



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Βελτιστοποίηση Ιδιοτήτων Οξειδίου του Ψευδαργύρου
(ZnO) για Διατάξεις Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων
(Surface Acoustic Waves)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Τσιλιβάκη Στεφανίας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και
Συστημάτων Πληροφορικής

**Βελτιστοποίηση Ιδιοτήτων Οξειδίου του Ψευδαργύρου
(ZnO) για Διατάξεις Ακουστικών Επιφανειακών Κυμάτων
(Surface Acoustic Waves)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Τσιλιβάκη Στεφανίας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1^η Νοεμβρίου 2022.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Τσάμης
Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2022.

.....

Στεφανία Τσιλιβάκη

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

Copyright © Στεφανία Τσιλιβάκη, 2022

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

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και οι αυξημένες ανάγκες των ανθρώπων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ταχύτερων, μικρότερων και φορητών συσκευών. Υπό αυτό το πρίσμα, η νανοτεχνολογία συμβάλλει σημαντικά στην κάλυψη των αναγκών αυτών, καθώς εφαρμόζεται σε πληθώρα εφαρμογών που χρησιμοποιούνται καθημερινά. Ένα από τα σπουδαιότερα υλικά που αξιοποιείται σε διατάξεις μικροηλεκτρονικής και νανοτεχνολογίας είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO). Αποτελεί ένα ημιαγώγιμο υλικό με σπουδαίες ιδιότητες, συνδυάζοντας πιεζοηλεκτρικά και οπτοηλεκτρονικά χαρακτηριστικά. Οι νανοδομές και τα υμένια του ZnO παρασκευάζονται με πληθώρα μεθόδων, οι οποίες καθορίζουν τα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του. Το ZnO λόγω του υψηλού συντελεστή πιεζοηλεκτρικής σύζευξης καθίσταται εξαιρετικό υλικό για διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (Surface Acoustic Waves).

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη υμενίων ZnO με την υδροθερμική μέθοδο και μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου ανάπτυξης στην μορφολογία και το πάχος του υμενίου με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Τα υμένια οξειδίου του ψευδαργύρου αναπτύχθηκαν με σκοπό την χρήση τους σε εφαρμογές και αισθητήρες ακουστικών επιφανειακών κυμάτων.

Το επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας ύστερα από την μελέτη του πάχους και της μορφολογίας των υμενίων ZnO, ήταν η κατασκευή διατάξεων διακλαδισμένων ηλεκτροδίων (IDE) αλουμινίου στην επιφάνεια των υμενίων. Στις διατάξεις που κατασκευάστηκαν πραγματοποιήθηκε θερμική ανόπτηση σε διαφορετικές συνθήκες. Ειδικότερα, η δημιουργία των διατάξεων και η θερμική ανόπτηση που επιβλήθηκε σε ορισμένες από αυτές είχε ως στόχο την εξαγωγή των χαρακτηριστικών I-V και μέσω αυτών την μελέτη της ειδικής αντίστασης του υλικού ZnO που αναπτύχθηκε.

Λέξεις Κλειδιά Νανοτεχνολογία, Οξείδιο του Ψευδαργύρου, ZnO, Υδροθερμική Ανάπτυξη, Υμένια, Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, Ακουστικά Επιφανειακά Κύματα, Διακλαδισμένα Ηλεκτρόδια, Ανόπτηση, Ειδική Αντίσταση

Abstract

The rapid development of technology and the increased needs of people have led to the development of faster, smaller, and more portable devices. In this respect, nanotechnology contributes significantly to covering these needs, as it is applied in a multitude of applications that are used every day. One of the most critical materials used in microelectronics and nanotechnology devices is zinc oxide (ZnO). It is a semiconducting material with great properties, combining piezoelectric and optoelectronic characteristics. ZnO nanostructures and films are prepared by a variety of methods, which determine their structural and morphological characteristics. ZnO due to its high piezoelectric coupling coefficient becomes an excellent material for Surface Acoustic Waves (SAW) devices.

In the context of this thesis, ZnO films were grown using the hydrothermal method, and the effect of the growth time on the morphology and thickness of the film was studied using the scanning electron microscope (SEM). Zinc oxide films were developed for acoustic surface wave applications and sensors.

The next stage of the present work, after studying the thickness and morphology of the ZnO films, was the construction of aluminum interdigitated electrodes (IDE) arrangements on the surface of the films. Thermal annealing in different conditions was carried out in the devices that were fabricated. In particular, the creation of the devices and the thermal annealing imposed on some of them aimed at extracting the I-V characteristics and through them the study of the resistivity of the developed ZnO material.

Keywords Nanotechnology, Zinc Oxide, ZnO, Hydrothermal Growth, Films, Scanning Electron Microscope, Surface Acoustic Waves, Interdigitated Electrodes, Annealing, Resistivity

Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και τον κύριο Χρήστο Τσάμη, Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εκπονήσω τη διπλωματική αυτή υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση τους. Παράλληλα, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω που μου έδωσαν την δυνατότητα να εργαστώ πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα αποκομίζοντας πολλές γνώσεις και σημαντική εμπειρία στον ερευνητικό τομέα της μικροηλεκτρονικής.

Ένα ισάξιο ευχαριστώ πρέπει να πάει στον Αχιλλέα Μπαρδάκα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Πατρών, που μου προσέφερε πολύτιμες γνώσεις και με βοήθησε να εξοικειωθώ με τις εργαστηριακές τεχνικές. Αχιλλέα, σε ευχαριστώ πολύ για τις δεκάδες ώρες που αφιέρωσες μαθαίνοντας μου τόσα πράγματα, για την ανοχή που έδειξες στην γκρίνια μου όλο αυτό το διάστημα αλλά και που με έμαθες ότι με ψυχραιμία και υπομονή όλα λύνονται.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μανώλη Χουρδάκη και Απόστολο Σέγκο, Μεταδιδακτορικούς Ερευνητές του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν και την γενικότερη αλληλεπίδραση που είχαμε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να δώσω στην Δανάη Μπρίλλη που αυτά τα πέντε χρόνια στην σχολή ήταν δίπλα και με έμαθε να μην τα παρατάω και να μην τα βάζω κάτω. Δανάη, σε ευχαριστώ που με βοήθησες να αντιμετωπίσω όλες τις δυσκολίες που συνάντησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου.

Contents

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
1 Νανοδομές Οξειδίου του Ψευδαργύρου	19
1.1 Εισαγωγή στη Νανοτεχνολογία	19
1.1.1 Ιστορία της Νανοτεχνολογίας	19
1.1.2 Νανοϋλικά & Νανοδομές	21
1.1.3 Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας	23
1.2 Οξείδιο του Ψευδαργύρου (ZnO)	25
1.2.1 Κρυσταλλογραφική Δομή του ZnO	25
1.2.2 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο	27
1.2.2.1 Διέπουσες Εξισώσεις του Πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου	28
1.2.2.2 Πιεζοηλεκτρικές Διατάξεις	30
1.2.3 Μέθοδοι Ανάπτυξης Νανοδομών ZnO	30
1.2.3.1 Μηχανισμός Ατμού-Υγρού-Στερεού (Vapour-Liquid-Solid)	30
1.2.3.2 Φυσική Εναπόθεση Ατμών (Physical Vapor Deposition)	31
1.2.3.3 Χημική Εναπόθεση Ατμών (Chemical Vapor Deposition)	31
1.2.3.4 Χημική Εναπόθεση Οργανικών Μεταλλικών Ενώσεων (Metal – Organic Chemical Vapor Deposition)	31
1.2.3.5 Υδροθερμική Μέθοδος	32
2 Διατάξεις Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων (Surface Acoustic Waves)	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Μηχανισμοί και Παράμετροι Ανίχνευσης	34
2.2.1 Θερμοκρασία	35
2.2.2 Πίεση	35
2.2.3 Μεταβολή Μάζας	35
2.2.4 Ιξωδοελαστικότητα	35
2.2.5 Αγωγιμότητα	35
2.3 Είδη Ακουστικών Κυμάτων	36
2.3.1 Κύματα Rayleigh	36
2.3.2 Οριζόντια Εγκάρσια (Shear Horizontal) Κύματα	37
2.3.3 Κύματα Lamb	38
2.3.4 Κύματα Love	39
2.4 Υλικά για Διατάξεις Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων	40
2.5 Σχεδιασμός Διακλαδισμένων Ηλεκτροδίων	42
2.6 Εφαρμογές Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων	45
2.6.1 Βιοαισθητήρες	45
2.6.2 Εξοπλισμός Ηλεκτρονικών Ισχύος	46
2.6.3 Σιδηροδρομικά Οχήματα	46
2.6.4 Ανίχνευση Υγρασίας	47
2.6.5 Ανίχνευση Χημικών και Αερίων	47
2.6.6 Εφαρμογές στη Μικρορευστομηχανική	47

3	Ανάπτυξη Υμενίων Οξειδίου του Ψευδαργύρου (ZnO)	48
3.1	Πειραματική Διαδικασία Ανάπτυξης Υμενίων ZnO	48
3.1.1	Προετοιμασία του Υποστρώματος	48
3.1.2	Επίστρωση του Στρώματος Πυρήνωσης (Seeding Layer Deposition)	49
3.1.3	Διαδικασία Ανάπτυξης Υμενίων ZnO	51
3.2	Ανάπτυξη Υμενίων ZnO	53
3.2.1	Τεχνικές Χαρακτηρισμού Υμενίων ZnO	53
3.2.1.1	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)	53
3.2.1.2	Επεξεργασία Εικόνων με το Λογισμικό ImageJ	55
3.2.2	Εξάρτηση από τον Χρόνο Ανάπτυξης	57
4	Κατασκευή και Χαρακτηρισμός Διατάξεων	70
4.1	Κατασκευή Διατάξεων με Διακλαδισμένα Ηλεκτρόδια (IDE)	71
4.2	Διαδικασία Θερμικής Ανόπτησης (Annealing) των Διατάξεων	73
4.3	Χαρακτηρισμός Διατάξεων	75
4.3.1	Πειραματική Διάταξη	75
4.3.2	Μετρήσεις και Εξαγωγή των Χαρακτηριστικών I-V	76
4.3.2.1	Θερμική Ανόπτηση Υμενίων ZnO με Ηλεκτρόδια Αλουμινίου στην Επιφάνεια	79
4.3.2.2	Θερμική Ανόπτηση Υμενίων ZnO χωρίς Ηλεκτρόδια Αλουμινίου στην Επιφάνεια	83
4.3.3	Υπολογισμός Ειδικής Αντίστασης του Υλικού	91
4.3.3.1	Ειδική Αντίσταση για τα Υμένια ZnO με Θερμική Ανόπτηση μετά την Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων	93
4.3.3.2	Ειδική Αντίσταση για τα Υμένια ZnO με Θερμική Ανόπτηση πριν την Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων	94
4.3.3.3	Συμπεράσματα	96
5	Επίλογος και Μελλοντικές Επεκτάσεις	97

List of Figures

1	Το κύπελλο του Λυκούργου. Το γυαλί εμφανίζεται πράσινο στο ανακλώμενο φως (A) και κόκκινο-μοβ στο εκπεμπόμενο φως (B).[2]	21
2	Νανοϋλικά με διαφορετικές μορφολογίες. (A) Μη πορώδη Pd Νανოსωματίδια, (B) Νανοφύλλα γραφενίου, (C) νανοράβδοι Ag, (D) Νανοσίνες οξειδίου πολυαιθυλενίου, (E) Νανοςύρματα ZnO που μοιάζουν με αχινό, (F) Δίκτυο νανοςύρματος WO_3 . [3]	22
3	Νανოსωλήνες άνθρακα για τη θεραπεία του καρκίνου.[4]	24
4	(α) Κυβική κρυσταλλική δομή σφαλερίτη (zinc-blende), (β) Εξαγωνική κρυσταλλική δομή βουρτσίτη (wurzite).[7]	26
5	Σχηματική αναπαράσταση της εξαγωνικής δομής του βουρτσίτη. Στο Σχήμα φαίνονται οι πλεγματικές σταθερές a και c, όπου a το μήκος της πλευράς του εξαγώνου (επίπεδο x-y) και c το ύψος του εξαγωνικού πρίσματος (διεύθυνση [0001] παράλληλη στον άξονα z) καθώς και ο εσωτερικός παράγοντας u, ο οποίος εκφράζεται ως το μήκος του δεσμού (b) διαιρεμένο από την πλεγματική σταθερά c. Οι γωνίες ανάμεσα στους δεσμούς, α και β (109,47 μοίρες για ιδανικό κρύσταλλο) και τρεις δευτερεύουσες διευθύνσεις b_1' , b_2' και b_3' . [8]	26
6	(Αριστερά) Επίδειξη της καθαρής πόλωσης ενός πιεζοηλεκτρικού πολύ-κρυστάλλου ως άθροισμα της πόλωσης μεμονωμένων κρυσταλλίτων. Αυτή η πόλωση θα μεγιστοποιηθεί στην περίπτωση μονο-κρυσταλλικού υποστρώματος (δεξιά). Επίδειξη της απόκρισης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού κατά την εφαρμογή εξωτερικής τάσης κατά τη διεύθυνση της πόλωσης. Μια τάση όμοιας πολικότητας θα εξαναγκάσει το υλικό να συσταλεί ενώ μια τάση αντίθετης πολικότητας θα εξαναγκάσει το υλικό να διασταλεί. [9]	28
7	Διάγραμμα φυσικής εναπόθεσης ατμών. Ο φούρνος με δύο ζώνες θερμοκρασίας αποτελείται από μία ζώνη υψηλής θερμοκρασίας όπου πραγματοποιείται η εξάχνωση και μια ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας όπου το εξαχνωμένο ZnO εναποτίθεται στα υποστρώματα. Το Ar χρησιμοποιείται συνήθως ως μεταφορέας ενώ το O_2 χρησιμοποιείται ως το αντιδρόν αέριο. [10]	31
8	Ανάπτυξη υμενίου ZnO με χρήση της υδροθερμικής μεθόδου. Η εικόνα προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (α) εγκάρσιας διατομής και (β) κάτοψης	33
9	Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Rayleigh στο υπόστρωμα. [12]	36
10	Σχηματική αποτύπωση διάδοσης οριζόντιου εγκάρσιου κύματος στο υπόστρωμα. [12]	37
11	Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Lamb στο υπόστρωμα και μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το κύμα. [12]	39
12	Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Love στο υπόστρωμα. [12]	40
13	Δομή διάταξης επιφανειακού ακουστικού κύματος που περιλαμβάνει λειτουργία κύματος Love [14]	40
14	Χαρακτηριστικά διακλαδισμένων ηλεκτροδίων. Το s (Spacing) είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και ισούται συνήθως με $\lambda/4$ στην διάταξη γραμμή καθυστέρησης (Delay Line). Το w είναι το πλάτος δακτύλων των ηλεκτροδίων. Το W_1 είναι το μήκος επικάλυψης (Aperture) των ηλεκτροδίων. Το G είναι η απόσταση μεταξύ των IDTs, όταν υπάρχουν 2 σετ (διάταξη Two-Port). Το W είναι το συνολικό μήκος της διάταξης συμπεριλαμβανομένων των ακροδεκτών. Το l συμπεριλαμβάνει το μήκος του IDT στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα ηλεκτρόδια (Fingers). Το l_1 είναι το μήκος των ακροδεκτών και το l_2 το συνολικό ύψος της διάταξης.	43
15	Τυπική διάταξη ενός ταλαντωτή (Resonator) που περιέχει ένα μόνο σύνολο IDTs (One-Port) [18]	44
16	Διάταξη γραμμής καθυστέρησης (Delay Line) με και χωρίς ταλαντωτή (Resonator) [12]	45

17	Σχηματική απεικόνιση αμφίδρομων (Bi-Directional) ηλεκτροδίων [12]	45
18	Βασική απεικόνιση ενός βιοαισθητήρα επιφανειακού ακουστικού και συγκεκριμένα ενός ανοσο-αισθητήρα SAW. Τα βέλη στο επάνω μέρος δείχνουν τη ροή του υγρού δείγματος (1) στο οποίο είναι βυθισμένος ο αισθητήρας. Τα στοιχεία του βιοαισθητήρα SAW είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (2), τα IDTs (3), το επιφανειακό ακουστικό κύμα (4) και τα ακινητοποιημένα αντισώματα (5) που αντιστοιχούν στα μόρια της αναλύομενης ουσίας (6) στο δείγμα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα καθοδήγησης (7) συμβάλλουν στην λειτουργία του αισθητήρα SAW και δημιουργούν αλλαγές στο σήμα εξόδου (8) καθώς η αναλύομενη ουσία δεσμεύεται στην επιφάνεια του αισθητήρα. [19]	46
19	Ζύγιση ένυδρου οξικού ψευδαργύρου για την παρασκευή του e-gel.	50
20	Πειραματική διάταξη επίστρωσης e-gel.	51
21	Πειραματική διάταξη ανάπτυξης νανοδομών ZnO με την διαδικασία της υδροθερμικής μεθόδου.	52
22	Ειδικός δειγματοφορέας για την τοποθέτηση των δειγμάτων στο λουτρό ανάπτυξης.	53
23	Απεικόνιση των τριών βασικών τμημάτων του SEM: τη στήλη ηλεκτρονίων, τον θάλαμο δειγμάτων και το υπολογιστικό σύστημα ελέγχου.[21]	54
24	Καθορισμός μίας γνωστής απόστασης στο ImageJ με βάση τα pixels της εικόνας.	55
25	Επεξεργασία εικόνας SEM εγκάρσιας διατομής στο ImageJ για εύρεση πάχους των υμενίων ZnO.	56
26	Μετρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση της εικόνας 25	56
27	Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO του δείγματος G_7 για 15 λεπτά ανάπτυξης.	57
28	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_7 για 15 λεπτά ανάπτυξης.	58
29	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO, με χρόνο ανάπτυξης 15 λεπτά για το δείγμα G_7	58
30	Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO του δείγματος G_5 για 30 λεπτά ανάπτυξης.	59
31	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_5 για 30 λεπτά ανάπτυξης.	59
32	Υπολείμματα σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας του δείγματος G_5	60
33	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO, με χρόνο ανάπτυξης 30 λεπτά για το δείγμα G_5	60
34	Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO των δειγμάτων G_1 και G_2 για 60 λεπτά ανάπτυξης.	61
35	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_1 για 60 λεπτά ανάπτυξης.	61
36	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_2 για 60 λεπτά ανάπτυξης.	62
37	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα 37α' G_1 και 37β' G_2 για 60 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.	62
38	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων του G_1 και του G_2 με χρόνο ανάπτυξης 60 λεπτά.	63
39	Εικόνα κάτοψης νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_4 , G_{13} και G_{14} σε 120 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.	63
40	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO των δειγμάτων G_4 , G_{13} και G_{14} για 120 λεπτά ανάπτυξης.	64
41	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_4 , G_{13} και G_{14} για 120 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.	64
42	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων των δειγμάτων G_4 και G_{13} με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά.	65
43	Εικόνα κάτοψης νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_9 και G_{10} σε 180 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.	65
44	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO των δειγμάτων G_9 και G_{10} για 180 λεπτά ανάπτυξης.	66

45	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO των δειγμάτων G_9 και G_{10} για 180 λεπτά χρόνο ανάπτυξης, όπου στο διάγραμμα 45β' συμπεριλαμβάνεται περιοχή που έχει μέσο μήκος νανοδομών 483.96 nm και στο διάγραμμα 45γ' δεν συμπεριλαμβάνεται.	66
46	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων των δειγμάτων G_9 και G_{10} με χρόνο ανάπτυξης 180 λεπτά.	67
47	Εικόνες SEM του δείγματος G_{11} κάτοψης 47α' και με κλίση 45 μοιρών 47β' για χρόνο ανάπτυξης 240 λεπτά	67
48	Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_{11} για 240 λεπτά ανάπτυξης.	68
49	Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων του δείγματος G_{11} με χρόνο ανάπτυξης 240 λεπτά.	68
50	Γραφική παράσταση του μέσου πάχους των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν συναρτήσει του χρόνου.	69
51	Η πάνω όψη (layout) της μάσκας που χρησιμοποιήθηκε για την λιθογραφία.	71
52	Διαδικασία κατασκευής διατάξεων διακλαδισμένων ηλεκτροδίων.	72
53	Οπτικό μικροσκόπιο DP71 της εταιρείας Olympus.	73
54	Απεικόνιση διακλαδισμένων ηλεκτροδίων στο οπτικό μικροσκόπιο.	73
55	Φούρνος για θερμική ανόπτηση υλικών με μέγιστη θερμοκρασία 1100°C.	74
56	Πειραματική διάταξη για μετρήσεις I-V.	76
57	Δείγμα G_{19} και ονομασία ψηφίδων.	76
58	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.	77
59	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.	77
60	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.	78
61	Μέθοδος γραμμικής παρεμβολής (linear fit) για την μικρή διάταξη (small) της τέταρτης ψηφίδας του δείγματος G_{19}	78
62	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	80
63	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	80
64	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	81
65	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	82
66	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	82

67	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.	83
68	Δείγμα G_{18} και ονομασία ψηφίδων.	84
69	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 231°C , για 60 λεπτά.	84
70	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 231°C , για 60 λεπτά.	85
71	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 231°C , για 60 λεπτά.	85
72	Δείγμα G_{22} και ονομασία ψηφίδων.	86
73	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{22} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2 και 4 (IDE1, IDE2 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{22} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 324°C , για 60 λεπτά.	87
74	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{22} για όλες τις μεσαίες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2 και 4 (IDE1, IDE2 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{22} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 324°C , για 60 λεπτά.	87
75	Δείγμα G_{23} και ονομασία ψηφίδων.	88
76	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{23} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1 και 2 (IDE1 και IDE2) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{23} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 400°C , για 60 λεπτά.	88
77	Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{23} για την μεγάλη (large) διάταξη της ψηφίδας IDE2 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{23} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 400°C , για 60 λεπτά.	89
78	Δείγμα G_{24} και ονομασία ψηφίδων.	89
79	Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{24} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1 και 2 (IDE1 και IDE2) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.	90
80	Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{24} για την μεσαία (medium) διάταξη της ψηφίδας IDE4 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.	90
81	Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{24} για την μεγάλη (large) διάταξη της ψηφίδας IDE3 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.	91
82	Μετρήσεις αγωγιμότητας της δομής των λεπτών υμενίων για επίπεδη δομή και για δομή σάντουιτς.[24]	92
83	Διακλαδισμένα ηλεκτρόδια για μετρήσεις επίπεδης αγωγιμότητας.[24]	92
84	Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου ανόπτησης.	94

85	Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας ανόπτησης του υποστρώματος πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	96
----	--	----

List of Tables

1	Χαρακτηριστικά των δειγμάτων που μελετήθηκαν με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).	57
2	Μέσο πάχος των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν με την υδροθερμική μέθοδο συναρτήσει του χρόνου παραμονής τους στο λουτρό ανάπτυξης.	69
3	Υπολογισμός κλίσης της καμπύλης 50 σε όλα τα χρονικά διαστήματα ανάπτυξης ZnO	70
4	Συνθήκες ανόπτησης των δειγμάτων G_{18} , G_{22} , G_{23} και G_{24}	74
5	Συνθήκες ανόπτησης του δείγματος G_{19}	75
6	Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.	79
7	Ηλεκτρικές αντιστάσεις κάθε ηλεκτροδίου (finger) των διατάξεων του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.	79
8	Ηλεκτρικές αντιστάσεις των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση.	81
9	Ηλεκτρικές αντιστάσεις των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την δεύτερη θερμική ανόπτηση.	83
10	Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{18} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $231^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	86
11	Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{22} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $324^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	88
12	Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{23} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $400^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	89
13	Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{24} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $500^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	91
14	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.	93
15	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση.	93
16	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την δεύτερη θερμική ανόπτηση.	93
17	Υπολογισμός μέσης ειδικής αντίστασης για το δείγμα G_{19} που προκύπτει από όλες τις διατάξεις, πριν την θερμική ανόπτηση, μετά την πρώτη θερμική ανόπτηση και μετά την δεύτερη.	94
18	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{18} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $231^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	94
19	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{22} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $324^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	95
20	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{23} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $400^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	95

21	Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{24} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 500°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	95
22	Υπολογισμός μέσης ειδικής αντίστασης για όλα τα δείγματα με θερμική ανόπτηση των υποστρωμάτων σε διαφορετικές θερμοκρασίες πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.	95

1 Νανοδομές Οξειδίου του Ψευδαργύρου

1.1 Εισαγωγή στη Νανοτεχνολογία

Νανοτεχνολογία ορίζεται ως ο χειρισμός και κατασκευή υλικών και συσκευών σε κλίμακα ατόμων ή μικρών ομάδων από άτομα. Η νανοκλίμακα τυπικά μετριέται σε νανόμετρα, όπου 1 νανόμετρο αντιστοιχεί σε 10^{-9} μέτρα, και τα υλικά τα οποία κατασκευάζονται σε αυτή την κλίμακα συνήθως διέπονται από χαρακτηριστικές χημικές και φυσικές ιδιότητες εξαιτίας των κβαντομηχανικών φαινομένων. Οι τεχνικές υλοποίησης εργασιών σε νανοκλίμακα είναι εξαιρετικά σημαντικές στην ηλεκτρονική μηχανική, καθώς πληθώρα νανοτεχνολογικών υλικών και προϊόντων εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου και γίνονται διαθέσιμα ακόμη και στην καταναλωτική αγορά. Για παράδειγμα, δισεκατομμύρια μικροσκοπικές νανοίνες, με μήκος περίπου 10 νανομέτρων η κάθε μία είναι προσκολλημένες μοριακά σε φυσικές και συνθετικές ίνες ώστε να προσδώσουν σε ρούχα και άλλα υφάσματα αντοχή στους λεκέδες. Επιπρόσθετα νανοκρύσταλλοι οξειδίου του ψευδαργύρου έχουν χρησιμοποιηθεί στην δημιουργία μη ορατής αντηλιακής προστασίας ώστε να εμποδίσουν την υπεριώδη ακτινοβολία. Τέλος νανοκρύσταλλοι αργύρου έχουν ενσωματωθεί σε επιδέσμους για να προσδώσουν αντιβακτηριδιακή δράση και να αποτρέψουν τυχόν μολύνσεις που μπορεί να προσβληθεί ο ασθενής.

Η νανοτεχνολογία είναι ένας ευρέως διεπιστημονικός κλάδος, καθώς συμπεριλαμβάνει την φυσική, τη χημεία, τη βιολογία, την επιστήμη των υλικών και ένα ευρύ φάσμα του κλάδου της μηχανικής. Ο όρος νανοτεχνολογία χρησιμοποιείται ως σύντομη αναφορά τόσο στην επιστήμη όσο και στην τεχνολογία αυτού του συνεχώς εξελισσόμενου κλάδου. Στα πλαίσια ενός πιο αυστηρού ορισμού, η νανοεπιστήμη περιλαμβάνει μια βασική κατανόηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων σε ατομική και σχεδόν ατομική κλίμακα. Παράλληλα, χρησιμοποιεί ελεγχόμενο χειρισμό των ιδιοτήτων αυτών για δημιουργία υλικών και λειτουργικών συστημάτων με μοναδικές ικανότητες.

Σε αντίθεση με τις σχετικά πρόσφατες προσπάθειες της μηχανικής, η φύση έχει αναπτύξει νανοτεχνολογίες εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια με την χρήση ενζύμων και καταλυτών για να οργανώσει με εξαιρετική ακρίβεια διαφορετικά είδη ατόμων και μορίων σε περίπλοκες μικροσκοπικές δομές που καθιστούν δυνατή τη ζωή. Αυτά τα φυσικά προϊόντα κατασκευάζονται με σπουδαία αποδοτικότητα και προσφέρουν εντυπωσιακές ικανότητες, όπως η δυνατότητα συλλογής ηλιακής ενέργειας, η μετατροπή αλάτων και νερού σε ζωντανά κύτταρα, η αποθήκευση και επεξεργασία τεράστια ποσότητας δεδομένων με την χρήση πολλών νευρικών κυττάρων και την τέλεια αντιγραφή δισεκατομμύρια τμημάτων πληροφορίας αποθηκευμένης σε μόρια δεσοξυριβονουκλεϊκού οξέος (DNA).

Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι για τις ποιοτικές διαφορές στη συμπεριφορά των υλικών σε νανοκλίμακα (η οποία παραδοσιακά ορίζεται ως μικρότερη από 100 νανόμετρα). Ο πρώτος λόγος είναι τα κβαντομηχανικά φαινόμενα, τα οποία εισέρχονται στο προσκήνιο λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων που οδηγούν σε νέους τομείς της φυσικής και της χημείας. Ο δεύτερος λόγος είναι ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό της νανοκλίμακας, η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο των δομών αυτών. Αυτό σημαίνει ότι κανένα άτομο δεν απέχει μεγάλη απόσταση από μια επιφάνεια ή διεπιφάνεια και η συμπεριφορά των ατόμων σε αυτές τις θέσεις υψηλότερης ενέργειας έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του υλικού. Για παράδειγμα η αντιδραστικότητα ενός σωματιδίου μεταλλικού καταλύτη γενικά αυξάνεται αισθητά καθώς μειώνεται το μέγεθος του. Ο μακροσκοπικός χρυσός είναι χημικά αδρανής, ενώ σε νανοκλίμακες ο χρυσός γίνεται εξαιρετικά αντιδραστικός και καταλυτικός, ταυτόχρονα λιώνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Επομένως σε διαστάσεις νανοκλίμακας οι ιδιότητες ενός υλικού εξαρτώνται και μεταβάλλονται συναρτήσει του μεγέθους του, όπως η σύνθεση και η δομή του.^[1]

1.1.1 Ιστορία της Νανοτεχνολογίας

Ο Αμερικανός φυσικός Richard Feynman και βραβευμένος με Νόμπελ εισήγαγε την έννοια της νανοτεχνολογίας το 1959. Κατά τη διάρκεια της ετήσιας συνάντησης της Αμερικανικής Εταιρείας Φυσικής, ο Feynman παρουσίασε μια διάλεξη με τίτλο «There's Plenty of Room at the Bot-

tom» στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνια (Caltech). Σε αυτή τη διάλεξη, ο Feynman έκανε την υπόθεση «Γιατί δεν μπορούμε να γράψουμε ολόκληρους τους 24 τόμους της Εγκυκλοπαίδειας Britannica στο κεφάλι μιας καρφίτσας;» και περιέγραψε ένα όραμα για τις μηχανές που κατασκευάζουν τα εξαρτήματα για μικρότερες μηχανές (μία αρκετά γνωστή και διαδεδομένη λειτουργία σε μακροκλίμακα), τα οποία όταν συναρμολογούνται είναι ικανά να κατασκευάσουν τα εξαρτήματα για ακόμη μικρότερα μηχανήματα. Με αυτό τον τρόπο συνεχίζοντας την ακολουθία αυτή θα φτάσουμε σε ατομική κλίμακα. Αυτή η νέα ιδέα έδειξε ότι οι υποθέσεις του Feynman έχουν αποδειχθεί σωστές και για αυτούς τους λόγους, θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης νανοτεχνολογίας. Ύστερα από 15 χρόνια ο Norio Taniguchi, ένας Ιάπωνας επιστήμονας ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε και διατύπωσε τον όρο “νανοτεχνολογία” το 1974 ως ότι νανοτεχνολογία εμπεριέχεται κυρίως στην επεξεργασία του διαχωρισμού, της ενοποίησης και της παραμόρφωσης υλικών από ένα άτομο ή ένα μόριο.

Έπειτα από τον Feynman, ο οποίος είχε ανακαλύψει αυτό το νέο πεδίο έρευνας που τράβηξε το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων, αναπτύχθηκαν δύο προσεγγίσεις που περιγράφουν τις διαφορετικές δυνατότητες για τη σύνθεση νανοδομών. Αυτές οι προσεγγίσεις παραγωγής αντιστοιχούν σε δύο κατηγορίες: από πάνω προς τα κάτω (top-down) και από κάτω προς τα πάνω (bottom-up), οι οποίες διαφέρουν ως προς τους βαθμούς ποιότητας, ταχύτητας και κόστους.

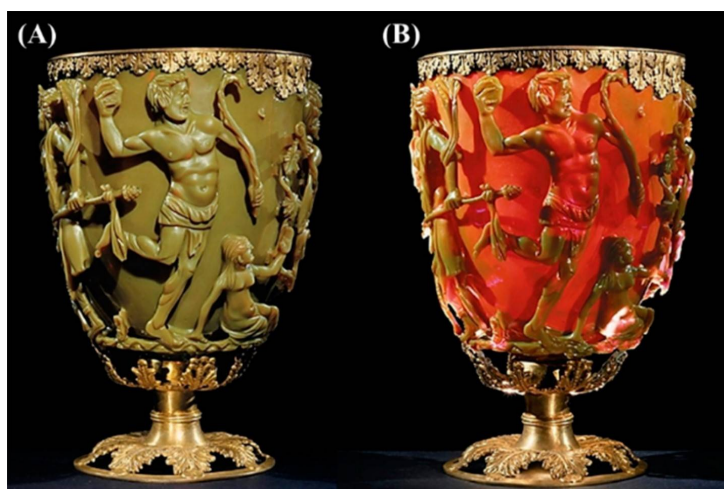
Η προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω είναι ουσιαστικά η διάσπαση του υλικού για να ληφθούν σωματίδια νανομεγέθους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση προηγμένων τεχνικών όπως η μηχανική ακριβείας και η λιθογραφία που έχουν αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί από τη βιομηχανία τις τελευταίες δεκαετίες. Η μηχανική ακριβείας υποστηρίζει την πλειοψηφία της βιομηχανίας μικροηλεκτρονικών κατά τη διάρκεια ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας και η υψηλή απόδοση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός συνδυασμού βελτιώσεων. Αυτά περιλαμβάνουν τη χρήση προηγμένης νανοδομής βασισμένης σε αδάμαντα ή κυβικό νιτρίδιο του βορίου και αισθητήρων για έλεγχο μεγέθους, σε συνδυασμό με αριθμητικό έλεγχο και προηγμένες τεχνολογίες μηχανισμού μετάδοσης κίνησης (servo-drive). Η λιθογραφία περιλαμβάνει τη διαμόρφωση μιας επιφάνειας μέσω της έκθεσης φωτός, ιόντων ή ηλεκτρονίων και την εναπόθεση υλικού σε αυτήν την επιφάνεια για να παραχθεί το επιθυμητό υλικό.

Η προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω αναφέρεται στη δημιουργία νανοδομών από κάτω. Συγκεκριμένα άτομο προς άτομο ή μόριο προς μόριο με φυσικές και χημικές μεθόδους που βρίσκονται σε εύρος νανοκλίμακας (1 nm έως 100 nm) χρησιμοποιώντας ελεγχόμενο χειρισμό της αυτοσυναρμολόγησης ατόμων και μορίων. Η χημική σύνθεση είναι μία μέθοδος παραγωγής ακατέργαστων υλικών. Η αυτοσυναρμολόγηση είναι μια προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω στην οποία τα άτομα ή τα μόρια οργανώνονται σε διατεταγμένες νανοδομές μέσω χημικών και φυσικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Επιπλέον είναι η μόνη τεχνική στην οποία μεμονωμένα άτομα, μόρια ή συμπλέγματα μορίων μπορούν να τοποθετηθούν ελεύθερα ένα προς ένα.

Το 1986, ο K. Eric Drexler δημοσίευσε το πρώτο βιβλίο για τη νανοτεχνολογία «Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology», το οποίο οδήγησε στο να γίνει πιο δημοφιλής η θεωρία της μοριακής μηχανικής. Ο Drexler περιέγραψε τη δημιουργία πολύπλοκων μηχανών από μεμονωμένα άτομα, τα οποία μπορούν ανεξάρτητα να χειριστούν μόρια και άτομα και να παραχθούν αυτοσυναρμολογούμενες νανοδομές. Αργότερα, το 1991, οι Drexler, Peterson και Pergamit δημοσίευσαν ένα άλλο βιβλίο με τίτλο “Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution”, στο οποίο χρησιμοποίησαν τους όρους «nanobots» ή «assemblers» για νανοδιεργασίες σε εφαρμογές ιατρικής και στη έπειτα έγινε για πρώτη φορά η χρήση του περίφημου όρος «nanomedicine».

Νανოსωματίδια και νανοδομές έχουν χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο τον τέταρτο αιώνα μ.Χ., από τους Ρωμαίους, γεγονός που απέδειξε ένα από τα πιο ενδιαφέροντα παραδείγματα χρήσης νανοτεχνολογίας στον αρχαίο κόσμο. Το κύπελλο του Λυκούργου, από τη συλλογή του Βρετανικού Μουσείου, που παρουσιάζεται στην εικόνα 1 αντιπροσωπεύει ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα στην αρχαία βιομηχανία γυαλιού, το οποίο είναι το παλαιότερο διάσημο δείγμα δίχρωμου γυαλιού. Το δίχρωμο γυαλί περιγράφει δύο διαφορετικούς τύπους γυαλιού, όπου παρουσιάζει αλλαγή χρώματος σε ορισμένες συνθήκες φωτισμού. Αυτό σημαίνει ότι το Κύπελλο έχει δύο διαφορετικά χρώματα.

Το γυαλί φαίνεται πράσινο στο άμεσο φως και κόκκινο-μοβ όταν το φως διαπερνά το ποτήρι.



Σχήμα 1: Το κύπελλο του Λυκούργου. Το γυαλί εμφανίζεται πράσινο στο ανακλώμενο φως (A) και κόκκινο-μοβ στο εκπεμπόμενο φως (B).[2]

Το 1990, οι επιστήμονες ανέλυσαν το κύπελλο με την χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης (Transmission Electron Microscopy-TEM) για να εξηγήσουν το φαινόμενο της διχρωμίας. Η παρατηρούμενη διχρωμία οφείλεται στην παρουσία νανοσωματιδίων διαμέτρου 50 έως 100 νανομέτρων. Η ανάλυση ακτίνων X (X-ray analysis) έδειξε ότι τα νανοσωματίδια αποτελούνται από κράμα αργύρου (Ag) - χρυσού (Au) με αναλογία 7 προς 3, που περιέχει επιπλέον περίπου 10% χαλκό (Cu) διασκορπισμένο σε μια γυάλινη μήτρα (glass matrix). Τα νανοσωματίδια χρυσού παράγουν κόκκινο χρώμα ως αποτέλεσμα της απορρόφησης φωτός (το μήκος κύματος είναι περίπου ίσο με 520 νανόμετρα). Το κόκκινο-μοβ χρώμα οφείλεται στην απορρόφηση από τα μεγαλύτερα σωματίδια ενώ το πράσινο χρώμα αποδίδεται στη σκέδαση του φωτός από κolloειδείς διασπορές νανοσωματιδίων αργύρου με μέγεθος μεγαλύτερο των 40 νανομέτρων. Το κύπελλο του Λυκούργου αναγνωρίζεται ως ένα από τα παλαιότερα συνθετικά νανοϋλικά. Ένα παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται στα παράθυρα των εκκλησιών του ύστερου μεσαίωνα, εκπέμποντας ένα φωτεινό κόκκινο και κίτρινο χρώμα λόγω της σύντηξης νανοσωματιδίων χρυσού και αργύρου στο γυαλί.

Στο διάστημα 9ου έως 17ου αιώνα λαμπερά, αστραφτερά και γυαλισμένα κεραμικά που χρησιμοποιούνταν στον Ισλαμικό κόσμο και αργότερα στην Ευρώπη εμπεριείχαν άργυρο ή χαλκό ή άλλα νανοσωματίδια. Οι Ιταλοί επίσης χρησιμοποίησαν νανοσωματίδια για την δημιουργία αγγείων την περίοδο της Αναγέννησης κατά την διάρκεια του 16ου αιώνα, καθώς επηρεάστηκαν από τις Οθωμανικές τεχνικές που επικρατούσαν τον 13ο έως 18ο αιώνα για να παράξουν λεπίδες σπαθιού της Δαμασκού στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν νανοσύρματα (nanowires) από τσιμέντο και νανοσωλήνες (nanotubes) άνθρακα για την παροχή αντοχής, ελαστικότητας και ικανότητας να συγκρατούν μια αιχμηρή άκρη. Αυτά τα χρώματα και οι ιδιότητες του υλικού παράγονταν σκόπιμα για εκατοντάδες χρόνια. Οι δημιουργοί του μεσαίωνα, ωστόσο, δεν γνώριζαν την αιτία αυτών των εκπληκτικών φαινομένων.

Το 1857, ο Michael Faraday μελέτησε την παρασκευή και τις ιδιότητες των κolloειδών εναιωρημάτων του χρυσού «Ruby». Οι μοναδικές οπτικές και ηλεκτρονικές τους ιδιότητες τα καθιστούν μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα νανοσωματίδια. Ο Faraday έδειξε πώς τα νανοσωματίδια χρυσού παράγουν διαλύματα διαφορετικού χρώματος υπό ορισμένες συνθήκες φωτισμού.[2]

1.1.2 Νανοϋλικά & Νανοδομές

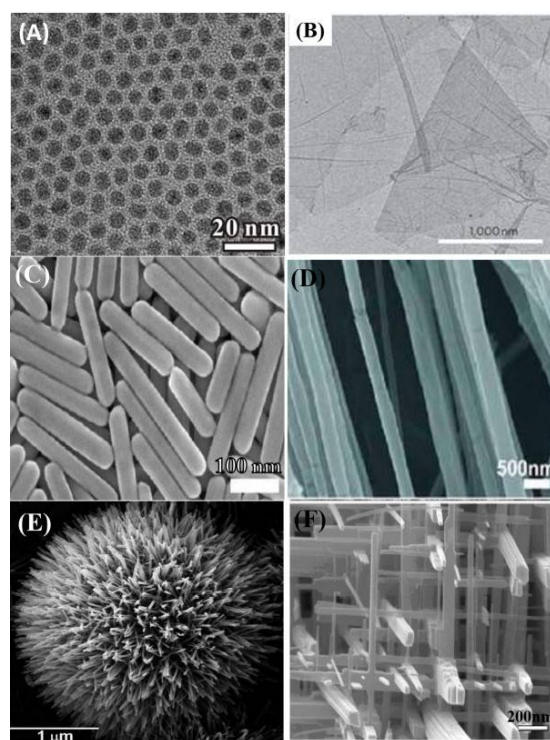
Σήμερα η πλειονότητα νανοσωματιδίων και νανοδομών που υπάρχουν μπορούν να οργανωθούν σε τέσσερις κατηγορίες σύμφωνα με το υλικό από το οποίο αποτελούνται.

Η πρώτη κατηγορία είναι τα νανοϋλικά βασισμένα στον άνθρακα. Γενικά, αυτά τα νανοϋλικά περιέχουν άνθρακα και βρίσκονται σε μορφολογίες όπως κοίλοι σωλήνες, ελλειψοειδή ή σφαίρες. Τα φουλερένια C_{60} , οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), οι νανοίνες άνθρακα, η αιθάλη (μαύρος άνθρακας), το γραφένιο και τα κρεμμύδια άνθρακα (carbon onions) συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία νανοϋλικών με βάση τον άνθρακα. Η αφαίρεση με λέιζερ (laser ablation), η εκφόρτιση τόξου (arc discharge) και η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) είναι οι σημαντικότερες μέθοδοι παραγωγής για την κατασκευή αυτών των υλικών με βάση τον άνθρακα (εκτός από την αιθάλη).

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα νανοϋλικά βασισμένα στα ανόργανα. Τα νανοϋλικά αυτά συμπεριλαμβάνουν μέταλλα και οξείδια μετάλλων νανοσωματιδίων και νανοδομών. Αυτά τα νανοϋλικά μπορούν να συντεθούν σε μέταλλα όπως νανοσωματίδια χρυσού ή αργύρου, οξείδια μετάλλων όπως νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) και οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) και ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο και τα κεραμικά.

Η τρίτη κατηγορία είναι τα νανοϋλικά βασισμένα στα οργανικά. Συμπεριλαμβάνουν νανοϋλικά τα οποία παρασκευάζονται κυρίως από ανόργανη ύλη, εξαιρουμένων των νανοϋλικών βασισμένων στον άνθρακα και στα ανόργανα. Η χρήση μη ομοιοπολικών (ασθενών) αλληλεπιδράσεων για την αυτοσυναρμολόγηση και το σχεδιασμό των μορίων βοηθά στο μετασχηματισμό των οργανικών νανοϋλικών σε επιθυμητές δομές όπως δενδριμερή, μικκύλια, λιπώματα και πολυμερή νανοσωματιδίων.

Η τέταρτη και τελευταία κατηγορία είναι τα σύνθετα νανοϋλικά. Τα σύνθετα νανοϋλικά είναι πολυφασικά νανοσωματίδια και νανοδομές με μία φάση στη διάσταση νανοκλίμακας που μπορούν είτε να συνδυάσουν νανοσωματίδια με άλλα νανοσωματίδια είτε να συνδιάσουν νανοσωματίδια με μεγαλύτερα ή με υλικά τύπου bulk (όπως υβριδικές νανοίνες) ή πιο περίπλοκες κατασκευές, όπως μεταλλο-οργανικά πλαίσια. Τα σύνθετα υλικά μπορεί να είναι οποιοδήποτε συνδυασμοί νανοϋλικών βασισμένα στον άνθρακα, μέταλλο ή οργανική βάση με οποιαδήποτε μορφή μεταλλικών, κεραμικών ή πολυμερών bulk υλικών. Τα νανοϋλικά συντίθενται σε διαφορετικές μορφολογίες (βλ. εικόνα 2) ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες για την επιθυμητή εφαρμογή.[3]



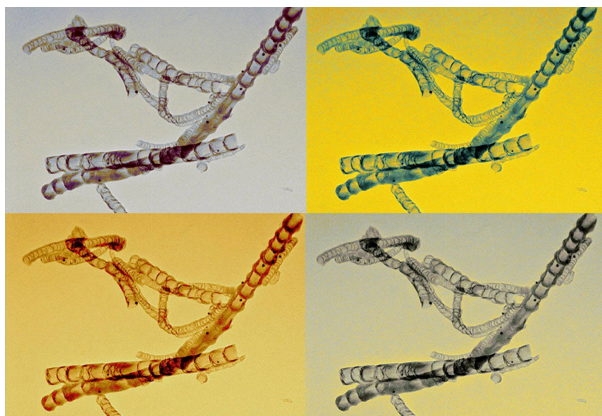
Σχήμα 2: Νανοϋλικά με διαφορετικές μορφολογίες. (A) Μη πορώδη Pd Νανοσωματίδια, (B) Νανοφύλλα γραφενίου, (C) νανοράβδοι Ag, (D) Νανοίνες οξειδίου πολυαιθυλενίου, (E) Νανοσφύρατα ZnO που μοιάζουν με αχινό, (F) Δίκτυο νανοσύρματος WO_3 . [3]

1.1.3 Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας

Η νανοτεχνολογία έχει συμβάλει σημαντικά στην πρόοδο και την εξέλιξη των υπολογιστών και των ηλεκτρονικών καθώς οδηγεί στην ανάπτυξη ταχύτερων, μικρότερων και φορητών συστημάτων τα οποία είναι ικανά να διαχειριστούν και να αποθηκεύσουν όλο και μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας. Αυτές οι συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογίες συμπεριλαμβάνουν πληθώρα εφαρμογών. Αρχικά τα τρανζίστορς, τα οποία χρησιμοποιούνται ως διακόπτες στους σύγχρονους υπολογιστές και η νανοτεχνολογία έχει βοηθήσει σημαντικά στην μείωση του μεγέθους του. Στις αρχές του 21ου αιώνα ένα τυπικό τρανζίστορ είχε μέγεθος 130 έως 250 νανομέτρα, ενώ το 2014 η Intel δημιούργησε το πρώτο τρανζίστορ μεγέθους 14 νανομέτρων, στην συνέχεια το 2015 η IBM δημιούργησε το πρώτο τρανζίστορ 7 νανομέτρων και το 2016 το Lawrence Berkeley National Lab παρουσίασε ένα τρανζίστορ με διάσταση ενός μόλις νανομέτρου. Τα μικρότερα, ταχύτερα και καλύτερα τρανζίστορ πιθανότατα δηλώνουν ότι σύντομα ολόκληρη η μνήμη ενός υπολογιστή θα μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα μικροσκοπικό τσιπ. Ακόμη, με τη χρήση μαγνητικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (MRAM) οι υπολογιστές θα έχουν δυνατότητα άμεσης εκκίνησης. Η MRAM ενεργοποιείται από μαγνητικές επαφές σήραγγας (magnetic tunnel junction) οι οποίες έχουν διαστάσεις νανομέτρων και είναι ικανή γρήγορα και αποτελεσματικά να αποθηκεύσει κατά την διάρκεια απενεργοποίησης του συστήματος ή να συνεχίσει την λειτουργία συνέχισης αναπαραγωγής. Επιπρόσθετα, τηλεοράσεις εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας, που πωλούνται στην αγορά, χρησιμοποιούν χβαντικές τελείες για την παραγωγή πιο ζωντανών χρωμάτων και παράλληλα είναι πιο αποδοτικές ενεργειακά. Πληθώρα εύκαμπτων, φορητών και ευέλικτων ηλεκτρονικών συσκευών έχουν αναπτυχθεί με την συμβολή της νανοτεχνολογίας, όπως η χρήση ημιαγώγιμων νανομεμβρανών σε οθόνες έξυπνων κινητών τηλεφώνων.

Η χρήση της νανοτεχνολογίας διευρύνει διαρκώς τις γνώσεις για την κατασκευή νέων ιατρικών εργαλείων και θεραπειών που είναι διαθέσιμες στους γιατρούς το τρέχων χρονικό διάστημα. Η νανοϊατρική, δηλαδή η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στον κλάδο της ιατρικής, βασίζεται στην φυσική κλίμακα των βιολογικών φαινομένων ώστε να προσφέρει ακριβές λύσεις για την πρόσληψη, την διάγνωση και την θεραπεία ασθενών. Εφαρμογές που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν προσαρμόσει νανοσωματίδια από χρυσό τα οποία λειτουργούν ως αισθητήρες για την ανίχνευση στοχευμένων αλληλουχιών νουκλεϊκών οξέων, ενώ παράλληλα τα νανοσωματίδια χρυσού αναπτύσσονται σε κλινικές εφαρμογές για πιθανή μελλοντική θεραπεία στον καρκίνο και άλλες ασθένειες. Η χρήση της νανοτεχνολογίας στην ιατρική επίσης συμβάλλει στην καλύτερη απεικόνιση και λήψη πιο έγκυρων αποτελεσμάτων μέσω των διαγνωστικών εργαλείων έτσι ώστε να επιλεγεί πιο εξατομικευμένη θεραπεία στον ασθενή και να υπάρξουν υψηλότερα ποσοστά ίασης. Ακόμη, χρησιμοποιείται τόσο για την διάγνωση όσο και για την θεραπεία της αθηροσκλήρωσης ή τη συσσώρευση πλάκας στις αρτηρίες. Οι ερευνητές κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα νανοσωματίδιο που μιμείται στην καλή χοληστερόλη του σώματος, γνωστή ως λιποπρωτεΐνη υψηλής πυκνότητας (HDL), η οποία βοηθάει στην συρρίκνωση της πλάκας. Επιπλέον, ο σχεδιασμός προηγμένων υλικών στερεάς κατάστασης με νανοπόρους είναι ικανός για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αλληλουχίας γονιδίων που επιτρέπουν την ανίχνευση ενός μορίου με χαμηλό κόστος και υψηλή ταχύτητα κατά την οποία χρειάζεται ελάχιστη προετοιμασία δειγμάτων και οργάνων. Πληθώρα ερευνητών εργάζονται πάνω σε μία σειρά θεραπευτικών μεθόδων όπου ένα νανοσωματίδιο μπορεί να προκληθεί από μία κάψουλα βοηθώντας στην μεταφορά φαρμάκου απευθείας στα καρκινικά κύτταρα και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος πρόκλησης μόνιμης βλάβης σε υγιή ιστό. Η θεραπευτική αντιμετώπιση του καρκίνου (βλ. εικόνα 3) θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει να αλλάξει ριζικά και να μειωθούν δραματικά οι τοξικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις συμβατικές χημειοθεραπείες. Η έρευνα χρήσης της νανοτεχνολογίας στην ιατρική καλύπτει πολλούς τομείς εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής των οστών και των νευρικών ιστών. Για παράδειγμα, νέα υλικά κατασκευάζονται ώστε να μιμηθούν την χρυσταλλική δομή ανθρώπινων οστών ή να χρησιμοποιηθούν ως ρητίνη αποκατάστασης στον κλάδο της οδοντιατρικής. Ταυτόχρονα αναζητούνται μέθοδοι για την ανάπτυξη πολύπλοκων ιστών με στόχο μία μέρα να αναπτυχθούν ανθρώπινα όργανα τα οποία θα είναι ικανά να μεταμοσχευθούν σε ασθενείς. Μελετώνται τρόποι για χρήση νανοδομικών γραφενίου για την αποκατάσταση τραυματισμών στον νωτιαίο μυελό, καθώς έρευνες δείχνουν ότι οι νευρώνες αναπτύσσονται επαρκώς στην

επιφάνεια αγωγίμου γραφενίου. Τέλος, η νανοϊατρική εξετάζει τρόπους βελτίωσης εμβολίων καθώς και την χορήγηση τους χωρίς την χρήση βελόνας.



Σχήμα 3: Νανοσωλήνες άνθρακα για τη θεραπεία του καρκίνου.[4]

Η νανοτεχνολογία βρίσκει εφαρμογή σε παραδοσιακές πηγές ενέργειας και ενισχύει σημαντικά τις εναλλακτικές προσεγγίσεις ενέργειας ώστε να εξυπηρετήσει την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών του κόσμου. Πολλοί επιστήμονες αναζητούν τρόπους για ανάπτυξη καθαρών, προσιτών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση κατανάλωσης ενέργειας και επιβαρύνσεων τοξικότητας στο περιβάλλον. Η απόδοση παραγωγής καυσίμου από πρώτες ύλες πετρελαίου βελτιώνεται κατά κόρον μέσω της καλύτερης κατάλυσης, καθώς επίσης επιτρέπει μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε οχήματα και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Εφαρμογή βρίσκει επίσης στην εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου μέσω χρήσης νανοτεχνολογίας σε βαλβίδες ανύψωσης αερίου στις υπεράκτιες εργασίες ή της χρήσης νανοσωματιδίων για την ανίχνευση μικροσκοπικών ρωγμών του πετρελαιαγωγού κάτω από το υπέδαφος. Πληθώρα ερευνών πραγματοποιούνται για την ανάπτυξη καλωδίων τα οποία περιέχουν νανοσωλήνες άνθρακα που θα έχουν πολύ χαμηλότερη αντίσταση από τα καλώδια υψηλής τάσης που χρησιμοποιούνται σήμερα στο ηλεκτρικό δίκτυο, μειώνοντας έτσι την απώλεια ισχύος μετάδοσης. Πολλά υποσχόμενη φαίνεται να είναι η νανοτεχνολογία στην ενσωμάτωση της σε ηλιακά πάνελ για την μετατροπή ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια πιο αποτελεσματικά και με σημαντικά μικρότερο κόστος. Νανοδομημένες ηλιακές κυψελίδες είναι οικονομικότερες στην κατασκευή και ευκολότερες στην εγκατάσταση, καθώς είναι δυνατή η χρήση διαδικασιών εκτύπωσης για την κατασκευή τους και η τοποθέτησή τους ακόμα και σε εύκαμπτα πάνελ. Ήδη είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση της στην ανάπτυξη πολλών νέων ειδών μπαταριών που είναι ταχύτερης φόρτισης, πιο αποτελεσματικής, μικρότερου βάρους, μεγαλύτερης πυκνότητας ισχύος και διατήρησης της ηλεκτρικής φόρτισης περισσότερο. Τα προϊόντα ενεργειακής απόδοσης και εξοικονόμησης αυξάνονται τόσο σε αριθμό όσο και σε ποικιλία εφαρμογών. Εκτός από αυτά που σημειώθηκαν παραπάνω, η νανοτεχνολογία επιτρέπει πιο αποτελεσματικά συστήματα φωτισμού, ελαφρύτερα και ισχυρότερα υλικά στον τομέα της μεταφοράς, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε προηγμένα ηλεκτρονικά, και έξυπνες επικαλύψεις για επιφάνειες οι οποίες απορροφούν το φως.

Εκτός από τους τρόπους με τους οποίους η νανοτεχνολογία μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, υπάρχουν επίσης πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να συνεισφέρει στην ανίχνευση και τον καθαρισμό περιβαλλοντικών ρύπων. Δυνατή είναι η συμβολή της ώστε να καλυφθούν ταχύτατα οι ανάγκες των ανθρώπων σε πρόσβαση πόσιμου νερού με πολύ χαμηλό κόστος ανίχνευσης και καταπολέμησης ρύπων μέσα στο νερό. Οι μηχανικοί έχουν αναπτύξει ένα φιλμ λεπτής μεμβράνης με νανοπόρους για ενεργειακά αποδοτική αφαλάτωση. Αυτή η μεμβράνη διθειφιδίου του μολυβδαινίου (MoS_2) φιλτράρει δύο έως πέντε φορές περισσότερο νερό από τα σημερινά συμβατικά φίλτρα. Νανοσωματίδια αναπτύσσονται για τον καθαρισμό των βιομηχανικών ρύπων του νερού στα υπόγεια ύδατα μέσω χημικών αντιδράσεων και καθιστούν τους ρύπους αβλαβείς. Αυτή η διαδικασία θα κοστίσει λιγότερο από συμβατικές μεθόδους που απαιτούν την άντληση του νερού

από το έδαφος και σε επόμενο στάδιο την επεξεργασία του. Συνάμα επιστήμονες ανέπτυξαν μία χαρτοπετσέτα που αποτελείται από νανοΐνες και είναι υφασμένη από μικροσκοπικά σύρματα οξειδίου μαγνητικού καλίου και μπορεί να απορροφήσει 20 φορές το βάρος της σε λάδι και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές καθαρισμού. Ζωτικής σημασίας για την υδρόβια ζωή αποτελεί η τοποθέτηση μαγνητικών νανოსωματιδίων τα οποία είναι ανθεκτικά στο νερό και χρησιμοποιούνται στην αφαίρεση και τον καθαρισμό των θαλασσών από πετρελαιοκηλίδες. Πολλές καμπίνες αεροπλάνων και άλλων τύπων φίλτρων αέρα είναι φίλτρα βασισμένα σε νανοτεχνολογία, τα οποία επιτρέπουν την μηχανική διήθηση στην οποία το υλικό ινών δημιουργεί πόρους νανοκλίμακας που παγιδεύουν σωματίδια μεγαλύτερα από το μέγεθος των πόρων και ταυτόχρονα τα φίλτρα αυτά μπορούν να περιέχουν στρώματα άνθρακα που αφαιρούν τις οσμές. Οι αισθητήρες βασισμένοι στην νανοτεχνολογία είναι πλέον σε θέση να ανιχνεύσουν και να αναγνωρίσουν χημικές ή βιολογικές ουσίες στον αέρα και το έδαφος με πολύ υψηλότερη ευαισθησία συγκριτικά με το παρελθόν. Ένας διαφορετικός τύπος αισθητήρα έχει αναπτυχθεί από τη NASA ως επέκταση ενός έξυπνου κινητού τηλεφώνου που μπορεί να χρησιμοποιήσει η πυροσβεστική για να ελέγξει την ποιότητα του αέρα γύρω από τις πυρκαγιές.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε ότι υπάρχει πληθώρα εφαρμογών της νανοτεχνολογίας σε πολλούς τομείς και καθημερινά ανακαλύπτονται νέες, ενώ με την χρήση της βελτιώνονται οι ήδη υπάρχουσες.[5]

1.2 Οξείδιο του Ψευδαργύρου (ZnO)

Το οξείδιο του ψευδαργύρου για πρώτη φορά μελετήθηκε το 1912. Με την έναρξη της εποχής των ημιαγωγών μετά την ανακάλυψη του τρανζίστορ, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές έρευνες του ZnO ως ημιαγωγικό υλικό. Το 1960 ανακαλύφθηκαν οι καλές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του οξειδίου του ψευδαργύρου, οι οποίες οδήγησαν στην πρώτη ηλεκτρονική εφαρμογή του ως λεπτό υμένιο σε διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (Surface Acoustic Waves Devices).

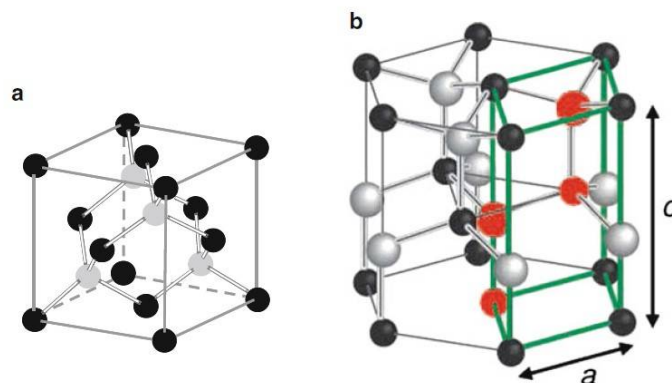
Επί του παρόντος, η έρευνα για το ZnO ως ημιαγωγικό υλικό αναπτύσσεται ραγδαία ύστερα από τις έντονες ερευνητικές περιόδους στις δεκαετίες του 1950 και του 1970. Από το 1990 περίπου, σημειώθηκε τεράστια αύξηση του αριθμού των δημοσιεύσεων για το ZnO. Το ανανεωμένο ενδιαφέρον για το ZnO ως οπτοηλεκτρονικό υλικό έχει πυροδοτηθεί από αναφορές σχετικά με την αγωγιμότητα τύπου p, ορισμένες ασθενείς σιδηρομαγνητικές ιδιότητες, τα τρανζίστορ λεπτών υμενίων οξειδίων και τη σημαντική πρόοδο στον τομέα κατασκευής νανοδομών.[6]

Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) είναι μία ημιαγωγική ένωση μεταξύ των στοιχείων του ψευδαργύρου ($_{30}\text{Zn}$) της ομάδας IIB και του οξυγόνου ($_{8}\text{O}$) της ομάδας VIA. Ο ψευδαργύρος (Zn) έχει πέντε σταθερά ισότοπα, με τα επικρατέστερα να είναι ο ^{64}Zn (με ποσοστό 48,89%), ^{66}Zn (με ποσοστό 27,81%), και ^{68}Zn (με ποσοστό 18,57%), ενώ το οξυγόνο αποτελείται σχεδόν καθαρά από το ισότοπο ^{16}O (με ποσοστό 99,76%). Η ηλεκτρονική διαμόρφωση του ψευδαργύρου είναι $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^2$ και του οξυγόνου είναι $(1s)^2(2s)^2(2p)^4$. Οι δεσμοί του ZnO στο κρυσταλλικό πλέγμα περιλαμβάνουν έναν sp^3 υβριδισμό των ηλεκτρονιακών τροχιακών, ο οποίος οδηγεί σε τέσσερα ισάξια τροχιακά, τα οποία τοποθετούνται στον χώρο σε μία τετραεδρική δομή. Στον ημιαγωγικό κρύσταλλο που προκύπτει, τα δεσμικά sp^3 τροχιακά αποτελούν τη ζώνη σθένους ενώ η ζώνη αγωγιμότητας αποτελείται από τα αντιδεσμικά τροχιακά. Το ενεργειακό διάκενο (energy gap) το οποίο προκύπτει ισούται με 3,4 eV, δηλαδή μέσα στο φασματικό εύρος UV, γεγονός που προκαλεί έντονο ενδιαφέρον για την χρήση του ZnO ως υλικό για διαφανή ηλεκτρονικά. Η συνδετική ενέργεια (cohesive energy) είναι αρκετά υψηλή, της τάξης των 7,52 eV, το οποίο σημαίνει ότι προσδίδει αρκετά υψηλή θερμική σταθερότητα, καθώς η θερμοκρασία τήξης του ισούται με $T_m = 2242\text{K}$.[7]

1.2.1 Κρυσταλλογραφική Δομή του ZnO

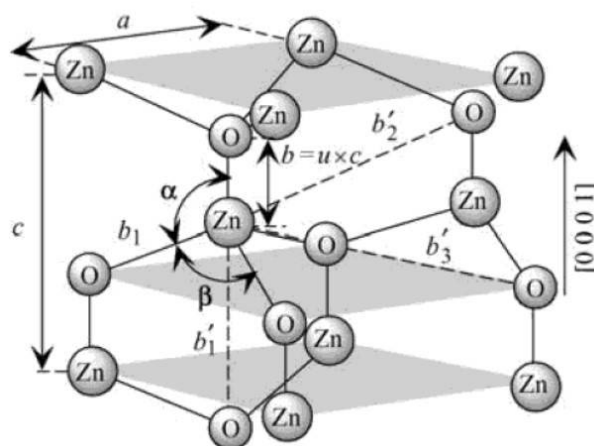
Η τετραεδρική γεωμετρία των τροχιακών καθορίζει την κρυσταλλική δομή του ZnO. Κάθε κατιόν ψευδαργύρου (Zn^{2+}) είναι συνδεδεμένο με τέσσερα ανιόντα οξυγόνου (O^{2-}) σε τετραεδρική δομή (τοποθετημένα στις κορυφές ενός τετραέδρου) και το αντίστροφο. Η γεωμετρική διάταξη αυτή

είναι γνωστή για τα στοιχεία της ομάδας IV (αδάμας, πυρίτιο και γερμάνιο) και για τις ενώσεις των ομάδων II-VI και III-V. Χαρακτηρίζεται ως ομοιοπολικός δεσμός, παρά το γεγονός ότι οι δεσμοί ενδεχομένως παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό πόλωσης όταν εμπλακούν ιόντα διαφορετικής ηλεκτραρνητικότητας. Η τετραεδρική γεωμετρία παρουσιάζει χαμηλή πλήρωση χώρου και ουσιαστικά σταθεροποιείται από την γωνιακή ακαμψία των sp^3 υβριδικών τροχιακών. Στην περίπτωση του ZnO, στο κρυσταλλικό πλέγμα τα γειτονικά τετράεδρα σχηματίζουν εναλλασσόμενα επίπεδα, όπου κάθε ένα αποτελείται από ένα επίπεδο ψευδαργύρου και ένα επίπεδο οξυγόνου. Αυτή η διάταξη τετραέδρων μπορεί να οδηγήσει είτε σε μία κυβική δομή σφαλερίτη (τύπου zinc-blende) ή σε μία εξαγωνική δομή βουρτσίτη (τύπου wurtzite) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4, ανάλογα με τη αλληλουχία των εναλλασσόμενων επιπέδων.



Σχήμα 4: (α) Κυβική κρυσταλλική δομή σφαλερίτη (zinc-blende), (β) Εξαγωνική κρυσταλλική δομή βουρτσίτη (wurtzite).[7]

Η φυσική κρυσταλλική δομή του ZnO είναι η εξαγωνική δομή του βουρτσίτη, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 5.



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση της εξαγωνικής δομής του βουρτσίτη. Στο Σχήμα φαίνονται οι πλεγματικές σταθερές a και c , όπου a το μήκος της πλευράς του εξαγώνου (επίπεδο $x-y$) και c το ύψος του εξαγωνικού πρίσματος (διεύθυνση $[0001]$ παράλληλη στον άξονα z) καθώς και ο εσωτερικός παράγοντας u , ο οποίος εκφράζεται ως το μήκος του δεσμού (b) διαιρεμένο από την πλεγματική σταθερά c . Οι γωνίες ανάμεσα στους δεσμούς, α και β ($109,47$ μοίρες για ιδανικό κρύσταλλο) και τρεις δευτερεύουσες διευθύνσεις b'_1 , b'_2 και b'_3 .[8]

Σε μια ιδανική δομή βουρτσίτη, στην οποία όλα τα άτομα βρίσκονται στο μέσο κανονικών τετραέδρων που σχηματίζονται από τέσσερα γειτονικά τους άτομα έχουμε $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1,633$ και

$u = \frac{8}{3} = 0,375$. Στους περισσότερους κρυστάλλους με δομή βουρτσιτή η τετραεδρική διάταξη υστερεί κεντρικής συμμετρίας. Επομένως και στον κρύσταλλο ZnO η τετραεδρική διάταξη των ιόντων Zn^{2+} και O^{2-} αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ο λόγος $\frac{c}{a}$ και ο u να αποκλίνουν από τις ιδανικές τιμές. Στην απόκλιση από τις ιδανικές τιμές συμβάλλουν και άλλοι παράγοντες όπως είναι η χημική σύσταση του κρυστάλλου, η στοιχειομετρία, η παρουσία ξένων ατόμων και κρυσταλλικών ατελειών καθώς και η εξωτερική πίεση και η θερμοκρασία. Όταν ο λόγος $\frac{c}{a}$ μειώνεται τότε ο εσωτερικός παράγοντας u αυξάνεται εξαιτίας της της μεταβολής των γωνιών του τετραέδρου έτσι ώστε οι αποστάσεις των ατόμων στο τετραέδρο να παραμένουν σχεδόν σταθερές. Αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση δύο αποστάσεων μεταξύ των εγγύτερων γειτονικών ατόμων. Τα δύο αυτά ελαφρώς διαφορετικά μήκη δεσμών θα είναι ίσα εφόσον ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$u = \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{a^2}{c^2}\right) + \frac{1}{4}$$

Τα μήκη των δεσμών των εγγύτερων γειτονικών ατόμων κατά μήκος του άξονα c (b) αλλά και εκτός αυτού (b_1) μπορούν υπολογιστούν από τις εξής σχέσεις:

$$b = cu \quad \& \quad b_1 = \sqrt{\frac{1}{3}a^2 + \left(\frac{1}{2} - u\right)^2 c^2}$$

Αντίστοιχα, τα μήκη των δεσμών των δεύτερων εγγύτερων γειτονικών ατόμων τα οποία ορίζονται ως b_1' (ένας δεσμός κατά μήκος του άξονα, b_2' (6 δεσμοί) και b_3' (3 δεσμοί) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$b_1' = c(1 - u), \quad b_2' = \sqrt{a^2 + (uc)^2} \quad \& \quad b_3' = \sqrt{\frac{4}{3}a^2 + c^2 \left(\frac{1}{2} - u\right)^2}$$

Τέλος, οι γωνίες, α και β , του τετραέδρου δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \pi/2 + \arccos \left[\left(\sqrt{1 + 3(c/a)^2(-u + 1/2)^2} \right)^{-1} \right]$$

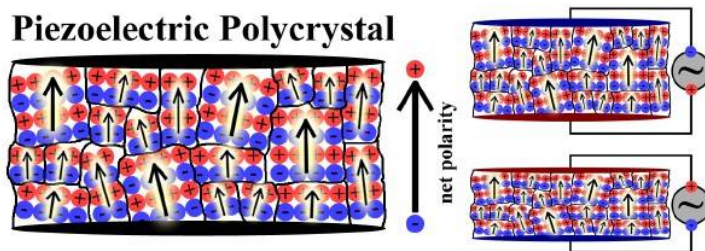
$$\beta = 2\arcsin \left[\left(\sqrt{4/3 + 4(c/a)^2(-u + 1/2)^2} \right)^{-1} \right]$$

Η μέτρηση των παραπάνω πλεγματικών παραμέτρων πραγματοποιείται με την τεχνική περίθλασης ακτίνων-X (X - ray Diffraction), που αποτελεί και τον πιο αξιόπιστο τρόπο προσδιορισμού αυτών, μέσω της χρήσης του νόμου Bragg.[8]

1.2.2 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

Το 1880 οι Pierre και Paul-Jacques Curie ανακάλυψαν ότι με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης σε μονοκρυστάλλους ορισμένων υλικών, όπως ο χαλαζίας, δημιουργείται ένα επιφανειακό φορτίο στους κρυστάλλους. Το παραγόμενο φορτίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης που ασκείται στο υλικό. Ως αποτέλεσμα, οι κρύσταλλοι που εμφανίζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι) μπορούν να συμπεριφερθούν ως αισθητήρες. Ένα χρόνο αργότερα, τα αδέρφια Curie ανακάλυψαν το αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή ότι με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης συνεπάγεται μηχανική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος. Με αυτό τον τρόπο, οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι μπορούν επίσης να παρουσιάσουν συμπεριφορά ενεργοποιητή (actuator).

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται μόνο σε ανισοτροπικά κρυσταλλικά υλικά. Αν η βασική κυψελίδα ενός κρυστάλλου είναι συμμετρική τότε η καθαρή κατανομή φορτίων (πόλωση) της κυψελίδας αυτής θα είναι μηδέν. Ωστόσο οι βασικές κυψελίδες ενός κρυστάλλου παρουσιάζουν μία καθαρή πόλωση. Σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό, ο τυχαίος προσανατολισμός των μεμονωμένων κόκκων τείνει να ακυρώνει τα διανύσματα πόλωσης που συνεισφέρει κάθε κόκκος. Παρά το γεγονός αυτό, ένας πολυκρύσταλλος μπορεί να εμφανίσει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μέσω της θέρμανσης του υλικού και παράλληλης έκθεσης του σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Με την εφαρμογή υψηλής θερμοκρασίας και την ταυτόχρονη διάχυση της στο εσωτερικό του υλικού τα μόρια θα επαναπροσανατολιστούν σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Ως αποτέλεσμα έχει ένα υλικό στο οποίο όλοι οι κόκκοι του να έχουν διανύσματα πόλωσης σε μία κατεύθυνση σχεδόν ίδια, παράγοντας μία συνολική πόλωση στο υλικό.



Σχήμα 6: (Αριστερά) Επίδειξη της καθαρής πόλωσης ενός πιεζοηλεκτρικού πολύ-κρυστάλλου ως άθροισμα της πόλωσης μεμονωμένων κρυσταλλίτων. Αυτή η πόλωση θα μεγιστοποιηθεί στην περίπτωση μονο-κρυσταλλικού υποστρώματος (δεξιά). Επίδειξη της απόκρισης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού κατά την εφαρμογή εξωτερικής τάσης κατά τη διεύθυνση της πόλωσης. Μια τάση όμοιας πολικότητας θα εξαναγκάσει το υλικό να συσταλεί ενώ μια τάση αντίθετης πολικότητας θα εξαναγκάσει το υλικό να διασταλεί. [9]

Η εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης (ηλεκτρικής ή μηχανικής) έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση των διπόλων στο εσωτερικό της βασικής κυψελίδας. Η κατανομή του φορτίου είναι ομοιόμορφη στο υλικό όταν δεν έχει εφαρμοστεί κάποια εξωτερική δύναμη. Αντίθετα, όταν πραγματοποιείται εφαρμογή εξωτερικής δύναμης, αυτή η κίνηση των διπόλων συνεπάγεται τον διαχωρισμό του φορτίου στο υλικό (βλ. εικόνα 6). Ο διαχωρισμός φορτίου οδηγεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο δρα για να επαναφέρει τα φορτία σε προηγούμενη κατάσταση ομοιόμορφης κατανομής φορτίου (κατάσταση ισορροπίας). Ως συνέπεια, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι χρήσιμα σε αισθητήρες δυναμικών καταπονήσεων.

Η εφαρμογή τάσης στο υλικό έχει ως αποτέλεσμα τα φορτία στο εσωτερικό του να κινούνται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κατάσταση ισορροπίας με μηδενικό εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο και όλο το φορτίο να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια. Τα φορτία στην επιφάνεια εξυπηρετούν τον τερματισμό των γραμμών ηλεκτρικού πεδίου που εισέρχονται κάθετα στην επιφάνεια του υλικού λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης. Σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, τα δίπολα μέσα στο πλέγμα είτε διαστέλλονται είτε συστέλλονται για την παραγωγή απαραίτητης κατανομής φορτίου δημιουργώντας μια τάση εφελκυσμού ή θλίψης αντίστοιχα μέσα στο πλέγμα.

Εξαιτίας της εμφάνισης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μόνο σε πλέγματα ανισοτροπικών κρυστάλλων, επακόλουθο είναι οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού αυτού είναι επίσης ανισοτροπικές. Γι' αυτό τον λόγο πρέπει να ληφθεί υπόψη η τομή και ο προσανατολισμός του πιεζοηλεκτρικού υλικού κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας διάταξης.[9]

1.2.2.1 Διέπουσες Εξισώσεις του Πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στην κατανόηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

1. Μηχανική παραμόρφωση (Mechanical Strain) ϵ : Η μηχανική παραμόρφωση που προκύπτει από την εφαρμογή της τάσης (stress) σ είναι γραμμικά ανάλογη με τη συμμόρφωση (compliance) S (όπου $S^{-1} = E_y = \text{μέτρο Young}$ ή μέτρο ελαστικότητας) στην περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης του υλικού (κάτω από την διαρροή αντοχής σ_S) και ισούται με $\epsilon = S\sigma$. Η παραμόρφωση είναι μία αδιάστατη ιδιότητα που περιγράφει τις αλλαγές στο μήκος ενός υλικού και ορίζεται ως το μήκος του υλικού όταν σε αυτό ασκείται τάση (stress) διαιρούμενο με το μήκος ισορροπίας (χωρίς εφαρμογή τάσης) του υλικού. Όταν είναι γνωστή η αντοχή διαρροής (yield strength) του υλικού είναι εφικτός ο προσδιορισμός της μέγιστης τάσης (stress) που μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό χωρίς αυτό να υποστεί μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση.
2. Ηλεκτρομηχανικός συντελεστής σύζευξης k : Ο ηλεκτρομηχανικός συντελεστής σύζευξης k περιγράφει την απόδοση της μεταγωγής του πιεζοηλεκτρικού υλικού μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας και αντίστροφα ισούται με

$$k = \sqrt{\frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electric energy applied}}} = \sqrt{\frac{\text{electrical energy stored}}{\text{mechanical energy applied}}}$$

Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης εκφράζεται συχνά και στην μορφή k^2 , το οποίο ισούται με το ποσοστό της ενέργειας που διατηρείται μετά τη μεταγωγή. Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της διάταξης θα πρέπει να επιλεγεί ένα υλικό με υψηλό συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης.

3. Σταθερά πιεζοηλεκτρικού φορτίου: Εξαιτίας της ανισοτροπικής φύσης των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι απαραίτητη η χρήση ταυιστή για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού όταν αυτό διέπεται από τάση και παραμόρφωση. Για λόγους απλότητας γίνεται χρήση βαθμωτών μεγεθών για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός μονοδιάστατου πιεζοηλεκτρικού υλικού. Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν την συμπεριφορά ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού.

$$P = d\sigma + \epsilon_\sigma E$$

$$\epsilon = dE + S^E \sigma$$

Το P είναι η πόλωση, δηλαδή η ηλεκτρική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού. Το d είναι η σταθερά του πιεζοηλεκτρικού φορτίου, το ϵ_σ είναι η διαπερατότητα του υλικού κάτω από σταθερή τάση (stress), E είναι το ηλεκτρικό πεδίο και S^E είναι η συμμόρφωση σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο.

Σύμφωνα με την εξίσωση $P = d\sigma + \epsilon_\sigma E$ προκύπτει ότι όταν το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν, η πόλωση είναι ανάλογη του σταθερού πιεζοηλεκτρικού φορτίου και της τάσης:

$$P = d\sigma$$

Επίσης από την εξίσωση $\epsilon = dE + S^E \sigma$ προκύπτει προκύπτει ότι όταν η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση είναι μηδέν, η παραμόρφωση είναι ανάλογη του σταθερού πιεζοηλεκτρικού φορτίου και της τάσης:

$$\epsilon = dE$$

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η σταθερά πιεζοηλεκτρικού φορτίου d χρησιμοποιείται τόσο για το ευθύ όσο και για το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η σταθερά του πιεζοηλεκτρικού φορτίου σχετίζεται με τον συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k με την ακόλουθη σχέση:

$$k = d^2 \sqrt{S^E \epsilon_\sigma}$$

Για μέγιστη απόδοση είναι επιθυμητή η επιλογή πιεζοηλεκτρικού υλικού με υψηλή σταθερά πιεζοηλεκτρικού φορτίου. Για μια δεδομένη σταθερά πιεζοηλεκτρικού φορτίου, μια μεγάλη συμμόρφωση (αναλογία παραμόρφωσης και τάσης) και μεγάλη διαπερατότητα (αναλογία μεταξύ αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας και εφαρμοζόμενης τάσης) θα αυξήσουν τον συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης.[9]

1.2.2.2 Πιεζοηλεκτρικές Διατάξεις

Αρκετές εφαρμογές του ZnO οφείλονται στις εξαιρετικές πιεζοηλεκτρικές του ιδιότητες. Παραδείγματα των εφαρμογών αυτών είναι διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) και πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Οι διατάξεις SAW χρησιμοποιούνται συνήθως ως βαθυπερατά (band pass) φίλτρα στον τομέα τηλεπικοινωνιών, κυρίως σε κινητά και σταθμούς βάσης. Αναπτυσσόμενο πεδίο για διατάξεις SAW είναι αισθητήρες σε εφαρμογές αυτοκινήτων (αισθητήρες στρεπτικής ροπής και πίεσης), ιατρικές εφαρμογές (χημικοί αισθητήρες) και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές (αισθητήρες ατμού, υγρασίας, θερμοκρασίας και μάζας). Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων ακουστικών κυμάτων είναι το χαμηλό κόστος, η ανθεκτικότητα και η υψηλή ευαισθησία. Μερικοί αισθητήρες μπορούν ακόμη και να ερωτηθούν ασύρματα, δηλαδή τέτοιοι αισθητήρες δεν απαιτούν τροφοδοσία.

Σε μια συσκευή SAW, μια μηχανική παραμόρφωση προκαλείται από τα ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα λεπτό στρώμα ZnO. Το οδεύον κύμα ταξιδεύει κατά μήκος της επιφάνειας του λεπτού στρώματος ZnO με την ταχύτητα του ήχου στο ZnO και ανιχνεύεται στο τέλος της διάταξης από μία άλλη μεταλλική επαφή ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρικά σήματα υψηλής συχνότητας (10 MHz–10 GHz) μπορούν να μετατραπούν σε SAW με τυπικές ταχύτητες κυμάτων περίπου 3 km/s. Λόγω της πολύ χαμηλότερης ακουστικής ταχύτητας, σε σύγκριση με την ταχύτητα του φωτός, τέτοιες συσκευές SAW μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως γραμμές ακουστικής καθυστέρησης.[6]

1.2.3 Μέθοδοι Ανάπτυξης Νανοδομών ZnO

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του οξειδίου του ψευδαργύρου το καθιστούν βιώσιμη και εξαιρετικά ελκυστική ένωση για χρήση σε μια ποικιλία εφαρμογών νανοτεχνολογίας. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνουν βιοϊατρική, ενέργεια, αισθητήρες και οπτική. Καθώς η έρευνα στις νανοδομές ZnO εξελίσσεται διαρκώς, έχει εμπνεύσει πληθώρα νέων καινοτόμων εφαρμογών. Συμπληρώνοντας τις μοναδικές χημικές του ιδιότητες, διαθέτει επίσης μια απλή τεχνολογία σύνθεσης και το κόστος κατασκευής του είναι σημαντικά χαμηλότερο συγκριτικά με άλλους ημιαγωγούς που χρησιμοποιούνται στη νανοτεχνολογία. Διάφορες διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για την σύνθεση νανοδομών ZnO υψηλής ποιότητας. Οι πέντε κύριοι μέθοδοι ανάπτυξης του ZnO που θα εξεταστούν περιλαμβάνουν τον μηχανισμό ατμού-υγρού-στερεού (vapor-liquid-solid), την φυσική εναπόθεση ατμών (physical vapor deposition), την χημική εναπόθεση ατμών (chemical vapor deposition), την χημική εναπόθεση οργανικών μεταλλικών ενώσεων (metal-organic chemical vapor deposition) και τέλος την υδροθερμική που βασίζεται στην υδάτινη χημική μέθοδο, η οποία ακολουθήθηκε και στην εν λόγω εργασία.

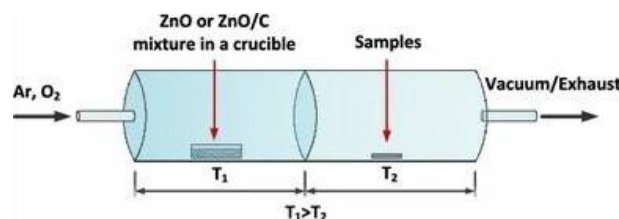
1.2.3.1 Μηχανισμός Ατμού-Υγρού-Στερεού (Vapour-Liquid-Solid)

Η μέθοδος ατμού-υγρού-στερεού (VLS), είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη νανοδομών, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Wagner και Ellis το 1964. Με την μέθοδο αυτή, η ανάπτυξη των νανοδομών πραγματοποιείται σε υπόστρωμα στο οποίο διασπείρονται με τη μορφή λεπτού υμενίου ή νανοσωματιδίων, μεταλλικά καταλυτικά σωματίδια. Ως καταλυτικά σωματίδια χρησιμοποιούνται ο χρυσός, το ασήμι, η πλατίνα, ο χαλκός και ο κασσίτερος. Οι αντιδρώντες ουσίες και το υπόστρωμα, το οποίο για την ανάπτυξη νανοδομών ZnO είναι συνήθως πυριτίου ή ζαφείρι, τοποθετούνται εντός του φούρνου κενού σωλήνα (vacuum tube furnace) χαλαζία και καθώς η θερμοκρασία στο φούρνο αυξάνεται, τα καταλυτικά σωματίδια του υποστρώματος τήκονται. Η τήξη των καταλυτικών σωματιδίων έχει ως συνέπεια την άνοδο σταγονιδίων, μέσα στις οποίες διαλύονται

τα αντιδρώντα που είναι σε μορφή ατμών, δημιουργώντας ένα εύτηκτο σύστημα. Όταν ο καταλύτης φτάνει σε σημείο κορεσμού, το αντιδρόν παγώνει και σχηματίζει έναν κρύσταλλο ZnO μεταξύ του υποστρώματος και του καταλύτη. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας να δημιουργηθεί η βάση για το τελικό νανοραβδί και η διάμετρος του είναι εξαρτώμενη από τις διαστάσεις του σταγονιδίου καταλύτη που χρησιμοποιήθηκε εξαρχής.

1.2.3.2 Φυσική Εναπόθεση Ατμών (Physical Vapor Deposition)

Η φυσική εναπόθεση ατμών (PVD), γνωστή ως μηχανισμός ατμού-στερεού (VS), είναι μια διαδικασία κατά την οποία το πρόδρομο υλικό εξαχνώνεται σε μορφή ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως σε φούρνο και στη συνέχεια σε χαμηλότερη θερμοκρασία εναποτίθεται σε ένα υπόστρωμα (βλ. εικόνα 7). Η τεχνική αυτή διαθέτει αρκετές παραμέτρους οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα για την παραλαβή του επιθυμητού προϊόντος. Οι παράμετροι αυτοί είναι η θερμοκρασία, η πίεση, το φέρον αέριο και το υπόστρωμα που χρησιμοποιούνται εντός του θαλάμου της σύνθεσης. Υπάρχει πληθώρα τεχνικών PVD, οι οποίες χρησιμοποιούν μια ποικιλία διαφορετικών αερίων αντιδρώντων για τη διάσταση και τον ιονισμό του πλάσματος. Αυτό με τη σειρά του αντιδρά με τα άτομα του στόχου που είναι από μέταλλο. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν φυσική εναπόθεση ατμών με δέσμη ηλεκτρονίων (EBPVD), φυσική εναπόθεση ατμού με τόξο καθόδου (Arc-PVD), εναπόθεση με παλμικό λέιζερ (PLD) και ιοντοβολή (IBS).



Σχήμα 7: Διάγραμμα φυσικής εναπόθεσης ατμών. Ο φούρνος με δύο ζώνες θερμοκρασίας αποτελείται από μία ζώνη υψηλής θερμοκρασίας όπου πραγματοποιείται η εξαχνωση και μια ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας όπου το εξαχνωμένο ZnO εναποτίθεται στα υποστρώματα. Το Ar χρησιμοποιείται συνήθως ως μεταφορέας ενώ το O_2 χρησιμοποιείται ως το αντιδρόν αέριο.[10]

1.2.3.3 Χημική Εναπόθεση Ατμών (Chemical Vapor Deposition)

Η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες εναπόθεσης λεπτού υμενίου και χρησιμοποιείται λόγω της ικανότητάς της να παρέχει ομοιόμορφη εναπόθεση σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Κατά την διαδικασία η οξειδωση ή θερμική αποσύνθεση διασπά τα πρόδρομα είδη χημικών ενώσεων σε αέρια φάση. Το υλικό εναποτίθεται στην επιφάνεια ο ατμός έρχεται σε επαφή με την θερμαινόμενη επιφάνεια του υποστρώματος. Η όλη διαδικασία μπορεί να αποσαφηνιστεί σε πέντε σημαντικά βήματα. Το πρώτο και το δεύτερο περιλαμβάνουν τη διάχυση των αντιδρώντων στο υπόστρωμα και την προσρόφηση στην επιφάνεια του. Το τρίτο βήμα ορίζει ότι οι επιφανειακές χημικές αντιδράσεις οδηγούν σε εναπόθεση του στερεού. Στη συνέχεια τα παραπροϊόντα που βρίσκονται σε αέρια φάση ξεκινούν μία διαδικασία απορρόφησης από την επιφάνεια. Τέλος, τα παραπροϊόντα που βρίσκονται σε αέρια φάση ξεκινούν να διαχέονται με την ροή. Η μέθοδος CVD πραγματοποιείται συνήθως σε υψηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με την μέθοδο PVD και μπορεί να περιέχει διαβρωτικά παραπροϊόντα λόγω χημικών αντιδράσεων.

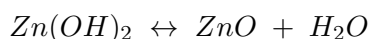
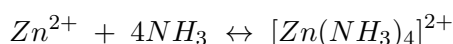
1.2.3.4 Χημική Εναπόθεση Οργανικών Μεταλλικών Ενώσεων (Metal – Organic Chemical Vapor Deposition)

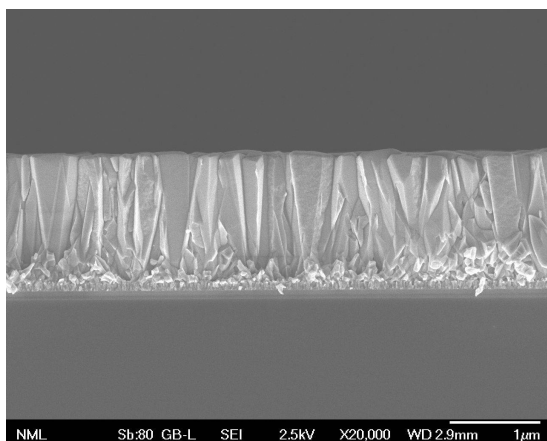
Η χημική εναπόθεση οργανικών μεταλλικών ενώσεων είναι μία τεχνική CVD με εφαρμογή πηγής οργανικού μετάλλου σε αέρια φάση (πολύ αδύναμου δεσμού) που πρέπει να σπάσει με χρήση θερμικών μέσων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεση μετάλλων και την ταυτόχρονη απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων μέσω αέριας φάσης. Για παράδειγμα, το αιθοξείδιο του τανταλίου ($Ta(OC_2H_5)_5$)

χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία πεντοξειδίου του τανταλίου (Ta_2O_5) και το τετραδιμεθυλαμινο τιτάνιο (TDMAT) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νιτριδίου του τιτανίου (TiN). Παρόμοια με άλλες τεχνικές CVD, η MOCVD απελευθερώνει διαβρωτικά παραπροϊόντα και πρόδρομα είδη τα οποία είναι αχρησιμοποίητα. Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων ασφαλείας καθώς κατά την διάρκεια της MOCVD είναι δυνατή η απελευθέρωση οργανικών παραπροϊόντων στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά επικίνδυνο, καθώς το ανθρώπινο σώμα έχει την ικανότητα να απορροφά με ευκολία οργανικές ενώσεις. Τα οργανικά παραπροϊόντα μπορεί να αποβούν δηλητηριώδεις για το ανθρώπινο σώμα διότι με το σπάσιμο των δεσμών μπορούν να αφήσουν υπολείμματα βαρέων μετάλλων τα οποία δεν μπορούν να αποβληθούν. Η μέθοδος αυτή για την ανάπτυξη ZnO είναι ακόμη περιορισμένη στην μαζική παραγωγή.[10]

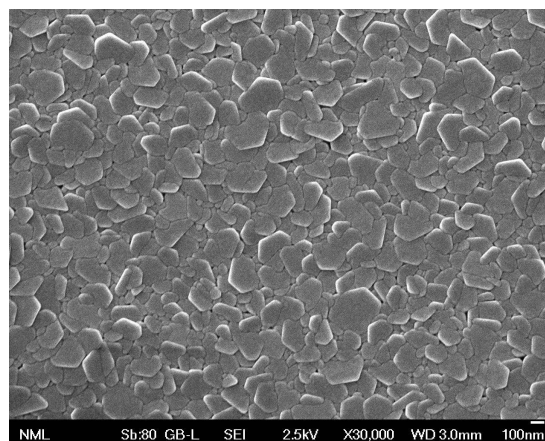
1.2.3.5 Υδροθερμική Μέθοδος

Η υδάτινη χημική μέθοδος (ACG - Aqueous Chemical Growth) είναι μία από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους σύνθεσης νανοδομών ZnO. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει κάθε μέθοδο ανάπτυξης ZnO που πραγματοποιείται εντός κάποιου διαλύματος. Τα διαλύματα μπορεί να είναι από αλκοολικά έως υδατικά, με τα τελευταία να είναι τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα. Κάθε μέθοδος σύνθεσης στην οποία χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα χαρακτηρίζεται υδροθερμική μέθοδος (Hydrothermal Growth) η οποία ακολουθήθηκε και στην εν λόγω εργασία και θα αναπτυχθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Η υδροθερμική μέθοδος ανάπτυξης νανοδομών ZnO που είναι η πιο συνήθης περιλαμβάνει ως αντιδρώντα Νιτρικό Ψευδάργυρο (Zinc Nitrate Hexahydrate) με έξι κρυσταλλικά νερά, με χημικό τύπο $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ και εξαμεθυλενοτετραμίνη (Hexamethylenetetramine - HMTA), με χημικό τύπο $C_6H_{12}N_4O$ νιτρικός ψευδάργυρος παρέχει κατιόντα Zn^{2+} ενώ το νερό παρέχει ανιόντα O^{2-} τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη. Ο ρόλος του HMTA δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως προς το παρόν, αλλά είναι δεδομένο πως συμβάλει στην ανάπτυξη των νανοδομών και δρα ως ρυθμιστής του pH. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντιδράσεις [11] που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των νανοδομών ZnO καθώς και η μορφολογία των νανοδομών ZnO που αναπτύχθηκαν (βλ. εικόνα 8).





(α')



(β')

Σχήμα 8: Ανάπτυξη υμενίου ZnO με χρήση της υδροθερμικής μεθόδου. Η εικόνα προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (α) εγκάρσιας διατομής και (β) κάτοψης

2 Διατάξεις Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων (Surface Acoustic Waves)

2.1 Εισαγωγή

Σήμερα, η εφαρμογή αισθητήρων (sensors) βρίσκεται στο αποκορύφωμά της σε διάφορους τομείς, γεγονός που δεν είχε συμβεί ξανά στο παρελθόν. Οι εφαρμογές στηρίζονται κυρίως σε διατάξεις και αισθητήρες που ανιχνεύουν το περιβάλλον, επεξεργάζονται τις πληροφορίες που λαμβάνουν από αυτό και τέλος αποκρίνονται σε αυτό με την βοήθεια ενεργοποιητών (actuators). Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές μπορούν να συνδράμουν σε καθημερινές ενέργειες, στην εκπαίδευση, στην ιατρική ακόμη και στην ψυχαγωγία και να αποτελέσουν την λύση σε πολλά προβλήματα. Απαραίτητο είναι οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές να αποκρίνονται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και παράλληλα να μικραίνουν και οι διαστάσεις τους. Επιπρόσθετα, αναγκαίο κρίνεται να διατίθενται σε χαμηλό κόστος ώστε να είναι οικονομικά προσιτοί. Ενεργοποιητές και αισθητήρες αυτής της κατηγορίας ονομάζονται μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS). Τα MEMS από μόνα τους αποτελούν έναν αχανή τομέα και έχουν εφαρμογές σε ένα τεράστιο εύρος κλάδων όπως είναι η ηλεκτρονική, η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η χημεία, οι ασύρματες επικοινωνίες, η βιοϊατρική και πολλοί ακόμη. Οι βιοαισθητήρες, οι οποίοι ανήκουν στο πεδίο των βιοϊατρικών διατάξεων και παρουσιάζουν ευρεία χρήση για την έγκαιρη διάγνωση και ανίχνευση αναλυτών πλέον αξιοποιούν την τεχνολογία MEMS. Βιοαισθητήρες βασισμένοι σε διατάξεις MEMS παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα για τον κλάδο της ιατρικής. Οι διατάξεις αυτές έχουν την προοπτική να καταφέρουν να ενσωματώσουν ένα ολόκληρο εργαστήριο με όργανα και αναλυτικές συσκευές σε ένα μικροσκοπικό τσιπ. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από μία σειρά μηχανικών και ηλεκτρονικών μερών που ενσωματώνονται σε μία συσκευή και είναι ικανές να μετρήσουν θερμοκρασία, πίεση, ιξώδες, μηχανική τάση, αλλαγή μάζας κ.α. Στους βιοϊατρικούς και χημικούς αισθητήρες οι διατάξεις “εργαστήριο σε ένα τσιπ (lab on a chip)” έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες. Οι εξελίξεις που έχουν σημειωθεί για τη λήψη μικρότερου δείγματος, ταχύτερη αντίδραση και ανάλυση, ο αυτοματισμός και η δυνατότητα μεταφοράς των συσκευών αυτών τις καθιστά περιζήτητες. Ωστόσο, ανεξάρτητα από το ευρύ φάσμα χρήσης και την αποτελεσματικότητα των διατάξεων lab on chip, αυτές παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς κατά την εφαρμογή τους. Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς που υπάγονται είναι η ταυτόχρονη λειτουργία τους ως αισθητήρες και ενεργοποιητές σε ένα περιβάλλον που εμπλέκονται περίπλοκοι μηχανισμοί και φυσικά φαινόμενα. Τέτοιου είδους περιορι-

ισμοί δύναται να αντιμετωπιστούν με διατάξεις ακουστικών κυμάτων για ταυτόχρονη ανίχνευση και ενεργοποίηση σε μία συσκευή.

Η χρήση των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (Surface Acoustic Waves -SAW) διαπιστώθηκε ότι είναι πολύτιμη για διατάξεις MEMS που απαιτούν ανίχνευση και ενεργοποίηση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διατάξεων και αισθητήρων SAW. Οι αισθητήρες SAW καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, οι οποίες δεν περιορίζονται μόνο σε αισθητήρες και ενεργοποιητές, αλλά βρίσκουν εφαρμογή και ως φίλτρα, ταλαντωτές και μετασχηματιστές. Το βασικό κομμάτι των αισθητήρων SAW είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των επιφανειακών κυμάτων. Οι διατάξεις επιφανειακών ακουστικών κυμάτων αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα και μετατροπείς με ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια (IDTs). Τα IDTs είναι διατεταγμένα στην επιφάνεια των πιεζοηλεκτρικών υποστρωμάτων εκ του σχεδιασμού. Το υπόστρωμα με τα ηλεκτρόδια μετατρέπουν την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και παράγουν επιφανειακά ακουστικά κύματα. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως ενεργοποίηση. Η μηχανική ενέργεια παράγεται σε ακουστικά κύματα στο πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα λόγω της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης καθώς στην είσοδο της διάταξης εφαρμόζεται ηλεκτρικό σήμα. Τα παραγόμενα ακουστικά κύματα επιφανείας διαδίδονται στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος και αλληλεπιδρούν με τα άλλα διατεταγμένα ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια στο άκρο λήψης παράγουν ηλεκτρικά σήματα μέσω της μηχανοηλεκτρικής σύζευξης του πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος ανιχνεύοντας τα επιφανειακά κύματα χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μηχανισμό. Τα επιφανειακά ακουστικά κύματα μπορούν να χειριστούν με διάφορους τρόπους και μπορούν να τροποποιηθούν λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των διαφορετικών φυσικών αλλαγών, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικούς ενεργοποιητές και αισθητήρες. Οι συσκευές SAW χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, όπως σε μηχανικές, χημικές, ηλεκτρικές, φυσικές επιστήμες και βιολογικές εφαρμογές. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν ακόμα και παραμικρές διαταραχές στην επιφάνεια. Η τεχνολογία ακουστικών κυμάτων είναι πολύ χρήσιμη στην ανίχνευση και την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών (Structural Health Monitoring). Οι διατάξεις SAW χρησιμοποιούνται συχνά ως ενεργοποιητές για την επιδιόρθωση ή την απομόνωση βλάβης σε ένα μηχανικό σύστημα, το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας. Επιπρόσθετα οι διατάξεις αυτές αποδεικνύονται επιτυχημένες για την μεταφορά υλικών σε μικρο και νάνο κλίμακες.[12]

2.2 Μηχανισμοί και Παράμετροι Ανίχνευσης

Δεδομένου ότι οι συσκευές ακουστικών κυμάτων χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά για τη διέγερση και την ανίχνευση των ακουστικών κυμάτων, οι παράμετροι που σχετίζονται με τις εφαρμογές αισθητήρων αφορά είτε μηχανικές είτε ηλεκτρικές διαταραχές. Επομένως, μία ακουστική διάταξη παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία κυρίως σε φυσικές παραμέτρους που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τις μηχανικές ιδιότητες του κύματος και του συσχετιζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Για χημικούς αισθητήρες ή βιοαισθητήρες απαραίτητη είναι η χρήση ορισμένων στρωμάτων μορφοτροπέων για την μετατροπή της επιθυμητής παραμέτρου (παραδείγματος χάριν η συγκέντρωση ενός χημικού παράγοντα) σε μηχανική ή ηλεκτρική διαταραχή που μπορούν να διαταράξουν τις ιδιότητες ακουστικών κυμάτων. Γενικά, η ακουστική φασική ταχύτητα μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες. Η παρακάτω εξίσωση απεικονίζει τη διαταραχή της ακουστικής ταχύτητας συναρτήσει των παραμέτρων μάζας, των ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων και του περιβάλλοντος.

$$\frac{\Delta V}{V_{acoustic}} \cong \frac{1}{V_{acoustic}} \left(\frac{\partial V}{\partial mass} \Delta mass + \frac{\partial V}{\partial elec} \Delta elec + \frac{\partial V}{\partial mech} \Delta mech + \frac{\partial V}{\partial envir} \Delta envir \right)$$

Η απόκριση ενός αισθητήρα οφείλεται στο συνδυασμό αυτών των παραμέτρων. Η χρήση συστοιχιών και ολοκληρωμένων συστημάτων με αισθητήρες για την ανάπτυξη συστημάτων συνολικής ανάλυσης είναι απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών ανίχνευσης.

2.2.1 Θερμοκρασία

Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι μία από τις ευκολότερες παραμέτρους που μπορεί να ανιχνευτεί, καθώς σχεδόν όλες οι φυσικές και χημικές επιδράσεις εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Σε ορισμένες εφαρμογές, η επίδραση της θερμοκρασίας θα πρέπει να ελαχιστοποιείται για να αποφευχθεί οποιαδήποτε παρεμβολή με άλλες επιδράσεις. Για τους αισθητήρες ακουστικών κυμάτων, η θερμοκρασία προκαλεί διαστολή και μικρές αλλαγές στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να μπορούν να μετρηθούν δύο είδη αλληλεπίδρασης. Η πρώτη μέτρηση αφορά τη μετατόπιση της ταχύτητας του ακουστικού κύματος εξαιτίας αλλαγών στις ιδιότητες του υλικού. δεύτερη αφορά ακουστικές διατάξεις στις οποίες η συχνότητα συντονισμού ή η ταχύτητα εξαρτάται από τις διαστάσεις. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τις αλλαγές τόσο των ιδιοτήτων του υλικού όσο και των οριακών συνθηκών.

2.2.2 Πίεση

Οι ακουστικές διατάξεις παρουσιάζουν ευαισθησία σε μηχανικές μεταβολές, όπως η πίεση. Η πρώτη εφαρμογή αισθητήρα SAW για ανίχνευση ήταν ένας αισθητήρας πίεσης. Το ακουστικό κύμα επηρεάζεται από την καταπόνηση που προκαλείται από μία εξωτερική πίεση. Όταν η πίεση αυτή εφαρμόζεται σε μία διάταξη ταλαντωτή που χρησιμοποιεί τεχνολογία SAW, τότε η καταπόνηση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί μέσω μιας μετατόπισης στη συχνότητα συντονισμού της διάταξης SAW. Η επίδραση της πίεσης ως παρεμβολή σε μια εφαρμογή ανίχνευσης χρειάζεται και αυτή να αντιμετωπιστεί και να αντισταθμιστεί. Η χρήση ενός παράλληλου αισθητήρα αναφοράς είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος αντιστάθμισης και μπορεί να εφαρμοστεί μέσω της χρήσης μιας σειράς ακουστικών αισθητήρων.

2.2.3 Μεταβολή Μάζας

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα μεγέθη ανίχνευσης είναι η μάζα. Τέτοιου είδους εφαρμογές παρατηρούνται σε τομείς όπως η παρακολούθηση πάχους μεμβράνης, η ανίχνευση αερίων και υγρών καθώς και σε εφαρμογές βιοαισθητήρων. Συγκεκριμένα, οι βιοχημικοί αισθητήρες βασισμένοι σε ακουστικές διατάξεις προσφέρουν μια μοναδική και πολύ ελκυστική μέθοδο ανίχνευσης χημικών ειδών είτε σε αέριο είτε σε υγρό μέσο. Παράλληλα, παρέχουν εξαιρετική ευαισθησία, ανθεκτικότητα, άμεση απόκριση συχνότητας και ευστάθεια. Οι συσκευές αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως βιοχημικοί αισθητήρες με την εφαρμογή βιοχημικής επικάλυψης στο υπόστρωμα, η οποία θα αντιδράσει επιλεκτικά με το δείγμα που πρέπει να ανιχνευτεί. Αυτή η αλληλεπίδραση παράγει μια μετρήσιμη μετατόπιση στη συχνότητα συντονισμού της συσκευής, ενώ μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικές εφαρμογές ανίχνευσης με την αλλαγή της επιλεγμένης βιοχημικής επίστρωσης.

2.2.4 Ιξωδοελαστικότητα

Η διερεύνηση του ιξώδους των ρευστών είναι ζωτικής σημασίας για μηχανικά, χημικά και βιοχημικά συστήματα και διεργασίες. Στην περιοχή των βιοαισθητήρων, για παράδειγμα, μια βιοχημική αλληλεπίδραση μπορεί να συνοδεύεται από μια μεταβολή στην ιξωδοελαστικότητα της διεπαφής. Η ιξωδοελαστικότητα είναι δυνατή να παρερμηνεύσει την επιθυμητή παράμετρο ανίχνευσης.

2.2.5 Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα είναι μια άλλη σημαντική παράμετρος που έχει άμεση επίδραση στην απόκριση των ακουστικών αισθητήρων για εφαρμογές τόσο σε αέριο όσο και σε υγρό μέσο. Ο μηχανισμός ανίχνευσης σχετίζεται με το ακουστοηλεκτρικό φαινόμενο όπου οι ηλεκτρικές ακουστικές συνθήκες για το διαδιδόμενο ακουστικό κύμα διαταράσσονται από κάποιο αγώγιμο λεπτό υμένιο ή κάποιο αγώγιμο υγρό μέσο. Για ένα αγώγιμο λεπτό υμένιο που εναποτίθεται σε μια συσκευή SAW, για παράδειγμα, το σχεδόν στατικό πεδίο που σχετίζεται με το ακουστικό κύμα αλληλεπιδρά με τους φορείς φορτίων στο υμένιο.[13]

2.3 Είδη Ακουστικών Κυμάτων

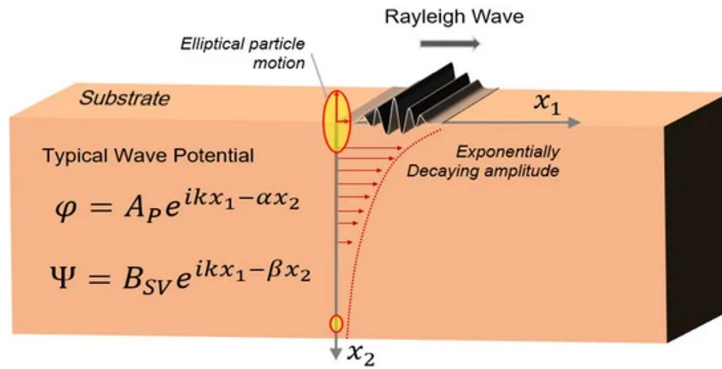
Οι διατάξεις SAW είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε συχνότητες υπερήχων (ultrasonic) και ένα υπερηχητικό κύμα διαδίδεται στο υπόστρωμα. Για τον σχεδιασμό ενός συγκεκριμένου αισθητήρα SAW για μία συγκεκριμένη εφαρμογή είναι απαραίτητη η γνώση των διαφορετικών τύπων κυμάτων που μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα υπόστρωμα.

2.3.1 Κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh διαδίδονται στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος. Η πόλωση των κυμάτων αυτών είναι κατά μήκος του επιπέδου που είναι κάθετο στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το πλάτος της κίνησης των μορίων είναι μεγαλύτερο κοντά στην επιφάνεια και μειώνεται εκθετικά με το βάθος του υποστρώματος. Το κύμα Rayleigh αποτελεί υπέρθεση μιας διαμήκουσ ή επιμήκουσ (longitudinal) συνιστώσας κύματος και μιας κατακόρυφης εγκάρσιας ή διατμητικής (shear vertical) συνιστώσας κύματος στην επιφάνεια με οριακές συνθήκες χωρίς πρόσφυση (traction-free boundary conditions) στο υπόστρωμα, δηλαδή η επιφάνεια είναι απαλλαγμένη από εξωτερικές μηχανικές τάσεις. Κατά τη διάδοσή τους τα μόρια κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές με τον κατακόρυφο άξονα κάθετο προς την επιφάνεια και τη διεύθυνση διάδοσης και τον οριζόντιο άξονα παράλληλο και ομόρροπο προς τη διεύθυνση διάδοσης κάθετα προς την επιφάνεια και παράλληλα με την κατεύθυνση της διάδοσης. Στα κύματα Rayleigh η ταχύτητα εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό του υποστρώματος και τον προσανατολισμό των κρυστάλλων και ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_R = c_S \left(\frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \right)$$

όπου ν είναι ο λόγος Poisson και c_S είναι η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος στο υπόστρωμα.



Σχήμα 9: Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Rayleigh στο υπόστρωμα. [12]

Το βάθος διείσδυσης των κυμάτων Rayleigh στο υπόστρωμα είναι συνήθως μικρότερο από ένα μήκος κύματος. Τα A_P και B_{SV} τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 9 αντιστοιχούν στα πλάτη του διαμήκουσ και του εγκάρσιου κύματος όπου από την σύζευξη αυτών προκύπτει το κύμα Rayleigh. Οι τελικές εξισώσεις για την κίνηση των σωματιδίων σε ένα κύμα Rayleigh δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$u_1(x_2) = A_i \left(k \exp(-\alpha x_2) - \frac{(\beta^2 + k^2)}{2k} \exp(-\beta x_2) \right)$$

$$u_2(x_2) = A_i \left(a \exp(-\alpha x_2) - i \frac{(\beta^2 + k^2)}{2k} \exp(-\beta x_2) \right)$$

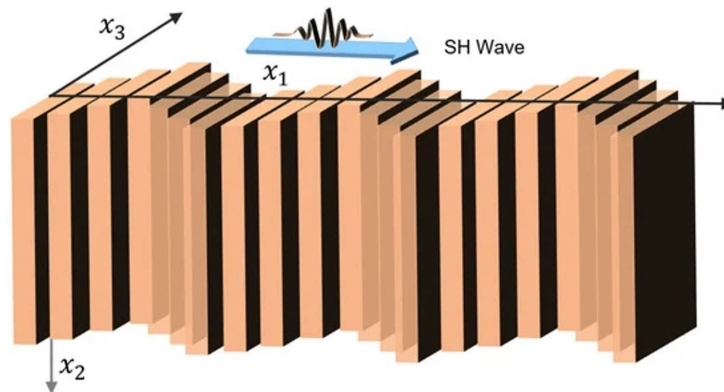
όπου το k είναι ο κυματαριθμός στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος κατά μήκος του άξονα x_1 . Τα $a = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_p^2}}$ και $\beta = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_s^2}}$ είναι οι κυματαριθμοί κατά μήκος του άξονα x^2 για τα διαμήκη και εγκάρσια κύματα αντίστοιχα. Το c_s είναι η ταχύτητα του διαμήκους κύματος στο υπόστρωμα και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του κύματος.

2.3.2 Οριζόντια Εγκάρσια (Shear Horizontal) Κύματα

Στα οριζόντια εγκάρσια ή διατμητικά κύματα (SH-κύματα), η κίνηση των σωματιδίων είναι κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα κύματα Rayleigh, το πλάτος της κίνησης των μορίων δεν μειώνεται εκθετικά με το βάθος του υποστρώματος. Πολλαπλά μήκη κύματος είναι εφικτό να μεταδοθούν στο υπόστρωμα, καθώς το πλάτος της κίνησης των μορίων δεν μειώνεται εκθετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση SH-κυμάτων στο υπόστρωμα με διαφορετικά μήκη κύματος ή τον κορεσμό ολόκληρου του πάχους του χρησιμοποιημένου υποστρώματος. Συνεπώς, η επιφάνεια της διάταξης γίνεται πιο ευαίσθητη στις αλλαγές. Οι αισθητήρες SH-SAW είναι πολύ χρήσιμοι και ευρέως διαδεδομένοι στην βιοχημική ανίχνευση ειδικότερα σε υγρά μέσα. Συγκριτικά με τα κύματα bulk, τα επιφανειακά κύματα είναι πιο ευαίσθητα για την ανίχνευση διαταραχών που δημιουργούνται στο περιβάλλον. Η διάταξη SH-SAW μπορεί να λειτουργήσει σε συχνότητες μεγαλύτερες των 100 MHz και επιτρέπει στην διάταξη να έχει μεγαλύτερη ευαισθησία διατηρώντας σε χαμηλά επίπεδα το λόγο σήματος προς το θόρυβο (signal-to-noise ratio). Οι διατάξεις αυτές δεν είναι μόνο μικρές και εύρωστες αλλά είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε on-line συστήματα χαμηλού κόστους. Επιπρόσθετα, η ευαισθησία συχνά ενισχύεται και με την χρήση μιας λεπτής επίστρωσης καθοδήγησης (guiding layer). Διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά όπως διοξείδιο του πυριτίου, νιτρίδιο του πυριτίου και διάφορα πολυμερή όπως PMMA και πολυϊμίδια χρησιμοποιούνται ως κατευθυντήριες επιστρώσεις σε διατάξεις SH-SAW. Με την βοήθεια των επιστρώσεων αυτών, οι ταχύτητες διάδοσης μειώνονται και οι ακουστικές ενέργειες παγιδεύονται στην περιοχή της επιφάνειας ανίχνευσης, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την ευαισθησία στις επιφανειακές διαταραχές. Η διαδικασία της βιολογικής και χημικής ανίχνευσης με χρήση SH-SAW αισθητήρων πραγματοποιείται με IDTs σε διάταξη γραμμής καθυστέρησης (delay line). Για τον σχεδιασμό αυτών των συσκευών, η επίδραση του IDT από την πλευρά του αισθητήρα λαμβάνεται υπόψη για τον σχεδιασμό αποκρίσεων. Στην παρακάτω εξίσωση παρουσιάζεται η απόκριση του αισθητήρα που μπορεί να μοντελοποιηθεί από την συνάρτηση μεταφοράς.

$$T_2(f) = T_{12}(f)e^{-i(2\pi l/\lambda)}e^{i(2\pi d l_s/\lambda)}e^{-\alpha l_s}$$

όπου T_2 και T_{12} είναι οι συναρτήσεις μεταφοράς στις κατευθύνσεις 2-2 και 1-2, το d είναι η κλασματική αλλαγή της ταχύτητας του SH-SAW εξαιτίας του φαινομένου ανίχνευσης, το α είναι ο συντελεστής εξασθένησης λόγω της επίστρωσης ως κυματοδηγού και του σύνθετου στρώματος βιοχημικής ευαισθησίας. Τα l και l_s είναι ο διαχωρισμός των κέντρων των IDTs και η περιοχή ανίχνευσης που βρίσκεται μεταξύ των IDTs αντίστοιχως.



Σχήμα 10: Σχηματική αποτύπωση διάδοσης οριζόντιου εγκάρσιου κύματος στο υπόστρωμα. [12]

Η κυματοδότηση της επίστρωσης καθοδήγησης (guiding layer) πραγματοποιείται όταν η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος (S-κύμα) στην κατευθυντήρια επίστρωση είναι μικρότερη από την ταχύτητα στο υπόστρωμα. Θεωρώντας ότι το SH-κύμα είναι συζευγμένο με το IDT, η κλασματική αλλαγή στην ταχύτητα του κύματος και το μέτρο της ευαισθησίας στις μηχανικές διαταραχές που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια λαμβάνουν υπόψη την θεωρία των διαταραχών έχουμε ότι:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{V_{SH}}{A}(\rho h) \left[1 - \left(\frac{V_M}{V_{SH}} \right)^2 \right] |U_2|^2$$

όπου V_{SH} είναι η μη διαταραγμένη ταχύτητα στο υπόστρωμα, V_M είναι η ταχύτητα στο στρώμα καθοδήγησης, ρ είναι η πυκνότητα μάζας, h είναι το πάχος του στρώματος και U_2 είναι το κανονικοποιημένο πλάτος μετατόπισης της ταχύτητας των μορίων στην επιφάνεια. Στην περίπτωση που το προκύπτων κύμα δεν έχει διασπορά και η διαδρομή ανίχνευσης ισούται με το μήκος διάδοσης του SH-SAW, η παραπάνω εξίσωση περιγράφει επίσης τη σχετική μετατόπιση συχνότητας. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, θεωρώντας ένα καθαρά ελαστικό υμένιο, οι ευαισθησίες λόγω μεταβολή μάζας και ιξωδοελαστικών φορτίων υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$S_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{f} / \Delta m$$

όπου $\Delta m = \rho h$. Η μεταβολή του Δf προκύπτει κυρίως από τη μεταβολή μάζας, αλλά μερικές φορές τα ιξωδοελαστικά φορτία συμβάλλουν επίσης σε αυτήν την αλλαγή. Στους βιοαισθητήρες και σε άλλες χημικές εφαρμογές, η παραπάνω εξίσωση είναι περισσότερο από κατάλληλη, καθώς το βιοστρώμα που αποτελείται από βιοϋποδοχείς πάνω από το guiding layer που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ή τη σύλληψη των βιοαναλυτών είναι της τάξης λίγων μορίων και αποτελείται από αμελητέα ιξωδοελαστική συνεισφορά. Αυτό το φαινόμενο είναι ο λόγος για τον οποίο πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τις μετατοπίσεις συχνότητας των SH-SAW διατάξεων για εφαρμογές βιοαισθητήρων και χημικών αισθητήρων. Ένας αισθητήρας SAW που βασίζεται σε κύματα SH μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση υγρών και αερίων. Η συνάρτηση για το SH-κύμα παρουσιάζεται παρακάτω.

$$u_3(x_1, x_2) = \exp(ikx_1 - i\beta x_2) + \text{Rexp}(ikx_1 + i\beta x_2)$$

Η εγκάρσια τάση του SH-κύματος που ασκείται κατά μήκος της διεύθυνσης x_3 και κάθετα στην διεύθυνση x_1 είναι η μόνη τάση η οποία δρα στο όριο του υποστρώματος και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

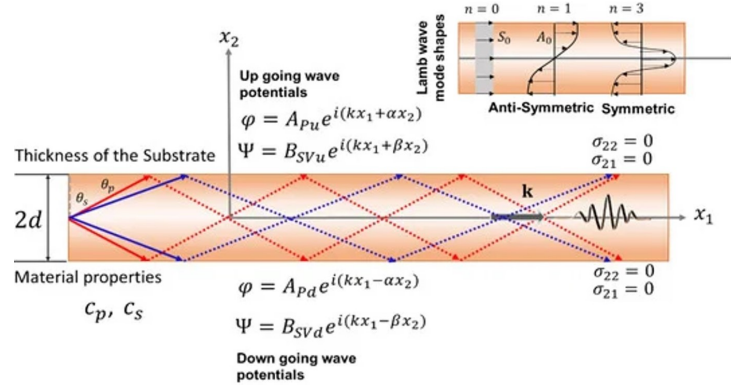
$$\sigma_{13} = 2ikc_S^2 \rho \cos(\beta x_2) \exp(ikx_1)$$

όπου k είναι ο κυμαριθμός κατά την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος κατά μήκος του άξονα x_1 . Ισχύει ότι $\beta^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{c_S^2}$, c_S είναι η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος και ρ είναι η πυκνότητα του υποστρώματος.

2.3.3 Κύματα Lamb

Τα κύματα Lamb παράγονται σε έναν κυματοδηγό μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών, παραδείγματος χάριν της άνω και της κάτω επιφάνειας ενός υποστρώματος. Με άλλα λόγια το κύμα Lamb αποτελείται από μία σύνθετη ταλάντωση που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το πάχος του υλικού. Τα κύματα Lamb κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους κυμάτων, τα συμμετρικά και τα αντισυμμετρικά κύματα, τα οποία μπορούν να διαδοθούν στην πλάκα ανεξάρτητα ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος. Η ταχύτητα κύματος Lamb εξαρτάται από την συχνότητα και το πάχος του υποστρώματος. Σύμφωνα με τα μέσα διάδοσης του κύματος και την συχνότητα διέγερσης, τα κύματα Lamb μπορούν να διαδοθούν με πολύ υψηλές ταχύτητες που κυμαίνονται από 800 m/s έως 6000 m/s, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές SAW. Η συχνότητα διάδοσης του κύματος Lamb αυξάνεται με την

αύξηση του πάχους. Ως εκ τούτου, για εφαρμογές αισθητήρων που χρησιμοποιούν κύματα Lamb, είτε είναι απαραίτητο να γίνει χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων, της τάξης κάτω από 5 MHz, είτε να γίνει χρήση εξαιρετικά λεπτού υποστρώματος ώστε να είναι εφικτή η πρόσβαση σε υψηλότερες συχνοτήτες.



Σχήμα 11: Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Lamb στο υπόστρωμα και μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το κύμα. [12]

Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται 2 σελ κυμάτων: πρώτον, τα ανοδικά διαμήκη και κατακόρυφα εγκάρσια κύματα και δεύτερον, τα καθοδικά διαμήκη και κατακόρυφα εγκάρσια κύματα. Τα ανοδικά πλάτη του διαμήχους κύματος (A_{Pu}) και του κατακόρυφου εγκάρσιου κύματος (B_{SVu}) και τα καθοδικά πλάτη του διαμήχους κύματος (A_{Pd}) και του κατακόρυφου εγκάρσιου κύματος (B_{SVd}) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το κύμα. Επιπρόσθετα το k είναι ο κυματαριθμός κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος και του άξονα x_1 . Οι κυματαριθμοί για τα διαμήκη και τα κατακόρυφα εγκάρσια κύματα κατά μήκος του άξονα x_2 ισούται με $a = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_p^2}}$ και $\beta = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_s^2}}$ αντίστοιχα. Τέλος έχουμε ότι c_s είναι η εγκάρσια ταχύτητα κύματος, c_p είναι η διαμήχους ταχύτητα κύματος και ω είναι η γωνιακή συχνότητα του κύματος. Τα κύματα Lamb διακρίνονται σε αντισυμμετρικά και συμμετρικά. Στα συμμετρικά κύματα Lamb οι μετατοπίσεις των μορίων προκύπτουν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$u_1(x_2) = Aik\cos(px_2) + Bic\cos(qx_2)$$

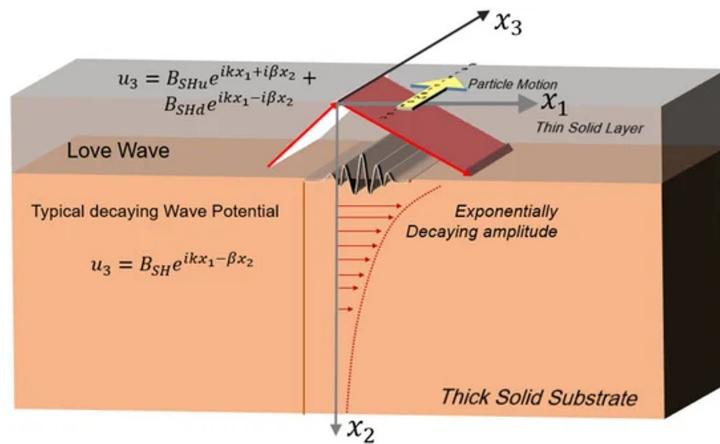
$$u_2(x_2) = Apsin(px_2) - Biks\sin(qx_2)$$

$$\text{με } p^2 = \frac{\omega^2}{c_p^2 - k^2} \text{ και } q^2 = \frac{\omega^2}{c_s^2 - k^2}.$$

2.3.4 Κύματα Love

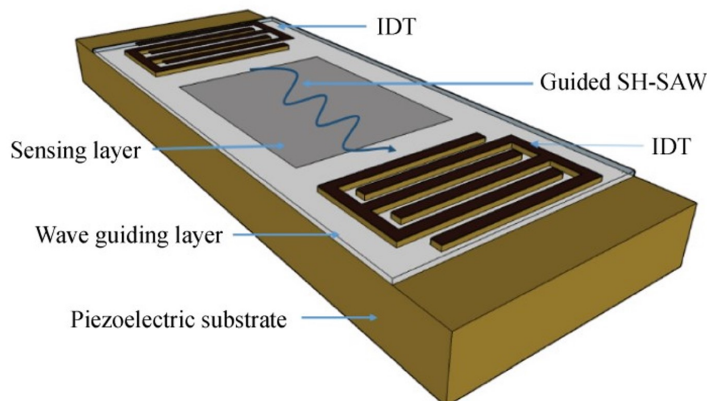
Τα κύματα Love όπως και τα Rayleigh διαδίδονται στην επιφάνεια ενός υποστρώματος και το πλάτος μειώνεται εκθετικά με το βάθος του υποστρώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός λεπτού στρώματος για την διάδοση SH-κυμάτων και τότε το κύμα φθίνει εκθετικά με το βάθος του δεύτερου υποστρώματος που είναι προσκολλημένο στο λεπτό στρώμα. Τέτοια κύματα SH ονομάζονται Love κύματα. Ως εκ τούτου, τα κύματα Love δημιουργούνται στη διεπιφάνεια δύο στερεών ελαστικών στρωμάτων όπου το ένα στρώμα είναι πολύ παχύ και το άλλο είναι λεπτό και τοποθετημένο στην επάνω επιφάνεια του πρώτου. Αυτά είναι τα καθοδηγούμενα κύματα τα οποία διαδίδονται μέσα από ένα λεπτό στρώμα εναπόθεσης δημιουργημένο πάνω από το υπόστρωμα SAW (βλ. εικόνα 13). Οι συγκεντρωμένες ακουστικές ενέργειες στο λεπτό στρώμα καθοδήγησης είναι πολύ υψηλές όταν δημιουργούνται κύματα Love, το οποίο συνεπάγεται υψηλή ευαισθησία στην μεταβολή της μάζας και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ευαισθησίας μεταξύ των αισθητήρων SAW. Κατά την διάδοσή τους τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται με

οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης, πρόκειται δηλαδή για κύματα οριζοντίως πολωμένα. Ακόμη εξαιτίας της φύσης του υποστρώματος μπορούν να διαδοθούν σε υγρά μέσα, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για βιοαισθητήρες.



Σχήμα 12: Σχηματική αποτύπωση διάδοσης κύματος Love στο υπόστρωμα. [12]

Στην εικόνα 12 παρουσιάζονται τρία σεί εξισώσεων που περιγράφουν το κύμα Love. Το πρώτο αφορά το ανοδικό SH-κύμα, το δεύτερο το καθοδικό SH-κύμα στο λεπτό στρώμα και το τρίτο στο φθίνον SH-κύμα. Τα ανοδικό πλάτος του οριζόντιου εγκάρσιου κύματος (B_{SHu}), το καθοδικό πλάτος οριζόντιου εγκάρσιου κύματος (B_{SHd}) στο λεπτό στρώμα και το φθίνον πλάτος οριζόντιου εγκάρσιου κύματος (B_{SH}) στο παχύ υπόστρωμα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το κύμα. Επιπρόσθετα, το k είναι ο κυματαριθμός κατά μήκος της διάδοσης του κύματος στον άξονα x_1 , $\beta = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_s^2}}$ είναι ο κυματαριθμός κατά μήκος του άξονα x_2 για το SH-κύμα, c_s είναι η εγκάρσια ταχύτητα κύματος και ω είναι η συχνότητα του κύματος Love.[12]



Σχήμα 13: Δομή διάταξης επιφανειακού ακουστικού κύματος που περιλαμβάνει λειτουργία κύματος Love [14]

2.4 Υλικά για Διατάξεις Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει τεράστια ποικιλία πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη πιεζοηλεκτρική απόδοση και να δημιουργηθεί συγκεκριμένος τύπος κύματος στο υπόστρωμα ανάλογα την χρήση της συσκευής πρέπει οι κρύσταλλοι να κοπούν σε συγκεκριμένο προσανατολισμό. Για παράδειγμα το οξειδίο λιθίου-τανταλίου (lithium tantalate) με τομή 36° ΥΧ δημιουργεί SH-κύματα και το οξειδίο λιθίου-νιοβίου (lithium niobate) με τομή 128° ΥΧ

παράγει κύματα Rayleigh. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο επιτυγχάνεται συχνά με συγκεκριμένη κοπή του κρυστάλλου. Η τιμή του πιεζοηλεκτρικού συντελεστή έχει άμεση επιρροή στην τομή των κρυστάλλων εξαιτίας της επίδρασης της στον συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης, ο οποίος αντιστοιχεί στην αποτελεσματικότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού ή υποστρώματος. Παράλληλα, ο προσανατολισμός ενός συγκεκριμένου πιεζοηλεκτρικού υλικού επιδρά και στην ταχύτητα του διαδιδόμενου κύματος. Για παράδειγμα το οξείδιο λιθίου-νιοβίου χωρίς να έχει κοπή σε συγκεκριμένο προσανατολισμό έχει ταχύτητα κύματος 3488 m/s, ενώ όταν έχει κοπή σε 128° XT έχει ταχύτητα κύματος Rayleigh που ισούται με 3979 m/s.

Στον τομέα των ακουστικών επιφανειακών κυμάτων, εκτός από τα πιο ογκώδη υποστρώματα έχουν προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον των ερευνητών και τα λεπτά υμενία. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά λεπτών υμενίων όπως το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), το νιτρίδιο του αλουμινίου (AlN) και τα πιεζοκεραμικά (PZT) θεωρούνται ως εξαιρετικές τεχνολογίες για διατάξεις lab-on-a-chip και ρευστομηχανικής. Τα πιο ογκώδη υποστρώματα είναι συχνά ακριβά και εύθραυστα, όπου σε αυτή την περίπτωση οι τεχνολογίες λεπτών υμενίων πλεονεκτούν. Επιπρόσθετα οι τεχνολογίες λεπτών υμενίων έχουν πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευελιξία τους και την ικανότητα εστιασμένης εναπόθεσης μόνο στην περιοχή ανίχνευσης ανεξαρτήτως του υπόλοιπου υποστρώματος, εξοικονομώντας άμεσα κόστος και χρόνο. Μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών υλικών λεπτών υμενίων, τα πιεζοκεραμικά διαθέτουν τη μεγαλύτερη πιεζοηλεκτρική σταθερά και ηλεκτρομηχανική σύζευξη, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την ανίχνευση όσο και για την ενεργοποίηση. Ωστόσο το PZT έχει ορισμένα μειονεκτήματα όπως είναι η απώλεια ενέργειας, η χαμηλή ταχύτητα κύματος, χαμηλός συντελεστής ποιότητας και μερικές φορές είναι δύσκολο να κατασκευαστεί.

Το ZnO είναι ένα άλλο αξιόλογο υλικό για κατασκευή λεπτών υμενίων λόγω του υψηλότερου συντελεστή πιεζοηλεκτρικής σύζευξης. Επιπλέον το οξείδιο του ψευδαργύρου παρουσιάζει χαμηλές τάσης υμενίου και έχει καλύτερη πρόσφυση από τα περισσότερα υποστρώματα εξαιτίας της οποίας είναι δυνατή η εναπόθεση παχιών υμενίων (μερικά μικρόμετρα). Με άλλα λόγια, τα υμενία ZnO είναι αποδεκτά για συσκευές ακουστικών κυμάτων επιφάνειας παχιών υμενίων. Οι συσκευές SAW που βασίζονται στο ZnO είναι βιοσυμβατές και γι' αυτόν τον λόγο είναι αρκετά δημοφιλείς στον τομέα των βιοαισθητήρων.

Το νιτρίδιο του αλουμινίου έχει προσελκύσει και αυτό το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Το AlN είναι ένα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά λεπτών υμενίων με την μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το αρκετά χρήσιμο σε συσκευές που καλούνται να φέρουν σε πέρας τέτοιου είδους λειτουργίες. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του AlN είναι ότι φέρει την υψηλότερη ταχύτητα κύματος μεταξύ των υπολοίπων υλικών. Ωστόσο, σε αντίθεση με το υμένιο του ZnO, το AlN δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παχιά υμενία και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές λεπτών υμενίων που είναι βασισμένες σε υψηλές συχνότητες.

Επιπρόσθετα σε αυτά τα υλικά που έχουν ήδη αναφερθεί, ορισμένα όπως το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) και το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN) είναι εξαιρετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συσκευές SAW. Αρκετά πρόσφατα πραγματοποιήθηκαν πειράματα με το νιτρίδιο του αργιλίου-γαλλίου (AlGaN) ως πιθανό πιεζοηλεκτρικό λεπτό υμένιο.[12]

Τα τελευταία χρόνια συσκευές SAW με εύκαμπτο υπόστρωμα έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον από πολλούς ερευνητές, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης συσκευών που μπορούν να φορεθούν, ανακυκλώσιμων συσκευών και συσκευών μίας χρήσης. Πολλές ομάδες έχουν κατασκευάσει εύκαμπτες συσκευές SAW με εναπόθεση υμενίων ZnO και AlN σε διάφορα πολυμερή όπως το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), η πολυαιθεροσουλφόνη (PES), το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), το πολυιμίδιο (PI) και το ναφθαλικό πολυαιθυλένιο (PEN). Μια βασική πρόκληση που περιέχει η σύνθεση εύκαμπτων συσκευών SAW είναι η ανάπτυξη υψηλής ποιότητας με προσανατολισμό στον άξονα c υμενίων ZnO και AlN σε αυτά τα πολυμερικά υποστρώματα. Τέλος, η διάδοση των ακουστικών κυμάτων σε εύκαμπτες συσκευές SAW εξαρτάται σημαντικά από τα πολυμερή υποστρώματα.[15]

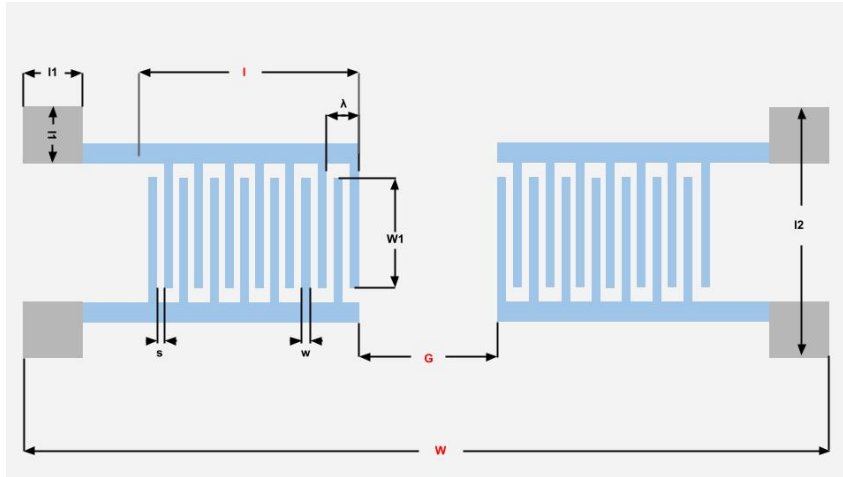
2.5 Σχεδιασμός Διακλαδισμένων Ηλεκτροδίων

Η διέγερση και η ανίχνευση επιφανειακών ακουστικών κυμάτων επιτυγχάνεται με την χρήση μετατροπέων με διακλαδισμένα ηλεκτρόδια (IDTs) λόγω της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος που εφαρμόζεται στην είσοδο και του πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος, γεγονός που αναφέρθηκε πρώτη φορά από τους Voltmer και White. Η δομή των ηλεκτροδίων μοιάζει με χτένα και κατασκευάζονται πάνω σε ένα πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα ή λεπτό υμένιο. Το μεταλλικό υμένιο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των IDTs πρέπει να είναι αρκετά παχύ ώστε να προσφέρει χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση και αρκετά λεπτό ώστε να μην παρουσιάζει υπερβολικό μηχανικό φορτίο στο ακουστικό κύμα. Τα IDTs κατασκευάζονται κατά βάση από αλουμίνιο πάχους 1000 \AA . Ένα άλλο δημοφιλές υλικό για την κατασκευή ηλεκτροδίων είναι ο χρυσός αλλά συχνά απαιτείται η προσθήκη ενός λεπτού στρώματος περίπου 100 \AA χρωμίου ή τιτανίου-βολφραμίου για να διασφαλιστεί η καλύτερη προσκόλληση του χρυσού στο υπόστρωμα. Ο σχεδιασμός των IDTs καθορίζει και την ηλεκτρική αντίσταση της συσκευής, την συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης και την περιοχή ανίχνευσης.[16]

Τα διακλαδισμένα ηλεκτρόδια μπορούν να σχεδιαστούν με πολλούς τρόπους και με διαφορετικά σχήματα ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις. Το εύρος ζώνης συχνότητας και η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από ορισμένες παραμέτρους όπως είναι το πλάτος των ηλεκτροδίων, η απόσταση, το ύψος και ο αριθμός των ηλεκτροδίων (fingers) των σχεδιαζόμενων IDTs. Οι μετατροπείς με διακλαδισμένα ηλεκτρόδια είναι σχεδιασμένοι για ηλεκτρομηχανική μετατροπή και μετάδοση ενέργειας σε συγκεκριμένη συχνότητα. Η μηχανική ενέργεια εφαρμόζεται ως κύμα τάσης το οποίο διαδίδεται στο υπόστρωμα. Το πλάτος, η φάση και η συχνότητα του κύματος τάσης που θα δημιουργηθεί στο υπόστρωμα εξαρτώνται από τους μετατροπείς. Όταν δημιουργηθεί το κύμα, η ανακλώμενη κυματική ενέργεια διαδίδεται και αυτή στο υπόστρωμα προς την αντίθετη κατεύθυνση, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει καταστροφικά και να μειώσει το σήμα απόκρισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο σχεδιασμός των IDTs θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε ανάκλαση να μπορεί να μειωθεί ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία του αισθητήρα. Από την άλλη πλευρά, για να ενισχυθεί τόσο η ευαισθησία όσο και η επιλεκτικότητα, απαιτείται ένα κύμα υψηλής συχνότητας, το οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί με την δημιουργία υψηλότερων αρμονικών της κεντρικής συχνότητας διέγερσης. Η δημιουργία μιας κεντρικής συχνότητας, η μείωση της ανάκλασης και οι υψηλότερες αρμονικές αποτελούν κατευθυντήριο παράγοντα για τον σχεδιασμό των IDTs.

Οι ιδιότητες των αισθητήρων SAW ποικίλουν ανάλογα με τις ακόλουθες παραμέτρους των ηλεκτροδίων. Οι παράμετροι που καθορίζουν τα IDTs και παρουσιάζονται στο σχήμα 14 είναι οι εξής: το πλάτος του ηλεκτροδίου, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το μήκος επικάλυψης (aperture) και ο αριθμός των ηλεκτροδίων (fingers) των IDTs. Ένα μεγαλύτερο πλάτος ηλεκτροδίου συνεπάγεται την δημιουργία χαμηλότερης κεντρικής συχνότητας f . Μια μικρότερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων προκαλεί μικρότερη ανάκλαση. Ωστόσο τόσο το πλάτος όσο και η απόσταση θα πρέπει να είναι αχέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ που δημιουργείται στο υπόστρωμα. Για τις περισσότερες διατάξεις, η τυπική απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ισούται με $\lambda/2$, $\lambda/3$ ή $\lambda/4$, με $\lambda=2\pi/k$, όπου k είναι ο κυματαριθμός κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Το ακουστικό μήκος κύματος μπορεί επίσης να ληφθεί από την εξίσωση $\lambda=c/f$, όπου το c είναι η φασική ταχύτητα κύματος και f η κεντρική συχνότητα του επιφανειακού κύματος. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτροδίων και μειώνεται το ύψος τους τόσο αυξάνεται η μεταδιδόμενη ενέργεια κύματος και το πλάτος του κύματος.

Τα διακλαδισμένα ηλεκτρόδια λειτουργούν ως χωρητικό σύστημα και η συνολική τους χωρητικότητα δίνεται από την εξίσωση $C_{total} = 1/2\pi fZ$ με το Z να είναι η σύνθετη αντίσταση του IDT. Το μήκος επικάλυψης (aperture) των ηλεκτροδίων υπολογίζεται από την εξίσωση $W = C_{total} = C_o \cdot N$, με N να ισούται με τον συνολικό αριθμό των ηλεκτροδίων (fingers) του IDT.



Σχήμα 14: Χαρακτηριστικά διακλαδισμένων ηλεκτροδίων. Το s (Spacing) είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και ισούται συνήθως με $\lambda/4$ στην διάταξη γραμμή καθυστέρησης (Delay Line). Το w είναι το πλάτος δακτύλων των ηλεκτροδίων. Το W_1 είναι το μήκος επικάλυψης (Aperture) των ηλεκτροδίων. Το G είναι η απόσταση μεταξύ των IDTs, όταν υπάρχουν 2 σετ (διάταξη Two-Port). Το W είναι το συνολικό μήκος της διάταξης συμπεριλαμβανομένων των ακροδεκτών. Το l συμπεριλαμβάνει το μήκος του IDT στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα ηλεκτρόδια (Fingers). Το l_1 είναι το μήκος των ακροδεκτών και το l_2 το συνολικό ύψος της διάταξης.

Για την σωστή λειτουργία και ανίχνευση ενός αισθητήρα SAW, η κεντρική συχνότητα και οι απώλειες είναι ζωτικής σημασίας. Για παράδειγμα αισθητήρες SAW υψηλής ευαισθησίας συνήθως πρέπει να έχουν κεντρική συχνότητα στην περιοχή των GHz και για να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα υφίσταται ορισμένες απώλειες. Γι' αυτό υπάρχουν ποικίλα σχέδια ηλεκτροδίων που ενισχύουν την απόδοση, την σταθερότητα και είναι εξατομικευμένα σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμογή. Κάθε σχέδιο έχει τόσο μειονεκτήματα όσο και πλεονεκτήματα.

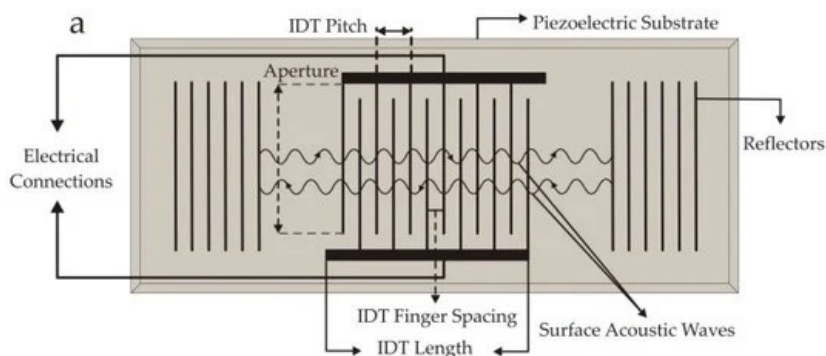
Τα διακλαδισμένα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες SAW μπορεί να αποτελούνται από ένα μόνο σύνολο IDTs (one-port) τα οποία είναι τοποθετημένα στην διάταξη, από δύο σύνολα (two-port) ή και περισσότερα. Στις διατάξεις one-port παράγονται επίπεδα οδεύοντα κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Ωστόσο, διατάξεις two-port ή με περισσότερα σύνολα IDTs χρησιμοποιούνται για την παραγωγή στάσιμων κυμάτων ή για την παραγωγή επιθυμητών παρεμβολών.[12]

Μια τυπική διάταξη SAW αποτελεί ο ταλαντωτής (resonator). Αρχικά οι SAW resonators αναπτύχθηκαν το 1991 από τους A. Lonsdale και B. Lonsdale ως ασύρματοι αισθητήρες παραμόρφωσης και στρέψης σε περιστρεφόμενους άξονες και στην συνέχεια το 1992 οι Baldauf και Schrufer ως SAW resonators αισθητήρες στρέψης. Από το 1992 έως το 1997, ο Buff και η ομάδα του συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη ασύρματων αισθητήρων resonator και έκαναν χρήση τριών αισθητήρων για την ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας και της πίεσης για τα ελαστικά του αυτοκινήτου. Έπειτα από το 2001 μέχρι το 2006 αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο βιομηχανοποιημένο σύστημα παρακολούθησης πίεσης ελαστικών.

Ο θεμελιώδης τύπος του SAW resonator που παρουσιάζεται στην εικόνα 15 αποτελείται από πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα, IDTs και ανακλαστές (reflectors) Bragg. Οι ανακλαστές Bragg σχηματίζονται από κανονικά διατεταγμένες μεταλλικές λωρίδες. Κάθε λωρίδα αντανακλά μία μικρή ποσότητα του ακουστικού επιφανειακού κύματος. Όταν η εξωτερική διαταραχή αλλάξει είτε το μέγεθος του resonator είτε την ταχύτητα διάδοσης του κύματος τότε θα αλλάξει και η κεντρική συχνότητα της διάταξης.[17]

Σε αυτή τη διάταξη υπάρχουν ειδικά σχεδιασμένοι ανακλαστές, όπου η περίοδος του ισούται με $\lambda/2$ και χρησιμοποιούνται για την ανάκλαση των επιφανειακών κυμάτων προς τα ηλεκτρόδια με στόχο την επίτευξη του συντονισμού. Μια τέτοια συσκευή SAW περιέχει μόνο ένα σύνολο IDTs

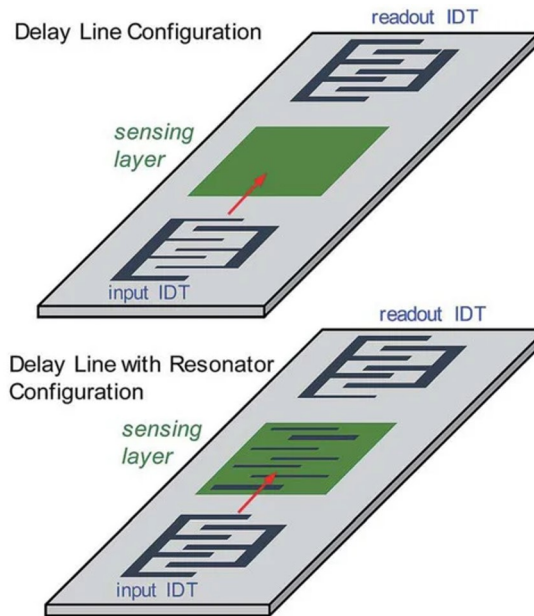
(one-port), αλλά δύο ανακλαστήρες, έναν στη μία και έναν στην άλλη μεριά του υποστρώματος και εκατέρωθεν των ηλεκτροδίων για την λήψη κατάλληλων σημάτων και την επίτευξη του συντονισμού. Τέτοιου είδους διατάξεις one port χρησιμοποιούνται κατά βάση για την κατασκευή κυκλωμάτων ως ταλαντωτές, σε αντίθεση με τις διατάξεις two-port που είναι χρήσιμες για την ανάπτυξη ειδικών φίλτρων συχνότητας.[18]



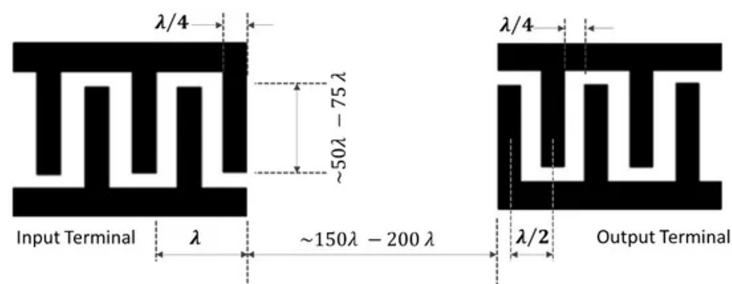
Σχήμα 15: Τυπική διάταξη ενός ταλαντωτή (Resonator) που περιέχει ένα μόνο σύνολο IDTs (One-Port) [18]

Η βασικότερη two-port διάταξη ηλεκτροδίων σε μία συσκευή SAW είναι ο σχηματισμός γραμμής καθυστέρησης (delay line), η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 16. Η διάταξη της γραμμής καθυστέρησης αποτελείται από δύο σύνολα IDTs, τα οποία είναι τοποθετημένα στο πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα. Το πρώτο σύνολο IDTs ή τα IDTs εισόδου δημιουργούν τα επιφανειακά κύματα και το παραγόμενο κύμα διαδίδεται μέσω της επιφάνειας ανίχνευσης. Το κύμα αλληλεπιδρά και εξαιτίας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου παράγεται στο δεύτερο σύνολο IDTs ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο αποτελεί το σήμα λήψης. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων λήψης και των ηλεκτροδίων εισόδου ονομάζεται γραμμή καθυστέρησης και υπάρχει κατά βάση εναποθετημένο ένα στρώμα ανίχνευσης. Μία πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής Q ή συντελεστής ποιότητας, ο οποίος χρησιμοποιείται στους τομείς της φυσικής και της μηχανικής. Το Q είναι μία αδιάστατη παράμετρος που υποδηλώνει τις απώλειες ενέργειας. Για τα ηλεκτρικά εξαρτήματα και τα εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων, ο συντελεστής Q είναι ο λόγος της ενέργειας που αποθηκεύεται σε έναν resonator προς την ενέργεια που παρέχεται σε αυτόν ανά κύκλο. Ένας συντελεστής Q με υψηλές τιμές αυξάνει τον συντονισμό, ο οποίος ενισχύει άμεσα την ευαισθησία και την επιλεκτικότητα των αισθητήρων SAW. Οι ενεργειακές απώλειες είναι μικρότερες όταν το Q είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα οι ταλαντωτές να ταλαντώνονται σε ένα σταθερό εύρος συχνοτήτων βελτιώνοντας έτσι την σταθερότητα των συσκευών.

Για την ενίσχυση του συντελεστή ποιότητας και την μείωση των απωλειών μπορούν να τοποθετηθούν ανακλαστήρες και σε αυτή την διάταξη παρόλου που είναι two-port, καθώς επίσης θα συμβάλλουν σημαντικά και στην βελτίωση της απόδοσης. Η γενική διάταξη γραμμής καθυστέρησης διαθέτει συνήθως ηλεκτρόδια που αποτελούνται σαν δομή πλέγματος και τα δάκτυλα των ηλεκτροδίων μεταξύ τους απέχουν απόσταση ίση με $\lambda/4$ (βλ. εικόνα 17).[12]



Σχήμα 16: Διάταξη γραμμής καθυστέρησης (Delay Line) με και χωρίς ταλαντωτή (Resonator) [12]

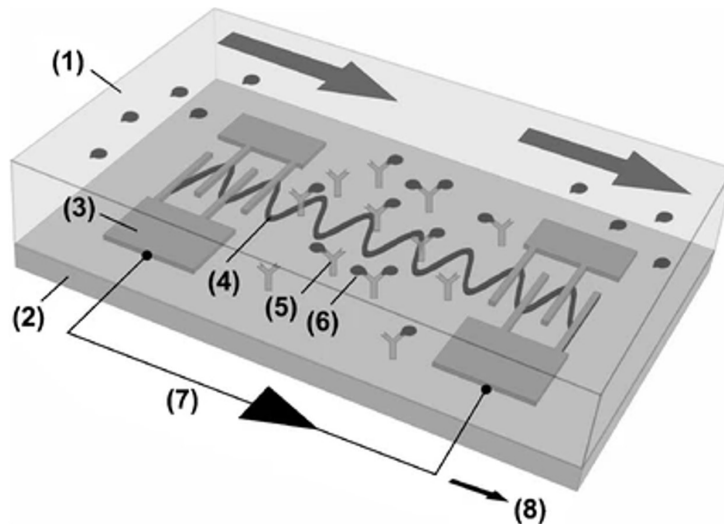


Σχήμα 17: Σχηματική απεικόνιση αμφίδρομων (Bi-Directional) ηλεκτροδίων [12]

2.6 Εφαρμογές Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων

2.6.1 Βιοαισθητήρες

Ευρέως διαδεδομένες είναι οι διατάξεις των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων για την κατασκευή ποικίλων βιοαισθητήρων. Ένας βιοαισθητήρας (βλ. εικόνα 18) περιλαμβάνει έναν μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει τη βιοχημική απόκριση σε ένα μετρήσιμο σήμα εξόδου. Οι συσκευές SAW όπως έχει ήδη αναφερθεί παράγουν και ανιχνεύουν το ακουστικό κύμα μέσω IDTs στην επιφάνεια ενός πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος. Για να γίνει η χρήση της συσκευής SAW ως βιοαισθητήρας, πρέπει αρχικά να πραγματοποιηθεί επικάλυψη της διάταξη με την αναλυόμενη ουσία. Ειδικά μόρια (τα αντισώματα) είναι ακινητοποιημένα στην επιφάνεια της συσκευής για να παγιδεύσουν τα μόρια της αναλυόμενης ουσίας (τα αντιγόνα) μέσω της ροής του δείγματος. Η αναλυόμενη ουσία που δεσμεύεται στα ακινητοποιημένα μόρια σύλληψης θα επηρεάσουν την ταχύτητα του SAW και συνεπώς το σήμα εξόδου που παράγεται από τα ηλεκτρονικά μέρη της συσκευής. Ενδεικτικά οι συνηθέστερες εφαρμογές SAW στον τομέα της βιοϊατρικής είναι για την ανίχνευση πρωτεϊνών, DNA, βακτηρίων, μικρών μορίων και ιών.[19]



Σχήμα 18: Βασική απεικόνιση ενός βιοαισθητήρα επιφανειακού ακουστικού και συγκεκριμένα ενός ανοσο-αισθητήρα SAW. Τα βέλη στο επάνω μέρος δείχνουν τη ροή του υγρού δείγματος (1) στο οποίο είναι βυθισμένος ο αισθητήρας. Τα στοιχεία του βιοαισθητήρα SAW είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (2), τα IDTs (3), το επιφανειακό ακουστικό κύμα (4) και τα ακινητοποιημένα αντισώματα (5) που αντιστοιχούν στα μόρια της αναλυόμενης ουσίας (6) στο δείγμα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα καθοδήγησης (7) συμβάλλουν στην λειτουργία του αισθητήρα SAW και δημιουργούν αλλαγές στο σήμα εξόδου (8) καθώς η αναλυόμενη ουσία δεσμεύεται στην επιφάνεια του αισθητήρα. [19]

2.6.2 Εξοπλισμός Ηλεκτρονικών Ισχύος

Ο εξοπλισμός ισχύος λειτουργεί πάντα σε υψηλή τάση, ισχυρό φορτίο και μακροχρόνια αδιάκοπη κατάσταση, το οποίο συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Ο εξοπλισμός ισχύος υψηλής τάσης που περιβάλλει τη διανομή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου κατά τη λειτουργία απαιτεί οι αισθητήρες ανίχνευσης θερμοκρασίας να έχουν συνήθως παθητική λειτουργία προκειμένου να διασφαλίζεται η ασφάλεια του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Επιπλέον, οι συσκευές ανίχνευσης θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, επειδή ο εξοπλισμός ισχύος απαιτεί τη διατήρηση μιας συγκεκριμένης απόστασης ασφαλείας. Ακόμη, οι αισθητήρες θα πρέπει να προσαρμόζουν την εγκατάστασή τους σε ποικίλους τύπους εξοπλισμών ισχύος και ο χρόνος που θα χρειαστούν ξανά συντήρηση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος ώστε να διασφαλίζεται η μακροπρόθεσμη συνεχής λειτουργία του εξοπλισμού ισχύος.

Η τεχνολογία SAW που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοκρασίας έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η παθητικότητα, η ασφάλεια, η αξιοπιστία, η εύκολη εγκατάσταση, η περιβαλλοντική προσαρμοστικότητα, είναι αποδοτική οικονομικά και έχει πλεονεκτήματα στην παρακολούθηση του εξοπλισμού ισχύος. Τέλος ο αισθητήρας SAW έχει εφαρμοστεί πλήρως στην παρακολούθηση θερμοκρασίας του εξοπλισμού διανομής υψηλής τάσης, των διαύλων επικοινωνίας, του διακόπτη εξωτερικού χώρου, των πυκνωτών, των μετασχηματιστών και άλλου εξοπλισμού ισχύος.

2.6.3 Σιδηροδρομικά Οχήματα

Η υψηλή ταχύτητα του τρένου οδηγεί στην αύξηση της πρόσφυσης, η οποία αυξάνει την τριβή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς, το πλάτος κραδασμών και τη δυναμική επίδραση του άξονα. Με την φθορά του άξονα των τροχών της αμαξοστοιχίας, αυξάνεται και η θερμότητα και το πλάτος των κραδασμών επιταχύνοντας έτσι την επέκταση των ελαττωμάτων του άξονα, που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός φαύλου κύκλου και επηρεάζει την κανονική λειτουργία της αμαξοστοιχίας. Ως εκ τούτου, η έγκαιρη διάγνωση των ελαττωμάτων του άξονα αμαξοστοιχίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Γενικά, μέσω της παρακολούθησης της θερμοκρασίας και των κραδασμών του

άξονα για να παρατηρείται η κατάσταση λειτουργίας των αξόνων αμαξοστοιχίας, ο παθητικός ασύρματος αισθητήρας SAW είναι μία καλή επιλογή. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας SAW μπορούν να εγκατασταθούν στον άξονα του τρένου που απαιτείται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, ο οποίος μπορεί να παρακολουθεί με ακρίβεια τις αλλαγές θερμοκρασίας.

2.6.4 Ανίχνευση Υγρασίας

Η ανίχνευση υγρασίας διαδραματίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο καθημερινά. Αρχικά, η ανίχνευση υγρασίας συναντάται στην αποθήκευση τροφίμων και στην διαφύλαξη τους από τυχόν μύκητες όπως είναι η ανάπτυξη μούχλας, σε καλλιέργειες που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκήπια, στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος, στις ηλεκτρικές συσκευές, στις μεταφορές, στην μετεωρολογία και σε στρατιωτικά ζητήματα. Ωστόσο, η υγρασία είναι μία παράμετρος που είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια σε ένα συμβατικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένας νέος τύπος αισθητήρα υγρασίας με υψηλή απόδοση, όπως για παράδειγμα υψηλή ευαισθησία και γρήγορη ταχύτητα απόκρισης. Ερευνητές κατασκεύασαν έναν ταλαντωτή (resonator) SAW υψηλής συχνότητας ως το βασικό στοιχείο μετατροπής σε έναν αισθητήρα υγρασίας χρησιμοποιώντας την ακρίβεια της διαδικασίας της λιθογραφίας και ανέπτυξαν το υψηλής απόδοσης κύκλωμα του ταλαντωτή SAW υψηλής συχνότητας και το πλήρες σύστημα ανίχνευσης που έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις για την ανίχνευση υγρασίας.[20]

2.6.5 Ανίχνευση Χημικών και Αερίων

Οι συσκευές που βασίζονται στην τεχνολογία SAW έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στο κομμάτι της ανίχνευσης χημικών και αερίων με το πέρασμα των δεκαετιών. Η βασική αρχή αυτού του τύπου αισθητήρα είναι παρόμοια με εκείνη του βιοαισθητήρα, καθώς τα χημικά ή αέρια μόρια που πρέπει να ανιχνευτούν προσκολλώνται στην επιφάνεια του στρώματος που έχει τοποθετηθεί ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Η επιφάνεια του στρώματος αυτού που προσκολλώνται τα μόρια των ουσιών που πρέπει να ανιχνευτούν έχει ως αποτέλεσμα την διαταραχή του υλικού και συνεπώς το γεγονός αυτό επηρεάζει και το ακουστικό κύμα. Συχνά μετράται η αλλαγή στην ταχύτητα του ακουστικού κύματος που επηρεάζει τις συχνότητες και στην περίπτωση ανίχνευσης χημικών και αερίων προκαλείται κατά βάση αλλαγή στην συχνότητα. Αυτή η αλλαγή στη συχνότητα μελετάται σε βάθος και αναλύεται για την επικύρωση και τον ποσοτικό προσδιορισμό της αποτελεσματικής ανίχνευσης αερίων.

2.6.6 Εφαρμογές στη Μικρορευστομηχανική

Οι αισθητήρες επιφανειακών ακουστικών κυμάτων μπορούν να λειτουργήσουν και να αλληλεπιδράσουν ακόμη και σε υγρά μέσα. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης των ακουστικών επιφανειακών κυμάτων με υγρά μέσα μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά αποτελέσματα, που εκτός από την ανίχνευση των υγρών ουσιών μπορεί να πραγματοποιηθεί και χρήση τους για την ανάμειξη των υγρών στην περιοχή ανίχνευσης του αισθητήρα. Τα επιφανειακά ακουστικά κύματα χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της μικρορευστομηχανικής εδώ και δεκαετίες. Τέτοιους είδους εφαρμογές είναι ο διαχωρισμός σωματιδίων, απομόνωση κυττάρων, ο χειρισμός υγρών μέσων, η ανάμειξη μικρορευστών, η μεταφορά ρευστών και πολλών ακόμη. Επιπρόσθετα τα SAW χρησιμοποιούνται τόσο από αισθητήρες όσο και από ενεργοποιητές στον τομέα της μικρορευστομηχανικής. Στον τομέα της ανίχνευσης, ορισμένα σωματίδια επικαλύπτονται ανάμεσα στα δύο σύνολα των IDTs πάνω από το πιεζοηλεκτρικών υπόστρωμα. Η περιοχή ανίχνευσης σε μικρορευστομηχανικές διατάξεις περιέχει συνήθως κανάλια και το ρευστό το οποίο πρέπει να ανιχνευτεί διοχετεύεται κατά μήκος του καναλιού και αλληλεπιδρά με τα σωματίδια. Η αλληλεπίδραση αυτή λαμβάνει χώρα παρουσία των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων που δημιουργούνται λόγω του πιεζοηλεκτρικού υποστρώματος και γίνεται η ανάλυση της ουσίας.[12]

3 Ανάπτυξη Υμενίων Οξειδίου του Ψευδαργύρου (ZnO)

3.1 Πειραματική Διαδικασία Ανάπτυξης Υμενίων ZnO

Η σύνθεση των υμενίων του οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) πραγματοποιήθηκε με την χρήση της υδροθερμικής μεθόδου (Hydrothermal Growth) που περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου ανάπτυξης των υμενίων. Τα δείγματα τα οποία προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία ήταν συνολικά 24. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αναλυτική πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και τα δείγματα που μελετήθηκαν.

3.1.1 Προετοιμασία του Υποστρώματος

Η προετοιμασία των υποστρωμάτων πάνω στα οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη υμενίων οξειδίου του ψευδαργύρου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα βήματα για την επιτυχή ολοκλήρωση της συνολικής διαδικασίας. Για την αποφυγή μόλυνσης είτε λόγω σκόνης που βρίσκεται στο περιβάλλον είτε εξαιτίας ανθρώπινου παράγοντα πραγματοποιείται σχολαστικός καθαρισμός των δειγμάτων. Για την μελέτη της ανάπτυξης των υμενίων ZnO χρησιμοποιήθηκαν δισκία πυριτίου (Si(100)) στα οποία είχε αναπτυχθεί θερμικό οξείδιο στην επιφάνεια (SiO_2). Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες για τον καθαρισμό των υποστρωμάτων. Η πρώτη κατηγορία είναι ο υγρός χημικός καθαρισμός (wet chemical cleaning) και ο στεγνός καθαρισμός (dry cleaning). Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ο καθαρισμός που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται piranha και ανήκει στην κατηγορία του υγρού χημικού καθαρισμού.

Αρχικά, τα δισκία πυριτίου καθαρίστηκαν με το διάλυμα piranha, το οποίο αποτελείται από ένα μείγμα θειικού οξέος (H_2SO_4 , 98%) και υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2 , 30%). Ο καθαρισμός αυτός είναι ζωτικής σημασίας, καθώς με αυτόν τον τρόπο απομακρύνονται ανεπιθύμητα οργανικά υπολείμματα και καθίσταται εφικτή η περαιτέρω επεξεργασία των δισκίων σε συνθήκες καθαρού χώρου (clean room). Με τον όρο clean room ορίζεται ένα απομονωμένο και κλειστό δωμάτιο και οι συνθήκες του είναι αυστηρά ελεγχόμενες ώστε το δωμάτιο να εμπίπτει τελικά σε μία από τις προκαθορισμένες κατηγορίες καθαρότητας βάση τα διεθνή πρότυπα. Ο καθορισμός της κατηγορίας του κάθε clean room πραγματοποιείται βάση της συγκέντρωσης και το μέγεθος των διαφόρων σωματιδίων που βρίσκονται στον αέρα όπως είναι η σκόνη και μπορούν να επηρεάσουν τις διατάξεις που παρασκευάζονται στο χώρο. Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα είναι η ακόλουθη:

- Σε ένα ποτήρι ζέσεως από Quartz προστίθενται πρώτα 500 mL H_2O_2 και έπειτα 500 mL H_2SO_4 και τοποθετείται στην ειδική εστία με απαγωγό. Η σειρά με την οποία προστίθενται οι παραπάνω ενώσεις είναι κρίσιμης σημασίας και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να διαφέρει. Το προκύπτον διάλυμα piranha είναι ισχυρά οξειδωτικό και αντιδρά εξωθερμικά όταν αναμειγνύονται τα αντιδρώντα
- Έπειτα, τοποθετούνται τα δισκία σε έναν ειδικό δειγματοφορέα από quartz και αφήνονται μέσα στο διάλυμα για 20 λεπτά.
- Τέλος, τα δισκία ξεπλένονται με καθαρό νερό (DI) και στεγνώνονται διεξοδικά σε ειδική συσκευή καθαρισμού και ξήρανσης με ροή αζώτου για να απαλλαγούν από σταγόνες και υγρασία.

Μετά τον καθαρισμό των δισκίων με διάλυμα piranha αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υποστρώματος ένα λεπτό υμένιο SiO_2 τριών έως πέντε νανομέτρων εξαιτίας του οξειδωτικού του χαρακτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μετατρέπεται η επιφάνεια του υποστρώματος από υδρόφοβη σε υδρόφιλη, γεγονός σπουδαίας σημασίας καθώς αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την

ορθή επίστρωση του στρώματος πυρήνωσης. Ορισμένα από αυτά τα δισκία πυριτίου αποθηκεύτηκαν σε τρυβλία στον καθαρό χώρο και σε άλλα πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της ξηρής θερμικής οξειδωσης. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε έναν φούρνο οξειδωσης όπου τα δισκία τοποθετούνται σε αυτόν με έναν ειδικό δειγματοφορέα όπου το αέριο οξυγόνο αντιδρά με το πυρίτιο και δημιουργείται διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 σε θερμοκρασία $1050^\circ C$. Στην διαδικασία αυτή λόγω του ότι είναι εξαιρετικά ελεγχόμενη υπάρχει χαμηλής τραχύτητας σύνθεση SiO_2 με υψηλή ποιότητα και καθαρότητα. Η διαδικασία για ανάπτυξη 100 nm διοξειδίου του πυριτίου διήρκεσε 80 λεπτά.

3.1.2 Επίστρωση του Στρώματος Πυρήνωσης (Seeding Layer Deposition)

Ως στρώμα πυρήνωσης (seeding layer) του οξειδίου του ψευδαργύρου ορίζεται ένα λεπτό υμένιο το οποίο έχει εναποτεθεί πάνω στο υπόστρωμα και δημιουργεί μία βάση πάνω στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των υμενίων του ZnO. Για την δημιουργία των “σπόρων” (seeds) ή αλλιώς των σημείων πυρήνωσης πραγματοποιείται ανόπτηση του υποστρώματος σε αυστηρά καθορισμένη θερμοκρασία, καθώς επηρεάζει την κρυσταλλικότητα των “σπόρων” ZnO από τους οποίους αρχίζει και η ανάπτυξη των νανοσωματιδίων, όπου προκύπτει η θερμική αποσύνθεση του οξικού ψευδαργύρου (Zinc Acetate Dihydrate) στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη ενός λεπτού υμενίου το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους ZnO σε διαστάσεις νανομέτρων.

Στα πειράματα που έλαβαν χώρα για την ανάπτυξη υμενίων του οξειδίου του ψευδαργύρου στα υποστρώματα Si και SiO_2 το στρώμα πυρήνωσης ZnO πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της επίστρωσης δια περιστροφής ή αλλιώς spin coating. Αρχικά η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την χρήση ενός κολλοειδούς μίγματος. Το κολλοειδές μείγμα αποτελείται από διασπαρμένα σωματίδια με διαστάσεις από 1 έως 1000 nm. Στο κολλοειδές μείγμα τα σωματίδια δεν καταβυθίζονται, παραμένουν διασπαρμένα στον διαλύτη και η διασπορά των δύο ουσιών είναι ομοιόμορφη. Όταν γίνεται η διασπορά ενός στερεού σε ένα υγρό τότε το διάλυμα αυτό ονομάζεται γέλη ή αλλιώς sol-gel εξαιτίας του spin coating. Το διάλυμα αυτό αποτελείται από ένυδρο οξικό ψευδάργυρο ($C_4H_{10}O_6Zn$ ή $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) της εταιρείας Merck και αιθανόλη (C_2H_5OH) της εταιρείας VWR. Το διάλυμα αυτό εξαιτίας του διαλύτη ονομάζεται e-gel και η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την παρασκευή είναι η ακόλουθη:

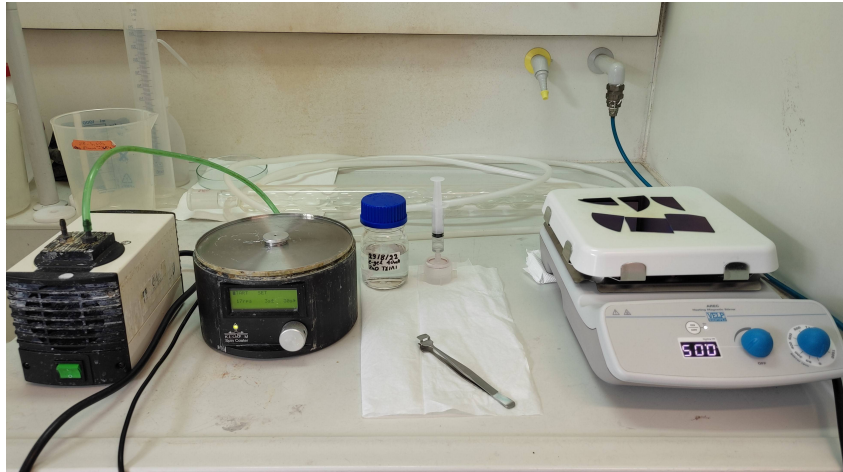
- Αρχικά, χρειάζεται ένα γυάλινο μπουκάλι χωρητικότητας μεγαλύτερη των 80 mL. Ξεπλένεται το μπουκάλι και το πώμα του με ακετόνη, έπειτα με ισοπροπανόλη και τέλος με καθαρό νερό (DI) και τοποθετείται στην θερμαντική πλάκα (hot plate) στους $100^\circ C$ μέχρι να αφαιρεθεί όλη η ποσότητα της υγρασίας. Η αφαίρεση της υγρασίας είναι ζωτικής σημασίας καθώς η ύπαρξη της καθιστά την παρασκευή e-gel λανθασμένη.
- Για την παρασκευή διαλύματος συγκέντρωσης 40 mM προστίθενται 80 mL αιθανόλης και έπειτα 0,7024 γραμμάρια ένυδρου οξικού ψευδαργύρου (βλ. εικόνα 19).
- Μετά την προσθήκη της αιθανόλης και του ένυδρου οξικού ψευδαργύρου προστίθεται στο μπουκάλι μαγνητικός αναδευτήρας. Έπειτα τοποθετείται στην θερμαντική πλάκα (hot plate) σε θερμοκρασία $130^\circ C$ ώστε η θερμοκρασία του διαλύματος να φτάσει στους $60^\circ C$ για 60 λεπτά με μαγνητική ανάδευση στις 400 στροφές το λεπτό. Το μπουκάλι κατά την θέρμανση δεν είναι σφικτά κλεισμένο ώστε να διαφεύγουν τυχόν ατμοί αιθανόλης.
- Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αφήνεται το διάλυμα για 24 ώρες μέχρι να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου και τότε είναι έτοιμο για χρήση.



Σχήμα 19: Ζύγιση ένυδρου οξικού ψευδαργύρου για την παρασκευή του e-gel.

Η πειραματική διάταξη για την επίστρωση του e-gel παρουσιάζεται στην εικόνα 20 και περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:

- Αρχικά για την διαδικασία της επίστρωσης (spin coating) θα χρειαστούν μια συσκευή επίστρωσης δια περιστροφής (spinner), μια αντλία κενού, μία θερμοαντική πλάκα, μία σύριγγα, ένα φίλτρο (0,45 μm pores) και το διάλυμα e-gel.
- Ο spinner ρυθμίζεται στα 17 rps (1000 rpm) για 30 δευτερόλεπτα με ramp time (ο χρόνος μέχρι να αποκτήσει ο spinner τις ζητούμενες στροφές) 3 δευτερόλεπτα. Παράλληλα ενεργοποιείται η αντλία κενού που είναι συνδεδεμένη με τον spinner για την συγκράτηση του δείγματος.
- Με την σύριγγα συλλέγεται ικανοποιητική ποσότητα του e-gel, πραγματοποιείται αφαίρεση του αέρα και τοποθετείται το φίλτρο στο ρύγχος της σύριγγας. Ενσταλάζεται ικανή ποσότητα πάνω στο υπόστρωμα ικανή να καλύψει τουλάχιστον τα $\frac{2}{3}$ της επιφάνειας του.
- Στην συνέχεια ενεργοποιείται ο spinner, ο οποίος λόγω του φαινομένου της φυγοκέντρησης δημιουργείται ένα λεπτό ομοιόμορφο υμένιο με ταυτόχρονη απόρριψη της περίσσειας ποσότητας του διαλύτη.
- Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας το δείγμα τοποθετείται στην θερμοαντική πλάκα για 10 λεπτά σε θερμοκρασία 500°C.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνολικά 10 φορές για την δημιουργία του επιθυμητού αριθμού επιστρώσεων.



Σχήμα 20: Πειραματική διάταξη επίστρωσης e-gel.

3.1.3 Διαδικασία Ανάπτυξης Υμενίων ZnO

Τα δείγματα μετά την επίστρωση τους με το e-gel εισάγονται στο λουτρό ανάπτυξης (chemical bath), αφού πρώτα παρασκευαστεί το διάλυμα στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των υμενίων. Η παρασκευή του διαλύματος πραγματοποιείται με την ανάμιξη ένυδρου νιτρικού ψευδαργύρου (Zinc Nitrate Hexahydrate) της εταιρείας Sigma-Aldrich και εξαμεθυλοτετραμίνης (Hexamethylenetetramine - HMTA) της εταιρείας Panreac σε καθαρό νερό (DI) με ισομοριακή αναλογία ανάμεσα στα ZNH και HMTA συγκέντρωσης $C = 200 \text{ mM}$.

Η συγκέντρωση ισούται με $C = n/V$, όπου C είναι η συγκέντρωση σε Molarity και υποδηλώνει τον αριθμό των moles της διαλυμένης ουσίας σε 1 L διαλύματος. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ο όγκος του διαλύματος ήταν ίσος με $V = 700 \text{ mL}$. Επομένως από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι $n = C \cdot V \Rightarrow n = 140 \text{ mmol}$. Τα mol μιας ουσίας προκύπτουν από τον τύπο $n = m/M_r$, όπου m η μάζα της ουσίας σε γραμμάρια και M_r το μοριακό βάρος της ουσίας. Το μοριακό βάρος του ZNH ισούται με $297,49 \text{ g/mol}$ και του HMTA ισούται με $140,186 \text{ g/mol}$. Κατ' επέκταση προκύπτουν οι ακόλουθες μάζες:

$$m_{ZNH} = n \cdot M_r = 140 \text{ mmol} \cdot \frac{297,49 \text{ g}}{\text{mol}} = 41,65 \text{ g}$$

$$m_{HMTA} = n \cdot M_r = 140 \text{ mmol} \cdot \frac{140,186 \text{ g}}{\text{mol}} = 19,63 \text{ g}$$

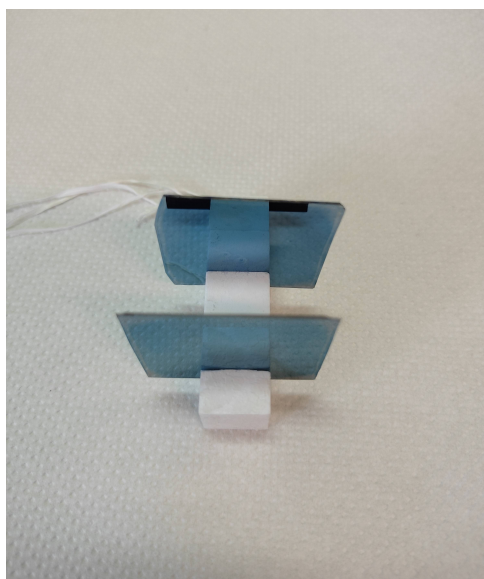
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 21. Το διάλυμα παρασκευάζεται σε ένα ποτήρι ζέσεως αφού πρώτα έχει καθαριστεί με καθαρό νερό (DI). Αρχικά προστίθεται στο ποτήρι ζέσεως η απαιτούμενη ποσότητα του καθαρού νερού, η οποία έχει μετρηθεί με την βοήθεια ενός ογκομετρικού κυλίνδρου. Έπειτα προστίθεται ο ένυδρος νιτρικός ψευδάργυρος, όπου πραγματοποιείται ανάδευση με την βοήθεια μεταλλικής ράβδου μέχρι την πλήρη διάλυση του. Στη συνέχεια, προστίθεται η εξαμεθυλοτετραμίνη όπου πραγματοποιείται η διάλυση της με την ίδια ακριβώς μέθοδο. Τέλος προστίθεται μαγνητικός αναδευτήρας στο ποτήρι ζέσεως και τοποθετείται στο θερμαντικό λουτρό ανάπτυξης με ενεργοποιημένη την μαγνητική ανάδευση σε μία στροφή το δευτερόλεπτο για μισή ώρα σε θερμοκρασία 94 έως $95,5^\circ\text{C}$ ώστε το να φτάσει διάλυμα τους 87°C . Πέντε λεπτά πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας απενεργοποιείται η μαγνητική ανάδευση ώστε να παραμείνει στον πυθμένα του δοχείου το ίζημα. Το ποτήρι ζέσεως όταν εισαχθεί στο λουτρό σκεπάζεται με πώμα στο οποίο είναι τοποθετημένη μία κάθετη γυάλινη ράβδος η οποία λειτουργεί ως ψυκτήρας καθώς από το εσωτερικό της περνάει νερό για την αποφυγή απομάκρυνσης υδρατμών.

Παράλληλα, στο διάλυμα είναι τοποθετημένος ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ο οποίος ελέγχει και καταγράφει συνεχώς την θερμοκρασία.



Σχήμα 21: Πειραματική διάταξη ανάπτυξης νανοδομών ZnO με την διαδικασία της υδροθερμικής μεθόδου.

Μετά το πέρας της μισής ώρας και την άνοδο της θερμοκρασίας του διαλύματος στους 87°C τοποθετούνται τα δείγματα. Η εισαγωγή των δειγμάτων γίνεται με την βοήθεια ενός ειδικά σχεδιασμένου δειγματοφορέα (βλ. εικόνα 22), ο οποίος τοποθετείται στο ποτήρι ζέσεως με την επιστρωμένη μεριά των δειγμάτων να κοιτάζει προς τον πυθμένα του δοχείου. Η διάταξη παραμένει ίδια με πριν με την ύπαρξη του ψυκτήρα, του θερμομέτρου και την θερμοκρασία να διατηρείται στους 87°C μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος. Ο χρόνος της ανάπτυξης των υμενίων καθορίζεται από το πάχος του υμενίου που προσδοκάται να επιτευχθεί. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία ανάπτυξης τα δείγματα αφαιρούνται από το διάλυμα και με την βοήθεια υδροβολέα καθαρίζονται σχολαστικά με καθαρό νερό και τοποθετούνται στην θερμοαντική πλάκα στους 100°C μέχρι να αφαιρεθεί όλη η υγρασία από τα δείγματα.



Σχήμα 22: Ειδικός δειγματοφορέας για την τοποθέτηση των δειγμάτων στο λουτρό ανάπτυξης.

Κατόπιν ολοκλήρωσης του πειράματος εξαιρετικά σημαντικός είναι ο καθαρισμός του γυάλινου δοχείου ζέσεως. Αρχικά αδειάζεται το διάλυμα και ξεπλένεται το δοχείο με καθαρό νερό. Έπειτα από τον καθαρισμό του με καθαρό νερό παρατηρείται στα τοιχώματα ίζημα από το διάλυμα, το οποίο για να απομακρυνθεί πρέπει να ξεπλυθεί με οξικό οξύ. Τέλος ξεπλένεται εκ νέου το δοχείο με άφθονο καθαρό νερό και είναι έτοιμο για επόμενη χρήση.

3.2 Ανάπτυξη Υμενίων ZnO

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης των υμενίων ο παράγοντας της πειραματικής του οποίου εξετάστηκε η επίδραση του ήταν ο χρόνος παραμονής των δειγμάτων στο λουτρό ανάπτυξης. Ως βασικό στόχο τα πειράματα αυτά είχαν την εύρεση μιας ιδανικής συνθήκης η οποία θα βελτιστοποιούσε την ανάπτυξη υποστρωμάτων από οξειδίο του ψευδαργύρου με χρήση της υδροθερμικής μεθόδου για την κατασκευή διατάξεων ακουστικών επιφανειακών κυμάτων. Στα πειράματα που έλαβαν χώρα η εναπόθεση του στρώματος πυρήνωσης (seeding layer) πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία σε όλα τα δείγματα η οποία περιγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

3.2.1 Τεχνικές Χαρακτηρισμού Υμενίων ZnO

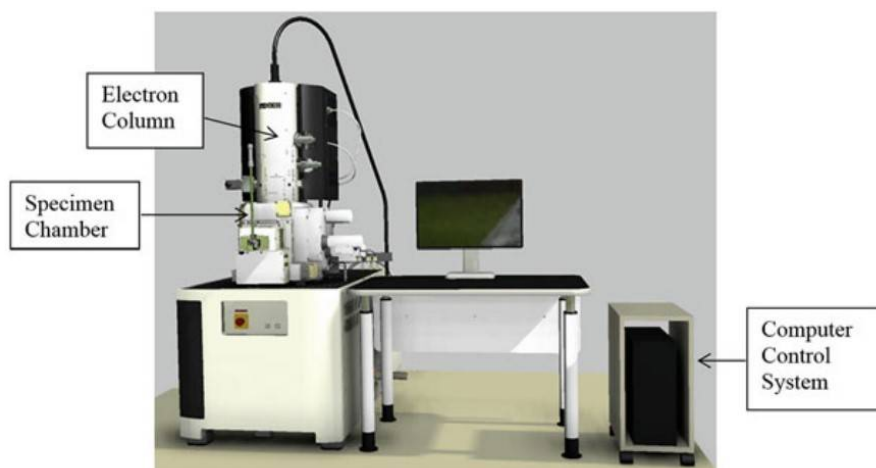
Η μελέτη της μορφολογίας των υμενίων που αναπτύχθηκαν είναι στάδιο κομβικής σημασίας για την εξαγωγή των συμπερασμάτων που θα εξαχθούν από τα πειράματα. Απαραίτητη είναι τόσο η μελέτη της επιφάνειας των υποστρωμάτων που αναπτύχθηκαν όσο και του ύψους αυτών. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη των υμενίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Scanning Electron Microscope–SEM) και του λογισμικού επεξεργασίας εικόνων ImageJ.

3.2.1.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Η κύρια λειτουργία του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Scanning Electron Microscope), το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 23, είναι ακριβώς αυτή όπως οποιουδήποτε άλλου μικροσκοπίου, δηλαδή η μεγέθυνση αντικειμένων και χαρακτηριστικών που είναι άορα στην ανθρώπινη όραση εξαιτίας του μικροσκοπικού τους μεγέθους. Αντί για δέσμη φωτός που χρησιμοποιούν τα οπτικά μικροσκόπια για τον σχηματισμό εικόνων, το SEM χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων. Οι εικόνες λαμβάνονται με την σάρωση της επιφάνειας του δείγματος από μία δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας όπου και εξαιτίας της διαδικασίας αυτής έλαβε και το όνομα του. Τα ηλεκτρόνια είναι ικανά να αναλύσουν λεπτότερα χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες αντικειμένων και υλικών σε πολύ καλύτερο

βαθμό συγκριτικά με το οπτικό φως λόγω του μικρότερου μήκους κύματος τους. Ένα σύγχρονο SEM μπορεί να μεγεθύνει αντικείμενα έως και ένα εκατομμύριο φορές το αρχικό τους μέγεθος και να διακρίνει χαρακτηριστικά με διάσταση μικρότερη του ενός νανομέτρου. Επομένως είναι μία διάταξη η οποία χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες για την δομή, την μορφολογία και την σύσταση της επιφάνειας σε επίπεδο μικρο και νανοκλίμακας για την επεξεργασία των ιδιοτήτων ενός υλικού.

Το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να διακρίνει αντικείμενα με μέγεθος μικρότερο από 200 μm , ενώ ένα οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να μεγεθύνει εικόνες έως και 1000 φορές και να αναλύσει λεπτομέρειες που αγγίζουν διαστάσεις των 0,2 μm . Το όριο ανάλυσης (Resolution limit) ορίζεται ως η μικρότερη διακριτή απόσταση που ξεχωρίζει δύο αντικείμενα. Για παράδειγμα, δύο αντικείμενα τα οποία απέχουν απόσταση μικρότερη από 200 μm στο ανθρώπινο μάτι θα εμφανίζονται ως ένα αντικείμενο, καθώς δεν είναι σε θέση να αναλύσει λεπτομέρειες οι οποίες έχουν διαστάσεις μικρότερες από 200 μm . Επομένως το όριο ανάλυσης για το ανθρώπινο μάτι ορίζεται στα 200 μm . Τα ίδια αντικείμενα τα οποία παρατηρούνται κάτω από οπτικό μικροσκόπιο εμφανίζονται ως διακριτά, καθώς μπορεί εύκολα να διακρίνει αποστάσεις μικρότερες από 200 μm . Ωστόσο, εάν η απόσταση μεταξύ των αντικειμένων μειωθεί περαιτέρω σε λιγότερο από 0,2 μm , το μικροσκόπιο δεν θα μπορεί πλέον να τα διακρίνει ως δύο ξεχωριστά αντικείμενα και θα εμφανίζονται ένα ενιαίο. Γι' αυτό το 0,2 μm ορίζεται ως όριο ανάλυσης του οπτικού μικροσκοπίου. Συμπερασματικά όσο μικρότερη είναι η τιμή της διακριτής απόστασης, τόσο υψηλότερη είναι η ανάλυση ενός μικροσκοπίου.[21]



Σχήμα 23: Απεικόνιση των τριών βασικών τμημάτων του SEM: τη στήλη ηλεκτρονίων, τον θάλαμο δειγμάτων και το υπολογιστικό σύστημα ελέγχου.[21]

Σε μια διάταξη SEM παράγονται ηλεκτρόνια με πυράκτωση νήματος βολφραμίου κατά βάση, το οποίο λειτουργεί σαν κάθοδος. Όταν πραγματοποιείται αύξηση του ρεύματος τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται από την άνοδο στην κάθοδο, όπου με την επίδραση υψηλής τάσης επιταχύνονται. Η άνοδος λόγω του ότι είναι θετική προκαλεί ελκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια το οποίο συνεπάγεται το γεγονός ότι μπορεί να τα κατευθύνει και να τα επιταχύνει και επομένως να ελέγχει την ενέργεια τους. Η λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη η οποία κατευθύνεται παρουσία κενού ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές σε μία αρκετά λεπτή τομή του εξεταζόμενου δείγματος πραγματοποιείται με την βοήθεια παρουσίας ηλεκτρομαγνητικών φακών και πηνίων σάρωσης.

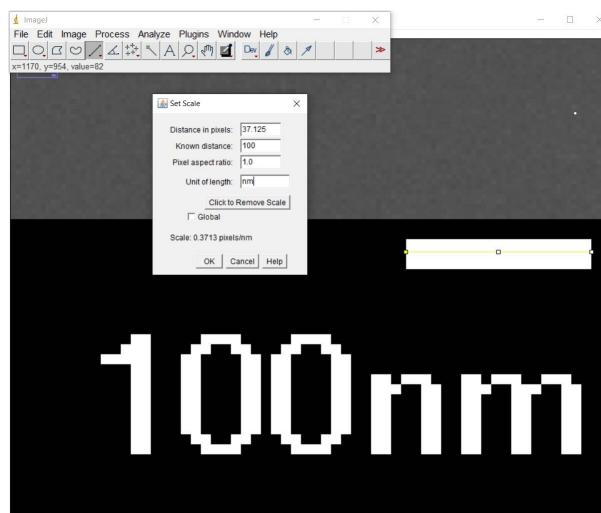
Η λειτουργία του SEM βασίζεται στα δευτερογενή ή οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από μία επιφάνεια κατά την διάρκεια σάρωσης της από μια εστιασμένη προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Τα πρωτογενή ηλεκτρόνια, τα οποία είναι τα ηλεκτρόνια της αρχικής δέσμης, μπορούν να σκεδαστούν μέσα στο δείγμα είτε ελαστικά είτε ανελαστικά. Όταν η σκέδαση τους είναι ελαστική αλλάζουν κατεύθυνση αλλά η ενέργεια τους παραμένει σταθερή και δεν μεταβάλλεται. Από την άλλη πλευρά όταν σκέδαση τους είναι ανελαστική, πραγματοποιείται αλλη-

λεπίδραση των ηλεκτρονίων με το εξεταζόμενο δείγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια της δέσμης να διεγείρουν φωτόνια ή πλασμόνια ή να ιονίζουν άτομα. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χαμηλής ενέργειας και προέρχονται από δείγματα ύστερα από την ανελαστική σκέδαση κοντά στην επιφάνεια όπου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του ειδικού στην επιφάνεια τους. Αντίθετα, τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι υψηλής ενέργειας, τα οποία προέρχονται από μεγαλύτερο βάθος των δειγμάτων που συνεπάγεται την παρουσία καλύτερων δεδομένων για την σύσταση των δειγμάτων. Η διακύμανση της έντασης των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται έχει επιρροή στη φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα που σαρώνεται συγχρονισμένα με την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων. Ως αποτέλεσμα αναπαράγεται η εικόνα της επιφάνειας στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα.[22]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασία για τη μελέτη της μορφολογίας των υμενίων που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης υψηλής ανάλυσης JSM 7401F FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) της εταιρείας JEOL. Το συγκεκριμένο μικροσκόπιο περιλαμβάνει πηγή ηλεκτρονίων εκπομπής πεδίου και αντικειμενικούς φακούς ισχυρά διεγερμένου μαγνητικού πεδίου με χαμηλά σφάλματα φακών. Λήφθηκαν εικόνες κάτοψης, εγκάρσιας διατομής καθώς και ορισμένες με κλίση 45 μοιρών για την μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των υμενίων που παρασκευάστηκαν. Η μέθοδος της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης συνέβαλε καθοριστικά στην εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επίδραση του χρόνου παραμονής των δειγμάτων στο λουτρό ανάπτυξης και πως αυτός επηρεάζει την μορφολογία και το πάχος των υμενίων. Βάση των εικόνων αυτών και την σύγκριση μεταξύ τους εξήχθησαν συμπεράσματα για τις ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης των υποστρωμάτων.

3.2.1.2 Επεξεργασία Εικόνων με το Λογισμικό ImageJ

Για την εξαγωγή και επεξεργασία των εικόνων από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ImageJ, το οποίο είναι ένα ελεύθερο λογισμικό πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων. Με το ImageJ είναι δυνατή η μέτρηση της επιφάνειας μιας εικόνας, των αποστάσεων καθώς και των γωνιών.

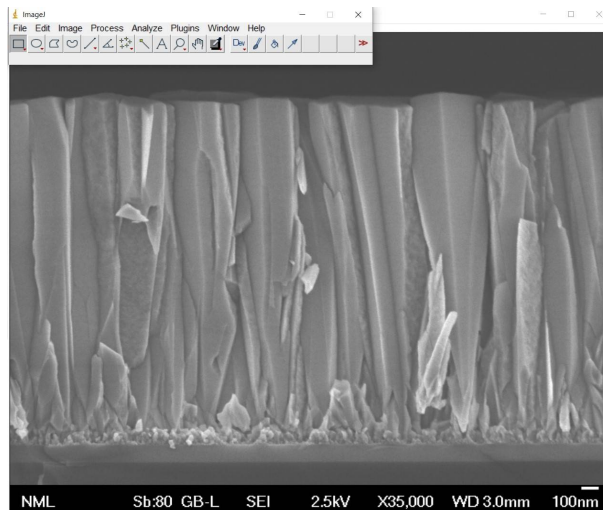


Σχήμα 24: Καθορισμός μίας γνωστής απόστασης στο ImageJ με βάση τα pixels της εικόνας.

Με το ImageJ πραγματοποιείται μέτρηση εικονοστοιχείων της ληφθείσας εικόνας και την αντιστοίχηση αυτών σε μία επιθυμητή μονάδα μέτρησης. Γι' αυτό των λόγω πριν την εξαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων μίας εικόνας, με βάση την αναγραφόμενη κλίμακα ρυθμίζεται η αντιστοιχία εικονοστοιχείων σε νανόμετρα. Από τις εικόνες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης λαμβάνονται μετρήσεις σχετικά με το ύψος των υμενίων ZnO που αναπτύσσονται στο υπόστρωμα. Για την μέτρηση των υψών επεξεργάζονται εικόνες εγκάρσιων διατομών των δειγμάτων. Τέλος

πραγματοποιείται η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την σύνθεση των νανοδομών.

Αναλυτικότερα, στην εικόνα 25 πραγματοποιείται χρήση του λογισμικού ImageJ κατά την επεξεργασία μιας εγκάρσιας διατομής του δείγματος G_{11} .



Σχήμα 25: Επεξεργασία εικόνας SEM εγκάρσιας διατομής στο ImageJ για εύρεση πάχους των υμενίων ZnO.

Το πρώτο βήμα που πραγματοποιείται πριν την λήψη δεδομένων είναι η βαθμονόμηση των μετρήσεων με τη διαμόρφωση της κατάλληλης κλίμακας μέτρησης. Αρχικά μεγεθύνουμε την φωτογραφία και μετράμε το μήκος των pixels από τα οποία αποτελείται η κλίμακα που υπάρχει στην εικόνα που προέκυψε από το SEM. Έπειτα το μήκος αυτό το ορίζεται ως 100 με μονάδα μέτρηση τα νανόμετρα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 24.

Λαμβάνονται εν συνεχεία μετρήσεις οι οποίες αφορούν το πάχος του υμενίου σε αρκετά σημεία του δείγματος για την λήψη επαρκών και έγκυρων δεδομένων. Μετά την υλοποίηση των μετρήσεων όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 26, το ImageJ παρέχει την δυνατότητα αποθήκευσης των μετρήσεων αυτών με την μορφή csv στις οποίες πραγματοποιείται περαιτέρω στατιστική επεξεργασία.

Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
5247.488	126.785	69	194	-90	1941.057
5232.912	117.545	85	179	-90	1935.658
5254.776	123.304	73	211	-90	1943.757
5247.488	129.444	78	209	-90	1941.057
5327.658	118.554	69	195	-90	1970.754
5225.624	130.929	89	197	-90	1932.958
5196.471	142.467	78	238	-90	1922.160
5342.234	129.123	70	255	90	1976.153
5327.658	135.114	78	213	90	1970.754
5320.370	143.468	82	201	90	1968.054
5305.793	119.007	72	255	90	1962.655
5283.929	128.981	69	216	90	1954.556
5181.894	130.979	76	243	-90	1916.760
5291.217	144.384	68	233	90	1957.255
5232.912	117.545	85	179	-90	1935.658

Σχήμα 26: Μετρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση της εικόνας 25

3.2.2 Εξάρτηση από τον Χρόνο Ανάπτυξης

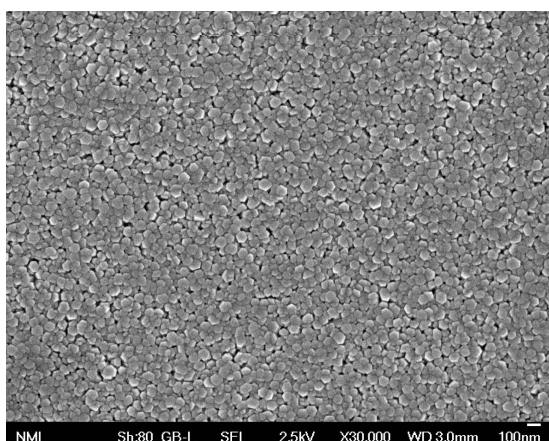
Στα εν λόγω πειράματα, πραγματοποιήθηκε η μελέτη της επίδρασης του χρόνου ανάπτυξης στην μορφολογία και το πάχος των υμενίων ZnO που δημιουργήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος. Τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν έχουν ως υπόστρωμα δισκία πυριτίου - Si/SiO_2 (nm) n-type και η επίστρωση του διαλύματος e-gel συγκέντρωσης 40 mM έχει πραγματοποιηθεί δέκα φορές. Η θερμική ανόπτηση των δειγμάτων ύστερα από την επίστρωση τους με e-gel έχει υλοποιηθεί σε θερμαντική πλάκα στους $500^\circ C$ για δέκα λεπτά η κάθε επίστρωση. Η σύνθεση των νανοδομών έχει πραγματοποιηθεί στους $87^\circ C$ και η συγκέντρωση των αντιδρώντων είναι ίση με 200 mM. Μελετήθηκαν έξι διαφορετικοί χρόνοι, 15, 30, 60, 120, 180 και 240 λεπτά.

Συνολικά στην πειραματική διαδικασία προέκυψαν 24 δείγματα. Στα 8 από τα 24 δείγματα πραγματοποιήθηκε ανάλυση και παρατήρηση της μορφολογίας των υμενίων που αναπτύχθηκαν με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων, τα οποία μελετήθηκαν με την χρήση του SEM.

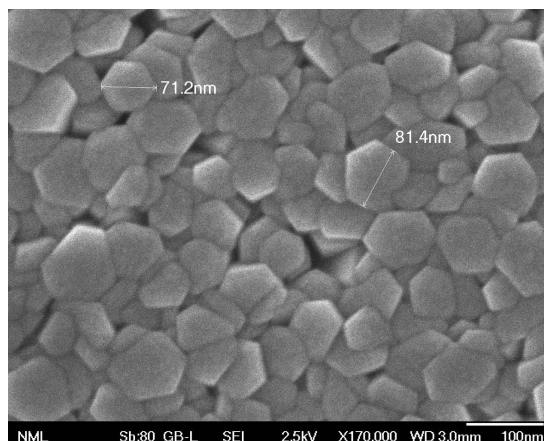
Όνομασία Δείγματος	Χρόνος Παραμονής στο Λουτρό Ανάπτυξης (min)
G_7	15
G_5	30
G_1, G_2	60
G_4, G_{13}, G_{14}	120
G_9, G_{10}	180
G_{11}	240

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των δειγμάτων που μελετήθηκαν με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

Στο συγκεκριμένο πείραμα που πραγματοποιήθηκε ο χρόνος ανάπτυξης των υμενίων ήταν 15 λεπτά. Αναλύθηκε η μορφολογία της επιφάνειας και του πάχους του δείγματος G_7 με τη χρήση SEM. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των ληφθέντων εικόνων με το λογισμικό ImageJ. Οι εικόνες εγκάρσιας διατομής από τις οποίες αντλήθηκαν δεδομένα για το πάχος των υμενίων ZnO του δείγματος ήταν τρεις. Λήφθηκαν μετρήσεις από 22 διαφορετικά σημεία σχετικά με το πάχος του υμενίου στην κάθε εικόνα, από τα οποία αντλήθηκαν πολύτιμα στατιστικά δεδομένα.



(α') Μεγέθυνση εικόνας 30000 φορές

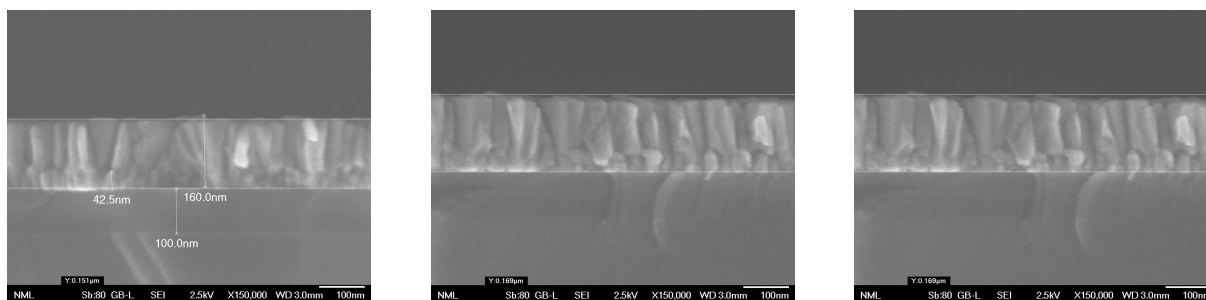


(β') Μεγέθυνση εικόνας 170000 φορές

Σχήμα 27: Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO του δείγματος G_7 για 15 λεπτά ανάπτυξης.

Όπως φαίνεται από τις εικόνες 27α' και 27β' το υμένιο ZnO το οποίο δημιουργείται πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος Si/SiO_2 αποτελείται από συμπαγή νανοραβδιά με διάμετρο μεταξύ των

50 και 100 νανομέτρων.



(α') Μεγέθυνση 150000 φορές

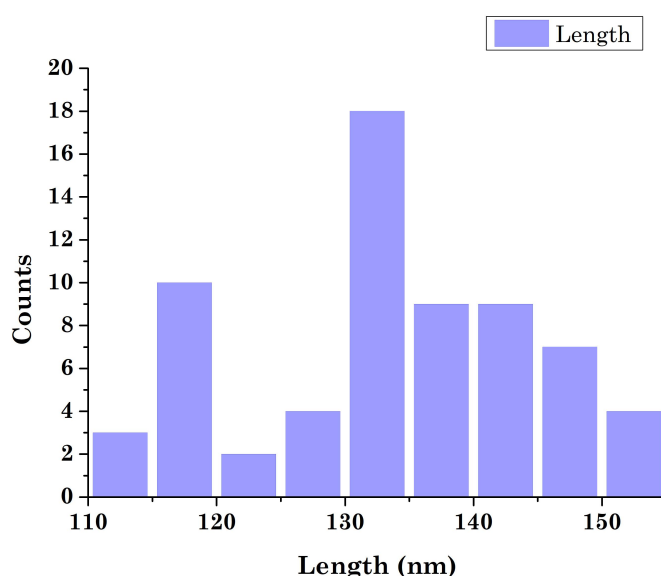
(β') Μεγέθυνση 150000 φορές

(γ') Μεγέθυνση 150000 φορές

Σχήμα 28: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_7 για 15 λεπτά ανάπτυξης.

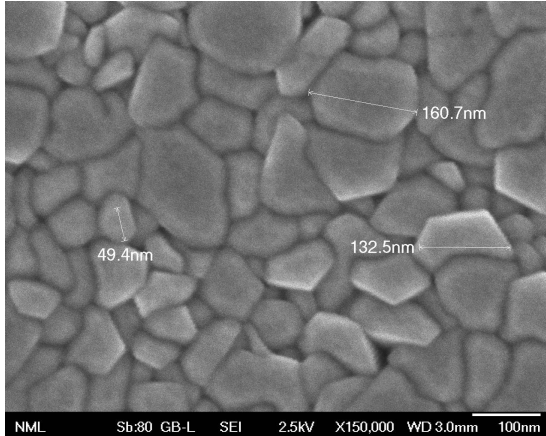
Παράλληλα στις εικόνες 28α', 28β' και 28γ' παρατηρείται η ανάπτυξη υμενίων πάνω στο SiO_2 με πάχος 100nm. Παρατηρείται ότι στην επιφάνεια του SiO_2 υπάρχει το seeding layer και πάνω σε αυτό αναπτύσσεται εν συνεχεία το ZnO. Η μέση τιμή του μήκους των νανοδομών του υμενίου που αναπτύχθηκαν χωρίς τον συνυπολογισμό του στρώματος πυρήνωσης για τις εικόνες 28α', 28β' και 28γ' ισούται με 121.83 nm, 143.07 nm και 135.28 nm αντίστοιχα. Επιπροσθέτως η τυπική απόκλιση για τις εικόνες 28α', 28β' και 28γ' ισούται με 6.32, 6.14 και 5.67 αντίστοιχα. Οι χαμηλές τιμές της τυπικής απόκλισης υποδηλώνουν ότι υπάρχει μία ομοιομορφία στο ύψος κάθε εγκάρσιας διατομής του δείγματος.

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική μέση τιμή του μήκους του υμενίου που αναπτύχθηκε σε χρόνο 15 λεπτών για όλες τις μετρήσεις των διαφορετικών τομών του δείγματος χωρίς τον συνυπολογισμό του στρώματος πυρήνωσης, η οποία ισούται με **133.39 nm**. Η τυπική απόκλιση είναι 10.66, η οποία είναι σχετικά χαμηλή υποδηλώνοντας ότι το σύνολο των μετρήσεων για το πάχος του υμενίου ZnO τείνουν να είναι κοντά στον μέσο όρο με ομοιόμορφη επιφάνεια. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από το ιστόγραμμα (διάγραμμα κατανομής συχνότητας μηκών των νανοδομών) στην εικόνα 29 όπου περιλαμβάνονται όλες οι μετρήσεις συνολικά από τις τρεις διαφορετικές εικόνες 28 των εγκάρσιων διατομών του δείγματος.

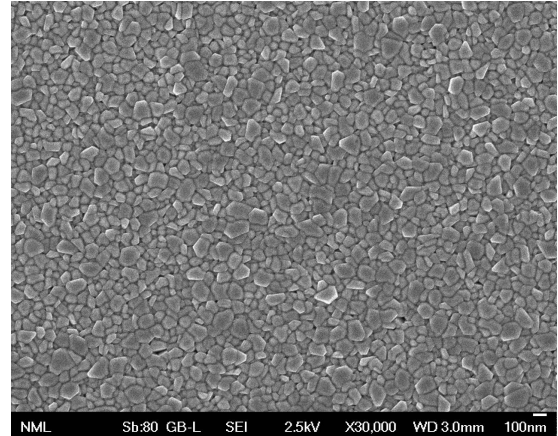


Σχήμα 29: Κατανομή συχνότητας μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO, με χρόνο ανάπτυξης 15 λεπτά για το δείγμα G_7 .

Στο συγκεκριμένο πείραμα που πραγματοποιήθηκε ο χρόνος παραμονής του δείγματος στο λουτρό ανάπτυξης ήταν 30 λεπτά. Ύστερα αναλύθηκε η επιφάνεια και το μήκος των νανοδομών του υμενίου που διαμορφώθηκε στο δείγμα G_5 . Οι εικόνες 31 εγκάρσιας διατομής από τις οποίες αντλήθηκαν δεδομένα για το πάχος του G_5 ανέρχονται στις τρεις. Ομοίως με το προηγούμενο πείραμα λήφθηκαν μετρήσεις από 22 διαφορετικά σημεία της κάθε εικόνα για το πάχος του υμενίου, στα οποία πραγματοποιήθηκε μία περαιτέρω στατιστική επεξεργασία.



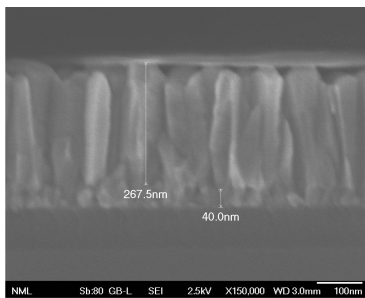
(α') Μεγέθυνση εικόνας 150000 φορές



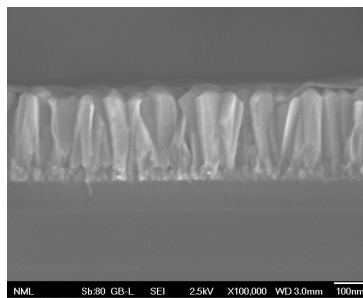
(β') Μεγέθυνση εικόνας 30000 φορές

Σχήμα 30: Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO του δείγματος G_5 για 30 λεπτά ανάπτυξης.

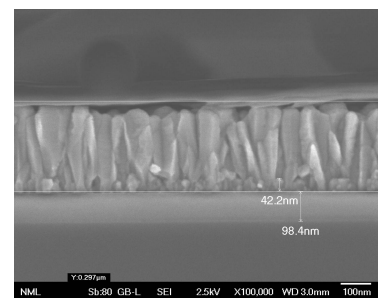
Παρατηρείται στις εικόνες 30α' και 30β' ότι η επιφάνεια του υμενίου ZnO αποτελείται από συμπαγή ενοποιημένα νανοραβδία, των οποίων η διάμετρος τους είναι μεγαλύτερη από το προηγούμενο πείραμα όπου ο χρόνος ανάπτυξης ήταν 15 λεπτά, ξεπερνώντας τα 160 nm.



(α') Μεγέθυνση 150000 φορές



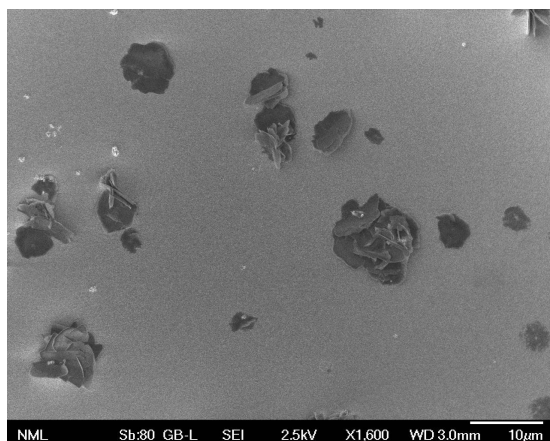
(β') Μεγέθυνση 100000 φορές



(γ') Μεγέθυνση 100000 φορές

Σχήμα 31: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_5 για 30 λεπτά ανάπτυξης.

Η μέση τιμή του μήκους των νανοδομών που αναπτύχθηκαν χωρίς τον συνυπολογισμό του στρώματος πυρήνωσης για τις εικόνες 31α', 31β' και 31γ' ισούται με 268.34 nm, 264.02 nm και 241.08 nm αντίστοιχα. Παράλληλα, η τυπική τους απόκλιση υπολογίστηκε στα 12.82, 7.6 και 9.97 αντίστοιχως. Λαμβάνοντας ορισμένες εικόνες 32 SEM με μικρότερη μεγέθυνση τόσο κάτοψης (μεγέθυνσης 1600 φορές) όσο και κάθετης τομής (μεγέθυνσης 15000 φορές) παρατηρούνται υπολείμματα σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας του δείγματος όπου ενδεχομένως να προέκυψαν ή από το διάλυμα ανάπτυξης ή από τυχόν σκόνη στην οποία εκτέθηκε το δείγμα.



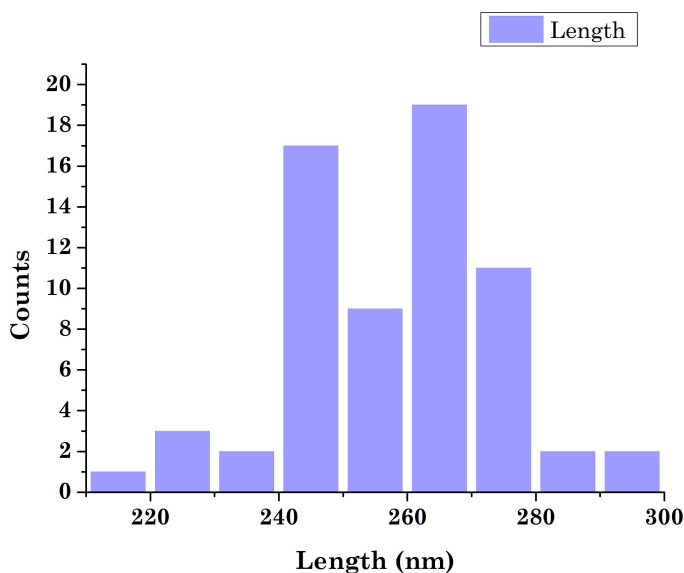
(α') Μεγέθυνση εικόνας 1600 φορές



(β') Μεγέθυνση εικόνας 15000 φορές

Σχήμα 32: Υπολείμματα σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας του δείγματος G_5 .

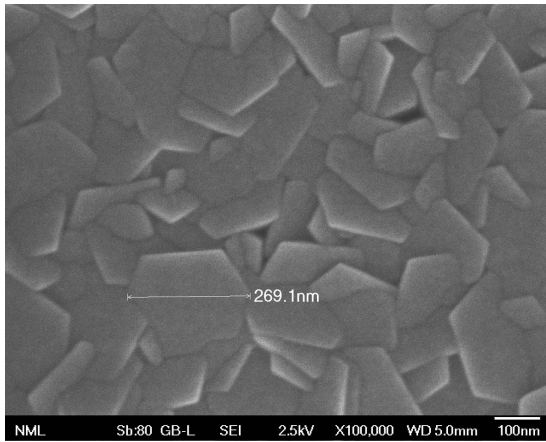
Ύστερα υπολογίστηκε η συνολική μέση τιμή του μήκους των νανοδομών που αναπτύχθηκαν σε χρόνο 30 λεπτών για όλες τις μετρήσεις των διαφορετικών τομών του δείγματος, η οποία προέκυψε **257.81 nm**, ενώ η τυπική απόκλιση ισούται με 15.79. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι με αύξηση του χρόνου στα 30 λεπτά έναντι των 15 που ήταν πριν το πάχος του υμενίου που δημιουργήθηκε σχεδόν διπλασιάστηκε. Παράλληλα, η τυπική απόκλιση παραμένει σχετικά μικρή με αποτέλεσμα η επιφάνεια του δείγματος να παρουσιάζει ομοιομορφία, όμως αυξήθηκε συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται στο ιστόγραμμα (διάγραμμα κατανομής συχνότητας μηκών των νανοδομών) στην εικόνα 33 όπου περιλαμβάνονται όλες οι μετρήσεις συνολικά από τις τρεις διαφορετικές εικόνες των εγκάρσιων διατομών του δείγματος, καθώς παρατηρείται ότι το μήκος των νανοδομών δείχνει να συγκεντρώνεται γύρω από τη μέση τιμή.



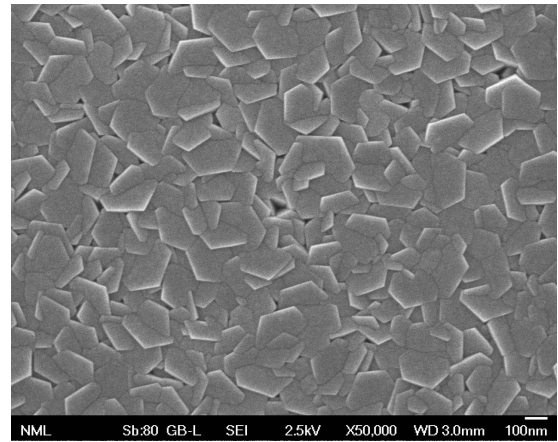
Σχήμα 33: Κατανομή συχνότητας μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO, με χρόνο ανάπτυξης 30 λεπτά για το δείγμα G_5 .

Στην συνέχεια, στο παρακάτω πείραμα ο χρόνος ανάπτυξης των νανοδομών αυξήθηκε στο 60 λεπτά. Τα δείγματα, των οποίων μελετήθηκε με την χρήση SEM η επιφάνεια και το πάχος του υμενίου που δημιουργήθηκε ήταν τα G_1 και G_2 . Οι εικόνες εγκάρσιας διατομής από τις οποίες

εξήχθησαν δεδομένα για το πάχος του υμενίου ήταν δύο (βλ. εικόνες 35 και 36) για το κάθε δείγμα και λήφθηκαν μετρήσεις από 22 διαφορετικά σημεία για κάθε εικόνα.



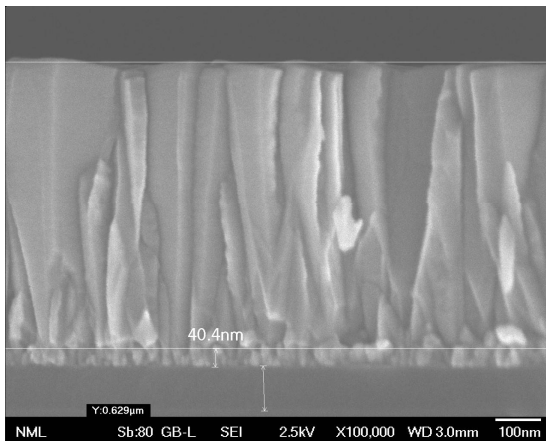
(α') Μεγέθυνση εικόνας 100000 φορές - G_1



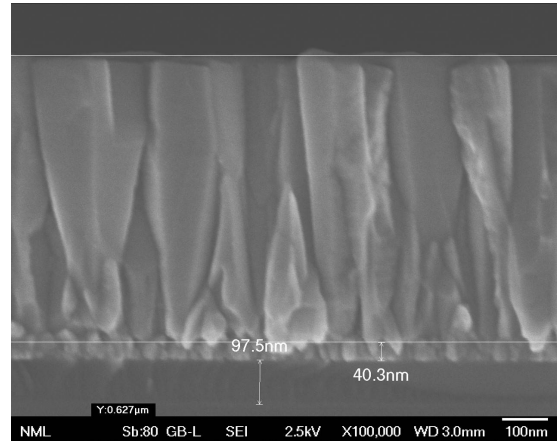
(β') Μεγέθυνση εικόνας 50000 φορές - G_2

Σχήμα 34: Εικόνες κάτοψης υμενίου ZnO των δειγμάτων G_1 και G_2 για 60 λεπτά ανάπτυξης.

Από τις παραπάνω εικόνες SEM 34α' και 34β' παρατηρείται ότι η επιφάνεια του υμενίου αποτελείται από νανοραβδιά τα οποία έχουν ενοποιηθεί με την διάμετρο τους να είναι ακόμη μεγαλύτερη από τα δύο προηγούμενα πειράματα ξεπερνώντας τα 250 nm.



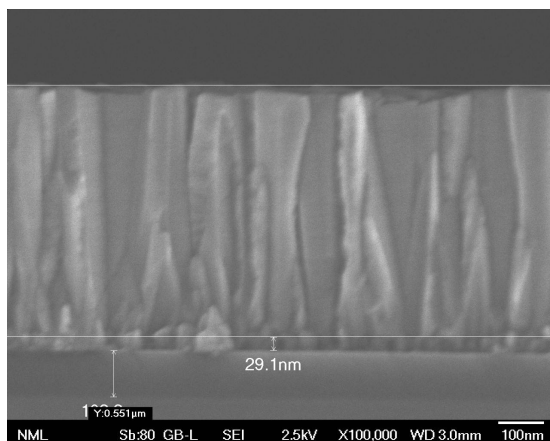
(α') Μεγέθυνση 100000 φορές



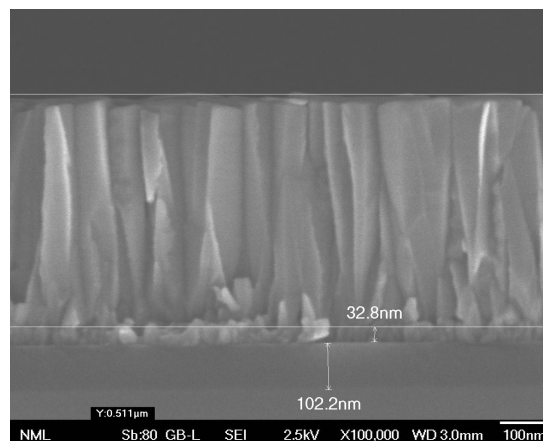
(β') Μεγέθυνση 100000 φορές

Σχήμα 35: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_1 για 60 λεπτά ανάπτυξης.

Η μέση τιμή του μήκους των νανοδομών που αναπτύχθηκαν στο δείγμα G_1 χωρίς τον συνυπολογισμό του στρώματος πυρήνωσης για τις εικόνες 35α' και 35β' είναι 620.56 nm και 622.18 nm, ενώ η τυπική τους απόκλιση ισούται με 7.91 και 6.73 αντίστοιχα. Έπειτα υπολογίστηκε η συνολική μέση τιμή του πάχους του υμενίου για το δείγμα G_1 και από τις δύο εικόνες που αναλύθηκαν και ισούται με 621.37 nm, ενώ η τυπική απόκλιση είναι ίση με 7.31.



(α') Μεγέθυνση 100000 φορές

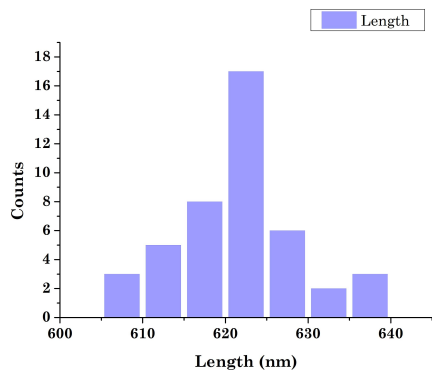


(β') Μεγέθυνση 100000 φορές

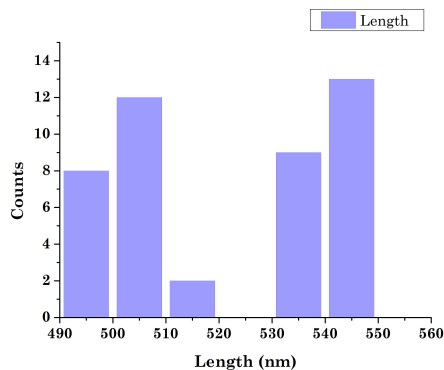
Σχήμα 36: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_2 για 60 λεπτά ανάπτυξης.

Για το δείγμα G_2 η μέση τιμή του μήκους των νανοδομών για τις εικόνες 36α' και 36β' είναι 540.78 και 501.95 nm με τυπική απόκλιση 5.17 και 5.58 αντίστοιχα. Εν συνεχεία η συνολική μέση τιμή του πάχους του υμενίου του G_2 και για τις δύο εικόνες υπολογίστηκε στα 521.37 nm με τυπική απόκλιση 20.34.

Στο διαγράμματα των εικόνων 37α' και 37β' παρουσιάζεται η κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για τα δείγματα G_1 και G_2 αντίστοιχα.



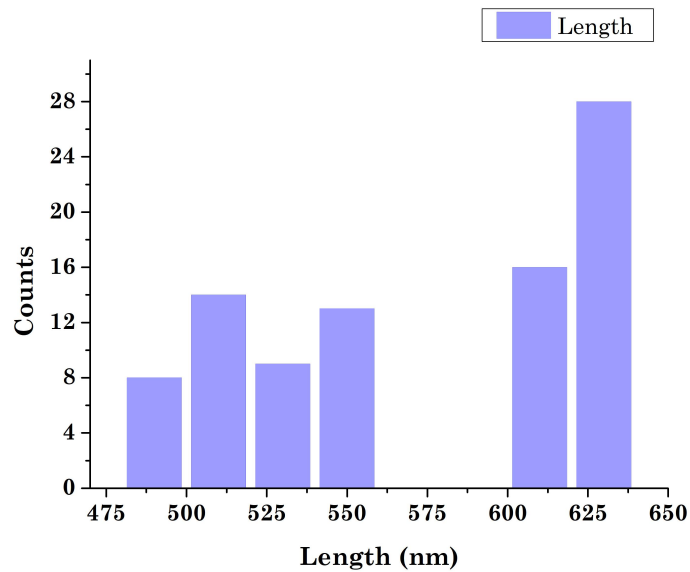
(α') G_1



(β') G_2

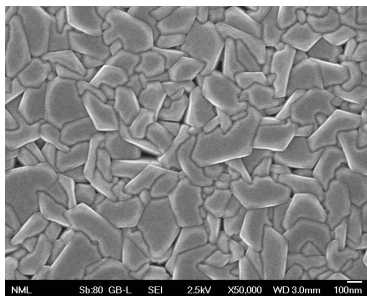
Σχήμα 37: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα 37α' G_1 και 37β' G_2 για 60 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.

Τέλος υπολογίστηκε η συνολική μέση τιμή του υμενίου που αναπτύχθηκε σε χρόνο 60 λεπτών για όλες τις μετρήσεις των διαφορετικών δομών και των δύο δειγμάτων, η οποία ισούται με **571.37 nm** με τυπική απόκλιση 52.53. Αυτό το οποίο προκύπτει με την αύξηση του χρόνου ανάπτυξης στα 60 λεπτά έναντι των 30 λεπτών του προηγούμενου πειράματος είναι ότι με διπλασιασμό του χρόνου το πάχος του υμενίου ξεπέρασε το διπλάσιο. Η συνολική τυπική απόκλιση και των δύο δειγμάτων αυξάνεται σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς μελετώνται δύο διαφορετικά δείγματα σε αντίθεση με τα προηγούμενα πειράματα. Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση φαίνεται στο διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων για το G_1 και το G_2 στην εικόνα 38.

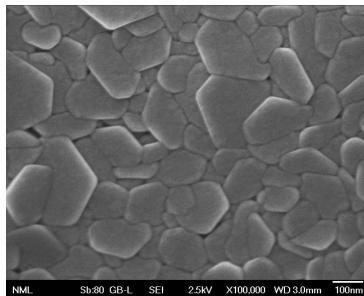


Σχήμα 38: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων του G_1 και του G_2 με χρόνο ανάπτυξης 60 λεπτά.

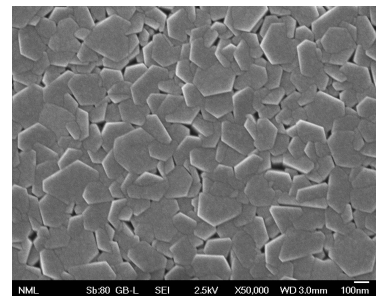
Στο επόμενο πείραμα ο χρόνος όπου τα δείγματα παρέμεινα στο λουτρό ανάπτυξης αυξήθηκε στα 120 λεπτά. Τα δείγματα στα οποία μελετήθηκαν και αναλύθηκαν οι νανοδομές τους στο παρόν πείραμα με την χρήση SEM ήταν τρία, το G_4 , G_{13} και G_{14} . Μία λήψη εγκάρσιας διατομής για το κάθε δείγμα παρουσιάζεται στην εικόνα 40. Οι εικόνες εγκάρσιας διατομής οι οποίες λήφθηκαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και μελετήθηκαν ήταν τρεις για το κάθε δείγμα. Επιπλέον λήφθηκαν και εικόνες κάτοψης 39α', 39β' και 39γ' για την μελέτη την επιφάνεια του υμενίου που προέκυψε.



(α') Μεγέθυνση 50000 φορές -
Εικόνα του δείγματος G_4



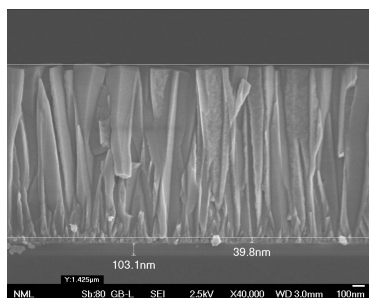
(β') Μεγέθυνση 100000 φορές
- Εικόνα του δείγματος G_{13}



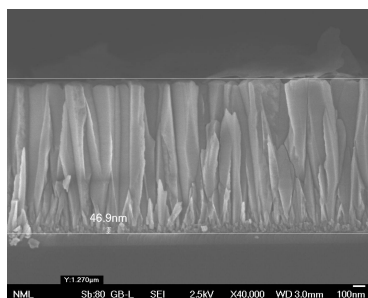
(γ') Μεγέθυνση 50000 φορές -
Εικόνα του δείγματος G_{14}

Σχήμα 39: Εικόνα κάτοψης νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_4 , G_{13} και G_{14} σε 120 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.

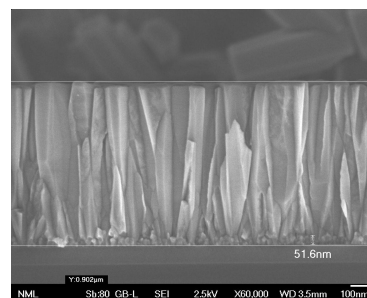
Από τις εικόνες κάτοψης 39α', 39β' και 39γ' παρατηρείται ότι η επιφάνεια του υμενίου που δημιουργήθηκε αποτελείται από ενοποιημένα νανοραβδία με ακόμη μεγαλύτερη διάμετρο συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα ξεπερνώντας σε ορισμένα ακόμα και τα 290 nm. Η καταμέτρηση της διαμέτρου των νανοραβδίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εργαλείου ImageJ.



(α') Μεγέθυνση 40000 φορές -
Εικόνα του δείγματος G_4



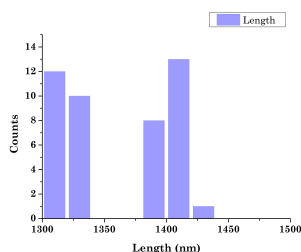
(β') Μεγέθυνση 40000 φορές -
Εικόνα του δείγματος G_{13}



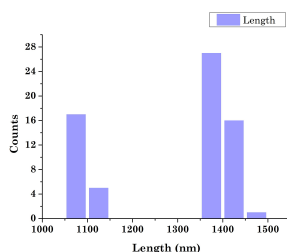
(γ') Μεγέθυνση 60000 φορές -
Εικόνα του δείγματος G_{14}

Σχήμα 40: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO των δειγμάτων G_4 , G_{13} και G_{14} για 120 λεπτά ανάπτυξης.

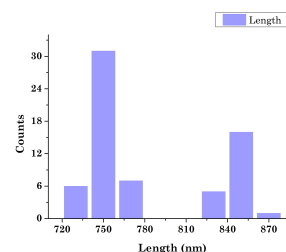
Η μέση τιμή του μήκους των νανοδομών από ανάλυση τριών εικόνων στο κάθε δείγμα ισούται με 1361.19 nm, 1297.22 nm και 781.54 nm για τα G_4 , G_{13} και G_{14} αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση για το G_4 είναι 43.55, για το G_{13} είναι 149.79 και για το G_{14} είναι 46.71. Παρατηρείται ότι το πάχος του ZnO που δημιουργείται στο δείγμα G_{14} φέρει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα δείγματα G_4 και G_{13} , στα οποία ήταν αναμενόμενο το πάχος για τον χρόνο παραμονή τους στο λουτρό ανάπτυξης. Για τον λόγο αυτό το πάχος του δείγματος G_{14} δεν θα ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της συνολικής μέσης τιμής για το πάχος του υμενίου καθώς θα εκτοξεύσει την τυπική απόκλιση και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι εσφαλμένα. Στις εικόνες 41α', 41β' και 41γ' παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής συχνοτήτων για τα δείγματα G_4 , G_{13} και G_{14} .



(α') G_4



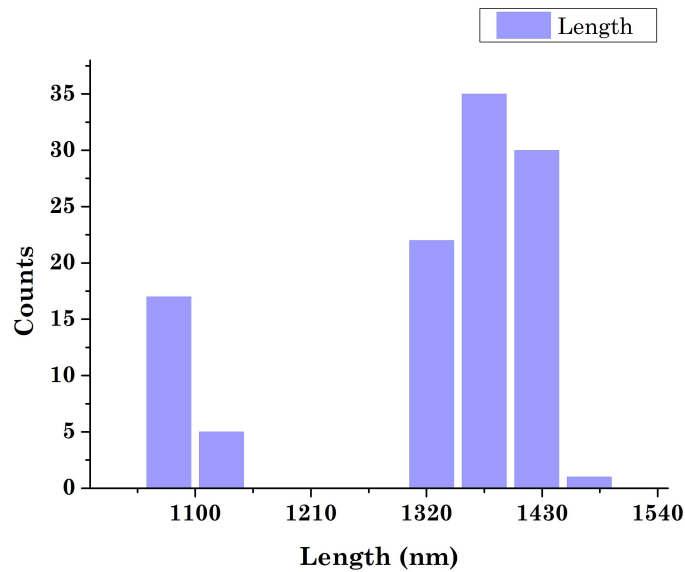
(β') G_{13}



(γ') G_{14}

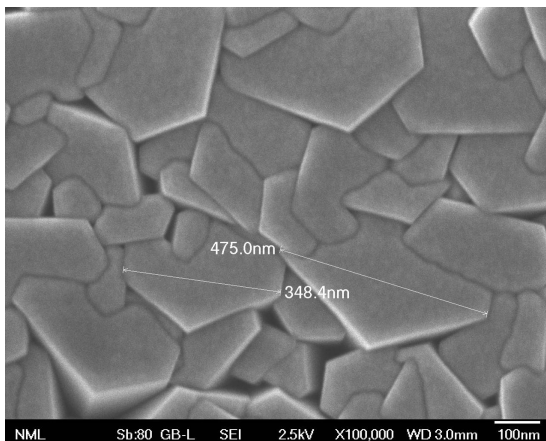
Σχήμα 41: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_4 , G_{13} και G_{14} για 120 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.

Η συνολική μέση τιμή για το πάχος του υμενίου που αναπτύχθηκε σε χρόνο 120 λεπτών για όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν από τα δείγματα G_4 και G_{13} είναι ίση με **1322.81 nm** και τυπική απόκλιση 122.96. Αυτό που παρατηρείται με τον εκ νέου διπλασιασμό του χρόνου ανάπτυξης είναι ότι το πάχος ξεπερνάει το διπλάσιο συγκριτικά με τον προηγούμενο χρόνο των 60 λεπτών και η τυπική απόκλιση αυξήθηκε αρκετά ακόμη και χωρίς τον συνυπολογισμό του δείγματος G_{14} . Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση παρουσιάζεται στην εικόνα 42 όπου από το διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για τα δείγματα G_4 και G_{13} παρατηρείται ότι δεν συγκεντρώνεται το σύνολο των μετρήσεων γύρω από την συνολική μέση τιμή τους.

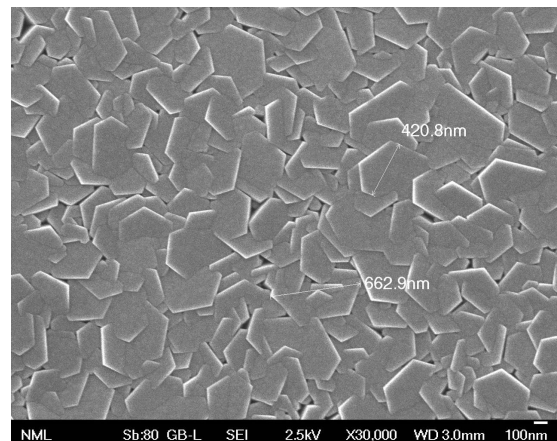


Σχήμα 42: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων των δειγμάτων G_4 και G_{13} με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά.

Σε επόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε αυξήθηκε ο χρόνος ανάπτυξης στα 180 λεπτά. Οι νανοδομές στο συγκεκριμένο πείραμα από τις οποίες εξήχθησαν δεδομένα με την χρήση του SEM αντιστοιχούν στα δείγματα G_9 και G_{10} . Οι εικόνες εγκάρσιας διατομής από το SEM που μελετήθηκαν για τον υπολογισμό του πάχους των νανοδομών ήταν τέσσερις για το δείγμα G_9 και τρεις για το δείγμα G_{10} μερικές από αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 44.



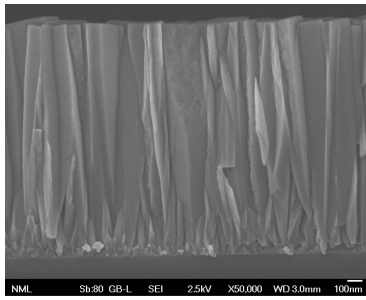
(α') Μεγέθυνση εικόνας 100000 φορές - G_9



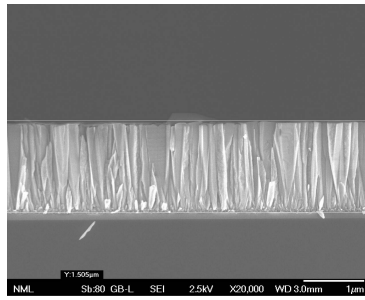
(β') Μεγέθυνση εικόνας 30000 φορές - G_{10}

Σχήμα 43: Εικόνα κάτοψης νανοδομών του υμενίου ZnO για τα δείγματα G_9 και G_{10} σε 180 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.

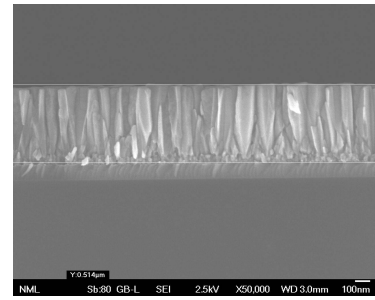
Από τις εικόνες κάτοψης 43α' και 43β' των δύο δειγμάτων G_9 και G_{10} παρατηρείται ότι με την αύξηση της παραμονής τους στο λουτρό ανάπτυξης στα 180 λεπτά η διάμετρος των ενοποιημένων νανοραβδίων που προέκυψαν ξεπερνά κατά πολύ αυτή του προηγούμενου πειράματος φτάνοντας σε ορισμένα ακόμη και τα 500 nm.



(α') Μεγέθυνση 50000 φορές - Εικόνα του δείγματος G_9



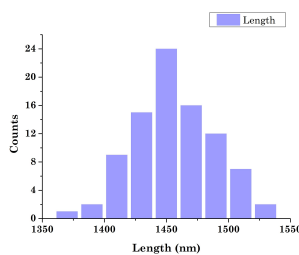
(β') Μεγέθυνση 20000 φορές - Εικόνα του δείγματος G_{10}



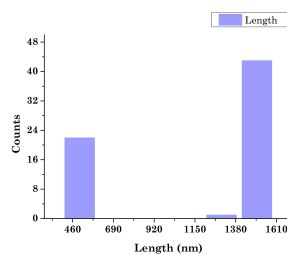
(γ') Μεγέθυνση 50000 φορές - Εικόνα του δείγματος G_{10}

Σχήμα 44: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO των δειγμάτων G_9 και G_{10} για 180 λεπτά ανάπτυξης.

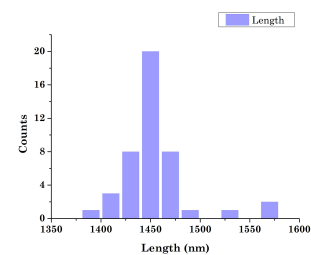
Η μέση τιμή για το πάχος του υμενίου στο δείγμα G_9 που προέκυψε από την ανάλυση τεσσάρων εικόνων SEM εγκάρσιας διατομής ισούται με 1455.85 nm και η τυπική απόκλιση του είναι 31.79 nm. Για το δείγμα G_{10} η μέση τιμή, η οποία προέκυψε είναι 1130.02 nm και η τυπική απόκλιση είναι στα 461.25 nm. Η τυπική απόκλιση έχει εκτοξευτεί τόσο ψηλά καθώς μία από τις τρεις εικόνες που μελετήθηκαν παρουσιάζει σημαντική διαφορά στο πάχος του υμενίου καθώς η μέση τιμή του στην εικόνα 44γ' υπολογίζεται στα 483.96 nm. Αυτό το πάχος έρχεται σε αντίθεση με την μελέτη των δύο άλλων εικόνων του G_{10} όπου η μέση τιμή του πάχους τους ισούται με 1453.69 nm και 1452.41 nm, καθώς και με την μελέτη για το μέσο πάχος του δείγματος G_9 . Για τον λόγο αυτό δεν θα ληφθεί υπόψη η εικόνα με μέσο πάχος υμενίου 483.96 nm γιατί θα επηρεάσει λανθασμένα το τελικό αποτέλεσμα. Επομένως η μέση τιμή που προκύπτει από τις δύο εικόνες για το δείγμα G_{10} ισούται με 1454.92 nm και έχει τυπική απόκλιση 32.53. Στο σχήμα 45 παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής συχνότητας μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO των δύο δειγμάτων.



(α') G_9



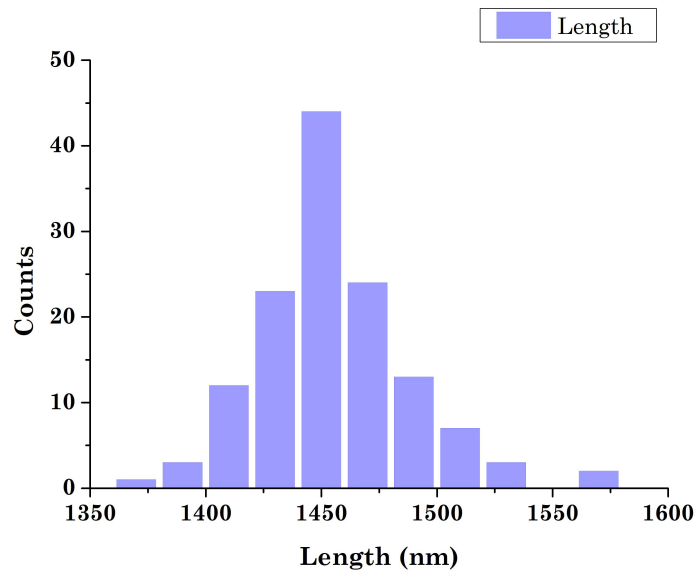
(β') G_{10}



(γ') G_{10}

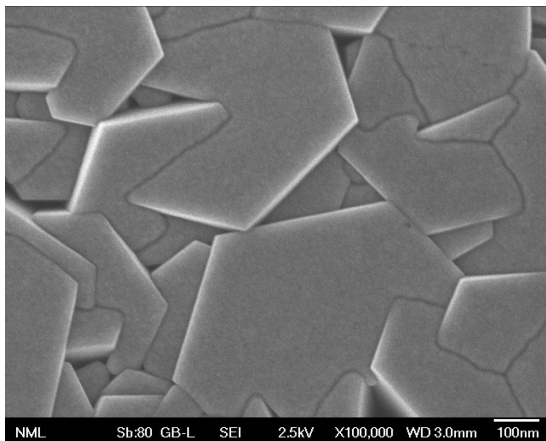
Σχήμα 45: Κατανομή συχνότητας μηκών των νανοδομών του υμενίου ZnO των δειγμάτων G_9 και G_{10} για 180 λεπτά χρόνο ανάπτυξης, όπου στο διάγραμμα 45β' συμπεριλαμβάνεται περιοχή που έχει μέσο μήκος νανοδομών 483.96 nm και στο διάγραμμα 45γ' δεν συμπεριλαμβάνεται.

Η συνολική μέση τιμή για το πάχος του υμενίου σε χρόνο ανάπτυξης 180 λεπτά ισούται με **1453.05 nm** και η τυπική απόκλιση είναι 34.27. Αυτό το οποίο παρατηρείται είναι ότι αυξάνεται ξανά το πάχος του ZnO με την αύξηση του χρόνου. Στο διάγραμμα 46 παρουσιάζεται η κατανομή συχνότητας μηκών των νανοδομών για 180 λεπτά χρόνο ανάπτυξης.

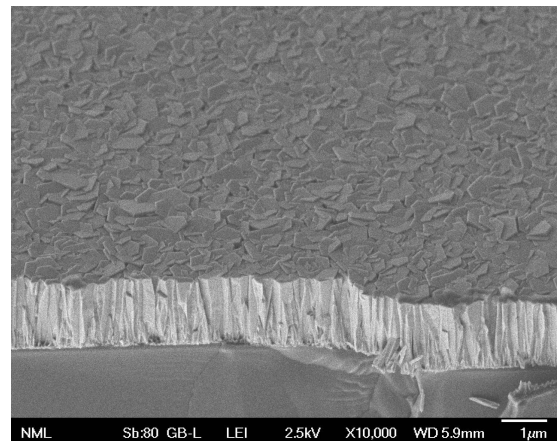


Σχήμα 46: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων των δειγμάτων G_9 και G_{10} με χρόνο ανάπτυξης 180 λεπτά.

Στο παρακάτω πείραμα ο τελευταίος χρόνος ανάπτυξης ο οποίος μελετήθηκε είναι τα 240 λεπτά. Το δείγμα το οποίο μελετήθηκε ήταν στον χρόνο αυτό είναι το G_{11} . Οι εικόνες που λήφθηκαν από το SEM ήταν κάτοψης (βλ. εικόνα 47α'), εγκάρσια διατομής (βλ. εικόνες 48) και με κλίση 45 μοιρών (βλ. εικόνα 47β'). Οι εικόνες εγκάρσιας διατομής που μελετήθηκαν για τον υπολογισμό του πάχους του ZnO που αναπτύχθηκε ήταν τέσσερις.



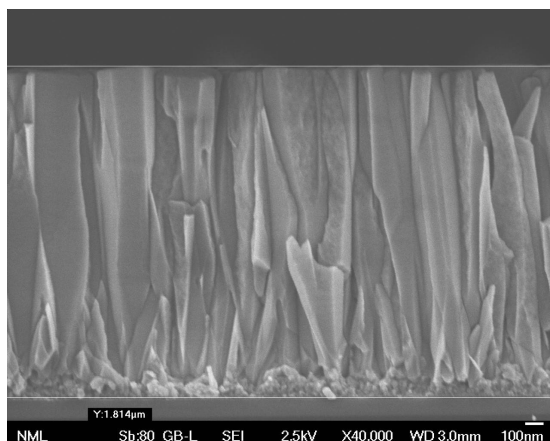
(α') Μεγέθυνση εικόνας 100000



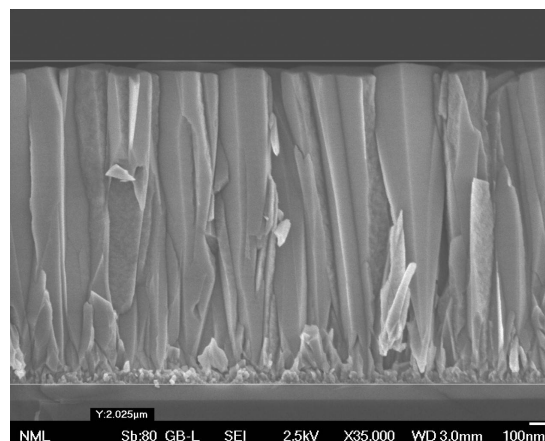
(β') Μεγέθυνση εικόνας 10000

Σχήμα 47: Εικόνες SEM του δείγματος G_{11} κάτοψης 47α' και με κλίση 45 μοιρών 47β' για χρόνο ανάπτυξης 240 λεπτά

Από την εικόνα 47α' παρατηρείται εκ νέου αύξηση της διαμέτρου των ενοποιημένων νανοραβδων που έχουν δημιουργηθεί και αποτελούν το συμπαγές υμένιο του ZnO που αναπτύσσεται. Η διάμετρος αυτή σε ορισμένα νανοραβδία ξεπερνά τα 600 nm.



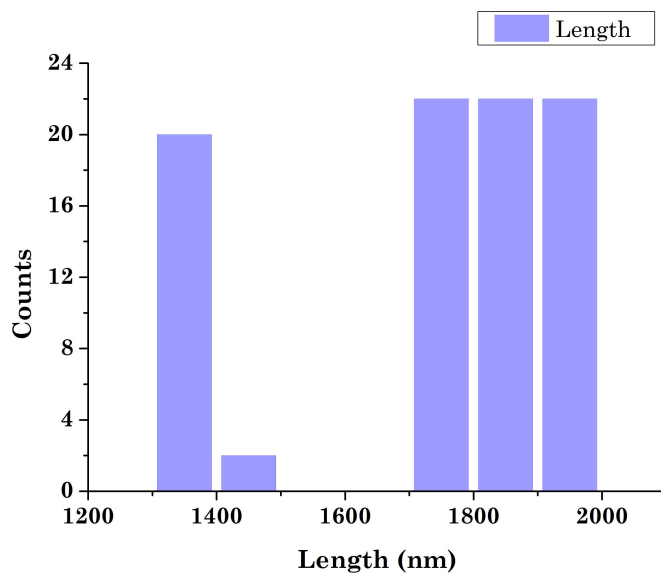
(α') Μεγέθυνση εικόνας 40000



(β') Μεγέθυνση εικόνας 35000

Σχήμα 48: Εικόνες εγκάρσιας τομής υμενίου ZnO του δείγματος G_{11} για 240 λεπτά ανάπτυξης.

Η μέση τιμή του πάχους των νανοδομών ZnO που αναπτύχθηκε στο δείγμα G_{11} για τις τέσσερις εικόνες που μελετήθηκαν ισούται με **1727.70 nm** με τυπική απόκλιση ίση με 216.67. Αυτό το οποίο παρατηρείται είναι ότι με την επιπλέον παραμονή του δείγματος στο διάλυμα ανάπτυξης στα 240 λεπτά αυξάνεται και άλλο το πάχος του ZnO. Παράλληλα παρουσιάζεται το διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το δείγμα G_{11} στην εικόνα 49.



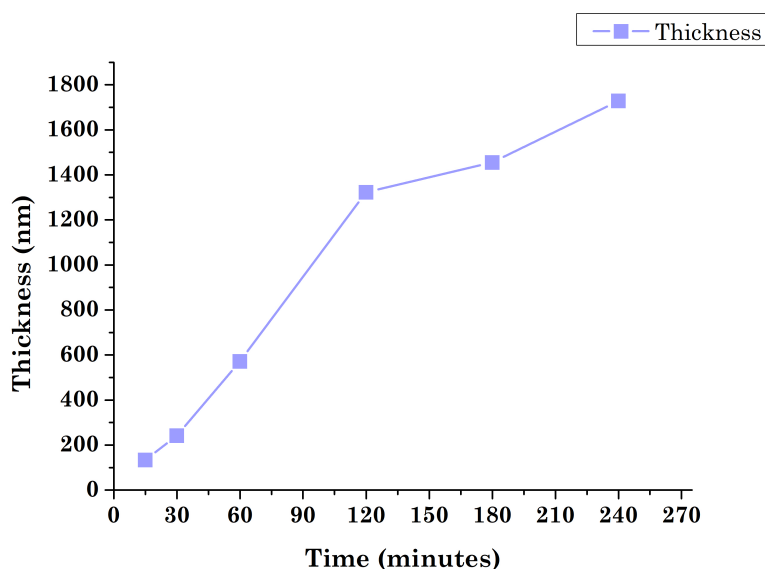
Σχήμα 49: Κατανομή συχνοτήτων μηκών των νανοδομών για το σύνολο των μετρήσεων του δείγματος G_{11} με χρόνο ανάπτυξης 240 λεπτά.

Στον πίνακα 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του μέσου πάχους ZnO χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το στρώμα πυρήνωσης, το οποίο υπολογίζεται 40 nm με ένα σφάλμα 5 nm από τις εικόνες SEM εγκάρσιας διατομής που προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα.

Χρόνος Ανάπτυξης (min)	Μέσο Πάχος Υμενίου ZnO (nm)
15	133.39
30	257.81
60	571.37
120	1322.81
180	1453.05
240	1727.70

Πίνακας 2: Μέσο πάχος των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν με την υδροθερμική μέθοδο συναρτήσει του χρόνου παραμονής τους στο λουτρό ανάπτυξης.

Στην εικόνα 50 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέσου πάχους υμενίου του ZnO συναρτήσει του χρόνου που παρέμειναν τα δείγματα στο λουτρό ανάπτυξης.



Σχήμα 50: Γραφική παράσταση του μέσου πάχους των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν συναρτήσει του χρόνου.

Αυτό το οποίο προκύπτει σύμφωνα με την γραφική παράσταση 50 και τα παραπάνω πειράματα σύνθεσης νανοδομών διατηρώντας όλες τις συνθήκες σταθερές και μεταβάλλοντας μόνο τον χρόνο είναι ότι μέχρι τα 120 λεπτά ανάπτυξης το μήκος των νανοδομών αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό. Έπειτα από το πέρας των 120 λεπτών η ανάπτυξη συνεχίζεται με μειωμένο ρυθμό. Πέρα από οπτική παρατήρηση της καμπύλης 50, το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της κλίσης της καμπύλης στα χρονικά διαστήματα 15-30, 30-60, 60-120, 120-180 και 180-240, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω πίνακα 3. Όσο μεγαλύτερη μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης τόσο μεγαλύτερος είναι και ο ρυθμός ανάπτυξης. Στο χρονικό διάστημα 120-180 λεπτά ο ρυθμός πέφτει ραγδαία, ενώ στο επόμενο διάστημα 180-240 λεπτά αυξάνεται χωρίς όμως να φτάσει τις προηγούμενες του τιμές.

Χρόνος Διάστημα Ανάπτυξης (min)	Κλίση Καμπύλης
15-30	7.18
30-60	11.01
60-120	12.52
120-180	2.20
180-240	4.55

Πίνακας 3: Υπολογισμός κλίσης της καμπύλης 50 σε όλα τα χρονικά διαστήματα ανάπτυξης ZnO

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος ανάπτυξης τόσο πιθανό είναι το πάχος των υμενίων να μην είναι ομοιόμορφο σε όλες τις περιοχές του δείγματος όπως παρατηρήθηκε σε μία περιοχή του δείγματος G_{10} με χρόνο ανάπτυξης 180 λεπτά και στο δείγμα G_{14} με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στην τιμή της τυπική, απόκλιση, καθώς αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου. Βέβαια η τυπική απόκλιση είναι αρκετό πιθανό να αυξάνεται σε ορισμένες περιπτώσεις όπου έχουν μελετηθεί το μήκος των νανοραβδίων σε περισσότερες περιοχές. Τέλος, αυτό το οποίο παρατηρήθηκε από τα παραπάνω πειράματα είναι ότι τα υμένια ZnO τα οποία δημιουργούνται στα παραπάνω πειράματα αποτελούνται από νανοραβδία συμπαγή και ενοποιημένα μεταξύ τους και με την αύξηση του χρόνου παραμονής του δείγματος στο λουτρό ανάπτυξης αυξάνεται και η διάμετρος των νανοραβδίων.

Συνοψίζοντας, τα παραπάνω συμπεράσματα έρχονται σε συμφωνία με την βιβλιογραφία, καθώς η ομάδα του Amin [23] διερεύνησε την επίδραση του χρόνου ανάπτυξης νανοραβδίων ZnO εκτελώντας διάφορα πειράματα μεταβάλλοντας μόνο τον χρόνο ανάπτυξης, διατηρώντας σταθερή την θερμοκρασία στους 90°C και με σταθερή ισομοριακή αναλογία ανάμεσα στα ZNH και HMT συγκέντρωσης 100 mM. Ο χρόνος ανάπτυξης ο οποίος μελετήθηκε ήταν 1, 3, 6, 10 και 20 ώρες. Αυτό το οποίο παρατήρησαν από εικόνες SEM εγκάρσιας διατομής ήταν ότι ο διάρκεια ανάπτυξης είναι εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας για τον έλεγχο του μεγέθους της δομής ZnO που αναπτύσσεται. Αυτό το οποίο παρατήρησαν στα πειράματα του ήταν ότι με την αύξηση του χρόνου μεγαλώνει η διάμετρος των νανοδομών. Ακόμη, τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Amin και της ομάδας του έδειξαν ότι συνεχής ανάπτυξη των νανοδομών πραγματοποιείται για τις πρώτες 10 ώρες με τον ρυθμό ανάπτυξης να είναι αρχικά αυξημένος και να μειώνεται στην πορεία. Μετά το πέρας των 10 ωρών σταματάει η περαιτέρω ανάπτυξη των νανοδομών ZnO. Το γεγονός συμβαίνει καθώς πιστεύουν ότι με την πάροδο του χρόνου το OH^- από το HMT υδρολύεται συνεχώς στο υδατικό διάλυμα έως και 10 ώρες και στην συνέχεια εξαντλείται. Επίσης του μελετήθηκε η επιρροή της συγκέντρωσης των αντιδρώντων με αναλογία 1 προς 1 στις συνθέσεις νανοδομών ZnO που ανέπτυξαν.

Παράλληλα, η ομάδα του Amin παρατήρησε ότι και η συγκέντρωση των αντιδρώντων συμβάλλει σημαντικά στην πυκνότητα, το μήκος και την διάμετρο των μικρο και νανοραβδίων ZnO που ανέπτυξε. Εξήγαγε το συμπέρασμα ότι είναι εφικτή η δημιουργία μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ της αύξησης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων και των διαστάσεων των νανοραβδίων. Η διάμετρος των νανοραβδίων αυξάνεται σταθερά ενώ το μήκος γίνεται σταθερό για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 200 mM. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος στο οποίο η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης δεν θα έχει αντίκτυπο στην αξονική κατεύθυνση ανάπτυξης των νανοραβδίων, σε αντίθεση με την ακτινική κατεύθυνση η οποία αυξάνεται συνεχώς και σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις οι ράβδοι συγχωνεύονται και σχηματίζουν ένα λεπτό συνεχές υμένιο. Για τον λόγο αυτό επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε συγκέντρωση ίση με 200 mM σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε.

4 Κατασκευή και Χαρακτηρισμός Διατάξεων

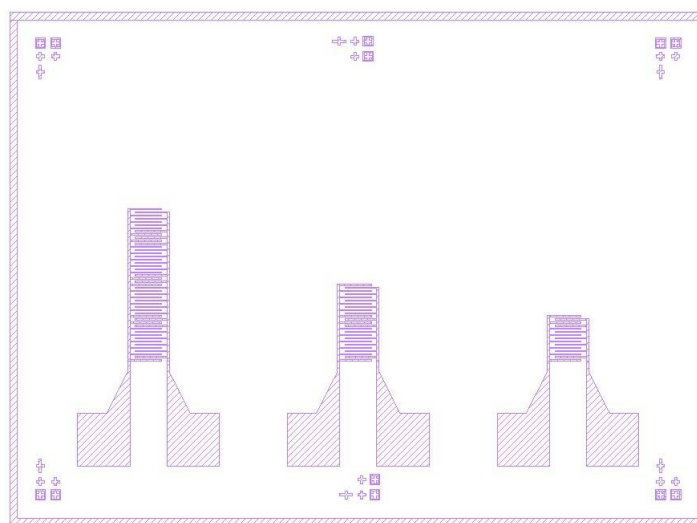
Στο παρόν κεφάλαιο κατασκευάστηκαν κατάλληλες διατάξεις για την μέτρηση της αντίστασης των λεπτών υμενίων ZnO που παρασκευάστηκαν με την τεχνική της υδροθερμικής ανάπτυξης. Η δομή των υμενίων ZnO παρουσιάστηκε και μελετήθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Παράλληλα,

μέσω της αντίστασης υπολογίστηκε η ειδική αντίσταση (ρ) των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν. Η ειδική αντίσταση είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα ενός υλικού, η οποία μετρά πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στο ηλεκτρικό ρεύμα. Μια χαμηλή ειδική αντίσταση υποδηλώνει ένα υλικό που επιτρέπει εύκολα την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης είναι το $\Omega \cdot \text{m}$. Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη της ειδικής αντίστασης των υμενίων ZnO και πώς αυτή εξαρτάται από τις διαφορετικές συνθήκες θερμικής ανόπτησης που εφαρμόζονται στα δείγματα μετά την ανάπτυξη των υμενίων. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται για την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του ZnO για την ανάπτυξη διατάξεων επιφανειακών κυμάτων.

4.1 Κατασκευή Διατάξεων με Διακλαδισμένα Ηλεκτρόδια (IDE)

Οι διατάξεις που παρασκευάστηκαν αποτελούνται από διακλαδισμένα ηλεκτρόδια ή Interdigitated Electrodes (IDE). Ως υπόστρωμα της διάταξης χρησιμοποιείται δισκίο πυριτίου n-type, το οποίο έχει καθαριστεί αρχικά με διάλυμα piranha ($H_2O_2 - H_2SO_4$ αναλογίας 1:1 v/v). Στην συνέχεια πραγματοποιείται ξηρή θερμική οξείδωση στο δισκίο πυριτίου ώστε να δημιουργηθεί ένα λεπτό υμένιο SiO_2 με πάχος 100 nm. Έπειτα αναπτύχθηκε πάνω από την επιφάνεια SiO_2 ένα υμένιο ZnO με την τεχνική της υδροθερμικής μεθόδου, αφού πρώτα είχε προηγηθεί η επίστρωση e-gel. Οι τεχνικές της υδροθερμικής μεθόδου ανάπτυξης υμενίων και της επίστρωσης του e-gel περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Στην επιφάνεια των υμενίων ZnO που αναπτύχθηκαν πρόκειται να δημιουργηθούν οι μεταλλικές επαφές αλουμινίου που θα λειτουργήσουν ως ηλεκτρόδια.

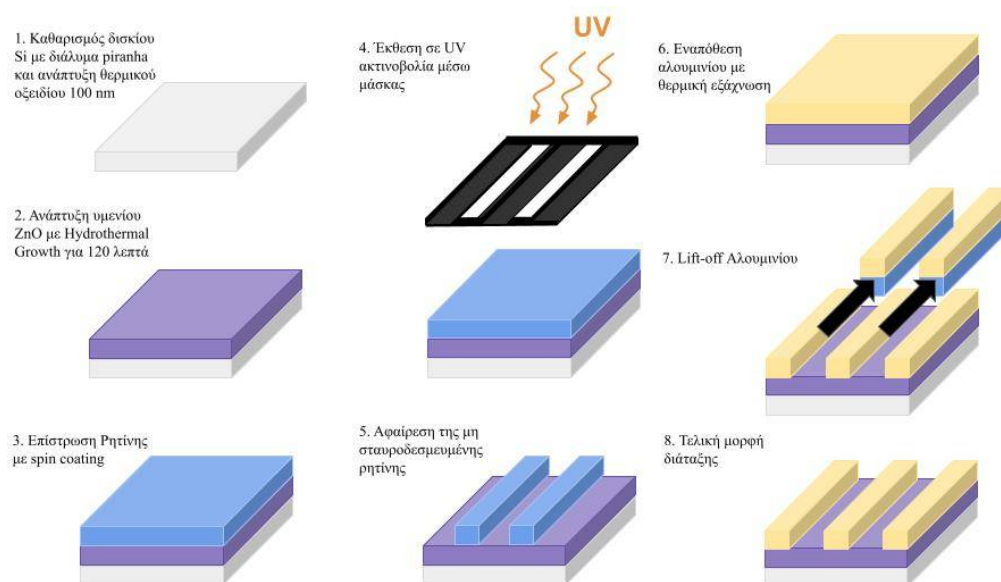
Για την διαδικασία εναπόθεση των ηλεκτροδίων πάνω από στα υμένια ZnO ακολουθήθηκε η μέθοδος lift-off. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της λιθογραφίας πραγματοποιείται καθαρισμός των δειγμάτων πρώτα με ακετόνη, ύστερα με προπανόλη και τέλος με υπερκαθαρό νερό το οποίο απομακρύνθηκε από τα δείγματα με την χρήση N_2 . Αρχικά, πραγματοποιείται προσκόλληση τα δείγματα με ρητίνη πάνω σε δισκία Si τεσσάρων ιντσών ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στον ευθυγραμμιστή μασκών (mask aligner). Στη συνέχεια το δείγμα επιστρώνεται με φωτοευαίσθητη ρητίνη AZ5214E με τη μέθοδο του spin coating στις 5000 rpm. Έπειτα από την επίστρωση ρητίνης πραγματοποιήθηκε θερμική ανόπτηση του δείγματος σε φούρνο για 90 δευτερόλεπτα σε θερμοκρασία $110^\circ C$. Στην συνέχεια με την χρήση γυάλινης μάσκας (glass mask) η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 51 ακολουθεί η εμφάνιση της ρητίνης για την πραγματοποίηση της αρνητικής λιθογραφίας.



Σχήμα 51: Η πάνω όψη (layout) της μάσκας που χρησιμοποιήθηκε για την λιθογραφία.

Μετά πραγματοποιείται έκθεση σε UV ακτινοβολία για 150 δευτερόλεπτα με την χρήση του ευθυγραμμιστή μασκών (mask aligner) MA6, με την επαφή του υποστρώματος-μάσκας να είναι σε

“ισχυρή επαφή” (hard contact). Ακολουθεί θερμική ανόπτηση για 90 δευτερόλεπτα στους 120°C και στη συνέχεια ολική έκθεση (flood exposure) χωρίς την μάσκα για 3 λεπτά με σκοπό την αντιστροφή της τονικότητας της ρητίνης. Η μη σταυρο-δεσμευμένη (cross-linked) ρητίνη αφαιρείται σε λουτρό εμφανιστή AZ726MIF για 40-50 δευτερόλεπτα. Μετά την παραπάνω διαδικασία το δείγμα τοποθετείται σε φούρνο για 15 λεπτά στους 120°C . Το επόμενο βήμα είναι η εναπόθεση λεπτού υμενίου αλουμινίου πάχους 300 nm με θερμική εξάχνωση (thermal evaporation). Τέλος, πραγματοποιείται η διαδικασία η οποία είναι γνωστή ως lift-off κατά την οποία το δείγμα εμβαπτίζεται σε λουτρό ακετόνης για την πλήρη αφαίρεση της ρητίνης και την απομάκρυνση του επιπρόσθετου αλουμινίου ώστε να εμφανιστεί η επιθυμητή δομή. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 52. Έπειτα πραγματοποιείται έκπλυση του δείγματος με ισοπροπανόλη για αφαίρεση των υπολειμμάτων της ακετόνης και τέλος με απιονισμένο νερό, το οποίο στεγνώνεται με χρήση N_2 . Έγτερα από αυτή την διαδικασία, το δείγμα ανάλογα το μέγεθος του διαθέτει αρκετές διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων.



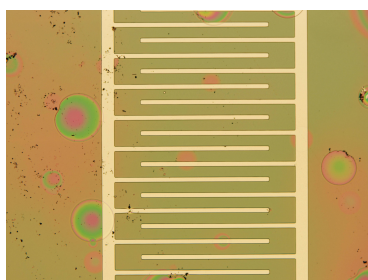
Σχήμα 52: Διαδικασία κατασκευής διατάξεων διακλαδισμένων ηλεκτροδίων.

Μία ψηφίδα αποτελείται από 3 διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων, μεγάλα, μεσαία και μικρά όπως φαίνεται και στην εικόνα 51. Τα μεγάλα διακλαδισμένα ηλεκτροδία αποτελούνται από 49 ηλεκτροδία, τα μεσαία από 25 και τα μικρά από 15. Το πλάτος του κάθε ηλεκτροδίου είναι 20 μm και η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων είναι ίσο με 40 μm . Τέλος, το μήκος επικάλυψης των ηλεκτροδίων είναι ίσο με 500 μm . Οι διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων που αναπτύχθηκαν πάνω σε υμένια ZnO με την παραπάνω διαδικασία μελετήθηκαν αρχικά στο οπτικό μικροσκόπιο. Το οπτικό μικροσκόπιο με το οποίο μελετήθηκαν οι διατάξεις είναι το DP71 της εταιρίας Olympus.



Σχήμα 53: Οπτικό μικροσκόπιο DP71 της εταιρείας Olympus.

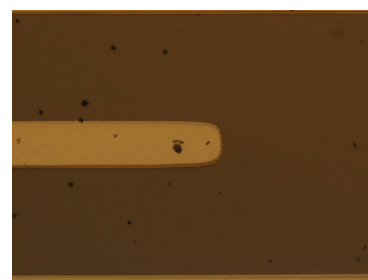
Το παρόν μικροσκόπιο που απεικονίζεται στο σχήμα 53 διαθέτει τρεις διαθέσιμες μεγεθύνσεις για το δείγμα το οποίο παρατηρείται, οι οποίες είναι 10, 50 και 100 φορές. Στην εικόνα 54 αποτυπώνονται τρεις διαφορετικές φωτογραφίες του δείγματος με μεγέθυνση των ηλεκτροδίων αλουμινίου που εναποτέθηκαν πάνω στο υμένιο ZnO. Από τα 24 δείγματα που προέκυψαν στα πειράματα ανάπτυξης νανοδομών ZnO που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 τοποθετήθηκαν διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων αλουμινίου στα 5. Η ονομασία των δειγμάτων αυτών είναι G_{18} , G_{19} , G_{22} , G_{23} και G_{24} και ο χρόνος ανάπτυξης ZnO για όλα είναι 120 λεπτά.



(α') Μεγέθυνση 10 φορές



(β') Μεγέθυνση 50 φορές



(γ') Μεγέθυνση 100 φορές

Σχήμα 54: Απεικόνιση διακλαδισμένων ηλεκτροδίων στο οπτικό μικροσκόπιο.

4.2 Διαδικασία Θερμικής Ανόπτησης (Annealing) των Διατάξεων

Η διαδικασία θερμικής ανόπτησης πραγματοποιήθηκε στον καθαρό χώρο του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του «ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος» σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

- Αρχικά γίνεται ρύθμιση του φούρνου (βλ. εικόνα 55) στην θερμοκρασία ανόπτησης που θα εκτεθεί το δείγματα.

- Στην συνέχεια γίνεται χρήση ενός δισκίου πυριτίου ως βάση για το δείγμα αφού πρώτα καθαριστεί με αέριο άζωτο. Τοποθετείται το δείγμα πάνω στο δισκίο και όταν ο φούρνος φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία εισάγεται μαζί με την βάση στο φούρνο.
- Τέλος αφαιρείται το δισκίο πυριτίου μαζί με το δείγμα μετά το πέρας του χρόνου που έχει επιλεχθεί για την ανόπτηση του δείγματος και τοποθετούνται σε μία πλάκα αλουμινίου για την άμεση επαναφορά τους σε θερμοκρασία δωματίου. Γίνεται χρήση πλάκας αλουμινίου καθώς αυτό είναι καταβόθρα θερμότητας και ψύχει σε δευτερόλεπτα το δείγμα.



Σχήμα 55: Φούρνος για θερμική ανόπτηση υλικών με μέγιστη θερμοκρασία 1100°C.

Στα δείγματα G_{18} , G_{22} , G_{23} και G_{24} πριν την τοποθέτηση IDE σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.1 πραγματοποιήθηκε θερμική ανόπτηση (annealing) σε φούρνο παρουσία αέρα για 60 λεπτά σε διαφορετικές θερμοκρασίες για το κάθε ένα και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των διατάξεων. Στον παρακάτω πίνακα 4 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι συνθήκες των δειγμάτων αυτών.

Δείγμα	Θερμοκρασία Ανόπτησης (°C)	Χρόνος (min)
G_{18}	231	60
G_{22}	324	60
G_{23}	400	60
G_{24}	500	60

Πίνακας 4: Συνθήκες ανόπτησης των δειγμάτων G_{18} , G_{22} , G_{23} και G_{24} .

Στο δείγμα G_{19} τοποθετήθηκαν τα IDE πάνω στο υμένιο ZnO χωρίς είχε υποστεί το δείγμα προηγουμένως θερμική ανόπτηση. Πραγματοποιήθηκαν πρώτα μετρήσεις και ύστερα τοποθετήθηκε στον φούρνο παρουσία αέρα στους 200°C για 60 λεπτά όπου πραγματοποιήθηκαν εκ νέου μετρήσεις. Τέλος το δείγμα G_{19} τοποθετείται ξανά στον φούρνο παρουσία αέρα στους 200°C για άλλα 60 λεπτά όπου και πραγματοποιούνται οι τελικές μετρήσεις. Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι συνθήκες ανόπτησης του δείγματος G_{19} .

Δείγμα	Θερμοκρασία Ανόπτησης (°C)	Χρόνος (min)
$G_{19} - A$	231	60
$G_{19} - B$	231	120

Πίνακας 5: Συνθήκες ανόπτησης του δείγματος G_{19} .

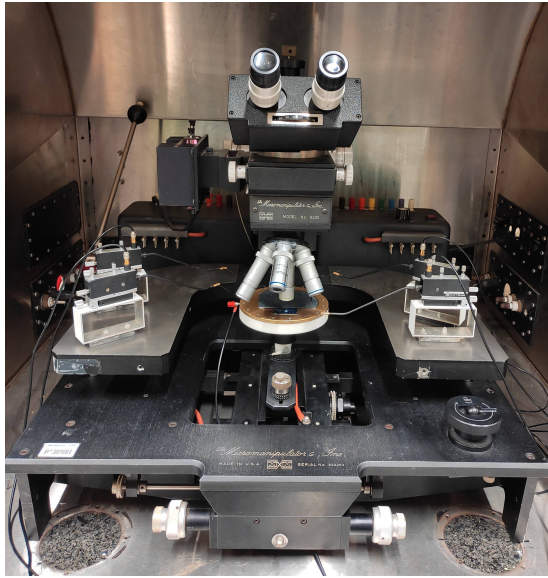
4.3 Χαρακτηρισμός Διατάξεων

Ο χαρακτηρισμός των διατάξεων που κατασκευάστηκαν πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον αέρα σε μία ειδική πειραματική διάταξη, η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα παρακάτω. Για τον χαρακτηρισμό των διατάξεων, καταγράφηκε η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος όταν εφαρμόζεται σταθερή ηλεκτρική τάση στους ακροδέκτες των ηλεκτροδίων. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V. Ο χαρακτηρισμός αυτός των δειγμάτων επέτρεψε τον υπολογισμό σημαντικών χαρακτηριστικών για τα υμένια του ZnO που αναπτύχθηκαν, καθώς επίσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή της ανόπτησης σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

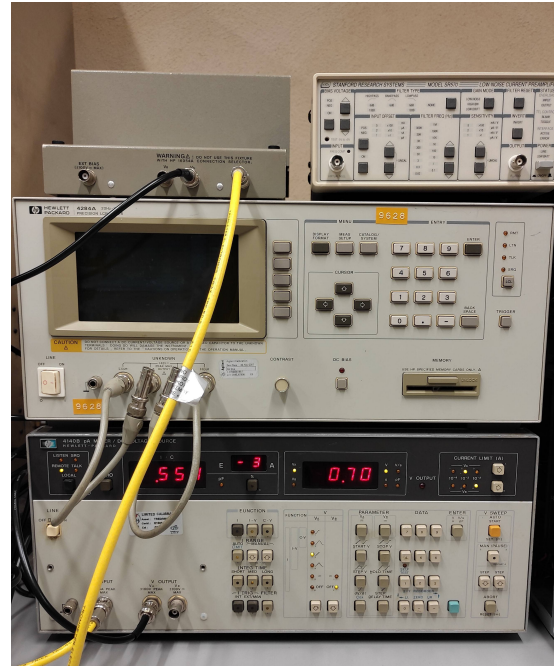
4.3.1 Πειραματική Διάταξη

Οι μετρήσεις των I-V χαρακτηριστικών στα εν λόγω πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ενός σταθμού ηλεκτρικών μετρήσεων με ακίδες (probe station ή prober) και με την βοήθεια ενός αυτοματοποιημένου συστήματος μέτρησης όπου περιλαμβάνει το ελεγχόμενο από τον υπολογιστή όργανο υψηλής ακρίβειας 4140B pA METER - DC Voltage Source της εταιρείας Hewlett Packard. Ο έλεγχος της λειτουργίας των οργάνων πραγματοποιείται μέσω υπολογιστή και επιτυγχάνεται μέσω διασύνδεσης GPIB με χρήση προγραμμάτων τα οποία έχουν γραφτεί στον κώδικα LabView.

Ο prober, ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 56α', χρησιμοποιείται για την απευθείας ηλεκτρική διασύνδεση της προς μέτρηση διάταξης με τα μετρητικά όργανα μέσω μεταλλικών ακίδων (probes). Συγκεκριμένα, το δείγμα τοποθετείται στην μεταλλική βάση που διαθέτει ο prober και συγκρατείται σταθερό πάνω σε αυτή σταθερό με την ενεργοποίηση κενού. Επιπρόσθετα, ο prober διαθέτει τέσσερις μεταλλικές ακίδες, ένα οπτικό μικροσκόπιο με τέσσερις διαφορετικές δυνατότητες μεγέθυνσης του δείγματος, ένα μηχανικό σύστημα μετατόπισης της μεταλλικής βάσης σε σχέση με το μικροσκόπιο και της ακίδες στους άξονες x και y και ένα μικρομετρικό σύστημα μετακίνηση των ακίδων στους άξονες x,y και z. Με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου είναι δυνατή η επιλογή της συγκεκριμένης διάταξης από όλο το δείγμα που θα μετρηθεί καθώς και η σύνδεση των ακροδεκτών της διάταξης με τις ακίδες. Οι ακίδες συνδέονται ηλεκτρικά με τους εξωτερικούς ακροδέκτες του prober με τους οποίους πραγματοποιείται η ηλεκτρική διασύνδεση μέσω δύο ομοαξονικών καλωδίων με τα μετρητικά όργανα που θα χρησιμοποιηθούν. Ο prober συνδέεται με το όργανο 4140B pA METER - DC Voltage Source που παρουσιάζεται στην εικόνα 56β', το οποίο είναι ένα πικοαμπερόμετρο υψηλής σταθερότητας, διαθέτει μέγιστη ανάλυση 10^{-13} A και δύο πηγές DC τάσης όπου στα παρόντα πειράματα χρησιμοποιείται η μία. Για την ακρίβεια, μέσω δύο ομοαξονικών καλωδίων BNC η μία ακίδα συνδέεται στον ακροδέκτη V_A του 4140B pA METER και η άλλη στον ακροδέκτη V_A του Exit Bias 16054A. Στην συνέχεια τοποθετούμε με προσοχή της ακίδες στους ακροδέκτες αλουμινίου των ηλεκτροδίων της διάταξης που επιλέγεται να μετρηθεί. Ύστερα γίνεται χρήση του υπολογιστή και συγκεκριμένα του προγράμματος LabView από το οποίο επιλέγεται το HPVI9V7.VI. Σε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε ρύθμιση της τάσης μέσω του προγράμματος από -0.7 έως 0.7 V με βήμα 50 mV, με V_A I limit ρυθμισμένο στα 10mA και voltage source mode ρυθμισμένο στο single staircase. Τέλος, πραγματοποιείται αυτόματη καταγραφή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος I από το πρόγραμμα και γίνεται η αποθήκευση των μετρήσεων σε ένα αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία στην συνέχεια.



(α') Prober

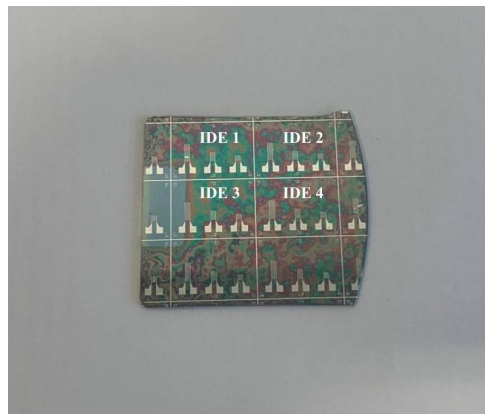


(β') 4140B pA METER - DC Voltage Source

Σχήμα 56: Πειραματική διάταξη για μετρήσεις I-V.

4.3.2 Μετρήσεις και Εξαγωγή των Χαρακτηριστικών I-V

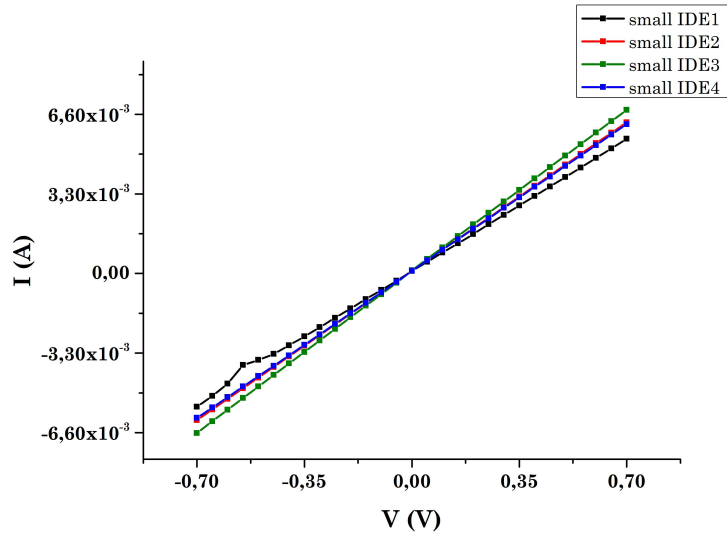
Αρχικά, μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του δείγματος G_{19} για τις ψηφίδες 1, 2, 3 και 4 όπου ονομάστηκαν IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4 αντίστοιχα και τα οποία παρουσιάζονται και στην εικόνα 57. Κάθε ψηφίδα παρουσιάζει τρεις διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων, τα small, τα medium και τα large. Στο παρόν δείγμα δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα large ηλεκτρόδια των ψηφίδων 1 και 3, καθώς λόγω της τοποθέτησης του δείγματος στον ειδικά διαμορφωμένο δειγματοφορέα κατά την διάρκεια της υδροθερμικής ανάπτυξης δεν υπάρχει σε αυτά τα σημεία ανάπτυξη ZnO. Οι αρχικές μετρήσεις του G_{19} που παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν στα εναποθετημένα ηλεκτρόδια πάνω από το υμένιο ZnO, που είχε προκύψει από 120 λεπτά ανάπτυξης, χωρίς να έχει γίνει στο υπόστρωμα κάποια περαιτέρω θερμική επεξεργασία. Για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκε τάση από -0.7 έως 0.7 V με το όριο του οργάνου να είναι ρυθμισμένο στα 10 mA.



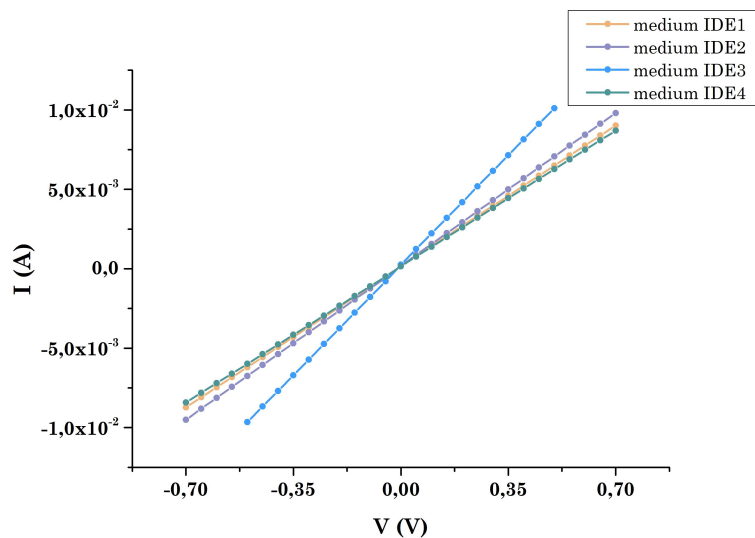
Σχήμα 57: Δείγμα G_{19} και ονομασία ψηφίδων.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για τις μικρές, μεγάλες και μεσαίες διατάξεις του δείγματος

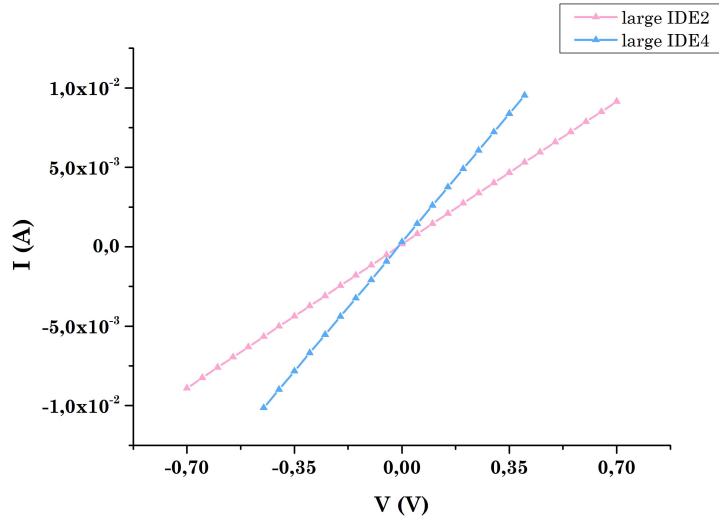
G_{19} παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες 58,59 και 60 αντίστοιχα.



Σχήμα 58: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.

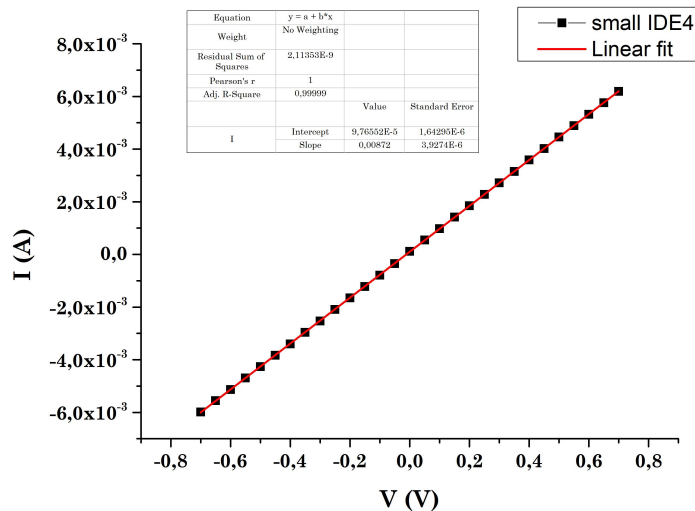


Σχήμα 59: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.



Σχήμα 60: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφιδών 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά, χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία.

Από τις χαρακτηριστικές I-V παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που εξάγονται είναι γραμμικές στο διάστημα που διεξήχθησαν οι μετρήσεις. Εφαρμόζοντας την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής (linear fit), όπου παρουσιάζεται στην εικόνα 61, θα ελέγξουμε ακριβώς την γραμμικότητα που παρουσιάζουν. Ενδεικτικά, εφαρμόζουμε το linear fit στο small IDE4. Από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson ο οποίος όταν ισούται με 1 συμπεραίνεται ότι είναι πράγματι γραμμική. Παράλληλα, υπολογίζεται η κλίση της ευθείας I/V , η οποία ισούται με την αγωγιμότητα G και μέσω αυτή υπολογίζουμε την αντίσταση R από την σχέση $R = \frac{1}{G}$. Στην πραγματικότητα η αντίσταση R που υπολογίζεται από την κλίση της χαρακτηριστικής I-V δεν ισούται με την αντίσταση μόνο του υλικού, αλλά σε αυτή προστίθενται και η αντίσταση επαφής των μεταξύ των ηλεκτροδίων και του οξειδίου του ψευδαργύρου.



Σχήμα 61: Μέθοδος γραμμικής παρεμβολής (linear fit) για την μικρή διάταξη (small) της τέταρτης ψηφίδας του δείγματος G_{19} .

Η γραμμικότητα αυτή που επικρατεί στις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V υποδηλώνει ότι η επαφή μεταξύ του υλικού και των ηλεκτροδίων είναι ωμική. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται οι αντιστάσεις

R που προέκυψαν μέσω της κλίσης των χαρακτηριστικών I-V. Αυτό το οποίο παρατηρείται αρχικά είναι ότι οι αντιστάσεις για τις μικρές διατάξεις (small) στις τέσσερις ψηφίδες είναι παρόμοιες χωρίς να είναι ακριβώς ίσες. Το ίδιο συμβαίνει για όλες τις μεσαίες (medium) και για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων. Οι αποκλίσεις αυτές συμβαίνουν λόγω της ανομοιομορφίας σε ορισμένα σημεία του πάχους του υμενίου. Πιο συγκεκριμένα στην ενότητα 3.2.2 παρατηρήθηκε ότι για χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτών το δείγμα G_{14} είχε μεγάλη απόκλιση στο πάχος του υμενίου που είχε αναπτυχθεί έναντι των άλλων δύο δειγμάτων. Συνάμα, μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις όπως παρατηρήθηκε ακόμη και στο πάχος του υμενίου του ίδιου δείγματος. Επομένως είναι λογικό να υπάρχουν τέτοιες αποκλίσεις για τις διατάξεις που έχουν το ίδιο μέγεθος αλλά είναι σε άλλη ψηφίδα του δείγματος.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	128.83	78.81	X
IDE2	113.23	72.38	77.52
IDE3	104.39	50.53	X
IDE4	114.73	81.62	43.16

Πίνακας 6: Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.

Επιπρόσθετα αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι μικρές (small) διατάξεις έχουν μεγαλύτερη αντίσταση συγκριτικά με τις μεσαίες (medium), οι οποίες και αυτές με την σειρά τους έχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με τις μεγάλες (large) διατάξεις. Αυτό συμβαίνει, διότι το κάθε ηλεκτρόδιο αποτελεί μία αντίσταση και τα ηλεκτρόδια σε κυκλωματική αναπαράσταση αποτυπώνονται ως αντιστάσεις παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Αν οι αντίσταση του ηλεκτροδίου θεωρηθεί R_e , τότε στις μικρές (small) διατάξεις που αποτελούνται από 15 ηλεκτρόδια ισχύει ότι $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_e} + \dots + \frac{1}{R_e} \Leftrightarrow \frac{1}{R} = \frac{15}{R_e} \Leftrightarrow R_e = 15R$. Αντίστοιχα, για τις μεσαίες (medium) διατάξεις που αποτελούνται από 25 ηλεκτρόδια ισχύει $R_e = 25R$ και στις μεγάλες (large) διατάξεις που αποτελούνται από 49 ηλεκτρόδια ισχύει ότι $R_e = 49R$. Βάση των παραπάνω πραγματοποιούνται υπολογισμοί για τις αντιστάσεις R_e κάθε διάταξης, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 7. Από τον υπολογισμό της αντίστασης του κάθε ηλεκτροδίου (R_e) της κάθε διάταξης παρατηρούνται εμφανώς μεγαλύτερες διαφορές έναντι της αντίστασης R που υπολογίστηκε στον πίνακα 6. Ειδικότερα στις αντιστάσεις ηλεκτροδίων των μεγάλων διατάξεων παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τις μεσαίες, οι οποίες και αυτές των μικρών. Πέρα από τυχόν ανομοιομορφίες στο πάχος του υμενίου που είχε αναπτυχθεί, συμβαίνει λόγω της αντίστασης επαφών που υπάρχει μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υμενίου, όπου στις μεγάλες διατάξεις είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις μεσαίες και τις μικρές.

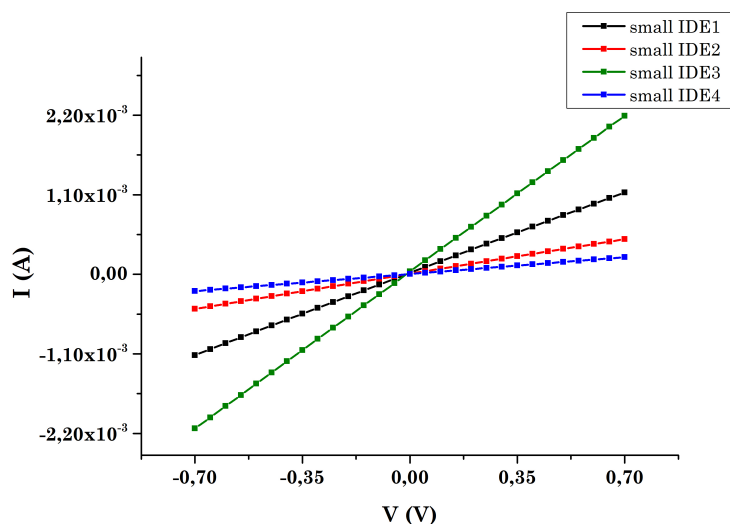
Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	1.93×10^3	1.97×10^3	X
IDE2	1.70×10^3	1.81×10^3	3.80×10^3
IDE3	1.57×10^3	1.26×10^3	X
IDE4	1.72×10^3	2.04×10^3	2.11×10^3

Πίνακας 7: Ηλεκτρικές αντιστάσεις κάθε ηλεκτροδίου (finger) των διατάξεων του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.

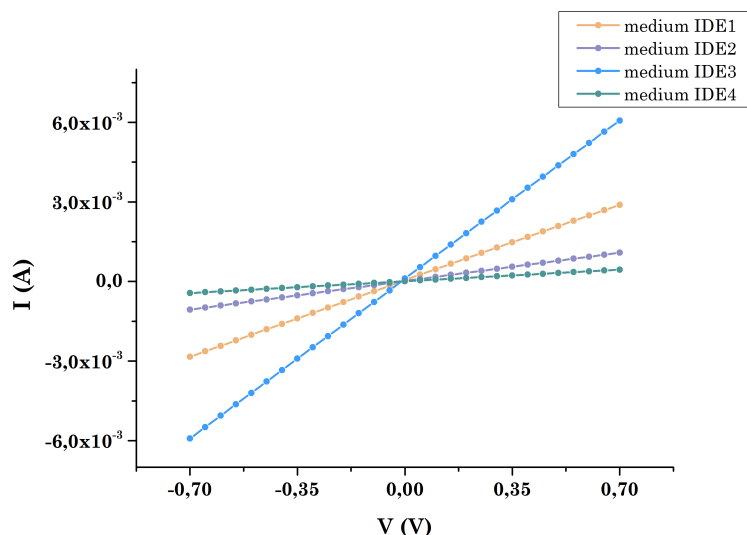
4.3.2.1 Θερμική Ανόπτηση Υμενίων ZnO με Ηλεκτρόδια Αλουμινίου στην Επιφάνεια

Στο επόμενο πείραμα που έλαβε χώρα, πραγματοποιήθηκε θερμική ανόπτηση του δείγματος G_{19}

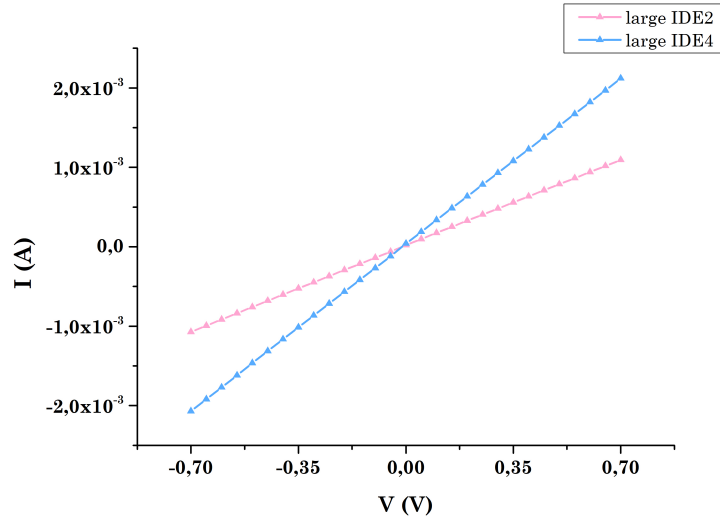
στους 231°C για 60 λεπτά, αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια και είχαν ολοκληρωθεί οι παραπάνω μετρήσεις. Από τις χαρακτηριστικές I-V που παρουσιάζονται στις εικόνες 62, 63 και 64 παρατηρείται ότι καμπύλες παραμένουν γραμμικές, γεγονός που επιβεβαιώνεται εφαρμόζοντας εκ νέου την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής (linear fit) σε όλες τις γραφικές που εξάγονται από τις μετρήσεις.



Σχήμα 62: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφιδών 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 63: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφιδών 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.



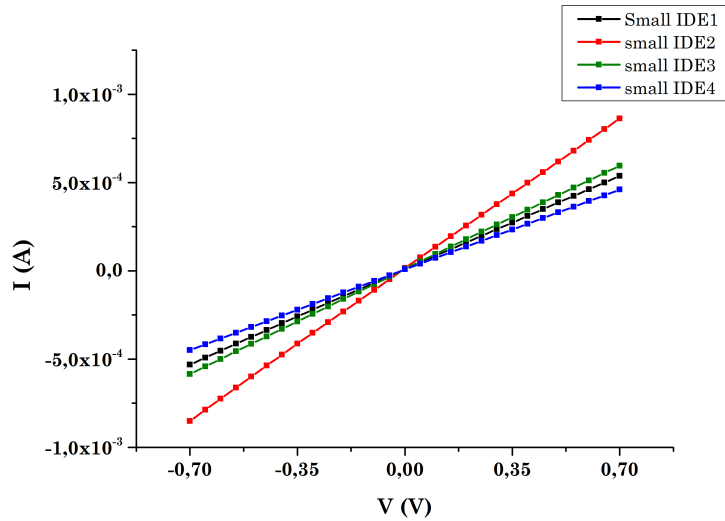
Σχήμα 64: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για πρώτη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.

Αυτό το οποίο εντοπίζεται από των υπολογισμό των αντιστάσεων μέσω της κλίσης των καμπύλων I-V στον παρακάτω πίνακα 8 είναι ότι οι αντιστάσεις του υλικού ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση αυξάνονται σε όλες τις διατάξεις, σε όλες τις ψηφίδες, χωρίς όμως στην προκειμένη περίπτωση οι αντιστάσεις να είναι παρόμοιες βάση του μεγέθους των διατάξεων. Επιπρόσθετα, αυτό το οποίο εντοπίζεται είναι ότι δεν ισχύει για το παρόν πείραμα ότι η πλειονότητα των αντιστάσεων των μικρών διατάξεων δεν είναι μεγαλύτερη από τις αντιστάσεις των μεσαίων διατάξεων και αυτές με την σειρά τους δεν είναι μεγαλύτερες από αυτές των μεγάλων. Από την άλλη πλευρά, σε κάθε ψηφίδα ισχύει ότι η αντίσταση της μικρής διάταξης είναι μεγαλύτερη από της μεσαίας διάταξης, η οποία είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση της μεγάλης διάταξης.

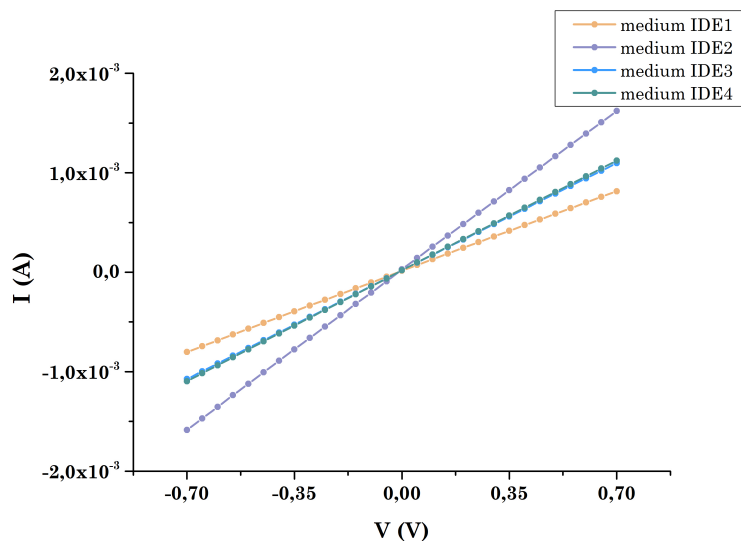
Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	0.62×10^3	0.24×10^3	\times
IDE2	1.45×10^3	0.65×10^3	0.65×10^3
IDE3	0.32×10^3	0.12×10^3	\times
IDE4	2.99×10^3	1.58×10^3	0.33×10^3

Πίνακας 8: Ηλεκτρικές αντιστάσεις των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση.

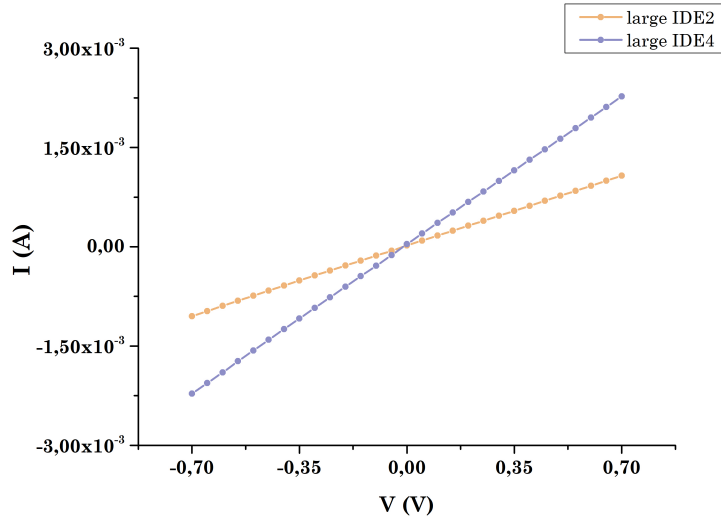
Στο ακόλουθο πείραμα πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία του δείγματος G_{19} . Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω μετρήσεων, το δείγμα επανατοποθετήθηκε στο φούρνο για επιπρόσθετη θερμική ανόπτηση στους 231°C για 60 λεπτά. Από την εξαγωγή των χαρακτηριστικών I-V που παρουσιάζονται στις εικόνες 65, 66 και 67 γίνεται αντιληπτό ότι η γραμμικότητα παραμένει και κατ' επέκταση ότι η επαφή μετάλλου και ημιαγωγού είναι ωμική.



Σχήμα 65: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 66: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 67: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{19} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφιδών 1, 2, 3 και 4 (IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{19} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση για δεύτερη φορά στους 231°C διάρκειας 60 λεπτών αφού είχαν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια.

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται οι αντιστάσεις όλων των διατάξεων ύστερα από την ολοκλήρωση της δεύτερης θερμικής ανόπτησης που πραγματοποιείται στο δείγμα G_{19} . Αυτό το οποίο παρατηρείται από τις μετρήσεις είναι ότι κάποιες αντιστάσεις αυξήθηκαν και κάποιες άλλες μειώθηκαν. Συγκεκριμένα αυτό το οποίο παρατηρείται είναι ότι κατά βάση αντιστάσεις οι οποίες αυξήθηκαν ραγδαία στην πρώτη θερμική ανόπτηση είναι και αυτές που μειώθηκαν στην δεύτερη θερμική ανόπτηση. Για παράδειγμα, οι διατάξεις small IDE2, small IDE4 και medium IDE4 μειώνονται αισθητά, καθώς η αύξηση τους στο πρώτο annealing ήταν μεγάλη. Παράλληλα, αυτό το οποίο παρατηρείται είναι ότι στις παρούσες μετρήσεις οι αντιστάσεις έγιναν πιο ομοιόμορφες ανάλογα με το μέγεθος της διάταξης. Αυτό εντοπίζεται στο γεγονός ότι στις προηγούμενες μετρήσεις (βλ. πίνακα 8) ανάμεσα σε όλες τις μεσαίες διατάξεις η ελάχιστη αντίσταση ήταν $0.12 \times 10^3 \Omega$ και η μέγιστη ήταν $1.58 \times 10^3 \Omega$, ενώ σε αυτές (βλ. πίνακα 9) τις μετρήσεις ανάμεσα σε όλες τις μεσαίες διατάξεις η ελάχιστη αντίσταση είναι $0.44 \times 10^3 \Omega$ και η μέγιστη $0.87 \times 10^3 \Omega$.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	1.31×10^3	0.87×10^3	X
IDE2	0.82×10^3	0.44×10^3	0.66×10^3
IDE3	1.19×10^3	0.64×10^3	X
IDE4	1.54×10^3	0.63×10^3	0.31×10^3

Πίνακας 9: Ηλεκτρικές αντιστάσεις των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την δεύτερη θερμική ανόπτηση.

4.3.2.2 Θερμική Ανόπτηση Υμενίων ZnO χωρίς Ηλεκτρόδια Αλουμινίου στην Επιφάνεια

Τα πειράματα τα οποία πραγματοποιούνται στην συνέχεια σχετίζονται με μετρήσεις I-V εφαρμοζόμενης τάσης από -0.7 έως 0.7V με το όριο του οργάνου να είναι ρυθμισμένο στα 10mA σε υποστρώματα που έχουν υποστεί θερμική ανόπτηση αφού πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη νανοδομών ZnO και πριν την τοποθέτηση των διακλαδισμένων ηλεκτροδίων.

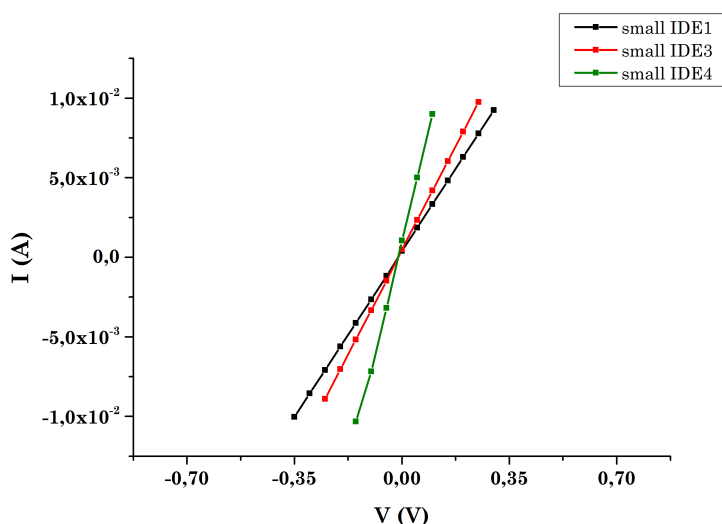
Αρχικά, στο παρόν πείραμα μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του δείγματος G_{18} για τις ψηφίδες 1, 2, 3 και 4 όπου ονομάστηκαν IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4 αντίστοιχα και οποία

παρουσιάζονται και στην εικόνα 68. Το δείγμα G_{18} τοποθετήθηκε σε φούρνο για 60 λεπτά στους $231^{\circ}C$, αφού είχε αναπτυχθεί το υμένιο ZnO στην επιφάνεια του και πριν ακόμη τοποθετηθούν ηλεκτρόδια. Οι μετρήσεις I-V δεν έγιναν σε όλες τις διατάξεις όλων των ψηφίδων του δείγματος, καθώς σε ορισμένες δεν είχε επιτευχθεί ανάπτυξη υμενίου λόγω του ειδικού δειγματοφορέα που είχε τοποθετηθεί το δείγμα κατά την διάρκεια της υδροθερμικής ανόπτησης. Παράλληλα, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε όλες τις διατάξεις, καθώς προηγουμένως ελέγχθηκαν οι διατάξεις με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Ορισμένες από αυτές δεν παρουσίαζαν την δομή διακλαδισμένων ηλεκτροδίων που ήταν επιθυμητή εξαιτίας προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν κατά την διάρκεια της λιθογραφίας λόγω ανομοιομορφίας της επιφάνειας του υμενίου σε ορισμένα σημεία.

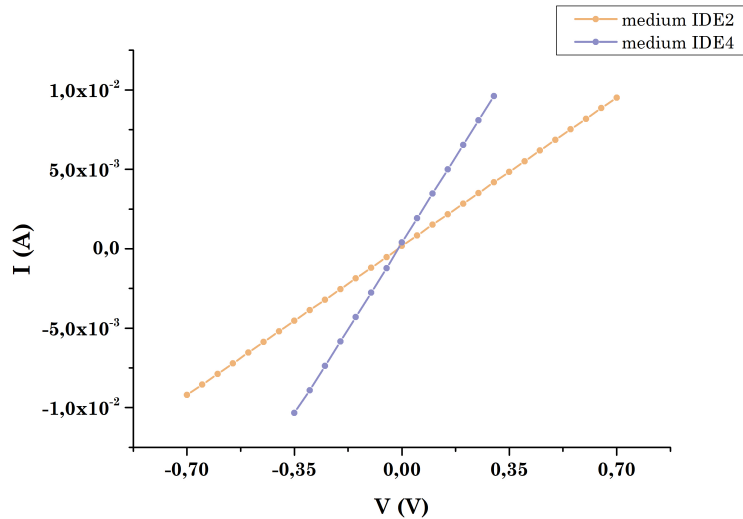


Σχήμα 68: Δείγμα G_{18} και ονομασία ψηφίδων.

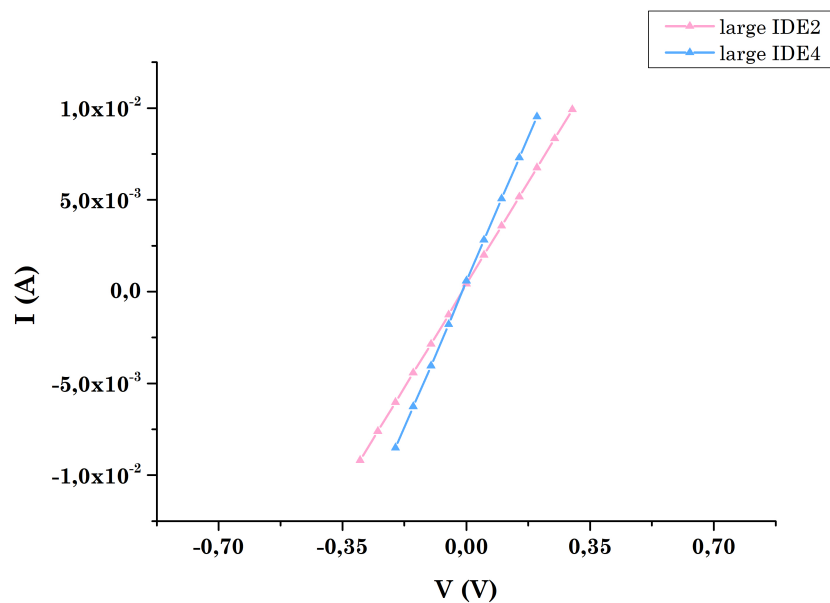
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του δείγματος G_{18} παρουσιάζονται στις εικόνες 69, 70 και 71.



Σχήμα 69: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων $231^{\circ}C$, για 60 λεπτά.



Σχήμα 70: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μεσαίες (medium) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 231°C , για 60 λεπτά.



Σχήμα 71: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{18} για όλες τις μεγάλες (large) διατάξεις των ψηφίδων 1, 3 και 4 (IDE1, IDE3 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{18} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 231°C , για 60 λεπτά.

Παρατηρώντας τις χαρακτηριστικές I-V γίνεται αντιληπτό ότι και στην προκειμένη περίπτωση η σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης είναι γραμμική, γεγονός που επιβεβαιώνεται εφαρμόζοντας linear fit σε όλες τις καμπύλες. Επομένως η επαφή μετάλλου ημιαγωγού παραμένει ωμική. Έπειτα μέσω της κλίσης υπολογίζεται η αντίσταση κάθε διάταξης. Οι αντιστάσεις οι οποίες προέκυψαν και παρουσιάζονται στον πίνακα 10 είναι πιο χαμηλές συγκριτικά με τις αντιστάσεις που προέκυψαν από το δείγμα G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση (βλ. πίνακα 6). Συνάμα, σε αντίθεση με τα

προηγούμενα πειράματα παρατηρείται ότι οι διατάξεις των μικρών ηλεκτροδίων δεν παρουσιάζονται μεγαλύτερη αντίσταση συγκριτικά με την αντίσταση των μεσαίων διατάξεων, οι οποίες με την σειρά τους δεν παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση από αυτή των μικρών διατάξεων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αντίστασης των επαφών η οποία λήφθηκε ως αμελητέα στα προηγούμενα πειράματα και στο παρόν πείραμα πιθανότατα δεν είναι λόγω της θερμικής επεξεργασίας του υποστρώματος.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	33.65	\times	\times
IDE2	\times	74.68	31.33
IDE3	26.77	\times	\times
IDE4	12.73	32.41	22.12

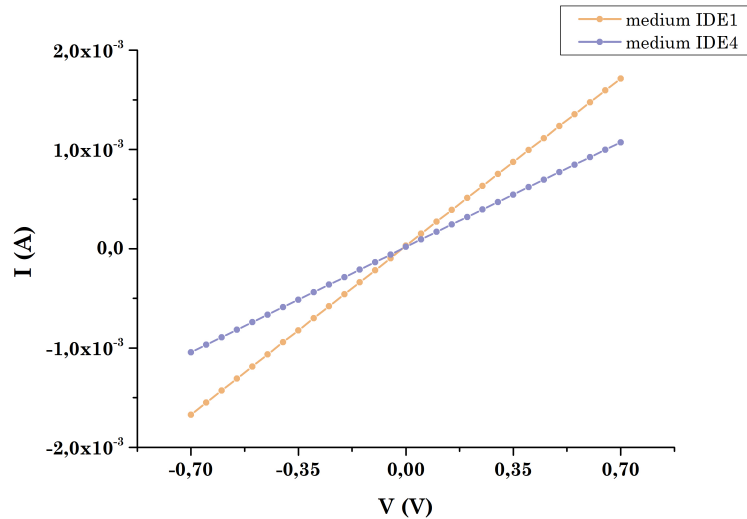
Πίνακας 10: Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{18} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $231^{\circ}C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Ύστερα, το επόμενο πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε σχετίζεται με την εξαγωγή καμπύλης I-V του δείγματος G_{22} για τις ψηφίδες 1, 2, 3 και 4 όπου ονομάστηκαν IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4 αντίστοιχα και οποία παρουσιάζονται και στην εικόνα 72. Το δείγμα G_{22} τοποθετήθηκε σε φούρνο για 60 λεπτά στους $324^{\circ}C$, αφού είχε αναπτυχθεί το υμένιο ZnO στην επιφάνεια του και πριν ακόμη τοποθετηθούν ηλεκτρόδια. Οι μετρήσεις I-V δεν πραγματοποιήθηκαν σε όλες τις διατάξεις που υπήρχαν στο δείγμα G_{22} , εξαιτίας των ίδιων προβλημάτων που υπήρχαν και στο προηγούμενο πείραμα.

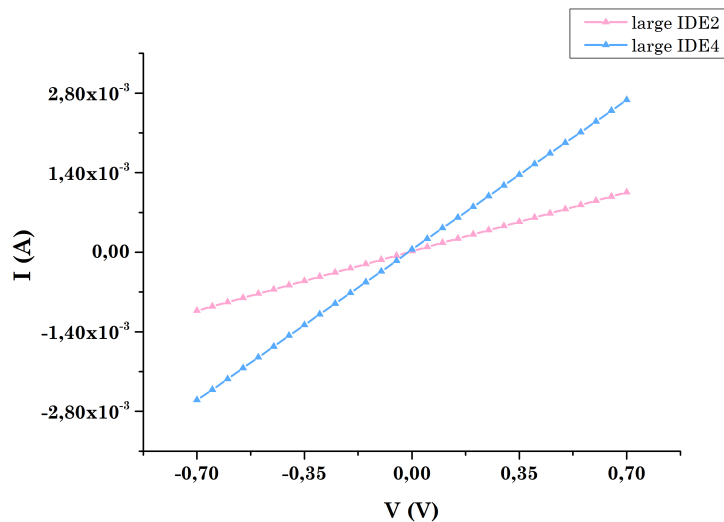


Σχήμα 72: Δείγμα G_{22} και ονομασία ψηφίδων.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του δείγματος G_{22} παρουσιάζονται στις εικόνες 73 και 74.



Σχήμα 73: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{22} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των φηφιδών 1, 2 και 4 (IDE1, IDE2 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{22} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων $324^{\circ}C$, για 60 λεπτά.



Σχήμα 74: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{22} για όλες τις μεσαίες (large) διατάξεις των φηφιδών 1, 2 και 4 (IDE1, IDE2 και IDE4) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{22} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων $324^{\circ}C$, για 60 λεπτά.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από την παρατήρηση των γραφικών είναι ότι η σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης παραμένει γραμμική και επιβεβαιώνεται και από την μέθοδο linear fit που εφαρμόζεται, άρα έχουμε και στο παρόν πείραμα ωμική επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων και του υμενίου ZnO. Οι αντιστάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 11 παρατηρείται ότι αυξάνονται τουλάχιστον 10 φορές πάνω συγκριτικά με την προηγούμενη θερμοκρασία ανόπτησης του υποστρώματος που ήταν σχεδόν $100^{\circ}C$ λιγότερο. Στο συγκεκριμένο πείραμα που έχει τοποθετηθεί για θερμική ανόπτηση το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO πριν την εναπόθεση αλουμινίου παρατηρείται ότι όπως και πριν οι αντιστάσεις των μεσαίων διατάξεων δεν είναι απόλυτο ότι θα είναι μεγαλύτερες από τις αντιστάσεις

των μεγάλων διατάξεων. Πιθανότητα και σε αυτή την περίπτωση αυτό γίνεται λόγω της αντιστάσης επαφής.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	\times	0.41×10^3	\times
IDE2	\times	\times	0.67×10^3
IDE4	\times	0.66×10^3	0.26×10^3

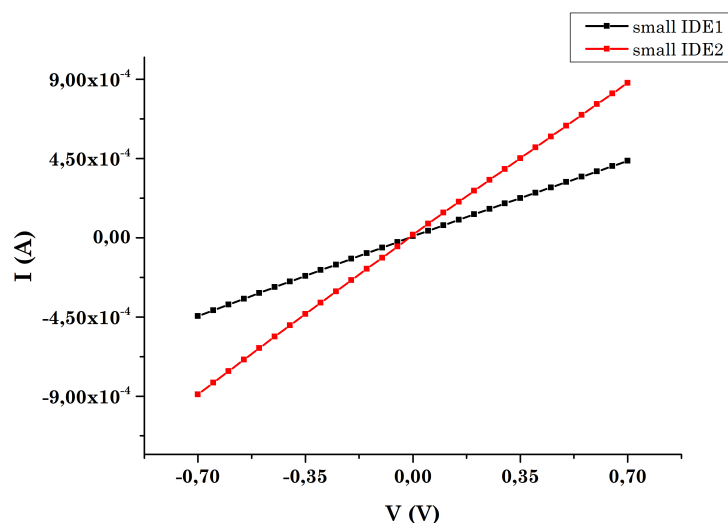
Πίνακας 11: Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{22} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους $324^\circ C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Μετάπειτα, το πείραμα το οποίο διεξάγεται σχετίζεται με την λήψη των χαρακτηριστικών I-V του δείγματος G_{23} , όπου αυτή την φορά το υπόστρωμα του αφού πρώτα έχει αναπτυχθεί το υμένιο ZnO έχει υποστεί θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους $400^\circ C$ πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων. Οι ψηφίδες 1 και 2 του δείγματος G_{23} ονομάστηκαν IDE1 και IDE2 αντίστοιχα και παρουσιάζονται στην εικόνα 75. Οι μετρήσεις I-V δεν πραγματοποιήθηκαν σε όλες τις διατάξεις που υπήρχαν στο δείγμα G_{23} , λόγω των ίδιων προβλημάτων που υπήρχαν και στα προηγούμενα πειράματα.

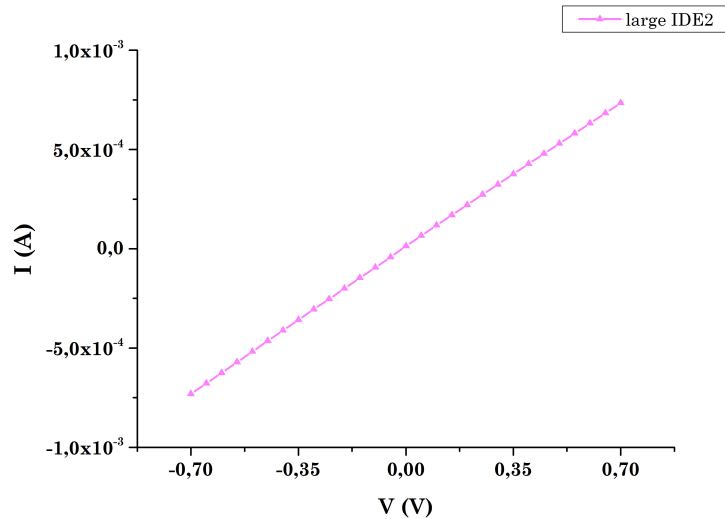


Σχήμα 75: Δείγμα G_{23} και ονομασία ψηφίδων.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του δείγματος G_{23} παρουσιάζονται στις εικόνες 76 και 77.



Σχήμα 76: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{23} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1 και 2 (IDE1 και IDE2) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{23} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων $400^\circ C$, για 60 λεπτά.



Σχήμα 77: Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{23} για την μεγάλη (large) διάταξη της ψηφίδας IDE2 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{23} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 400°C , για 60 λεπτά.

Από την παρατήρηση των γραφικών παραστάσεων προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης είναι γραμμική για ανόπτηση του δείγματος G_{23} στους 400°C για 60 λεπτά και ότι η επαφή μετάλλου (Al) και ημιαγωγού (ZnO) είναι ωμική. Μέσω της κλίσης της καμπύλης εξάγονται οι αντιστάσεις, οι οποίες όπως παρατηρείται στον πίνακα 12 είναι ακόμη μεγαλύτερες συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα όπου η θερμοκρασία ανόπτησης ήταν μεγαλύτερη.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	1.59×10^3	\times	\times
IDE2	0.79×10^3	\times	0.95×10^3

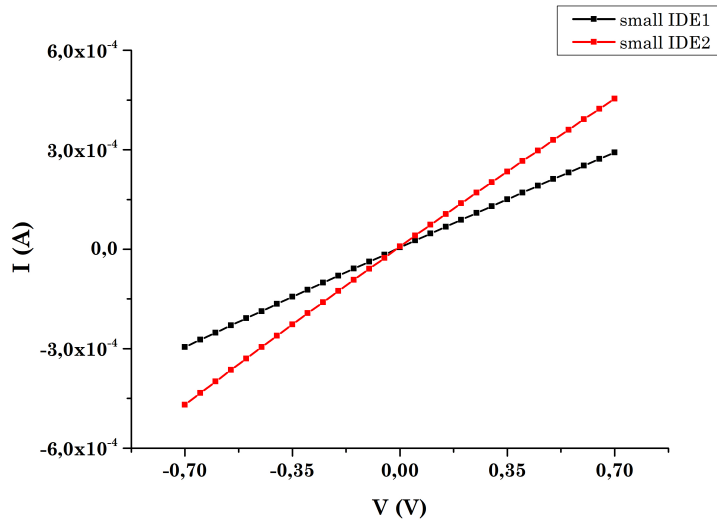
Πίνακας 12: Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{23} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 400°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Το τελευταίο πείραμα το οποίο πραγματοποιείται είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών I-V για το δείγμα G_{24} , στο οποίο έχει γίνει θερμική ανόπτηση στους 500°C για 60 λεπτά αφού αναπτύχθηκε το ZnO και πριν τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια. Οι ψηφίδες 1, 2, 3 και 4 ονομάστηκαν IDE1, IDE2, IDE3 και IDE4 αντίστοιχα, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 78. Οι μετρήσεις IV δεν πραγματοποιήθηκαν σε όλες τις διατάξεις που υπήρχαν στο δείγμα G_{24} , εξαιτίας των ίδιων προβλημάτων που υπήρχαν και στα προηγούμενα πειράματα όσον αφορά την εναπόθεση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του ZnO ύστερα από την θερμική ανόπτηση.

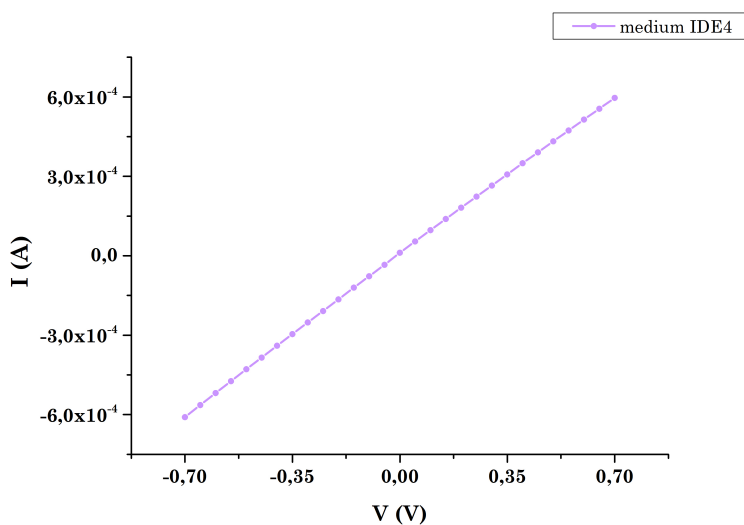


Σχήμα 78: Δείγμα G_{24} και ονομασία ψηφίδων.

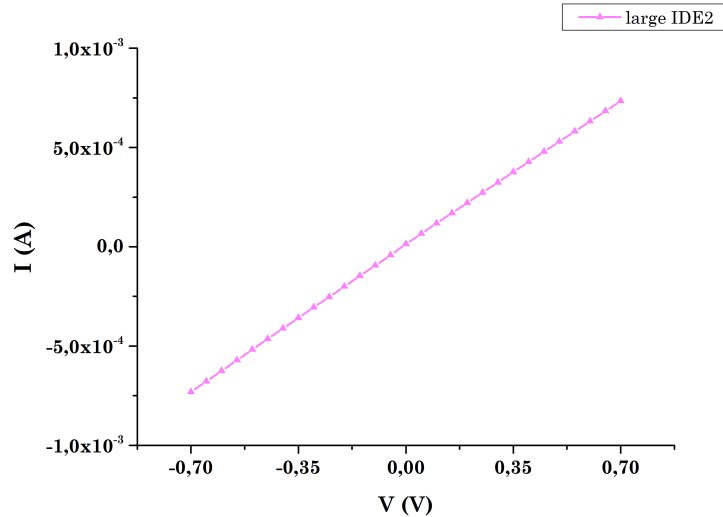
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του δείγματος G_{24} παρουσιάζονται στις εικόνες 79, 80 και 81.



Σχήμα 79: Χαρακτηριστικές I-V του δείγματος G_{24} για όλες τις μικρές (small) διατάξεις των ψηφίδων 1 και 2 (IDE1 και IDE2) πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.



Σχήμα 80: Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{24} για την μεσαία (medium) διάταξη της ψηφίδας IDE4 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.



Σχήμα 81: Χαρακτηριστική I-V του δείγματος G_{24} για την μεγάλη (large) διάταξη της ψηφίδας IDE3 πάνω σε υπόστρωμα ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά. Το δείγμα G_{24} είχε υποστεί θερμική ανόπτηση πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων 500°C , για 60 λεπτά.

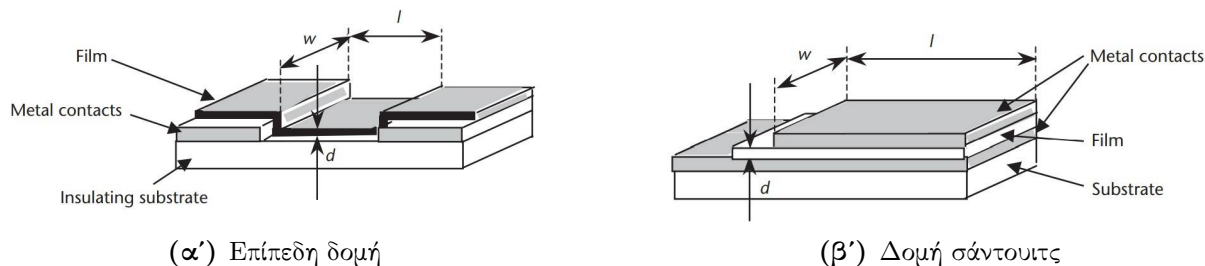
Από τις γραφικές παραστάσεις 79, 80 και 81 προκύπτει η γραμμικότητα των I-V, γεγονός που δηλώνει ότι και εδώ η επαφή ηλεκτροδίων και οξειδίου του ψευδαργύρου είναι ωμική. Από τις αντιστάσεις που υπολογίζονται στον πίνακα 13 δεν μπορεί να εξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα αν η αντίσταση μειώθηκε ή αν αυξήθηκε με την επιπρόσθετη αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, καθώς στην μεγάλη διάταξη μειώνεται, ενώ στις μικρές διατάξεις παρατηρείται αύξηση. Αυτό όμως που σίγουρα φαίνεται ότι η αντίσταση στις μικρές διατάξεις ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση της μεσαίας διάταξης, η οποία είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση της μεγάλης διάταξης.

Διατάξεις	Small (Ω)	Medium (Ω)	Large (Ω)
IDE1	2.38×10^3	\times	\times
IDE2	1.52×10^3	\times	\times
IDE3	\times	\times	0.55×10^3
IDE4	\times	1.16×10^3	\times

Πίνακας 13: Ηλεκτρικές αντιστάσεις για τις διατάξεις του δείγματος G_{24} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 500°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

4.3.3 Υπολογισμός Ειδικής Αντίστασης του Υλικού

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του υλικού που αναπτύχθηκε θα πραγματοποιηθεί μέσω της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού. Η ειδική αγωγιμότητα συμβολίζεται με σ , είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής αντίστασης και υπολογίζεται από τον τύπο $\sigma = \frac{1}{\rho}$ με θεμελιώδης μονάδα μέτρησης το 1 Siemens/m. Η ειδική αγωγιμότητα των λεπτών υμενίων μπορεί να μελετηθεί θεωρητικά και πειραματικά σε δύο πιθανές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι η αγωγιμότητα στο επίπεδο του υμενίου (πλευρική ή επίπεδη) και η δεύτερη είναι στην κατεύθυνση που είναι κάθετη στην επιφάνεια του υμενίου (κανονική αγωγιμότητα). Πειραματικά, αυτές οι δύο περιπτώσεις αγωγιμότητας μπορούν να ελεγχθούν σε επίπεδες και “σάντουιτς” δομές αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 82.



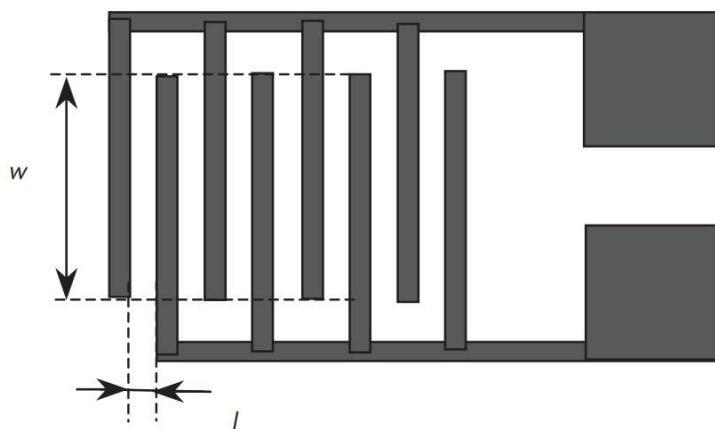
Σχήμα 82: Μετρήσεις αγωγιμότητας της δομής των λεπτών υμενίων για επίπεδη δομή και για δομή σάντουιτς.[24]

Η ειδική αγωγιμότητα και στις δύο περιπτώσεις ορίζεται ως $\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{l}{A}$, όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, τα οποία χωρίζονται με απόσταση l, που οδηγεί το ρεύμα I μέσω της διατομής A. Στις επίπεδες δομές, το L είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και το A είναι το γινόμενο του πάχους του υμενίου d και του πλάτους του ηλεκτροδίου w, δηλαδή $A = d \times w$. Συνήθως, σε επίπεδες κατασκευές, το L είναι πολύ μεγαλύτερο και το A είναι πολύ μικρότερο από τις αντίστοιχες τιμές στις κατασκευές σάντουιτς.

Στην περίπτωση όπου έχουν εναποτεθεί διακλαδισμένα ηλεκτρόδια σε επίπεδες δομές όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 82α', η ειδική αγωγιμότητα ισούται με:

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{l}{(N - 1) \cdot w \cdot d}$$

όπου όπου N είναι ο αριθμός των ηλεκτροδίων, l είναι η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων και w είναι το μήκος επικάλυψης των ηλεκτροδίων (βλ. εικόνα 83). [24]



Σχήμα 83: Διακλαδισμένα ηλεκτρόδια για μετρήσεις επίπεδης αγωγιμότητας.[24]

Προσεγγιστικά, θα γίνει χρήση του παραπάνω τύπου για τον υπολογισμό της ειδικής αγωγιμότητας του υμενίου ZnO που αναπτύχθηκε, παρόλο που τα ηλεκτρόδια στα παρόντα πειράματα έχουν εναποτεθεί πάνω από το υμένιο ZnO και οι διατάξεις των πειραμάτων δεν ικανοποιούν πλήρως τον ορισμό της επίπεδης δομής που παρουσιάζεται στην εικόνα 82α'.

Αρχικά το πάχος του υμενίου d θα θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσο με 1322.81 nm, το οποίο είναι το πάχος του υμενίου ZnO για χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτών και είχε υπολογιστεί αναλυτικά στην ενότητα 3.2.2. Το πάχος υμενίου θεωρείται ίδιο για όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς όλες οι διατάξεις έφεραν υμένιο ZnO με χρόνο ανάπτυξης 120 λεπτά.

Η ειδική αντίσταση του υλικού υπολογίζεται με την χρήση του τύπου:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{V}{I} \cdot \frac{(N - 1) \cdot w \cdot d}{l}$$

όπου $w=500 \mu\text{m}$, $l=40 \mu\text{m}$, $d=1322.81 \mu\text{m}$ και $N=15$ για τις μικρές διατάξεις, $N=25$ για τις μεσαίες διατάξεις και $N=49$ για τις μεγάλες διατάξεις.

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{19} πριν την θερμική ανόπτηση που προέκυψαν από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 14.

Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	2.98×10^3	3.17×10^3	X
IDE2	2.62×10^3	2.87×10^3	6.15×10^3
IDE3	2.42×10^3	2.01×10^3	X
IDE4	2.66×10^3	3.24×10^3	3.43×10^3

Πίνακας 14: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} πριν υποστεί θερμική ανόπτηση.

4.3.3.1 Ειδική Αντίσταση για τα Υμένια ZnO με Θερμική Ανόπτηση μετά την Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{19} που προέκυψαν ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 231°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 15.

Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	1.44×10^4	0.97×10^4	X
IDE2	3.36×10^4	2.58×10^4	5.13×10^4
IDE3	0.75×10^4	0.46×10^4	X
IDE4	6.91×10^4	6.28×10^4	2.65×10^4

Πίνακας 15: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την πρώτη θερμική ανόπτηση.

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{19} που προέκυψαν ύστερα από την δεύτερη θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 231°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 9.

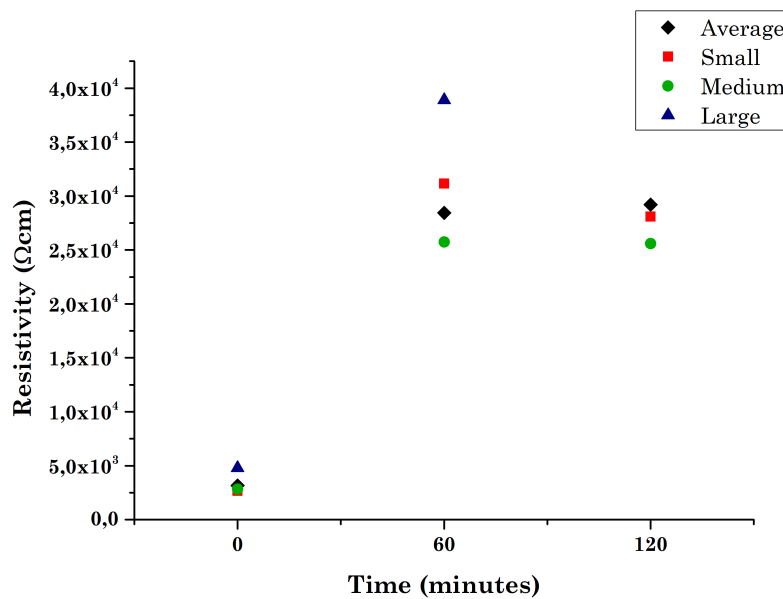
Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	3.04×10^4	3.43×10^4	X
IDE2	1.90×10^4	1.73×10^4	5.25×10^4
IDE3	2.74×10^4	2.56×10^4	X
IDE4	3.56×10^4	2.51×10^4	2.48×10^4

Πίνακας 16: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{19} ύστερα από την δεύτερη θερμική ανόπτηση.

Στην συνέχεια στον πίνακα 17 παρουσιάζεται η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης για το δείγμα G_{19} που προκύπτει από όλες τις διατάξεις, πριν την θερμική ανόπτηση, μετά την πρώτη θερμική ανόπτηση και μετά την δεύτερη. Παράλληλα, σε αυτόν τον πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ειδικές αντιστάσεις που προκύπτουν σύμφωνα με το μέγεθος της κάθε διάταξης και εξάγεται η γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου ανόπτησης που παρουσιάζεται στην εικόνα 84.

Χρόνος (min)	Ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{cm}$)			
	Average	Small ide	Medium ide	Large ide
0	0.31×10^4	0.27×10^4	0.28×10^4	0.48×10^4
60	2.84×10^4	3.12×10^4	2.57×10^4	2.89×10^4
120	2.92×10^4	2.81×10^4	2.56×10^4	3.86×10^4

Πίνακας 17: Υπολογισμός μέσης ειδικής αντίστασης για το δείγμα G_{19} που προκύπτει από όλες τις διατάξεις, πριν την θερμική ανόπτηση, μετά την πρώτη θερμική ανόπτηση και μετά την δεύτερη.



Σχήμα 84: Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου ανόπτησης.

4.3.3.2 Ειδική Αντίσταση για τα Υμένια ZnO με Θερμική Ανόπτηση πριν την Τοποθέτηση Ηλεκτροδίων

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{18} που προέκυψαν ύστερα από θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 231°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 10.

Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	0.78×10^3	\times	\times
IDE2	\times	2.96×10^3	2.49×10^3
IDE3	0.62×10^3	\times	\times
IDE4	0.30×10^3	1.29×10^3	1.79×10^3

Πίνακας 18: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{18} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 231°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{22} που προέκυψαν ύστερα από θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 324°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 19.

Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	\times	1.64×10^4	\times
IDE2	\times	\times	5.33×10^4
IDE4	\times	2.63×10^4	2.10×10^4

Πίνακας 19: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{22} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 324°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{23} που προέκυψαν ύστερα από θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 400°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 20.

Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	3.68×10^4	\times	\times
IDE2	1.83×10^4	\times	7.58×10^4

Πίνακας 20: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{23} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 400°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Οι υπολογισμοί για την ειδική αντίσταση του δείγματος G_{24} που προέκυψαν ύστερα από θερμική ανόπτηση για 60 λεπτά στους 500°C από την κάθε διάταξη παρουσιάζεται στον πίνακα 21

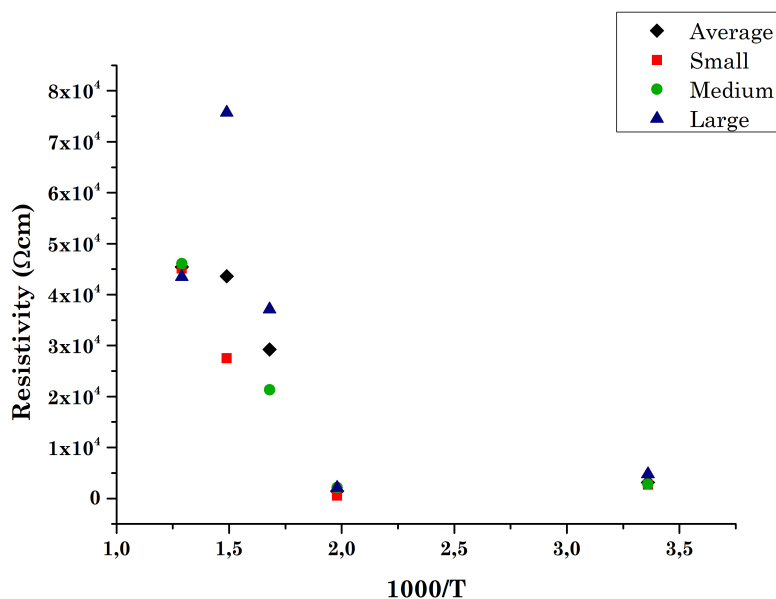
Διατάξεις	Small ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Medium ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Large ($\Omega \cdot \text{cm}$)
IDE1	5.51×10^4	\times	\times
IDE2	3.51×10^4	\times	\times
IDE3	\times	\times	4.35×10^4
IDE4	\times	4.61×10^4	\times

Πίνακας 21: Ειδική αντίσταση (ρ) των διατάξεων του δείγματος G_{24} αφού είχε υποστεί το υπόστρωμα με το υμένιο ZnO θερμική ανόπτηση στους 500°C πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

Έπειτα στον πίνακα 22 παρουσιάζεται η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης για το δείγμα G_{19} πριν την ανόπτηση, για το G_{18} με θερμική ανόπτηση 60 λεπτά στους 231°C , για το G_{22} με θερμική ανόπτηση 60 λεπτά στους 324°C , για το G_{23} με θερμική ανόπτηση 60 λεπτά στους 400°C και για το G_{24} με θερμική ανόπτηση 60 λεπτά στους 500°C . Συνάμα, στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ειδικές αντιστάσεις που προκύπτουν σύμφωνα με το μέγεθος της κάθε διάταξης και εξάγεται η γραφική παράσταση (βλ. εικόνα 85) της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας ανόπτησης που επιβάλλεται.

Θερμοκρασία $^\circ\text{C}$	Ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{cm}$)			
	Average	Small ide	Medium ide	Large ide
25	0.32×10^4	0.27×10^4	0.28×10^4	0.48×10^4
231	0.15×10^4	0.06×10^4	0.21×10^4	0.21×10^4
324	2.92×10^4	\times	2.13×10^4	3.71×10^4
400	4.36×10^4	2.75×10^4	\times	7.58×10^4
500	4.54×10^4	4.51×10^4	4.61×10^4	4.35×10^4

Πίνακας 22: Υπολογισμός μέσης ειδικής αντίστασης για όλα τα δείγματα με θερμική ανόπτηση των υποστρωμάτων σε διαφορετικές θερμοκρασίες πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.



Σχήμα 85: Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας ανόπτησης του υποστρώματος πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων.

4.3.3.3 Συμπεράσματα

Αρχικά αυτό το οποίο συμπεραίνεται από τους πίνακες 17 και 22 παραπάνω άλλα και από όλες τις μετρήσεις είναι ότι η ειδική αντίσταση του οξειδίου του ψευδαργύρου δεν είναι σε όλα τα σημεία του υμενίου ίδια για κάθε δείγμα. Από το γεγονός αυτό εξάγεται με ασφάλεια ότι το πάχος του υλικού δεν είναι ομοιόμορφο σε όλα τα σημεία του κάθε δείγματος. Επιπρόσθετα, οι διαφορές στην ειδική αντίσταση βάσει μεγέθους διατάξεων προέκυψαν εξαιτίας της υπόθεσης ότι η αντίσταση επαφής μεταξύ ηλεκτροδίων και ZnO θεωρήθηκε μηδενική ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι.

Όσον αφορά την ειδική αντίσταση η οποία προκύπτει συναρτήσει του χρόνου θερμικής ανόπτησης συμπεραίνεται ότι ενώ στην αρχή ήταν αρκετά χαμηλή μετά από 60 λεπτά ανόπτησης σχεδόν δεκαπλασιάστηκε. Μετά την παραμονή του δείγματος ακόμα 60 λεπτά στους 231°C προκύπτει ότι η μέση ειδική αντίσταση παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Πιο συγκεκριμένα παρατηρώντας τους πίνακες στους οποίους έχει υπολογιστεί η ειδική αντίσταση για όλες τις διατάξεις του G₁₉ για 60 και 120 λεπτά ανόπτησης, συμπεραίνεται ότι στα 60 λεπτά ανόπτησης υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες αποκλίσεις στο ρ από την μία διάταξη στην άλλη. Το φαινόμενο αυτό εξομαλύνεται μετά την δεύτερη θερμική ανόπτηση που υφίσταται το G₁₉. Επομένως, μετά την δεύτερη ανόπτηση το δείγμα έχει αποκτήσει μια πιο ομοιόμορφη ειδική αντίσταση σε όλες τις περιοχές του υμενίου ZnO σε αντίθεση με πριν και έχει σχεδόν διπλασιαστεί συγκριτικά με την αρχική.

Τα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης που προκύπτουν με την ανόπτηση των δειγμάτων σε διάφορες θερμοκρασίες για σταθερό χρόνο μετά την την ανάπτυξη ZnO και πριν την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αρχικά έρχονται σε σύγκρουση με τα προηγούμενα. Όταν το G₁₈ θερμανθεί στους 231°C για 60 λεπτά η μέση ειδική αντίσταση γίνεται σχεδόν η μισή, σε αντίθεση με την πρώτη ανόπτηση που εφαρμόστηκε στο G₁₉ και το μέσο ρ έχει δεκαπλασιαστεί στις ίδιες συνθήκες αλλά με την διαφορά είχε γίνει η τοποθέτηση ηλεκτροδίων πριν την ανόπτηση. Ύστερα, με αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης πριν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων το ρ παρατηρείται ότι αυξάνεται αρκετά φτάνοντας σχεδόν δεκαπλάσιο του αρχικού σε θερμοκρασία 324°C. Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στους 400°C οδηγεί σε αύξηση της ειδικής αντίστασης με μικρότερο ρυθμό. Ενώ όταν αυξάνεται στους 500°C η θερμοκρασία σχεδόν παραμένει η ειδική αντίσταση ίδια με αυτή που είχε προκύψει στους 400°C.

5 Επίλογος και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το οξειδίο του ψευδαργύρου αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα υλικά με πληθώρα εφαρμογών στον τομέα της μικροηλεκτρονικής και της νανοτεχνολογίας. Είναι ένα μοναδικό ημιαγωγίμο υλικό με ευρύ ενεργειακό διάκενο που παρουσιάζει πυροηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Μεγάλη ποικιλία μοναδικών νανοδομών με διαφορετικά μορφολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά αναπτύσσεται από το ZnO. Αυτό αποδεικνύει ότι πιθανόν αποτελεί την πλουσιότερη οικογένεια νανοδομών μεταξύ όλων των υλικών, τόσο εξαιτίας την πληθώρα των δομών που δημιουργεί όσο και των ιδιοτήτων που το διακατέχουν. Οι νανοδομές του ZnO βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών στην οπτοηλεκτρονική, τους αισθητήρες, της νανογεννήτριες και στην βιοϊατρική επιστήμη λόγω βιοσυμβατότητας.

Οι διατάξεις ακουστικών επιφανειακών κυμάτων βασιζόμενες στα λεπτά υμένια ZnO έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ποικίλων αισθητήρων. Η ευαισθησία των αισθητήρων αυτών είναι εξαιρετικά υψηλή καθιστώντας του απαραίτητους στις ολοένα μεγαλύτερες απαιτήσεις της κοινωνίας για παραγωγή αισθητήρων με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που εξάγουν με χαμηλό κόστος κατασκευής.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ανάπτυξη υμενίων ZnO με την χρήση της υδροθερμικής μεθόδου. Η μέθοδος αυτή προσδίδει καλά αποτελέσματα και επαναληψιμότητα και είναι αρκετά οικονομικά συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν ήταν 24 και ως στόχο είχαν την μελέτη της επίδρασης του χρόνου παραμονής τους στο λουτρό ανάπτυξης, διατηρώντας σταθερή την συγκέντρωση των αντιδρώντων, την θερμοκρασία καθώς και την διαδικασία παραγωγής και επίστρωσης του στρώματος πυρήνωσης. Τα πειράματα αυτά ως στόχο είχαν την μελέτη του πάχους των υμενίων ZnO που αναπτύσσονται, καθώς και την μορφολογία της επιφάνειάς τους. Ο χαρακτηρισμός των υμενίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωση και για την επιπρόσθετη επεξεργασία των εικόνων που προέκυψαν από αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ImageJ. Στην συνέχεια αποφάνθηκε ότι ο χρόνος ανάπτυξης έχει καθοριστικό ρόλο στο τελικό πάχος και στην μορφολογία της επιφάνειας των υμενίων ZnO. Η γνώση του πάχους και της επιφάνειας των υμενίων που αναπτύσσονται είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αισθητήρων ακουστικών επιφανειακών κυμάτων με αυστηρά καθορισμένες λειτουργίες και υψηλή ευαισθησία.

Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων πάνω στα υμένια ZnO που είχαν αναπτυχθεί με την υδροθερμική μέθοδο σε χρόνο 120 λεπτών. Οι διατάξεις αυτές χαρακτηρίστηκαν ηλεκτρικά και πιο συγκεκριμένα καταγράφηκε η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στους ακροδέκτες των ηλεκτροδίων. Εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και μέσω αυτών μελετήθηκε η ειδική αντίσταση του υλικού και η επαφή των ηλεκτροδίων με τα υμένια ZnO. Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την επιρροή διαφορετικών συνθηκών θερμικής ανόπτησης στα υμένια του ZnO πριν και μετά την τοποθέτηση ηλεκτροδίων και πως αυτή επηρεάζει την ειδική αντίσταση του υλικού. Βάση της σύγκρισης των δειγμάτων και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν καθιστά δυνατό τον καθορισμό του πάχους του πιεζοηλεκτρικού υμενίου ZnO και της ειδικής αντίστασης για την υλοποίηση ενός αισθητήρα ακουστικών επιφανειακών κυμάτων.

Τα υμένια ZnO που προέκυψαν θα μπορούσαν να μελετηθούν περαιτέρω με μεταβολή διαφόρων παραγόντων κατά την κατά την κατασκευή τους, όπως για παράδειγμα την αύξηση ή την μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων κατά την διάρκεια της υδροθερμικής ανάπτυξης. Παράλληλα θα μπορούσαν να μελετηθεί περαιτέρω η ανάπτυξη ZnO σε διαφορετικούς τύπους υποστρωμάτων. Αναφορικά με τις διατάξεις διακλαδισμένων ηλεκτροδίων που τοποθετήθηκαν στα υμένια θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν επιπρόσθετες συνθήκες θερμικής ανόπτησης ή ακόμα να τοποθετηθούν στο υμένιο ZnO ηλεκτρόδια διαφορετικού υλικού. Παρουσιάστηκε μεγάλη πρόοδος στο κομμάτι της μελέτης του υλικού οξειδίου του ψευδαργύρου όσον αφορά την μορφολογία του, το πάχος των υμενίων που παράγονται και την ειδική του αντίσταση ώστε στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αισθητήρων επιφανειακών ακουστικών κυμάτων.

References

- [1] *nanotechnology — Manufacturing, Food Processing, & Atoms — Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/nanotechnology>. (Accessed on 10/27/2022).
- [2] Samer Bayda, Muhammad Adeel, Tiziano Tuccinardi, Marco Cordani, and Flavio Rizzolio. “The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine”. In: *Molecules* 25.1 (2019), p. 112.
- [3] Jaison Jeevanandam, Ahmed Barhoum, Yen S Chan, Alain Dufresne, and Michael K Danquah. “Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations”. In: *Beilstein journal of nanotechnology* 9.1 (2018), pp. 1050–1074.
- [4] RC Jagessar. “Nanotechnology and Nanoparticles in Contemporary Sciences”. In: *Journal of Nanosciences Research & Reports. SRC/JNSRR-119*. DOI: [doi.org/10.47363/JNSRR/2021\(3\)118](https://doi.org/10.47363/JNSRR/2021(3)118) (2021), pp. 2–7.
- [5] *Applications of Nanotechnology — National Nanotechnology Initiative*. <https://www.nano.gov/about-nanotechnology/applications-nanotechnology>. (Accessed on 10/27/2022).
- [6] Klaus Ellmer, Andreas Klein, and Bernd Rech. “Transparent conductive zinc oxide: basics and applications in thin film solar cells”. In: (2007).
- [7] Claus F Klingshirn, Andreas Waag, Axel Hoffmann, and Jean Geurts. “Zinc oxide: from fundamental properties towards novel applications”. In: (2010).
- [8] Hadis Morkoç and Ümit Özgür. *Zinc oxide: fundamentals, materials and device technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [9] Jared Kirschner. “Surface acoustic wave sensors (SAWS)”. In: *Micromechanical systems* (2010).
- [10] Jorge L Gomez and Onur Tigli. “Zinc oxide nanostructures: from growth to application”. In: *Journal of Materials Science* 48.2 (2013), pp. 612–624.
- [11] Conor P Burke-Govey and Natalie OV Plank. “Review of hydrothermal ZnO nanowires: Toward FET applications”. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* 31.6 (2013), 06F101.
- [12] Debdyuti Mandal and Sourav Banerjee. “Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications”. In: *Sensors* 22.3 (2022), p. 820.
- [13] Moussa Hoummady, Andrew Campitelli, and Wojtek Wlodarski. “Acoustic wave sensors: design, sensing mechanisms and applications”. In: *Smart materials and structures* 6.6 (1997), p. 647.
- [14] Bo Liu, Xiao Chen, Hualin Cai, Mohammad Mohammad Ali, Xiangguang Tian, Luqi Tao, Yi Yang, and Tianling Ren. “Surface acoustic wave devices for sensor applications”. In: *Journal of semiconductors* 37.2 (2016), p. 021001.
- [15] Yuqi Huang, Pradipta Kr Das, and Venkat R Bhethanabotla. “Surface acoustic waves in biosensing applications”. In: *Sensors and Actuators Reports* 3 (2021), p. 100041.

- [16] DS Ballantine Jr, Robert M White, Stephen J Martin, Antonio J Ricco, ET Zellers, GC Frye, and H Wohltjen. *Acoustic wave sensors: theory, design and physico-chemical applications*. Elsevier, 1996.
- [17] Zhaozhao Tang, Wenyan Wu, and Jinliang Gao. “Water pressure sensing based on wireless passive SAW technology”. In: *Procedia Engineering* 119 (2015), pp. 892–900.
- [18] Adnan Mujahid and Franz L Dickert. “Surface acoustic wave (SAW) for chemical sensing applications of recognition layers”. In: *Sensors* 17.12 (2017), p. 2716.
- [19] Kerstin Lange, Bastian E Rapp, and Michael Rapp. “Surface acoustic wave biosensors: a review”. In: *Analytical and bioanalytical chemistry* 391.5 (2008), pp. 1509–1519.
- [20] Songcen Wang, Chong Xu, Xiaoshan Pan, and Bin Wei. “Design and application of high precision differential SAW sensor”. In: *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*. IEEE. 2017, pp. 890–893.
- [21] Anwar Ul-Hamid. *A beginners’ guide to scanning electron microscopy*. Vol. 1. Springer, 2018.
- [22] Ray F Egerton et al. *Physical principles of electron microscopy*. Vol. 56. Springer, 2005.
- [23] Gul Amin, MH Asif, Ahmed Zainelabdin, Siama Zaman, Omer Nur, and Magnus Willander. “Influence of pH, precursor concentration, growth time, and temperature on the morphology of ZnO nanostructures grown by the hydrothermal method”. In: *Journal of Nanomaterials* 2011 (2011).
- [24] Alexei Nabok. *Organic and inorganic nanostructures*. Artech House Publishers, 2005.