβράνης  $d_{mem}=22\mu m$



Εικόνα 4.22: Απόκριση μεμβράνης  $d_{mem}=17\mu m$



Εικόνα 4.23: Απόκριση μεμβράνης  $d_{mem}=15\mu m$

Από τις μετρήσεις παρατηρείται η μείωση των συχνοτήτων ταλάντωσης όσο μειώνεται το πάχος της μεμβράνης, γεγονός που επαληθεύεται και από τις προσομοιώσεις. Επίσης επειδή η μέγιστη συχνότητα απόκρισης του ηχείου είναι 20kHz, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των υψηλότερων συχνοτήτων για τις μεμβράνες με μεγάλα πάχη (όπως π.χ. η 1<sup>η</sup> μεμβράνη με  $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$ ). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μια δεύτερη μέθοδος διέγερσης, με US, προκειμένου να καθίσταται δυνατός ο πλήρης προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων της κάθε συσκευής.

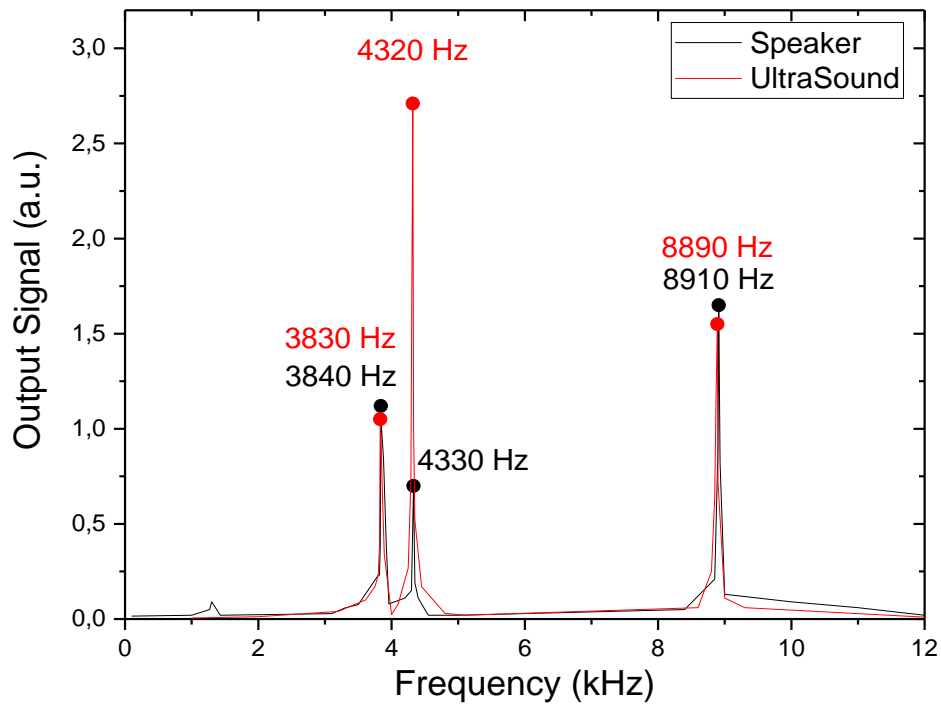
$d_{mem}$	1 <sup>η</sup> συχνότητα (Hz)	2 <sup>η</sup> συχνότητα (Hz)	3 <sup>η</sup> συχνότητα (Hz)	4 <sup>η</sup> συχνότητα (Hz)
22	15200	-	-	-
17	3840	4330	8910	
15	750	1530	2270	3060

Πίνακας 4.1: Συχνότητες ταλάντωσης μεμβρανών με πηγή διέγερσης τα ηχεία

#### 4.5.2 Μετρήσεις με πηγή διέγερσης τους υπερήχους

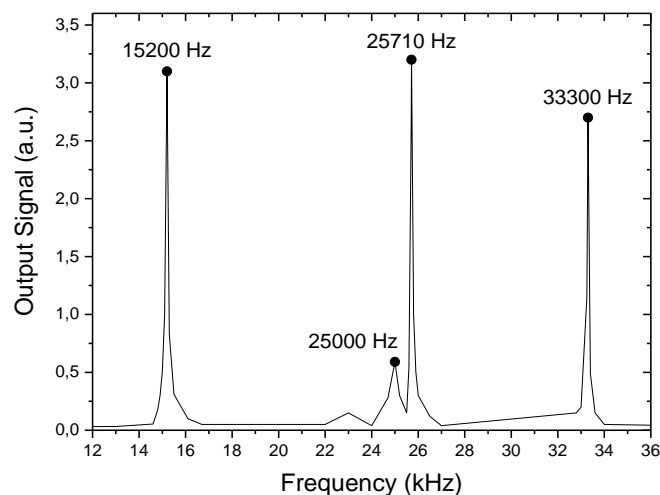
Η κεφαλή υπερήχων τροφοδοτήθηκε με τάση  $10V_{pp}$  (η μέγιστη τάση που παρείχε η γεννήτρια σήματος) και έγινε σάρωση για συχνότητες 100Hz-40kHz. Εξαιτίας του μικρού της μεγέθους, τοποθετήθηκε σε επαφή με τη βάση του δείγματος (απόσταση περίπου 3 cm από το δείγμα). Αρχικά έπρεπε να επιβεβαιωθεί κατά πόσο οι μεμβράνες ανταποκρίνονταν το ίδιο στις 2 μεθόδους διέγερσης. Παρατηρήθηκε μια αυξομείωση στο πλάτος σε συνθήκες συντονισμού χωρίς όμως μεταβολή των συχνοτήτων συντονισμού. Στην Εικόνα 4.24 εμφανίζονται τα

συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων με τις 2 μεθόδους διέγερσης που επαληθεύουν την αρχική εκτίμηση.



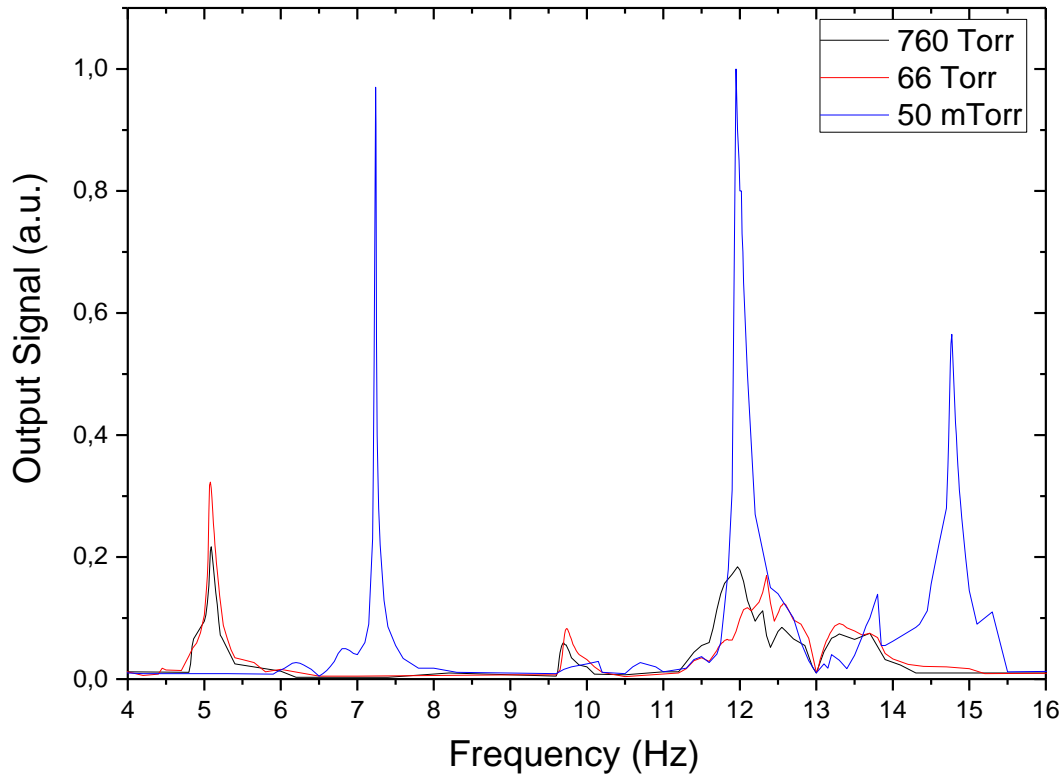
Εικόνα 4.24: Σύγκριση διέγερσης ηχείου-υπερήχων για μεμβράνη  $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$

Δοκιμάστηκε εκ νέου η μέτρηση της μεμβράνης με  $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$  ώστε να μετρηθούν οι ανώτερες συχνότητες συντονισμού που δεν ήταν δυνατό να καταγραφούν με το σύστημα του ηχείου, εξαιτίας του περιορισμένου εύρους των ηχείων. Επιπλέον από τη σύγκριση των Εικόνων 4.21 - 4.25 παρατηρείται η ταύτιση της 1<sup>ης</sup> συχνότητας γεγονός που επαληθεύει την μέχρι τώρα εκτίμηση ότι οι δύο μέθοδοι διέγερσης παράγουν τα ίδια αποτελέσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά προκειμένου να επιτευχθεί ο καλύτερος χαρακτηρισμός των μεμβρανών.

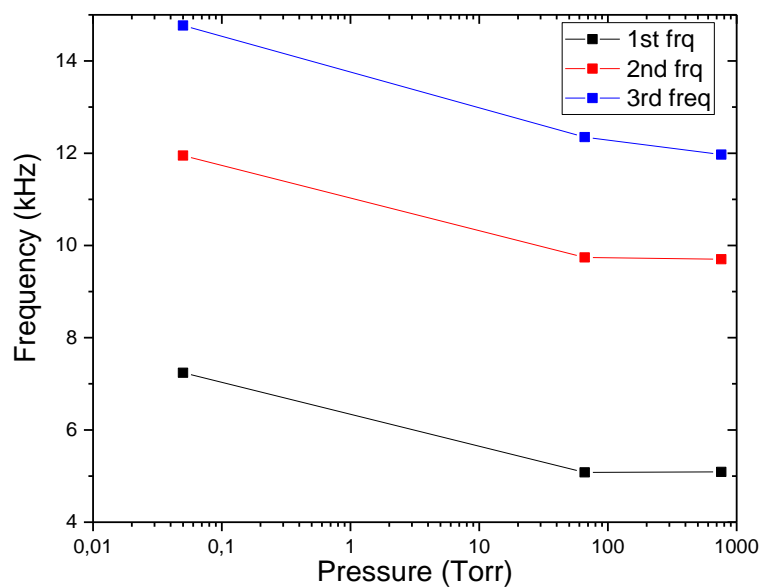


Εικόνα 4.25: Απόκριση μεμβράνης  $d_{mem}=22 \pm 3\mu m$  στους US

Όπως και στις μικρογεννήτριες τύπου αιωρούμενης προβόλου έτσι και εδώ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πιέσεις μικρότερες από 760Torr (1atm) προκειμένου να καθοριστεί η επίδραση της πίεσης του χώρου στις μεμβράνες. Με το σύστημα κενού μετρήθηκε η μεμβράνη με  $t_{etch} = 303\text{min}$  και  $d_{mem}=20 \pm 3\mu\text{m}$  ενώ οι συνθήκες πίεσης στις οποίες λήφθηκαν οι μετρήσεις είναι οι εξής: 760Torr - 43Torr - 54mTorr.



Εικόνα 4.26: Απόκριση μεμβράνης  $d_{mem}=20 \pm 3\mu\text{m}$  σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης



Εικόνα 4.27: Μεταβολή των συχνοτήτων με την πίεση,  $d_{mem}=20 \pm 3\mu\text{m}$

Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η μείωση της πίεσης προκαλεί αφενός τη μετατόπιση των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσης σε υψηλότερα επίπεδα και αφετέρου την αύξηση του πλάτους αυτής της ταλάντωσης.

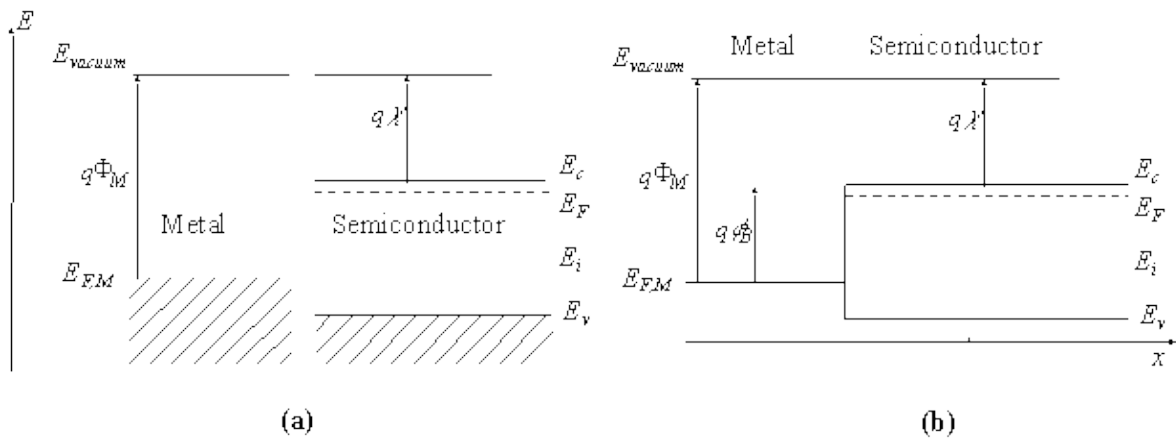
Τέλος, επιχειρήθηκε η δημιουργία μεμβρανών για χρόνους εγχάραξης  $t_{etch} = 308, 309$  και  $310$  min. Επειδή όμως το πάχος του πυριτίου ήταν εξαιρετικά λεπτό, οι δομές έσπαγαν είτε κατά τη διάρκεια της εγχάραξης, είτε κατά το στέγνωμα.

#### 4.6 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μεμβρανών με μάζα αδράνειας

Όπως αναφέρθηκε στο στάδιο της κατασκευής των μεμβρανών, μεταξύ του άνω ηλεκτροδίου και του πιεζοηλεκτρικού υλικού μεσολαβεί ένα μονωτικό υμένιο ( $SiO_2$ ). Το υμένιο αυτό τοποθετήθηκε για τη βελτίωση του πιεζοηλεκτρικού σήματος σύμφωνα με την έρευνα των Sohn et al.<sup>31</sup>

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα, οι ελεύθεροι φορείς στα νανοραβδία (NW)  $ZnO$ , σε αντίθεση με τα ιδανικά μονωμένα πιεζοηλεκτρικά υλικά, επισκιάζουν μερικώς τα φορτία που παράγονται από το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Συγκεκριμένα, όταν ασκείται μια μηχανική δύναμη στο  $ZnO$  NW, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας κινούνται προς τις περιοχές που δημιουργήθηκε το πιεζοηλεκτρικό δυναμικό για να το αντισταθμίσουν, αφήνοντας έτσι ιονισμένους δότες στην περιοχή αρνητικού δυναμικού και συσσωρευμένα ηλεκτρόνια στην περιοχή θετικού δυναμικού του NW. Επίσης ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των πιεζογεννητριών είναι επαφή μετάλλου-ημιαγωγού.

Όταν έρχεται σε επαφή ένα μέταλλο με έναν ημιαγωγό, δημιουργείτε είτε μια ωμική επαφή είτε μια επαφή Schottky. Στην περίπτωση της ωμικής επαφής, δεν υπάρχει φραγμός δυναμικού στη διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα τη συμμετρική μεταφορά ηλεκτρονίων σε συνθήκες ορθής ή ανάστροφης πόλωσης. Στη δεύτερη περίπτωση, ένας φραγμός δυναμικού μπορεί να δημιουργηθεί στη διεπιφάνεια προκαλώντας τη μη-συμμετρική μεταφορά ηλεκτρονίων. Καθώς το μέταλλο και ο ημιαγωγός έρχονται σε επαφή, οι ενεργειακές στάθμες Fermi δεν αλλάζουν αμέσως, με αποτέλεσμα να παράγεται η Εικόνα 4.28<sup>32</sup>. Ο φραγμός δυναμικού  $\Phi_B = \Phi_M - \chi$  ονομάζεται φραγμός Schottky και σχηματίζεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών, με  $\Phi_M$  το έργο εξόδου για το μέταλλο και  $\chi$  η ηλεκτροσυγγένεια του ημιαγωγού. Η επαφή είναι ωμική όταν  $\Phi_M < \chi$  και επαφή Schottky όταν ισχύει  $\Phi_M > \chi$ .



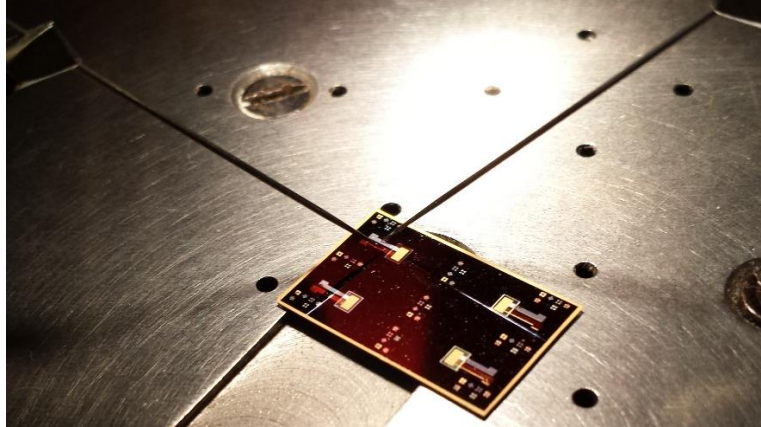
Εικόνα 4.28: Ενεργειακό διάκενο πριν και αμέσως μετά την επαφή του μετάλλου με τον ημιαγωγό

Επομένως, ένα ελλειπές φράγμα ενέργειας μεταξύ του μεταλλικού ηλεκτροδίου και του πιεζοηλεκτρικού ημιαγωγού, το οποίο οδηγεί στη διαρροή ρεύματος από τη διεπιφάνεια μετάλλου-ημιαγωγού, έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του πιεζοηλεκτρικού δυναμικού.

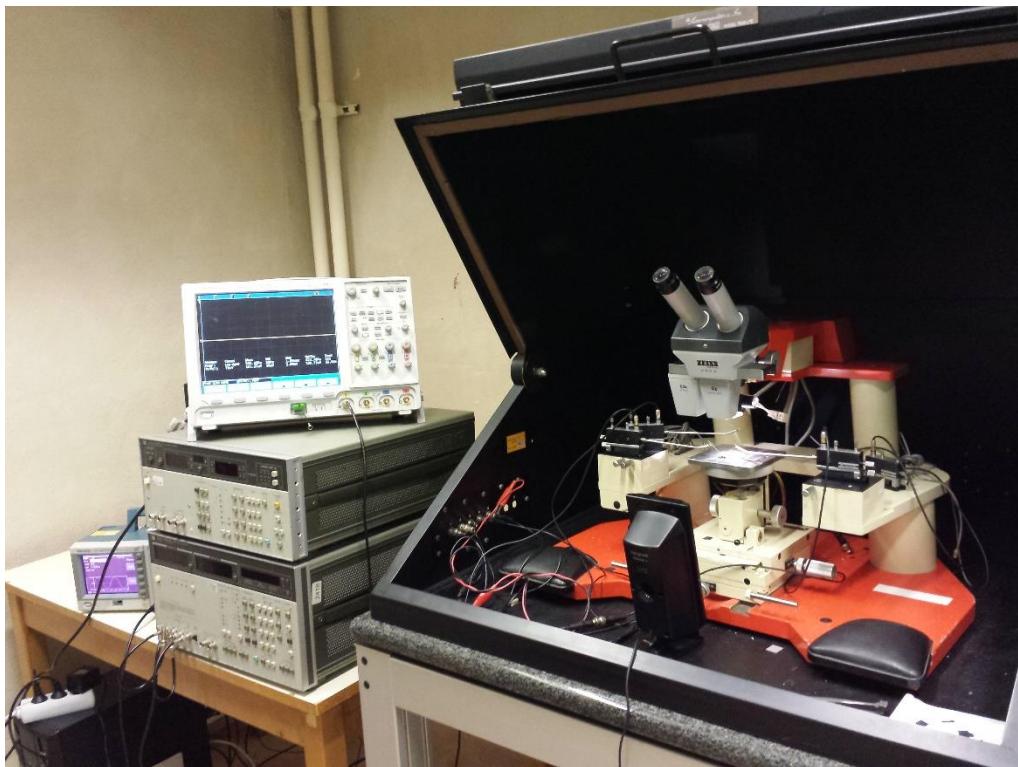
Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος των ελεύθερων φορέων στα ZnO NW, είναι μέσω της νόθευσης p-τύπου. Όμως το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας δεν ήταν η βελτίωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού με αποτέλεσμα να μην επιχειρηθούν βελτιώσεις σε αυτό τον τομέα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της διεπιφάνειας μετάλλου-ημιαγωγού, η οποία πρέπει να είναι επαφή Schottky για τη μεγιστοποίηση και την αποτελεσματική παραγωγή σημάτων εξόδου, προτάθηκε η χρήση λεπτού υμενίου SiO<sub>2</sub> (100nm). Το υμένιο SiO<sub>2</sub> εμποδίζει την μεταφορά των ελεύθερων φορέων μεταξύ της διεπαφής μετάλλου-ημιαγωγού και επίσης απομονώνει την απόδοση της γεννήτριας από το κύκλωμα εξόδου (φορτίο).

Για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των μεμβρανών επιλέχθηκε αντί να κολληθούν οι μεμβράνες σε PCB, να χρησιμοποιηθεί η συσκευή probe για τις μετρήσεις. Ο probe είναι ένα μηχάνημα το οποίο έχει ακροδέκτες σε σχήμα καρφίτσας (ακίδες), η έξοδος των οποίων οδηγεί σε ξεχωριστά ομοαξονικά καλώδια (Εικόνα 4.29).



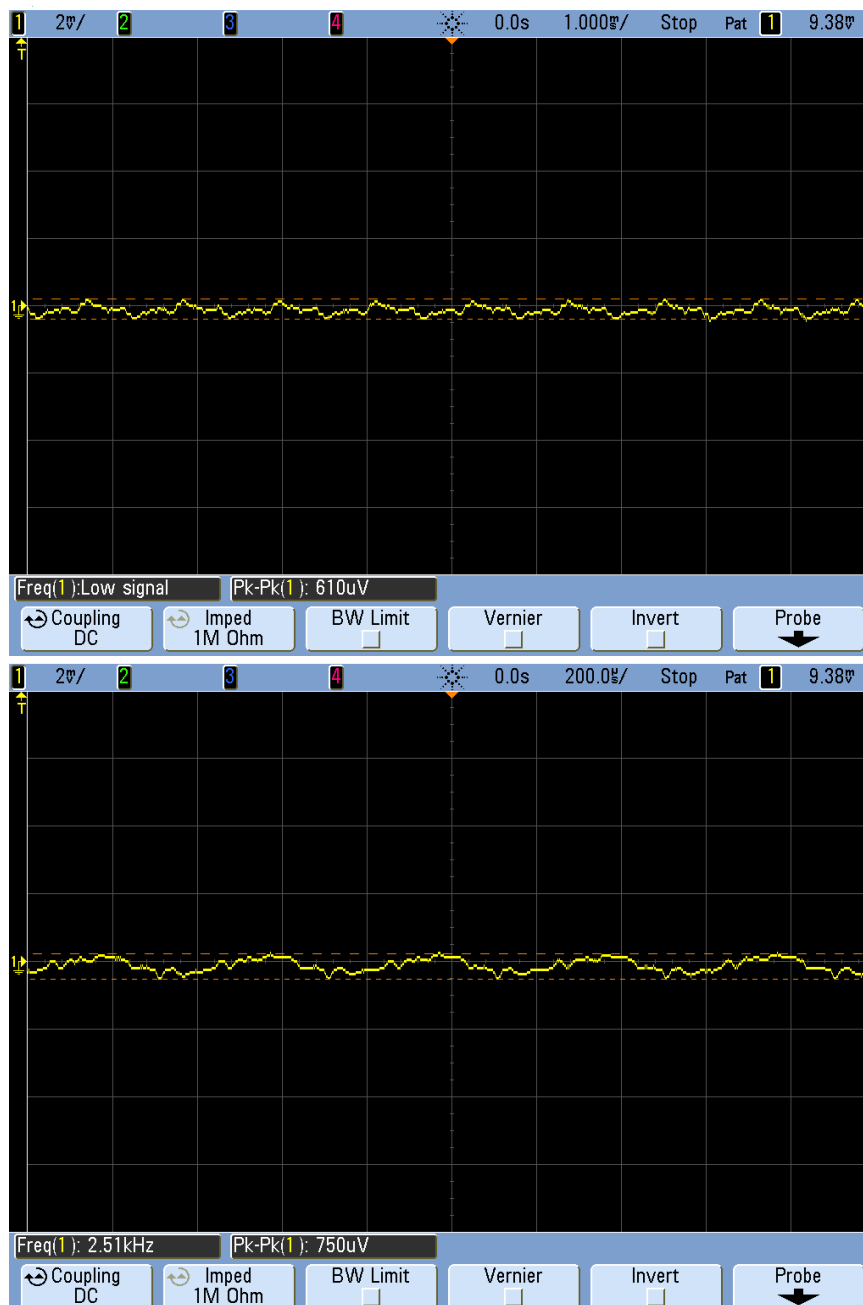
Εικόνα 4.29: Επαφή των ακίδων του prober με τους ακροδέκτες της γεννήτριας  
Επειδή οι συσκευές που μετρούνται είναι εξαιρετικά μικρές, ο prober διαθέτει ενσωματωμένο μικροσκόπιο προκειμένου να μπορεί να γίνει η ένωση των ακίδων του με τα ηλεκτρόδια της συσκευής με ακρίβεια. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό αποτελούνταν από τον Prober, τον παλμογράφο, τη γεννήτρια συχνοτήτων και το ηχείο σαν πηγή διέγερσης (Εικόνα 4.30).



Εικόνα 4.30: Διάταξη ηλεκτρικού χαρακτηρισμού (Prober-Παλμογράφος-Γεννήτρια)  
Η συχνότητα μέγιστης ταλάντωσης της γεννήτριας ήταν 980Hz. Με ημιτονικό σήμα σαν είσοδο του ηχείου λήφθηκαν οι γραφικές της Εικόνας 4.32. Η 1<sup>η</sup> αποτελεί την απόκριση της γεννήτριας στη συχνότητα συντονισμού και η 2<sup>η</sup> σε μία τυχαία συχνότητα (2500Hz).

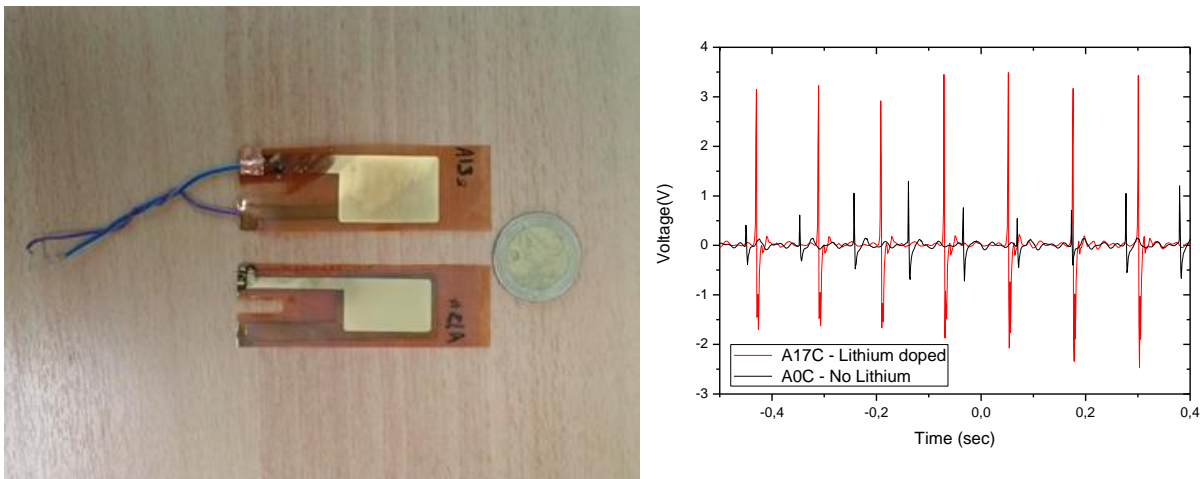


Πραγματοποιήθηκε σάρωση για συχνότητες από 50-20.000Hz, με περισσότερη έμφαση κοντά στα 980Hz, που ήταν η συχνότητα μέγιστης ταλάντωσης της γεννήτριας. Επίσης δοκιμάστηκαν διαφορετικά πλάτη τάσεων στην είσοδο του ηχείου (1-10V<sub>pp</sub>), καθώς και αλλαγή της θέσης του ως προς τη γεννήτρια. Σε όλες τις περιπτώσεις δεν παρατηρήθηκε κάποιο διακριτό σήμα που να οφείλεται στη μικρογεννήτρια, παρά μόνο θόρυβος (κυρίως από τα ηχεία).



Εικόνα 4.32: Ηλεκτρική απόκριση μικρογεννήτριας στο ηχείο

Η μη ανίχνευση του πιεζοηλεκτρικού σήματος μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Είτε το πιεζοηλεκτρικό σήμα αντισταθμίζεται από τα ελεύθερα φορτία που υπάρχουν μέσα στο πιεζοηλεκτρικό, είτε ότι το σήμα αυτό είναι πολύ μικρό και δεν μπορεί να ανιχνευτεί. Η πρώτη, αν και είναι πιθανή, δεδομένου ότι το πιεζοηλεκτρικό υλικό δεν έχει βελτιστοποιηθεί, δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα σε μικρογεννήτριες που κατασκευάστηκαν σε εύκαμπτα υποστρώματα (Εικόνα 4.31a). Στις μικρογεννήτριες αυτές, το πιεζοηλεκτρικό υλικό έχει κατασκευαστεί με ακριβώς αντίστοιχη διαδικασία όπως και στις μικρογεννήτριες που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στην Εικόνα 4.31b φαίνεται το πιεζοηλεκτρικό σήμα που επάγεται στα ηλεκτρόδια της μικρογεννήτριας όταν παραμορφώνεται μηχανικά. Αυτό σημαίνει ότι το υμένιο ZnO έχει σχετικά καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά και μπορεί να δημιουργήσει πιεζοηλεκτρικό σήμα.



Εικόνα 4.31: a) Πιεζογεννήτρια σε υπόστρωμα Καρτον με ZnO, κατασκευασμένη με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες όπως στις μικρογεννήτριες πυριτίου και b) τάση εξόδου της πιεζογεννήτριας σαν αποτέλεσμα μηχανικής παραμόρφωσης

Επομένως, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η πιο πιθανή αιτία της μη ανίχνευσης του πιεζοηλεκτρικού σήματος, είναι ότι το σήμα αυτό είναι μικρό, πιθανότατα επειδή είναι μικρό το πλάτος της ταλάντωσης των μεμβρανών, με αποτέλεσμα να υπερκαλύπτεται από το θόρυβο που ανιχνεύει η πειραματική διάταξη.

## 4.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε ο μηχανικός και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των πιεζοηλεκτρικών μικρογεννητριών. Κατά τη διαδικασία του μηχανικού χαρακτηρισμού παρατηρήθηκαν φαινόμενα θορύβου από τον πάγκο που ήταν εγκατεστημένη η διάταξη μέτρησης. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη μεταφορά της διάταξης στο πάτωμα, πάνω σε ειδικά "τσοχάκια" για την απόσβεση των δονήσεων από το περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι διέγερσης των μικρογεννητριών, ακουστική (με το ηχείο) και μέσω επαφής με την κεφαλή υπερήχων. Στις μικρογεννήτριες τύπου αιωρούμενης προβόλου υπερτερούσε η διέγερση με τα ηχεία καθώς η πρώτη συχνότητα συντονισμού ήταν κοντά στα 250Hz με αποτέλεσμα η διέγερση από την κεφαλή υπερήχων (που είχε κεντρική συχνότητα τα 40kHz) να μην είναι ικανή για να τις διεγείρει στη συγκεκριμένη συχνότητα. Από την άλλη μεριά, στις μικρογεννήτριες μεμβρανών και ειδικότερα αυτών με μεγάλο πάχος, ήταν αναγκαία η χρήση της κεφαλής υπερήχων καθώς η απόκριση των ηχείων ήταν στο εύρος 90Hz-20kHz.

Όσον αφορά τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των μικρογεννητριών, οι μικρογεννήτριες λειτούργησαν κάτω από συνθήκες εξωτερικής διέγερσης χωρίς να υπάρχει εμφανές πιεζοηλεκτρικό σήμα. Πιθανότερη αιτία είναι το ότι το σήμα απόκρισης ήταν μικρού πλάτους με αποτέλεσμα να υπερκαλύπτεται από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που κατέγραφε η πειραματική διάταξη, δεδομένου ότι αντίστοιχες μικρογεννήτριες υλοποιημένες σε εύκαμπτα υποστρώματα έδωσαν μετρήσιμα σήματα.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε ενδελεχώς η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός πιεζοηλεκτρικών μικρογεννητριών για τη συλλογή ενέργειας από τις μηχανικές δονήσεις του περιβάλλοντος.

Σαν πιεζοηλεκτρικό υλικό χρησιμοποιήθηκε λεπτό υμένιο από νανοραβδία ZnO το οποίο κατασκευάστηκε με την υδροθερμική μέθοδο.

Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μικρογεννήτριες. Η πρώτη ήταν μικρογεννήτρια τύπου αιωρούμενης προβόλου με μάζα αδράνειας, όπου υλοποιήθηκε σε δισκία SOI με ηλεκτρόδια Al. Η δεύτερη ήταν η μικρογεννήτρια μεμβράνης με μάζα αδράνειας, όπου υλοποιήθηκε σε δισκία DSP και ηλεκτρόδια Al-Au.

Ο χαρακτηρισμός των μικρογεννητριών έγινε σε δύο στάδια. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο μηχανικός χαρακτηρισμός τους, με σκοπό τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων ταλάντωσής τους. Πραγματοποιήθηκαν επίσης, μετρήσεις σε συνθήκες πίεσης μικρότερης της ατμοσφαιρικής με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης, της πίεσης, στις συχνότητες ταλάντωσης και στα πλάτη των μικρογεννητριών. Όσον αφορά τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των μικρογεννητριών, παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις οι μικρογεννήτριες δούλευαν μηχανικά, διαπιστώθηκε η ύπαρξη εκτεταμένου ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, ο οποίος υπερκάλυπτε το πιεζοηλεκτρικό σήμα.

Η κατασκευή μικρογεννητριών πάνω σε πυρίτιο είναι ένας κλάδος ο οποίος απασχολεί ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα, καθώς η ενεργειακή αυτονόμηση των ασύρματων ηλεκτρονικών συστημάτων γίνεται ολοένα και περισσότερο αναγκαία εξαιτίας της τεράστιας διείσδυσής τους στην καθημερινή ζωή. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στη βελτίωση των πιεζοηλεκτρικών υλικών και συγκεκριμένα στην εξάλειψη ή στον περιορισμό των ελεύθερων φορέων μέσα στα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Η ύπαρξή τους περιορίζει αισθητά το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα και μειώνει τη συνολική απόδοση των μικρογεννητριών. Τέλος, μια ακόμη σημαντική παράμετρος είναι η κατασκευή μικρογεννητριών ικανών να συλλέγουν ενέργεια από ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, με σκοπό να εξαλειφθεί η ανάγκη επανασχεδίασης των χαρακτηριστικών τους για κάθε διαφορετική εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <sup>1</sup> T. Kazmierksi and S. Beeby “Energy Harvesting Systems”, Springer, 2011
- <sup>2</sup> S. Beeby and N. White, “Energy harvesting for autonomous systems”, Artech House, 2010
- <sup>3</sup> S. Roundy, P. Wright and J. Rabaey “Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: with Special Focus on Vibrations”, Springer, 2004
- <sup>4</sup> Wang Y. L. “Piezoelectric ZnO Nanostructure for Energy Harvesting”, Wiley, 2015
- <sup>5</sup> R. Calio, U. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. Petris and C. Oddo, “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions”, Sensors 2014, 14, 4755-4790
- <sup>6</sup> [http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/mineral\\_physics/tensors.html#Elasticity](http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/mineral_physics/tensors.html#Elasticity)
- <sup>7</sup> S. Whitney, “Vibrations of Cantilever Beams: Deflection, Frequency, and Research uses”, April 1999, Retrieved from: <http://emweb.unl.edu/Mechanics-Pages/Scott-Whitney/325hweb/Beams.htm>
- <sup>8</sup> Γ. Νιάρχος, “Σχεδιασμός και κατασκευή μικρογεννήτριας για τη συλλογή ενέργειας από μηχανικές δονήσεις”, Αθήνα 2013
- <sup>9</sup> J. Yi, W. Shih and W. Shih, “Effect of length, width, and mode on the mass detection sensitivity of piezoelectric unimorph cantilevers”, J. Appl. Phys., Vol. 91, 1680, 2002
- <sup>10</sup> J. Fraden, “Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs and Applications”, Springer, 2010
- <sup>11</sup> Wang Z. L., “Nanogenerators for Self-powered Devices and Systems”, Georgia Institute of Technology, SMARTech digital repository, 2011
- <sup>12</sup> Wang Z. L., “Piezotronics and piezo-phototronics: fundamentals and applications”, National Science Review, vol1, pp. 62-90, March 2014
- <sup>13</sup> D. Shen, J. Park, J. Ajitsaria, S. Choe, H. Wikle III and D. Kim, “The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting”, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol 18, April 2008
- <sup>14</sup> A. Dow, A. Bittner, U. Schmid and N. Kherani, “Design, fabrication and testing of a piezoelectric energy microgenerator”, Microsystem Technologies, vol. 20, pp. 1035-1040, Feb. 2014
- <sup>15</sup> L. Prusaskova, P. Novak, P. Kulha, J. Ocenasek, J. Savkova, L. Pastorek, P. Sutta, “Modeling and fabrication of single cantilever piezoelectric microgenerator with optimized ZnO active layer”, ScienceDirect, vol. 591, pp. 305-310, Sept. 2015
- <sup>16</sup> P. Wang, H. Du, “ZnO thin film piezoelectric MEMS vibration energy harvesters with two piezoelectric elements for higher output performance”, Review of Scientific Instruments, vol 86, Jul. 2015
- <sup>17</sup> C. Hung, T. Chung, P. Yeh, C. Chen, C. Wang and S. Lin, “A miniature Mechanical-Piezoelectric-Configured Three-Axis Vibrational Energy Harvester”, IEEE Sensors Journal, vol. 15, Oct. 2015
- <sup>18</sup> X. Zhao, Z. Shang, G. Luo, L. Deng, “A vibration energy harvester using AlN piezoelectric cantilever array”, ScienceDirect, vol. 142, pp. 47-51, July 2015
- <sup>19</sup> {HYPERLINK “[www.lcinet.kent.edu](http://www.lcinet.kent.edu)”}- Why Cleanrooms
- <sup>20</sup> Ι. Ν. Αβαριτσιώτης, “Σημειώσεις Μικροηλεκτρονικής”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1994
- <sup>21</sup> <https://www.crystec.com/klnitre.htm>
- <sup>22</sup> Β. Εμ. Βαμβακάς, “Χημική εναπόθεση από ατμό διηλεκτρικών υμενίων. Εφαρμογές των υμενίων αυτών σε ηλεκτρονικές διατάξεις πυριτίου”, Αθήνα 2001
- <sup>23</sup> K. Nojiri, “Dry Etching Technology for Semiconductors”, Springer, 2015
- <sup>24</sup> T. Adams and R. Layton, “Introductory MEMS - Fabrication and Applications”, Springer, 2010
- <sup>25</sup> Π. Στυλιανός, “Κατασκευή και χαρακτηρισμός συντονιστών πολυκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου με μικρομηχανικές τεχνικές”, Αθήνα 1998
- <sup>26</sup> M. Madou, “Fundamentals of Microfabrication”, CRC Press, 2002
- <sup>27</sup> [http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/thin\\_layer\\_deposition.pdf](http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/thin_layer_deposition.pdf)
- <sup>28</sup> Y. Gao and Z.L. Wang, “Electrostatic Potential in a Bent Piezoelectric Nanowire. The fundamental Theory of Nanogenerator and Nanopiezotronics”, Nano letters, vol.7, pp. 2499-2505, Aug. 2007

<sup>29</sup> S. Vashist, "A review of Microcantilevers for Sensing Applications", Journal of Nanotechnology online, vol.3, June 2007

<sup>30</sup> J. Mertens, E. Finot, T. Thundat, A. Fabre, M. Nadal, V. Eyraud, E. Bourillot, "Effects of temperature and pressure on microcantilever resonance response", ScienceDirect, vol. 97, pp.119-126, Nov. 2003

<sup>31</sup> J. Sohn, S. Cha, B. Song, S. Lee, S. Kim, J. Ku, H. Kim, Y. Park, B. Choi, Z. Wang, J. Kim and K. Kim, "Engineering of efficiency limiting free carriers and an interfacial energy barrier for an enhancing piezoelectric generation", Energy and Environmental Science, vol. 6, pp. 97-104, Nov. 2012

<sup>32</sup> [http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3\\_2.htm#fig3\\_2\\_3](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3_2.htm#fig3_2_3)