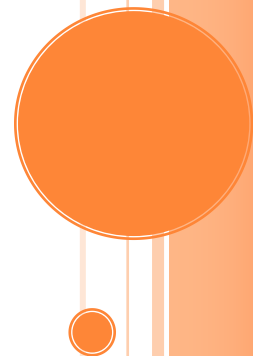


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
& ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΔΜΠΣ «ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΣΥΝΟΛΑ
ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Μουσαδάκος Δημήτριος
2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
& ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΜΠΣ «ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

«ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟΙ ΑΠΟ
ΣΥΝΟΛΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ»
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Μουσαδάκος Δημήτριος

Φυσικός

Τριμελής Συμβουλευτική επιτροπή:

Καθ. Δ. Τσουκαλάς (Επιβλέπων)

Αναπ. Καθ. Ι. Ράπτης

Αναπ. Καθ. Ι. Ζεργιώτη

Copyright © Δημήτριος Π. Μουσαδάκος, Αθήνα 2011

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.

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα μου, Καθηγητή ΕΜΠ, και Διευθυντή του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Δρ. Δημήτριο Τσουκαλά, για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου, όπως και για την εφευρετικότητά του σε όλες τις στιγμές που συνάντησα δυσκολίες.

Ευχαριστώ ακόμα:

- Τον Αναπ. Καθηγητή ΕΜΠ, Δρ. Ιωάννη Ράπτη για τις γνώσεις που προσέφερε στον τομέα της οπτικής αλλά και για τις χρήσιμες συμβουλές του στο «φινίρισμα» του σχεδιασμού των συστημάτων παραμόρφωσης, όπου έκαναν την λειτουργία τους ομαλή.
- Τον Δρ. Joe Tanner για την βοήθεια και επιτήρηση μου στον καθαρό χώρο καθώς και για την εκμάθηση του συστήματος εναπόθεσης νανοσωματιδίων και επιμετάλλωσης.
- Τον Δρ. E.Verrelli για την βοήθειά του στην μάθηση χειρισμού των μηχανημάτων των ηλεκτρικών μετρήσεων.
- Τον Υ.Δ. Μπρούτα Παναγιώτη για την κατασκευή του PCB καθώς και την βοήθειά του στον σχεδιασμό του, για τις γνώσεις του στον τομέα των ηλεκτρονικών και για τις χρήσιμες συμβουλές του για την ολοκλήρωση της διάταξης κάμψης υποστρώματος πυριτίου.
- Τον Υ.Δ. Ευάγγελο Σκοτάδη για την άριστη συνεργασία, την δημιουργία και τον χαρακτηρισμό ορισμένων κοινών δειγμάτων.
- Τον Υ.Δ. Σπύρο Σταθόπουλο για την ομαλή εισαγωγή μου στο Clean Room του Ε.Μ.Π. και την βοήθειά του στα πρώτα μου βήματα με το L-Edit.
- Το Μηχανουργείο του Ε.Μ.Π. του τομέα φυσικής για την άδεια χρήσης του εξοπλισμού του για την κατασκευή όλων των εξαρτημάτων που χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.
- Όλα τα μέλη του εργαστηρίου: Την Αναπ. Καθηγήτρια Δρα Ιωάννα Ζεργιώτη, τον Δρ. Πάνο Φωτόπουλο, τον Δρ. Αντώνη Φλωράκη, τη Δρα Σταυρούλα Κολιοπούλου, τον Ι. Καλπύρη, την Μ. Παναγοπούλου, την Μ. Χατζηπέτρου, τον Ν. Παντίσκο, τον Γ. Ζαχόπουλο και τον Δ. Τσιαλούκη.

- ο Τον Δρ. Κ. Γιαννακόπουλο για την προετοιμασία των TEM εικόνων.
- ο Τον Σπήλιο Ζιδρόπουλο για την απροβλημάτιστη λήψη δεδομένων από: SEM, AFM και profilometer.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κοπέλα μου Σοφία για την συμπαράστασή αλλά και την κατανόηση που έδειξε όλο το διάστημα διεξαγωγής αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Τόνια και Τάκη και την αδερφή μου Νίκη για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Επάνω σε υποστρώματα οξειδωμένου πυριτίου και πολυιμίδιου αναπτύχθηκαν αισθητήρες παραμορφώσεως από ηλεκτρόδια χρυσού και νανοσωματίδια πλατίνας. Στην ανίχνευση παραμόρφωσης παρατηρήθηκε συντελεστής ευαισθησίας 700, ο οποίος είναι δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν που παρατηρείται στα αισθητήρες από συνεχείς μεταλλικές ταινίες και επτά φορές μεγαλύτερος από τις υπάρχουσες διατάξεις παραμόρφωσης που βασίζονται σε ημιαγωγούς. Η μετρούμενη αντίσταση εξαρτάται στο μεγαλύτερο βαθμό από την μεταξύ απόσταση των σωματιδίων, η οποία μεταβάλλεται όταν το υπόστρωμα είναι παραμορφωθεί.

Παραδοσιακά, οι αισθητήρες παραμόρφωσης κατασκευάζονται είτε από μεταλλικά είτε από ημιαγωγικά υλικά. Η βασική αρχή λειτουργίας σε αυτούς είναι η μεταβολή της αντίστασης με την παραμόρφωση. Πιο πρόσφατα αντικείμενα νανοτεχνολογίας, όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα μέσα σε ένα πολυμερές πλέγμα[1][2] έχουν ερευνηθεί προς υψηλότερη ευαισθησία και χαμηλότερο κόστος της συσκευής. Η αλλαγή αντίστασης σε αυτή την περίπτωση οφείλεται σε εγγενείς ιδιότητες του υλικού των νανοσωλήνων άνθρακα που παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή πιεζοαντίστασης. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η οργάνωση μεταλλικών νανοσωματιδίων ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια αγωγιμότητας εμφανίζουν πολύ υψηλότερη ευαισθησία παραμόρφωσης από αυτή των διατάξεων που αποτελούνται από συνεχείς μεταλλικές ταινίες (συντελεστής ευαισθησίας 2) και παρόμοιας τάξης με διατάξεις από ημιαγωγούς (συντελεστής ευαισθησίας 100). Η υψηλή ευαισθησία στη μεταβολή της αντίστασης κατά την παραμόρφωση δεν οφείλεται στις εγγενείς ιδιότητες του υλικού αλλά στο φαινόμενο της σήραγγας που αναπτύσσεται ως κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς ηλεκτρονίων μεταξύ των νανοσωματιδίων[1] στη διάταξη. Στην παρούσα εργασία ερευνούμε αυτό το είδος του αισθητήρα παραμόρφωσης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο δύο τεχνικές για την νανοσωματιδίων σε θερμοκρασία δωματίου οι οποίες είτε βασίζονται στην εκτύπωση εναπόθεση (ink-jet) είτε στην εναπόθεση σε κενό^{4,5}. Ενώ ink-jet τεχνική είναι απλούστερη παρουσιάζει προβλήματα που σχετίζονται με την ομοιομορφία (ελεγχόμενη πυκνότητα εναπόθεσης) των νανοσωματιδίων στην επιφάνεια εναπόθεσης. Από την άλλη πλευρά η τεχνική εναπόθεσης σε κενό με βάση την τεχνική sputtering δίνει ελεγχόμενο μέγεθος καθώς

και ομοιόμορφη κατανομή νανοσωματιδίων. Η τεχνική αυτή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία παρουσιάζει το πλεονέκτημα ενός καλύτερου ελέγχου της αντίστασης (ομοιομορφία αποστάσεων μεταξύ των νανοσωματιδίων) και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του αισθητήρα τόσο όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος αλλά και την ευαισθησία στην ανίχνευση της παραμόρφωσης.

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των αισθητήρων ήταν υποστρώματα πυριτίου με ένα λεπτό οξείδιο (μέγιστο πάχος 1μm) καθώς και λεπτά υμένα από πολυιμίδιο. Σε αυτές τι επιφάνειες αναπτύχθηκαν ηλεκτρόδια από χρυσό συγκεκριμένης γεωμετρικής δομής (μεταξύ αποστάσεις των ηλεκτροδίων: 2μm, 5μm και 10μm) με οπτική λιθογραφία και κατόπιν με εξάχνωση χρυσού από το e-Gun. Τα νανοσωματίδια που εναποτέθηκαν ήταν από πλατίνα (Pt) ώστε να αποφευχθεί η οξείδωση με την πάροδο του χρόνου και έτσι να μη αλλάξει η ευαισθησία του αισθητήρα. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του HP4140B picoampere meter, ενώ οι μέτρηση της παραμόρφωσης αλλά και της ομοιομορφίας της επιφάνειας του αισθητήρα πραγματοποιήθηκε από μία οπτική διάταξη με laser⁶. Η πυκνότητα των νανοσωματιδίων ήταν ελεγχόμενη από το χρόνο εναπόθεσης και μελετήθηκε με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Abstract

Strain sensors have been fabricated by depositing platinum nanoparticles between interdigitated gold electrodes on oxidised silicon substrate. A significant improvement in strain sensitivity is achieved with a gauge factor in excess of 700, which is two orders of magnitude higher than continuous metallic films and five times higher than semiconductor devices. The measured resistance is strongly dependent on inter-particle distance, which is altered when the substrate is strained.

Traditionally strain sensors have been fabricated using either metallic strain gauges or semiconductors. The basic principle of operation of these devices is based on the change of the resistance with strain. More recently nanotechnology objects like carbon nanotubes dispensed within a polymer matrix[2, 3] have been investigated towards higher sensitivity and lower cost device. The resistance change in that case is due to intrinsic material properties of carbon nanotubes that present a high piezoresistance coefficient. It has been also demonstrated that metallic nanoparticle assemblies positioned between two conductive electrodes exhibit much higher strain sensitivity than continuous metallic films (gauge factor 2) and of similar value with their semiconducting rivals (gauge factor 100). The high resistance sensitivity with strain in that case is not due to a material intrinsic property like piezoresistance but to the dominating current transport mechanism itself which is based on current tunneling through nanogaps present between nanoparticles. In the current work we investigate this type of strain sensor.

We have developed during recent years, techniques for room temperature nanoparticle deposition which are based either on ink-jet printing or in vacuum[4, 5]. While ink-jet technique is simpler it presents problems related with uniformity (controlled deposition density) of nanoparticles within the deposited layer. On the other hand formation of nanoparticles in vacuum based on sputtering and condensation of atoms from a metallic target to form clusters of controlled size that are uniformly deposited on the substrate presents another alternative for uniform nanoparticle layer formation with controlled surface density. This technique that is explored in the present work presents the advantage of a better resistance control and allows optimization of the sensor operation both in terms of power dissipation and strain sensitivity.

We used silicon substrate with $1\mu\text{m}$ thermally oxidised layer, on which gold electrodes, with gaps ranging from $2\text{-}10\mu\text{m}$, were applied by optical lithography and e-Gun evaporation. The nanoparticles are formed in vacuum, based on sputtering and condensation of atoms from a metallic target to form clusters of controlled size that are uniformly deposited on the substrate[2]. Platinum was used as a means to avoid oxidation and thus device aging. Electrical measurements were made using an HP4140B picoampere meter at $10\mu\text{m}$ intervals of sample deflection, whilst the strain measurements were based on an optical bend monitoring of the sample[6]. The density of nanoparticles was controlled by deposition time and examined by scanning electron microscopy (SEM).

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο Συνοπτική Θεωρία Αισθητήρων	12
1.1. Οι αισθητήρες σε συστήματα μετρήσεως.....	12
1.2. Η δομή ενός συστήματος μέτρησης	13
1.3. Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων	15
1.4. Δυναμικά χαρακτηριστικά αισθητήρων	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο Τεχνικές Δημιουργίας του Αισθητήρα & Χαρακτηρισμού Επιφάνειας	23
2.1. Τεχνικές Δημιουργίας των Αισθητήρων	23
2.1.1. Οπτική Λιθογραφία	23
2.1.2. Φυσική Εναπόθεση από Εξάχνωση (ebeam evaporation).....	24
2.1.3. Εναπόθεση νανοσωματιδίων σε κενό μέσω Ιοντοβολής (Sputtering).....	26
2.2. Τεχνικές Χαρακτηρισμού Επιφάνειας.....	29
2.2.1. Το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM).....	29
2.2.2. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	31
2.2.4. Προφίλομετρία.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο Κατασκευή και Λειτουργία του Αισθητήρα	38
3.1. Σχεδιασμός της μάσκας των ηλεκτροδίων	38
3.2. Λιθογραφία για τη δημιουργία των ηλεκτροδίων.....	39
3.3. Περιγραφή του συστήματος PVD (e-Gun) για εναπόθεση υμενίων Ti και Au και διαδικασία εξάχνωσης	40
3.4. Λιθογραφία για τη δημιουργία περιοχών εναπόθεσης νανοσωματιδίων	41
3.5. Εναπόθεση νανοσωματιδίων	42
3.6. Λειτουργία σημερινών αισθητήρων παραμόρφωσης	43
3.6.1. Αισθητήρες παραμόρφωσης από μεταλλικά υμένια	44
3.6.2. Αισθητήρες παραμόρφωσης από στοιχεία πιεζοαντίστασης ημιαγωγών	45

3.6.3. Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών	45
3.6.4. Αισθητήρες παραμόρφωσης από στρώσεις μεταλλικών νανοσωματιδίων.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Δημιουργία Συστημάτων Παραμόρφωσης.....	51
4.1. Η παραμόρφωση (ϵ).....	51
4.2. Ο Μετρητικός Παράγοντας (Gauge Factor, g)	52
4.3. Σύστημα παραμόρφωσης για υπόστρωμα πυριτίου.....	53
4.4. Μέτρηση κάθετης μετατόπισης με την βοήθεια του laser.....	57
4.5. Σύστημα παραμόρφωσης για υποστρώματα λεπτού υμενίου από πολυιμίδιο	60
4.6. Υπολογισμός του ϵ	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	64
5.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	64
5.2. Συμπεράσματα - Συζήτηση.....	68
5.3. Σκέψεις για το μέλλον	74
Βιβλιογραφία.....	76

Εισαγωγή

Η σημασία των αισθητήρων στη ζωή μας είναι σχεδόν αυτονόητη. Οι πρώτοι αισθητήρες εμφανίζονται μαζί με την εξέλιξη των έμβιων όντων και αποτελούν τα βασικά όργανά για την επιβίωσή τους. Ο άνθρωπος κατά την εξέλιξή του συνειδητοποίησε ότι χρειάζεται όργανα μέτρησης για να λύσει καθημερινά πρακτικά προβλήματα, όπως αυτό της μέτρησης του μήκους, του βάρους ή του όγκου κτλ. Οι πρώτοι αισθητήρες ήταν μηχανικοί (πχ. η αρχή λειτουργίας του πρώτου θερμόμετρου βασίζεται στη μεταβολή των διαστάσεων των σωμάτων με τη θερμοκρασία). Η συστηματική μελέτη του ηλεκτρισμού οδήγησε στην ανάπτυξη νέων ηλεκτρικών αισθητήρων, των οποίων η έξοδος ήταν ένα αναλογικό σήμα. Η ανάπτυξη των ημιαγωγών είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αισθητήρων ημιαγωγών αλλά και ψηφιακών οργάνων μέτρησης. Στη σημερινή εποχή η ανάπτυξη των μικρομηχανικών διεργασιών οδήγησε σε νέες μορφές αισθητήρων, πολύ μικρότερων σε διαστάσεις, ταχύτερους σε απόκριση και με χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Έτσι ο άνθρωπος κατάφερε να μετρήσει ποσότητες που δεν ήταν αντιληπτές με τα δικά του μέσα. Λόγω του μεγέθους και των μικρομηχανικών ιδιοτήτων τους δημιουργήθηκαν νέοι αισθητήρες που εκμεταλλεύθηκαν αυτά τα χαρακτηριστικά. Τέτοιοι αισθητήρες είναι οι αισθητήρες επιταχύνσεως, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης, οι αισθητήρες ανίχνευσης κάμψης και παραμόρφωσης, οι κάμερες τύπου CCD και CMOS, οι αισθητήρες για χημική και βιολογική ανίχνευση κτλ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

1.1. Οι αισθητήρες σε συστήματα μετρήσεως

Μέτρηση (measurement) είναι ο προσδιορισμός ενός μεγέθους ή ποσού με βάση ένα μέγεθος αναφοράς του ίδιου τύπου, που χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης (measurement unit, πχ. το μέτρο, το κιλό κλπ.). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα συστήματα μέτρησης (measurement systems). Οι μετρήσεις των φυσικών και των χημικών φαινομένων αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα πολλών ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ο άνθρωπος από πολύ παλιά χρησιμοποίησε τη μέτρηση για να μπορέσει να εκφράσει ποσότητες (πχ. του λαδιού, της απόστασης κλπ.), ώστε να μπορέσει να επικοινωνήσει με τους άλλους ανθρώπους και να διεξάγει πλήθος δραστηριοτήτων (πχ. πωλήσεις και αγορές προϊόντων κλπ.).

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας, οι μετρήσεις εκτός από την έκφραση του μεγέθους μιας ποσότητας άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως στα λεγόμενα συστήματα αυτόματου ελέγχου (automatic control systems). Στα συστήματα αυτά μετράται ένα μέγεθος, η μέτρηση συγκρίνεται με μια επιθυμητή τιμή και στη συνέχεια η διαφορά τους χρησιμοποιείται για να ελέγξει μια διαδικασία, έτσι ώστε το μετρούμενο μέγεθος να συμπίπτει τελικά με την επιθυμητή τιμή. Στις μέρες μας δεν υπάρχει καμία βιομηχανική μονάδα χωρίς συστήματα αυτόματου ελέγχου, μέρος των οποίων είναι τα συστήματα μέτρησης[7].

Παλιότερα, πολλά συστήματα μέτρησης βασιζόταν σε χειροκίνητες, μηχανικές ή άλλες διαδικασίες για την πραγματοποίηση της μέτρησης (πχ. η μέτρηση των διαστάσεων ενός αντικειμένου με χάρακα, η μέτρηση του βάρους ενός αντικειμένου με ζυγό ισορροπίας και χρήση πρότυπων βαρών, η μέτρηση της θερμοκρασίας με θερμομότρο υδραργύρου, κλπ.). Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, η συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων βασίζεται πλέον στην μετατροπή ενός φυσικού μεγέθους (πχ. θερμοκρασία, πίεση, κλπ.) στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα (συνήθως τάση). Ο λόγος είναι ότι το ηλεκτρικό σήμα είναι εύκολο να ενισχυθεί, να φιλτραρισθεί (στην περίπτωση που επιδρούν διαταραχές στη μέτρηση του μεγέθους), να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις (στην περίπτωση που η

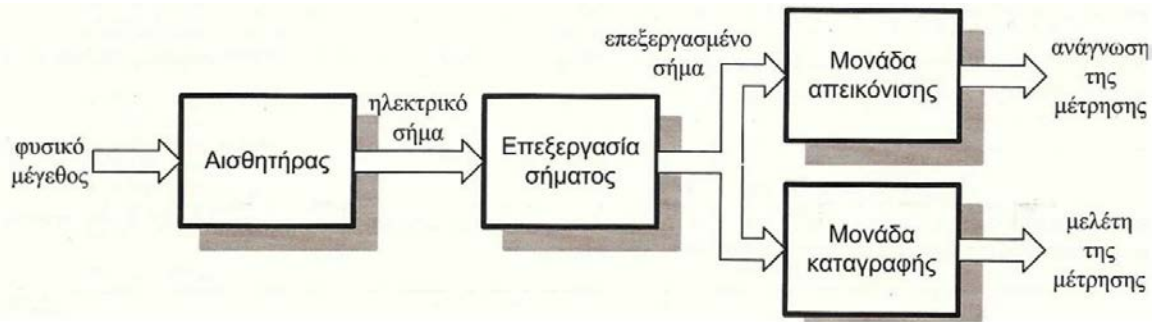
λήψη της μέτρησης πρέπει να γίνει σε απομακρυσμένο σημείο), να απεικονιστεί εύκολα και ευανάγνωστα, καθώς και να αποθηκευτεί για μελλοντική επεξεργασία και χρήση. Την μετατροπή του φυσικού μεγέθους στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα αναλαμβάνει μια μονάδα που ονομάζεται αισθητήρας (sensor). Σήμερα έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες για πολύ μεγάλο αριθμό φυσικών μεγεθών και με διαρκείς ερευνητικές προσπάθειες προκύπτουν νέοι αισθητήρες για μεγέθη για τα οποία δεν υπήρχαν τέτοιοι, όπως επίσης βελτιώνονται διαρκώς οι υπάρχοντες αισθητήρες και οι αντίστοιχες ηλεκτρονικές διατάξεις που συνιστούν το σύστημα μέτρησης. Επακόλουθο της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας των αναλογικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ήταν και η ανάπτυξη των ψηφιακών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (hardware) καθώς και του αντίστοιχου λογισμικού (software). Εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρέχουν τα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα, το μεγαλύτερο μέρος των συστημάτων μέτρησης σήμερα βασίζεται σε ψηφιακά ηλεκτρονικά (CPUs, μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές, PCs, κλπ).

Τα ψηφιακά συστήματα προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια, πολύ μεγάλες δυνατότητες επεξεργασίας του σήματος (σύνθετους αλγορίθμους φιλτραρίσματος και μετατροπής, στατιστική ανάλυση, κλπ.), δυνατότητα μεταφοράς της μέτρησης σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (σε οποιοδήποτε σημείο της γης ή ακόμα και σε διαστημικές αποστάσεις), απεικόνιση με μεγάλη ανάλυση (πχ. πολλά δεκαδικά ψηφία) χωρίς να επεμβαίνει η υποκειμενικότητα του παρατηρητή, και αναλλοίωτη στο χρόνο αποθήκευση των μετρήσεων. Επίσης, το λογισμικό επαναπρογραμματίζεται εύκολα για την προσαρμογή του συστήματος μέτρησης σε νέες απαιτήσεις. Τα συστήματα μέτρησης αποτελούνται από αναλογικά ή /και ψηφιακά ηλεκτρονικά στοιχεία. Βασικά δομικά στοιχεία όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης είναι οι αισθητήρες, οι οποίοι αποτελούν το συνδετικό κρίκο μεταξύ του μετρούμενου φαινομένου και του συστήματος μέτρησης.

1.2. Η δομή ενός συστήματος μέτρησης

Η γενική δομή ενός συστήματος μέτρησης εικονίζεται στο σχήμα 1.1. Το ηλεκτρικό σήμα που αντιστοιχεί στη μετρούμενη φυσική ποσότητα παρέχεται από τον αισθητήριο μέρος (sensor) ή μετατροπέα φυσικών μεγεθών (transducer). Στη βιβλιογραφία οι δύο όροι χρησιμοποιούνται ελεύθερα για να περιγράψουν τη διάταξη μετατροπής του φυσικού

μεγέθους. Εντούτοις, ένας ποιο αυστηρός ορισμός θεωρεί, ως αισθητήριο μέρος αποκλειστικά τη διάταξη ανίχνευσης του φυσικού μεγέθους και μετατροπέα ένα πλήρες σύστημα που περιλαμβάνει εκτός από τη συσκευή ανίχνευσης πρόσθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής και μορφοποίησης του σήματος από το αισθητήριο.



Σχήμα 1.1: Γενική δομή ενός συστήματος μέτρησης

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση των κατασκευαστών σήμερα είναι να παρέχουν ολοκληρωμένα μετρητικά στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν τη διάταξη ανίχνευσης του φυσικού μεγέθους μαζί με ηλεκτρονικά κυκλώματα μορφοποίησης του ηλεκτρικού σήματος. Έτσι, τα δύο πρώτα μέρη στο γενικό σύστημα μέτρησης τείνουν να ενοποιηθούν. Το σύστημα προσαρμογής (conditioner), είτε είναι ενσωματωμένο με το αισθητήριο ή ανεξάρτητο συνδέεται από την πλευρά της εισόδου με το αισθητήριο και παρέχει στην πλευρά της εξόδου ένα ηλεκτρικό σήμα κατάλληλο για τη μετάδοση στο σύστημα επεξεργασίας. Ένα σύστημα προσαρμογής περιλαμβάνει κυκλώματα ενίσχυσης, φιλτραρίσματος, μείωσης του θορύβου, γραμμικοποίησης και ακόμη διατάξεις μετατροπής της τάσης σε ρεύμα, σε συχνότητα ή σε ψηφιακή μορφή. Το ηλεκτρικό σήμα σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή από το σύστημα προσαρμογής μεταδίδεται στο σταθμό επεξεργασίας. Η μετάδοση γίνεται είτε ενσύρματα, με διάφορα είδη αγωγών ανάλογα με τη μορφή του σήματος, είτε ασύρματα. Χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος μέτρησης είναι τα εξής:

- Μεγάλη ευαισθησία
- Μικρή κατανάλωση ισχύος
- Μεγάλη ταχύτητα απόκρισης

- Εύκολη μετάδοση του σήματος εξόδου σε απόσταση
- Υψηλή αξιοπιστία

1.3. Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων

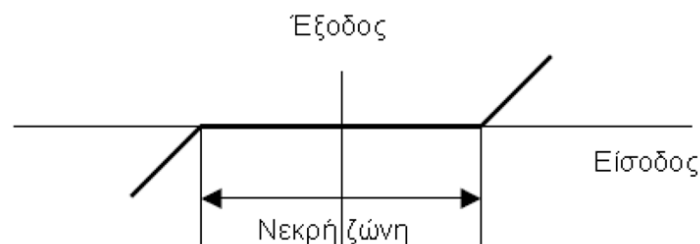
Στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων ονομάζονται κάποιες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους αισθητήρες. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν, (α) την αξιολόγηση της ποιότητας του αισθητήρα και (β) επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μέτρησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να επεκταθούν και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που συνδέονται στην έξοδο του αισθητήρα για να επεξεργαστούν το σήμα του αισθητήρα (πχ. ενίσχυση, φιλτράρισμα, περιορισμός θορύβου, κλπ.). Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα εισόδου είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα.

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

Πιστότητα: Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Η πιστότητα δίνεται συνήθως «ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα»[7]. Για παράδειγμα εάν ένας αισθητήρας πίεσης, περιοχής λειτουργίας 0-10 bar έχει πιστότητα $\pm 1.0\%$ της πλήρους κλίμακας τότε η μέγιστη αβεβαιότητα του αισθητήρα θα είναι ίση με 0,1 bar. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο αισθητήρας δίνει ως αποτέλεσμα 1 bar τότε η μέγιστη αναμενόμενη αβεβαιότητα θα είναι ίση με το 10% της τιμής αυτής. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο εύρος των μετρούμενων τιμών, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή πιστότητα των μετρήσεων. Αν δηλαδή έχουμε μία εφαρμογή στην οποία οι πιέσεις μεταβάλλονται στο διάστημα 0-1 bar είναι λάθος να επιλέξουμε αισθητήρα περιοχής λειτουργίας 0-10 bar.

Βαθμονόμηση: Η βαθμονόμηση (calibration) είναι η διαδικασία καθορισμού της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα ή γενικότερα ενός συστήματος μέτρησης. Η γνώση της συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα είναι απαραίτητη κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, έτσι ώστε μετρώντας την τιμή του ηλεκτρικού σήματος εξόδου που παράγει ο αισθητήρας να υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς και η αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης εφαρμόζονται γνωστές τιμές του μετρούμενου φυσικού μεγέθους στον αισθητήρα και μετρώνται οι αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του. Η ακρίβεια με την οποία έχει καθοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, που λαμβάνονται κατά τη χρήση του αισθητήρα σε ένα σύστημα μέτρησης.

Νεκρή ζώνη: Νεκρή ζώνη (dead-zone, dead-band), αποκαλείται η περιοχή μετρήσεων (συνήθως γύρω από το μηδέν) για την οποία ο αισθητήρας δεν αποκρίνεται στις μεταβολές της μετρούμενης ποσότητας. Το σχήμα 1.2 δείχνει τα χαρακτηριστικά μίας νεκρής ζώνης. Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει νεκρή ζώνη καθ' όλο το εύρος ενός οργάνου και συχνά οι υπολογίσιμες νεκρές ζώνες εμφανίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες[8].



Σχήμα 1.2: Νεκρή ζώνη ενός αισθητήρα

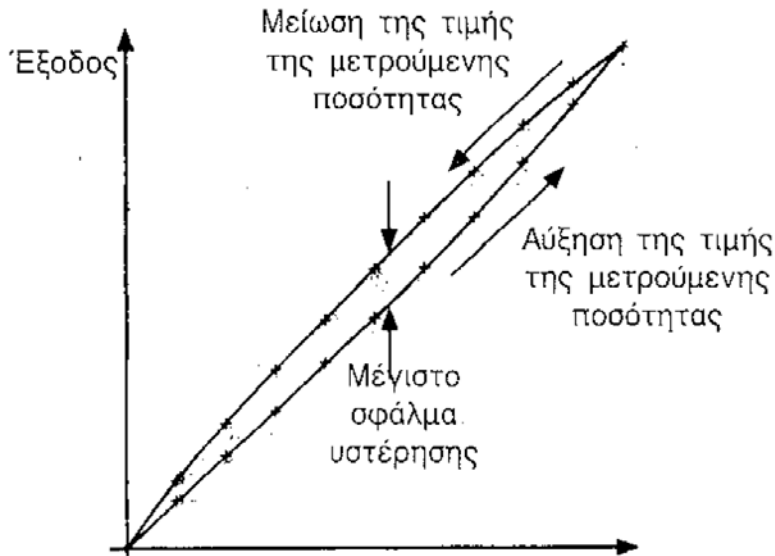
Διαστάσεις: Οι διαστάσεις ενός αισθητήρα ή συστήματος μέτρησης είναι το μέτρο του φυσικού του μεγέθους και αναγράφονται σχεδόν πάντοτε στις προδιαγραφές του[8].

Ολίσθηση: Ολίσθηση (drift) είναι η αργή μεταβολή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, ενώ το μετρούμενο φυσικό μέγεθος παραμένει σταθερό. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, υγρασία κλπ. Η μακροχρόνια ολίσθηση(long term drift) είναι η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με την πάροδο μεγάλου

χρονικού διαστήματος και μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η διάβρωση τμημάτων του αισθητήρα, η ρύπανση του αισθητήρα, η γήρανση των υλικών κατασκευής κλπ[9].

Σφάλμα: Το σφάλμα ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή μίας ποσότητας. Τα σφάλματα μπορούν συχνά να εκφράζονται επί τοις εκατό (%), οπότε τότε αντιπροσωπεύουν την ακρίβεια του συστήματος[8].

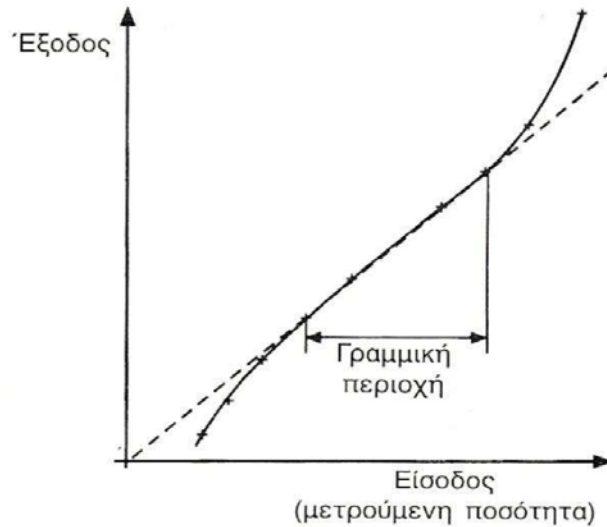
Υστέρηση: Η υστέρηση προκαλεί διαφορές στην έξοδο που δίνει ένας αισθητήρας, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Με τον τρόπο αυτό παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής. Το σχήμα 1.3 που ακολουθεί παρουσιάζει την επίδραση της υστέρησης με την βοήθεια μίας γραφικής παράστασης. Η είσοδος του αισθητήρα, δηλαδή η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται με σταθερό βήμα. Όταν φτάσει τη μέγιστη δυνατή τιμή μειώνεται με το ίδιο σταθερό βήμα έως ότου λάβει ξανά την τιμή μηδέν. Η γραφική παράσταση δείχνει τη διαφορά που υπάρχει στην έξοδο του αισθητήρα, όταν η μετρούμενη ποσότητα αυξάνεται ή μειώνεται. Αυτό το γεγονός ονομάζεται υστέρηση του συστήματος. Δεν εμφανίζουν υστέρηση όλοι οι αισθητήρες και τα συστήματα μέτρησης. Η υστέρηση προκαλείται από διάφορους παράγοντες, ειδικότερα τη μηχανική τάση και την τριβή. Η χαλάρωση των συστημάτων γραναζιών και ο «τζόγος» σε συστήματα κοχλιών αποτελούν επίσης σημαντικά αίτια. Τα συστήματα μέτρησης που είναι πιθανό να εμφανίσουν υστέρηση πρέπει να περιέχουν μηχανικά γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα κινητά μέρη, τα οποία να τείνουν να είναι ελαστικά, όπως είναι το λάστιχο, τα πλαστικά και κάποια μέταλλα[8].



Σχήμα 1.3: Τυπικός βρόγχος υστέρησης ενός αισθητήρα

Καθυστέρηση: Καθυστέρηση (lag) ονομάζεται η καθυστέρηση της αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητήρα ως προς την αλλαγή της εισόδου του. Μετριέται σε δευτερόλεπτα ή συνηθέστερα σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Σε μερικές εφαρμογές, όπως είναι ο έλεγχος η καθυστέρηση μπορεί να επηρεάζει αποφασιστικά την απόδοση[8].

Γραμμικότητα: Η γραμμικότητα (linearity) ενός αισθητήρα αποτελεί το βαθμό στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.4. Επίσης, η γραμμικότητα μπορεί να εκφράζεται ως προς το μέγιστο βαθμό απόκλισης από την ευθεία γραμμή σε όλο το εύρος τιμών εισόδου και τότε αναφέρεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας[8].



Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση γραμμικότητας αισθητήρα

Χρόνος λειτουργίας: Ο χρόνος λειτουργίας (operating life) ενός αισθητήρα αποτελεί ένδειξη του χρόνου κατά τον οποίο αυτός αναμένεται να λειτουργεί στα πλαίσια των προδιαγραφών του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή με τον αριθμό των λειτουργιών ή των κύκλων λειτουργίας που μπορεί να διεκπεραιώσει με επιτυχία[8].

Επαναληψιμότητα: Η επαναληψιμότητα μίας συσκευής είναι ο βαθμός στον οποίο αυτή παράγει το ίδιο αποτέλεσμα, όταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τροφοδοτείται με ακριβώς την ίδια είσοδο. Στα αγγλικά αποδίδεται με τη λέξη «precision», η οποία συχνά συγγέεται με την καθημερινή έννοια της ακρίβειας (accuracy). Εντούτοις, στην ορολογία των συστημάτων μέτρησης ένας αισθητήρας μπορεί να έχει υψηλή επαναληψιμότητα και να δίνει παρόμοια έξοδο όταν μετρά πολλές φορές μία συγκεκριμένη είσοδο, αλλά, εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα στην έξοδο τότε η έξοδος δεν είναι ακριβής[8].

Εύρος: Το εύρος λειτουργίας (operating range) μίας συσκευής ισούται με τα όρια, στα οποία μπορεί η συσκευή να λειτουργεί αξιόπιστα. Το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα εκφράζεται συνήθως με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Άλλες έννοιες του εύρους που αναγράφονται συχνά στις προδιαγραφές είναι το «θερμοκρασιακό εύρος», δηλαδή η περιοχή θερμοκρασιών στην οποία μπορεί να λειτουργεί ο αισθητήρας. Συχνά αναφέρονται επίσης το εύρος τιμών πίεσης και το εύρος τιμών υγρασίας.

Απόκριση: Η απόκριση (response) μίας συσκευής ισούται με το χρόνο που απαιτεί η συσκευή για να λάβει την τελική τιμή εξόδου της για μια δεδομένη είσοδο. Μπορεί να εκφραστεί σε δευτερόλεπτα ή κλάσματα του δευτερολέπτου, ή κάποιες φορές ως ποσοστό επί της τελικής τιμής εξόδου. Για παράδειγμα, εάν οι προδιαγραφές ορίζουν ότι ο χρόνος απόκρισης 95% είναι 3 sec αυτό σημαίνει, ότι η συσκευή χρειάζεται 3 sec για να λάβει η έξοδος της το 95% της τελικής τιμής[8].

Διακριτική ικανότητα: Η διακριτική ικανότητα (resolution) με την οποία μία συσκευή ή ένας αισθητήρας ανιχνεύει ή εμφανίζει μία τιμή αναφέρεται στην μικρότερη είσοδο ή αλλαγή εισόδου που μπορεί αυτός να ανιχνεύσει. Εκφράζεται συνήθως ως προς το μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί ή μετρηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ενός ενδείκτη, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί ο αισθητήρας να μετρήσει[8].

Ευστάθεια: Η ευστάθεια (stability) αποτελεί το μέτρο της μεταβολής της εξόδου μίας συσκευής, όταν η είσοδος και οι συνθήκες παραμένουν σταθερά, κατά τη διάρκεια μίας μεγάλης χρονικής περιόδου[8].

Στατικό σφάλμα: Το στατικό σφάλμα (static error) είναι ένα σταθερό σφάλμα που υπεισέρχεται καθ' όλο το εύρος τιμών εισόδου μίας συσκευής. Εάν αυτό το σφάλμα είναι γνωστό, τότε μπορεί να αντισταθμιστεί χωρίς να υπάρξει υποβάθμιση της ακρίβειας του συστήματος[8].

Ανοχή: Η ανοχή (tolerance) μίας συσκευής είναι το μέγιστο ποσό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Ανάλογα με τη φύση της συσκευής μπορεί συχνά να αναφέρεται η ανοχή αντί της ακρίβειας στις προδιαγραφές[8].

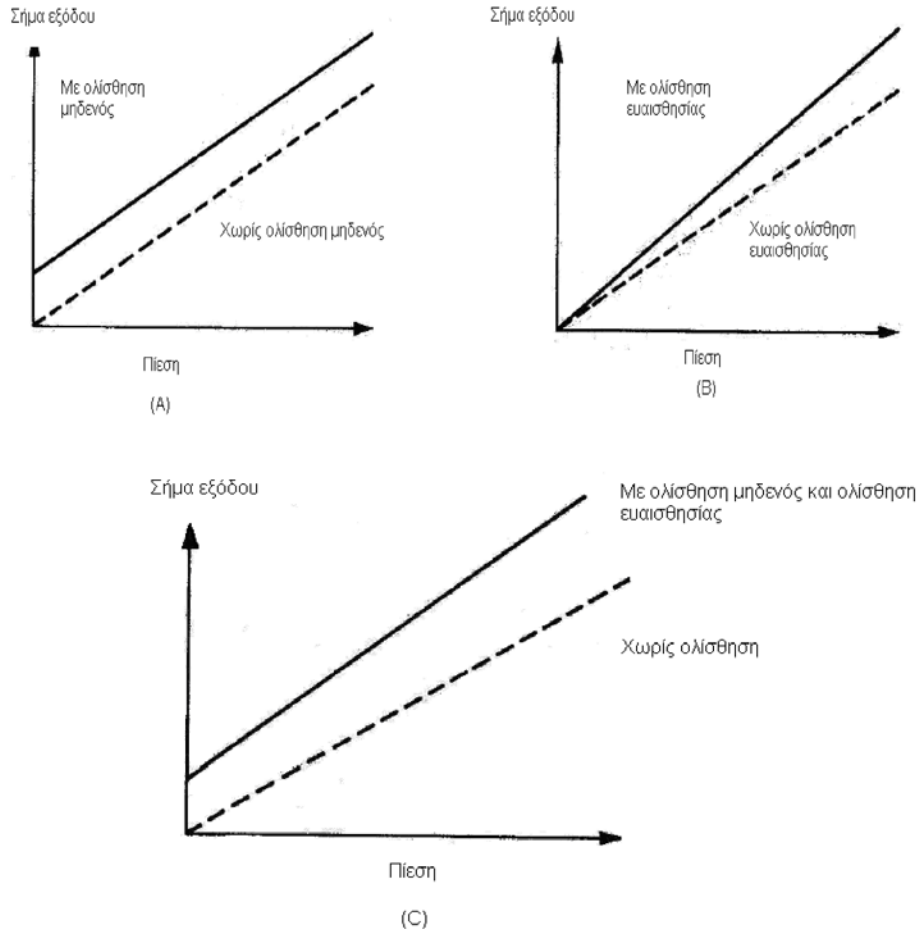
Ευαισθησία: Η ευαισθησία (sensitivity) εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην αλλαγή της εξόδου και την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα είναι ίση με τη διαφορά των τιμών εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών της εισόδου, δηλαδή της μετρούμενης ποσότητας[8].

Άρα είναι:

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{\text{μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{ελάχιστη τιμή εξόδου}}{\text{μέγιστη τιμή εισόδου} - \text{ελάχιστη τιμή εισόδου}}$$

Οι μονάδες στις οποίες μετριέται η ευαισθησία ορίζονται από την παραπάνω εξίσωση και επομένως διαφέρουν ανάλογα με τη φύση του αισθητήρα και τη μετρούμενη ποσότητα. Για παράδειγμα, υπάρχουν αισθητήρες που μετρούν μικρές αποστάσεις όπου κινείται κάποιο αντικείμενο και παρέχουν τάση. Στην περίπτωση αυτή η ευαισθησία θα εκφράζεται σε volt ανά mm. Εάν η σχέση ανάμεσα στη μετρούμενη ποσότητα και την έξοδο είναι γραμμική, η ευαισθησία μπορεί να εκφράζεται ως προς το όλο εύρος. Εάν δεν είναι γραμμική, τότε η ευαισθησία της συσκευής θα διαφέρει από περιοχή και θα αναφέρεται ως προς συγκεκριμένες περιοχές τιμών εισόδου[8].

Ευαισθησία στη διαταραχή: Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν, όταν αυτό λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κ.λ.π. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα. Μεταβολή κάποιας από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δύο και είναι γνωστά ως ολίσθηση του μηδενός (zero drift) και ολίσθηση ευαισθησίας (sensitivity drift). Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα, όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Μετριέται συνήθως σε $^{\circ}\text{C}^{-1}$ στην περίπτωση (π.χ. βολτόμετρου το οποίο έχει επηρεαστεί από τη μεταβολή της θερμοκρασίας). Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες από μία περιβαλλοντικές παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός[8]. Χαρακτηριστική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης, φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: α) Ολίσθηση μηδενός, β) Ολίσθηση ευαισθησίας και γ) Συνδυασμένη επίδραση των δύο ολισθήσεων

1.4. Δυναμικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση του σε ένα σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά από τα στατικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι λόγοι αυτής της διαφοροποίησης είναι ότι οι αισθητήρες περιλαμβάνουν στοιχεία που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ. α. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

&

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

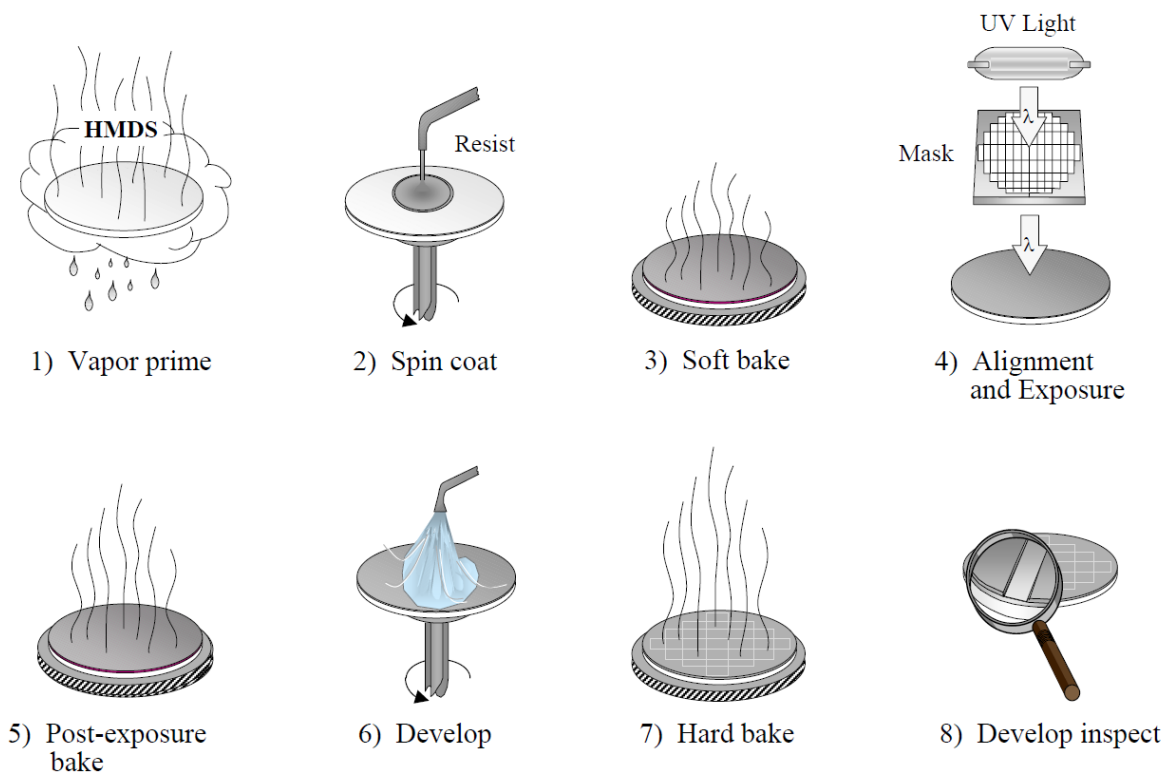
2.1 Τεχνικές Δημιουργίας των Αισθητήρων

2.1.1 Οπτική Λιθογραφία

Λιθογραφία (lithography) είναι η διαδικασία αποτύπωσης (patterning) ορισμένων δομών, δηλαδή γεωμετρικών σχημάτων, πάνω σε κάποια επιφάνεια. Για να αποτυπωθούν αυτές οι δομές απαιτείται η χρήση μιας πρότυπης μάσκας, η οποία να έχει αποτυπωμένη πάνω της μια μήτρα αυτών των δομών. (Ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται, η λιθογραφία διακρίνεται σε οπτική λιθογραφία, λιθογραφία με ακτίνες Χ και λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης). Κατά την οπτική λιθογραφία (φωτολιθογραφία) η αποτύπωση γίνεται με τη διέλευση φωτός μέσα από τη μάσκα, η οποία είναι κατασκευασμένη συνήθως από χαλαζία ή πλαστικό. Ο σχεδιασμός της μάσκας γίνεται με κλασικά προγράμματα σχεδίασης (L-Edit, AUTOCAD κτλ), για τις απλές διατάξεις. Η μάσκα διαθέτει σκοτεινές (μη διαπερατές από το φως) και φωτεινές (διαπερατές από το φως) περιοχές [10, 11].

Τα βήματα της οπτικής λιθογραφίας είναι τα εξής: α) Λεπτό στρώμα φωτοευαίσθητου πολυμερούς αποτίθεται στο δισκίο, το οποίο στη συνέχεια περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα, έτσι ώστε να εξαπλωθεί το πολυμερές, μέσω της φυγόκεντρου δύναμης. Ακολουθεί θέρμανση για την πλήρη απομάκρυνση του διαλύτη του πολυμερούς. β) Το φωτοευαίσθητο πολυμερές ακτινοβολείται μέσα από τη μάσκα με τις διαφανείς και αδιαφανείς περιοχές, η οποία περιέχει το επιθυμητό σχήμα αποτύπωσης στο δισκίο. Το φως που περνά από τις διαφανείς περιοχές, προκαλεί χημικές αλλαγές στο φωτοευαίσθητο πολυμερές, οι οποίες ενισχύονται και με τη θέρμανση του δείγματος. Συγκεκριμένα, η ρητίνη όταν δέχεται το φως μπορεί είτε να φωτοαποικοδομείται είτε να σταθεροποιείται. Οπότε στην πρώτη περίπτωση το πολυμερές καταστρέφεται στις φωτεινές περιοχές της μάσκας, ενώ σταθεροποιείται στις σκοτεινές και το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στη δεύτερη περίπτωση. γ) Ακολουθεί η εμφάνιση του

πολυμερούς σε κατάλληλο εμφανιστή (συνήθως αραιό διάλυμα βάσης) που απομακρύνει το φωτοαποικοδομημένο πολυμερές. Έτσι, απομακρύνονται οι φωτισμένες περιοχές αφήνοντας άθικτες τις σκοτεινές (διεργασία θετικού τόνου), είτε οι σκοτεινές περιοχές αφήνοντας άθικτες τις φωτισμένες (διεργασία αρνητικού τόνου). Μετά το τέλος της εμφάνισης, στο πολυμερές έχει αποτυπωθεί είτε το σχήμα της μάσκας είτε το αρνητικό του[10, 11].



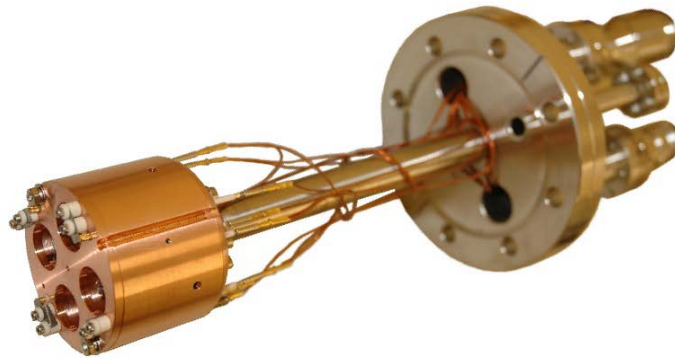
Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση των βημάτων της λιθογραφίας[11]

2.1.2 Φυσική Εναπόθεση από Εξάχνωση (ebeam evaporation)

Η Φυσική εναπόθεση από ατμό χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες ανάλογα με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται:

- Εξάχνωση υπό κενό: Η εξάχνωση υπό κενό είναι η πιο κοινή μέθοδος επιμετάλλωσης κατά την οποία θερμαίνουμε το υλικό υπό συνθήκες υψηλού κενού. Η υψηλή θερμοκρασία και το υψηλό κενό, δημιουργεί μεγάλη κινητικότητα στα μόρια του υλικού τα οποία έχουν την τάση να κατευθύνονται προς ψυχρότερες περιοχές. Ψύχοντας έτσι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο γίνεται η εναπόθεση πετυχαίνουμε την ανάπτυξη του υμενίου.

Για την εναπόθεση υμενίου με καλές ιδιότητες απαιτείται όπως προαναφέραμε χρήση υψηλού κενού (>10⁻⁶mTorr) για την αποφυγή οξείδωσης του εξαχνώμενου υλικού[12]. Η εξάχνωση πραγματοποιείται είτε με θέρμανση του προς εξάχνωση υλικού μέσω διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος, είτε με τον βομβαρδισμό του υλικού με ηλεκτρόνια, από μια κατευθυνόμενη δέσμη ηλεκτρονίων (e-gun). Με εξάχνωση υπό κενό εναποτίθενται αγωγιμα υλικά με εύκολο τρόπο. Πιο δύσκολη είναι η εξάχνωση κραμάτων λόγω των διαφορετικών ρυθμών εξάχνωσης των συστατικών τους.



Εικόνα 2.2 Κεφαλή του e-Gun με τέσσερις θέσεις για τοποθέτηση υλικού (pockets)

- **Ιοντοβολή (Sputtering):** Η τεχνική αυτή συνίσταται στην απομάκρυνση ατόμων ή μορίων από την επιφάνεια ενός υλικού (στόχος) και την ακόλουθη εναπόθεσή τους σε ένα προεπιλεγμένο υπόστρωμα. Στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ ανόδου (υπόστρωμα) και στόχου (υλικό προς εναπόθεση) δημιουργείται πλάσμα αδρανούς υλικού (συνήθως αργό), το οποίο μέσω των κρούσεων του με το στόχο αποκολλά τα άτομα ή τα μόρια του στόχου και τα οποία με τη σειρά τους κατευθύνονται προς το υπόστρωμα. Στο DC-sputtering χρησιμοποιείται dc τροφοδοσία υψηλής τάσης για τη δημιουργία της εκκένωσης. Στο RF-sputtering γίνεται χρήση εναλλασσόμενου πεδίου υψηλής συχνότητας για περιορισμό της εκκένωσης στην περιοχή του στόχου.

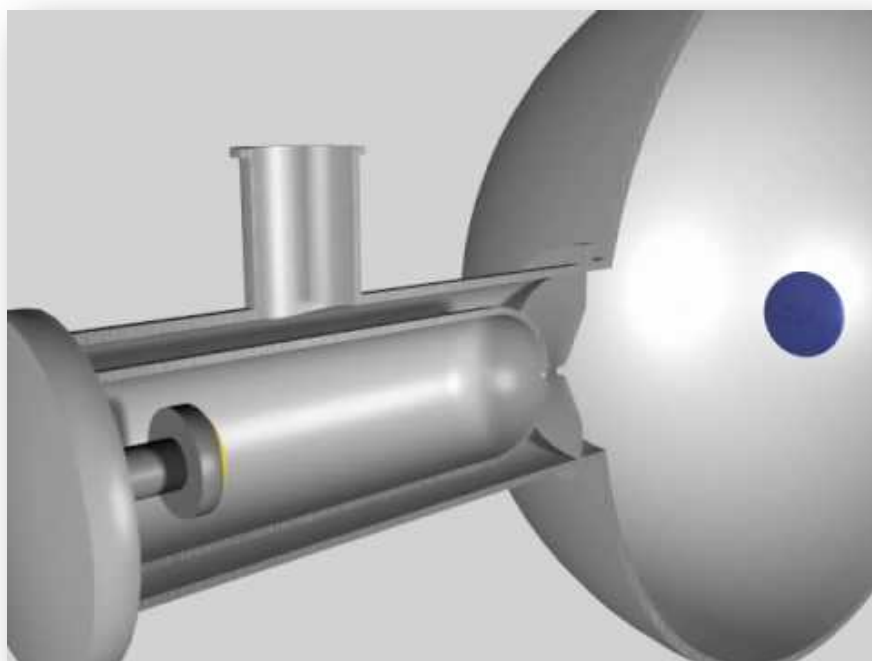
2.1.3 Εναπόθεση νανοσωματιδίων σε κενό μέσω Ιοντοβολής (Sputtering)

Η τεχνική της εναπόθεσης με Ιοντοβολή (sputtering) ή αλλιώς η τεχνική του Καθοδικού Θρυμματισμού χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία των ημιαγωγών. Η εκτενής υπάρχουσα βιβλιογραφία[13-16], σχετικά τόσο με τις ιδιότητες όσο και με τις κατασκευαστικές παραμέτρους που τις επηρεάζουν, οξειδίων που αναπτύσσονται με την τεχνική της Ιοντοβολής, επιτρέπει την επιτυχή εφαρμογή της, για την κατασκευή μικροηλεκτρονικών συστημάτων. Η Ιοντοβολή είναι μια διαδικασία εγχάραξης, η οποία αλλάζει τις φυσικές ιδιότητες μιας επιφάνειας (του στόχου). Κατά τον βομβαρδισμό της επιφάνειας ενός στόχου με ιόντα, τα άτομα της επιφάνειας οπισθοσκεδάζονται με αποτέλεσμα να αποσπώνται από τον στόχο. Υπάρχουν διάφορα είδη sputtering όπως: DC, RF και DC-Magnetron το οποίο χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο.

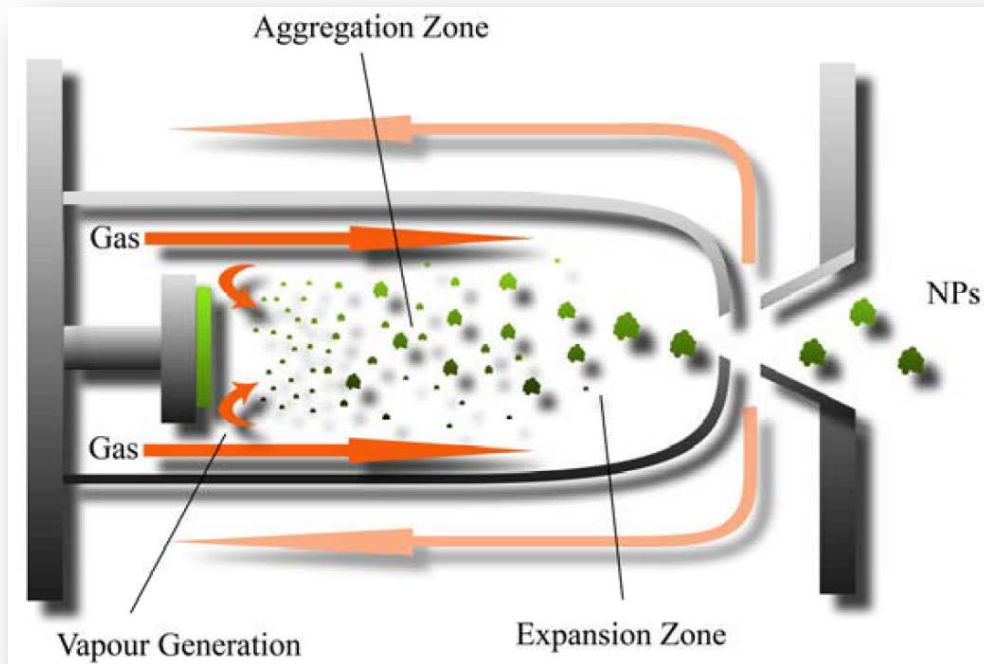
Στο θάλαμο κενού τοποθετείται ο στόχος από το υλικό που πρόκειται να εναποτεθεί. Στο στόχο εφαρμόζεται αρνητικό δυναμικό (γιαυτό το λόγο αποτελεί την κάθοδο). Η βάση για την τοποθέτηση των υποστρωμάτων πάνω στα οποία θα εναποτεθεί λεπτό υμένιο από το υλικό του στόχου τοποθετείται απέναντι από το στόχο και μπορεί να αποτελεί την άνοδο, να είναι γειωμένη ή να έχει πολωθεί με κάποια τάση. Μετά τη δημιουργία κενού μέσα στο θάλαμο εισέρχεται αέριο, συνήθως Αργό (Ar), επειδή παρουσιάζει καλή καμπύλη του ρυθμού εναπόθεσης. Το αέριο εισάγεται στο θάλαμο κενού να δημιουργηθεί και να διατηρηθεί η εκκένωση αίγλης. Η πίεση του αερίου μπορεί να είναι έως 100 cc/min, εξαρτώμενη πάντα και από τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος. Πίσω από το στόχο έχει τοποθετηθεί ένας πολύ δυνατός μαγνήτης (σχήματος κυκλικού δακτυλίου) ο οποίος με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί εξαναγκάζει τα ηλεκτρόνια του πλάσματος να διαγράψουν διαφορετική τροχιά και να συγκρουστούν στον στόχο αντί να συγκρουστούν με τα τοιχώματα του θαλάμου και να χαθούν. Η εισαγωγή του μαγνήτη στο DC Sputtering ανεβάζει κατά πολύ την απόδοση της διεργασίας. Το υλικό ξεκολλά από το στόχο σε μορφή σωματιδίων (μικρότερη του νανομέτρου, χωρίς το υλικό να λιώνει) και καθώς προχωρούν μέσα στο σωλήνα προς την οπή (λόγω διαφοράς πίεσης) αρχίζουν και κάνουν συσσωματώματα και αυξάνουν το μέγεθός τους (μπορούν να φτάσουν έως τα 12nm διάμετρο εάν ορίσουμε την απόσταση μέγιστη, εικόνα 2.3, 2.4). Ανάμεσα στον θάλαμο όπου λαμβάνει χώρα η αποκόλληση υλικού από τον στόχο και στον θάλαμο του υποστρώματος υπάρχει μια διαφορά πίεσης δύο τάξεων μεγέθους η οποία και αναγκάζει τα παραγόμενα νανοσωματίδια να κινηθούν προς το υπόστρωμα όπου

και προσγειώνονται ομαλώς (soft-landed). Τα νανοσωματίδια περνώντας την οπή φτάνουν στο δειγματοφορέα δημιουργώντας μια ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια του δείγματος. Στην εναπόθεση μέσω Sputtering τα νανοσωματίδια αποκτούν φορτίο. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά την διαδρομή από τον στόχο ως και το υπόστρωμα διέρχονται από το πλάσμα του αερίου το οποίο και προσδίδει φορτίο στα νανοσωματίδια. Όσο περισσότερος ο χρόνος εναπόθεσης, τόσο πιο πυκνός ο σχηματισμός των νανοσωματιδίων.

Εξαιτίας της φύσης της τεχνικής του Sputtering αξίζει να σημειωθεί ότι ο στόχος δεν μπορεί να είναι μονωτικό υλικό μιας και ο βομβαρδισμός ενός υλικού με θετικά φορτισμένα ιόντα Αργού θα είχε ως αποτέλεσμα την φόρτιση του μονωτή και την δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου ανταγωνίσιμου προς αυτό της καθόδου ελαττώνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα/απόδοση της διαδικασίας. Η εναπόθεση μονωτικού υλικού μπορεί να γίνει με το RF Sputtering. Παρόλα αυτά, τα οξειδία των υλικών μπορούν να παραχθούν αν παράλληλα με την δημιουργία των νανοσωματιδίων εισαχθεί στον θάλαμο οξυγόνο.



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση εναπόθεσης νανοσωματιδίων με Ιοντοβολή, αριστερά βρίσκεται ο στόχος του υλικού και δεξιά στην απέναντι πλευρά βρίσκεται το δείγμα



Εικόνα 2.4: Πηγή νανοσωματιδίων και πορεία τους προς τον θάλαμο εναπόθεσης.



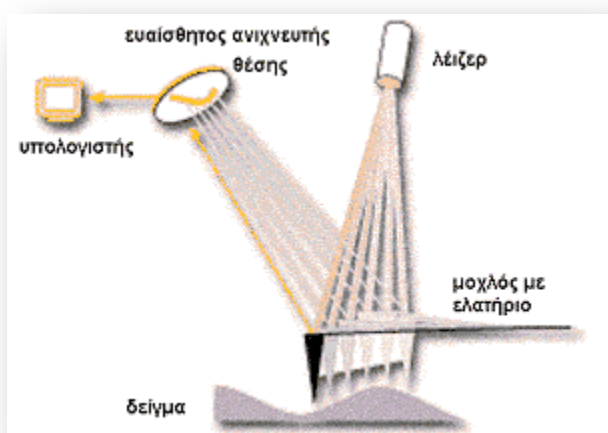
Εικόνα 2.5 Στόχος στην κεφαλή του Nanogen

Το πλεονέκτημα της Ιοντοβολής είναι ότι η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου.

2.2 Τεχνικές Χαρακτηρισμού Επιφάνειας

2.2.1 Το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM)

Το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης στηρίζεται σε μια τεχνική σάρωσης για να παράγει τρισδιάστατες εικόνες των επιφανειών πολύ υψηλής ανάλυσης. Μετρά πολύ μικρές δυνάμεις (<1 nN) μεταξύ της επιφάνειας της ακίδας του AFM που βρίσκεται τοποθετημένη σε ένα εύκαμπτο βραχίονα (cantilever) και της μελετούμενης επιφάνειας δείγματος (εικόνα 2.6) και μπορεί να εφαρμοστεί με την ίδια άνεση τόσο σε μονωτές όσο και σε αγωγούς ή ημιαγωγούς.



Εικόνα 2.6: Αρχή λειτουργίας AFM

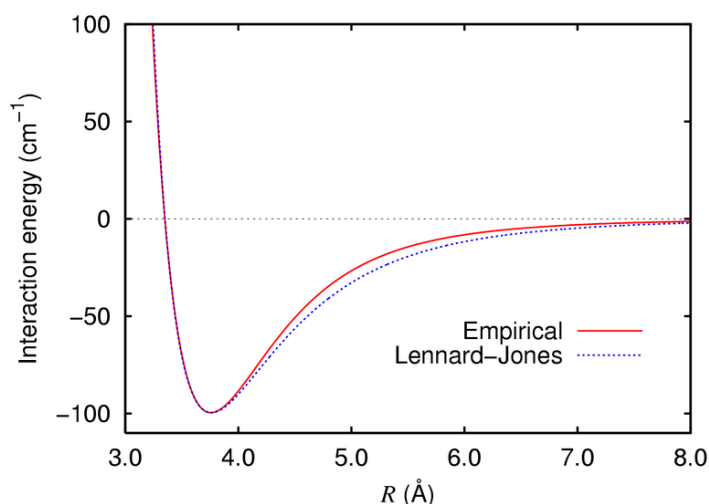
Αυτές οι μικρές δυνάμεις καθορίζονται με τη μέτρηση της κίνησης ενός πολύ εύκαμπτου βραχίονα με εξαιρετικά-μικρή μάζα, με διάφορες τεχνικές μέτρησης, όπως οπτική. Η εκτροπή μπορεί να μετρηθεί για 0.02 nm, έτσι για έναν βραχίονα με σταθερά ελατηρίου 10Nm^{-1} , μπορεί να ανιχνευθεί δύναμη 0.2 nN. Στη διαδικασία μέτρησης με AFM, το δείγμα μελετάται με τέτοιο τρόπο ώστε οποιαδήποτε μετακίνηση του βραχίονα να μην προκαλεί δονήσεις. Με AFMs μπορούν να μελετηθούν δείγματα διαστάσεων επιφάνειας έως $100 \times 100 \mu\text{m}$, με την ακίδα να ανιχνεύει το δείγμα ενώ αυτό είναι ακίνητο. Για να επιτευχθεί ατομική ανάλυση με το AFM, το σταθερό ελατήριο του βραχίονα πρέπει να είναι πιο μαλακό από το ‘ισοδύναμο ελατήριο’ μεταξύ των ατόμων (δεσμοί ατόμων), δηλαδή απαιτείται ένας βραχίονας με ελατήριο σταθεράς $\leq 1\text{Nm}^{-1}$. Για υψηλή ανάλυση, οι άκρες των ακίδων πρέπει

να είναι όσο το δυνατόν πιο αιχμηρές, γιατί συνήθως χρησιμοποιούνται ακίδων με ακτίνα καμπυλότητας του άκρου τους 10–100nm.

Η δύναμη που εφαρμόζεται από την επιφάνεια στην ακίδα έχει ως αποτέλεσμα την κάμψη του μοχλοβραχίονα. Μετρώντας κανείς την μετατόπιση του μοχλοβραχίονα, είναι δυνατόν να εκτιμήσει την δύναμη αλληλεπίδρασης ακίδας-επιφάνειας. Οι δυνάμεις που μετρώνται με το AFM μπορούν να εξηγηθούν ποιοτικά με τη θεωρία, για παράδειγμα, των δυνάμεων van der Waals. Το δυναμικό van der Waals μεταξύ δύο ατόμων που τοποθετούνται σε μια απόσταση r μεταξύ τους, μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο των Lennard-Jones:

$$V(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right],$$

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος περιγράφει την έλξη μακράς απόστασης που προκαλείται βασικά από μια αλληλεπίδραση διπόλου-διπόλου και ο δεύτερος όρος λαμβάνει υπόψη την άπωση που εμφανίζεται στις πολύ μικρές αποστάσεις, λόγω της αρχής αποκλεισμού του Pauli. Η παράμετρος r_0 είναι η απόσταση ισορροπίας μεταξύ των ατόμων, εκεί που τιμή της ενέργειας είναι ελάχιστη (Σχήμα 2.7). Το δυναμικό Lennard-Jones μας επιτρέπει να κάνουμε μια εκτίμηση της δύναμης αλληλεπίδρασης της ακίδας με το δείγμα. Η ενέργεια του συστήματος ακίδας-επιφάνειας μπορεί να προκύψει με πρόσθεση των στοιχειωδών αλληλεπιδράσεων για όλα τα άτομα της ακίδας και της επιφάνειας.



Σχήμα 2.7: Ποιοτική μορφή του δυναμικού Lennard-Jones

Συνοπτικά αναφέρονται οι τρεις τρόποι λειτουργία του AFM:

1. Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης με συνεχή επαφή (Contact Mode)

Χρησιμοποιείται κυρίως σε σκληρά και ανθεκτικά δείγματα. Οι ακίδες σε αυτή την περίπτωση είναι φτιαγμένες συνήθως από Silicon Nitride, με ακτίνα καμπυλότητας <20nm. Η ακίδα βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το δείγμα και όπως είπαμε παραπάνω επιδίωξη του οργάνου είναι η δύναμη μεταξύ ακίδας και δείγματος να διατηρείται σταθερή. Ο πρόβολος (Cantilever) που συγκρατεί την ακίδα έχει σταθερά ελατηρίου 0.1-0.5 N/m, η οποία είναι μικρότερη από την σταθερά της δύναμης που συγκρατεί τα άτομα μεταξύ τους σε ένα στερεό.

2. Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης με περιοδική επαφή (Tapping Mode)

Χρησιμοποιείται κυρίως σε μαλακά και εύθραυστα δείγματα (Πολυμερή, gels κλπ). Οι ακίδες σε αυτή την περίπτωση είναι φτιαγμένες συνήθως από Si n-τύπου (πρόσμιξη P) με ακτίνα καμπυλότητας <10nm. Η ακίδα έχει περιοδική επαφή με το δείγμα.³

3. Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης χωρίς επαφή (Non Contact Mode)

Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας το πλάτος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης του μοχλοβραχίονα είναι μικρό, λιγότερο από 10 nm. Στην περίπτωση αυτή μετρώνται μάλλον ελκτικές παρά απωστικές δυνάμεις. Ο βρόχος ανάδρασης διατηρεί συνεχώς σταθερό το πλάτος ή τη συχνότητα της ταλάντωσης καθώς ο σαρωτής κινείται οριζόντια σε σχέση με το δείγμα. Για να μπορέσει κανείς να ανιχνεύσει αλλαγές στη συχνότητα και στη φάση της ταλάντωσης με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα του συστήματος ανάδρασης, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιείται συχνά.

2.2.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η λειτουργία του SEM στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του προς

εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων σε αυτό. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται κυρίως από το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το θάλαμο που τοποθετείται το δείγμα, την αντλία κενού και το σύστημα ανιχνευτών και παρουσίασης. Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα σύρμα βολφραμίου (κάθοδος) και επιταχύνονται προς την άνοδο, στην οποία εφαρμόζεται ένα δυναμικό 1-30KV. Η άνοδος δημιουργεί ισχυρές ελκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να τα επιταχύνει και να τα κατευθύνει. Η παραγόμενη δέσμη ηλεκτρονίων έχει τυπικά ενέργεια από μερικές εκατοντάδες eV μέχρι περίπου 50KeV και εστιάζεται από ένα σύστημα φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με κατάλληλα διαφράγματα. Αμέσως μετά, αυτή η εστιασμένη δέσμη περνά μέσα από ζεύγη πηνίων σάρωσης, τα οποία την εκτρέπουν οριζόντια και κάθετα έτσι ώστε να σαρώνουν μια τετραγωνική περιοχή της επιφάνειας του δείγματος. Τα πηνία αυτά είναι τοποθετημένα σε δύο ζεύγη γύρω από τη δέσμη, με το ένα ζεύγος να ελέγχει την κίνηση της δέσμης στην κατεύθυνση X και το άλλο την κίνησή της στην κατεύθυνση Y. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα καθορίζει το μαγνητικό πεδίο και άρα την εκτροπή της δέσμης ώστε αυτή να στέλνεται στο σωστό σημείο. Τα ίδια τα πηνία ελέγχονται με την γεννήτρια σάρωσης, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τον έλεγχο μεγέθυνσης και την οθόνη. Η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο δείγμα και το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του δείγματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού, και μπορεί να είναι και δευτερογενή ηλεκτρόνια, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια Auger ή Ακτίνες-X.

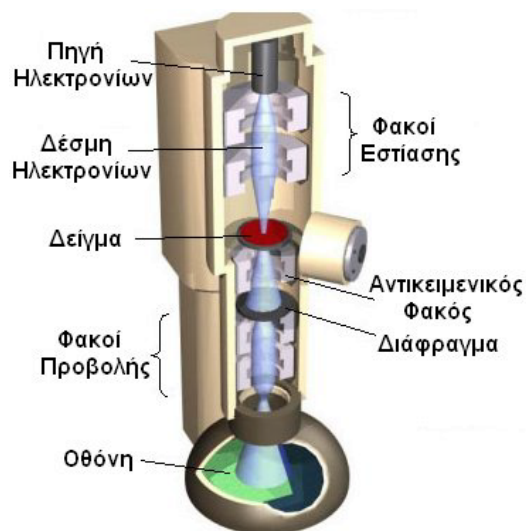
Το βάθος πεδίου του SEM και η διακριτική του ικανότητα είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με το οπτικό μικροσκόπιο. Το SEM, μπορεί να φτάσει σε μεγεθύνσεις της τάξης x10000-30000. Επίσης τα δοκίμια δε χρειάζεται να έχουν τόσο καλή επιπεδότητα όσο στο οπτικό μικροσκόπιο, έτσι μετά από κοπή, λείανση και χημική προσβολή είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η χημική προσβολή είναι απαραίτητη έτσι ώστε να είναι πιο έντονη η τοπογραφία της επιφάνειας και η ένταση του σήματος που προέρχεται από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια να είναι αυξημένη.



Εικόνα 2.8: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης στο Ε.Μ.Π.

2.2.3 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης

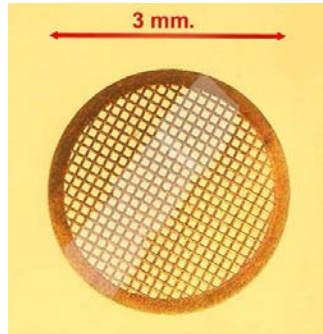
Σε ένα συμβατικό Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (TEM = Transmission Electron Microscopy), ένα λεπτό δείγμα ακτινοβολείται από μία δέσμη ηλεκτρονίων ομοιόμορφης πυκνότητας ρεύματος. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μία κάθοδο, είτε με θερμιονική εκπομπή, είτε με εκπομπή τύπου Schottky, είτε με εκπομπή πεδίου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών μαγνητικών φακών, ελέγχεται η περιοχή που φωτίζεται καθώς και η εστίαση της δέσμης. Μετά τα ηλεκτρόνια οδηγούνται, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών φακών (επίσης μαγνητικού τύπου), σε μια φθορίζουσα οθόνη. Επειδή τα ηλεκτρόνια υφίστανται ισχυρή ελαστική και μη ελαστική σκέδαση από τα άτομα του δείγματος, γιατί και το δείγμα πρέπει να είναι αρκούντως λεπτό, ανάλογα, βέβαια, και με την πυκνότητα και τη στοιχειακή σύνθεσή του[17].



Εικόνα 2.9: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης

Στο επάνω μέρος μιας στήλης κενού, υπάρχει η πηγή ηλεκτρονίων, η οποία είναι είτε ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου (περίπτωση θερμοηλεκτρονικής εκπομπής), είτε μια λεπτή μεταλλική ακίδα παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (περίπτωση εκπομπής πεδίου). Για την αποφυγή ασταθειών στην εκπομπή ηλεκτρονίων, η πρώτη αυτή βαθμίδα βρίσκεται σε υπερυψηλό κενό. Η εκπεμπόμενη δέσμη ηλεκτρονίων επιταχύνεται με τη βοήθεια ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε υψηλή τάση (kV-MV). Ακολουθούν, συνήθως δύο, συγκεντρωτικοί φακοί μαγνητικού τύπου, με τη βοήθεια των οποίων εστιάζεται η δέσμη ηλεκτρονίων. Οι μαγνητικοί φακοί είναι ηλεκτρομαγνητικά πηνία τοποθετημένα έτσι ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να περνά κατά μήκος του άξονά τους. Στην περιοχή των μαγνητικών φακών το κενό είναι της τάξης 10^{-7} έως 10^{-4} mbar, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αέρα. Οι συγκεντρωτικοί φακοί προκαλούν εστίαση της δέσμης ηλεκτρονίων, σε μια περιοχή διαστάσεων λίγων τετραγωνικών μικρομέτρων (μm^2), στο επίπεδο που βρίσκεται το αντικείμενο. Το αντικείμενο έχει τη μορφή λεπτού δισκίου, το πάχος του οποίου είναι μερικά νανόμετρα. Το δείγμα εισάγεται στο θάλαμο του μικροσκοπίου μέσω ειδικής θυρίδας που εξασφαλίζει τη διατήρηση του κενού, και τοποθετείται σε διάταξη μικρομετρικών μετατοπίσεων. Τα ηλεκτρόνια που διέρχονται από το δείγμα περιθλώνται, σύμφωνα με το νόμο του Bragg, σε διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με τα κρυσταλλικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής του. Ο αντικειμενικός φακός, ο οποίος βρίσκεται αμέσως μετά το δείγμα, σχηματίζει στο εστιακό του επίπεδο την περίθλαση μακρινού πεδίου του δείγματος (περίθλαση Fraunhofer), η οποία αποτελεί τον

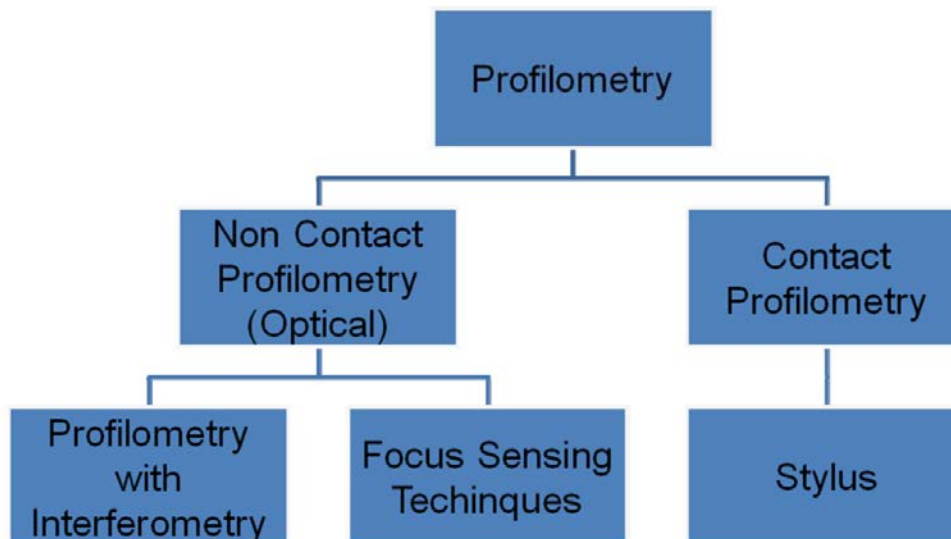
μετασχηματισμό Fourier (σε αντίστροφο χώρο) των κρυσταλλικών χαρακτηριστικών του δείγματος. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια διέρχονται από έναν ενδιάμεσο φακό, με τη βοήθεια του οποίου σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο είδωλο, το οποίο (ως αντίστροφος μετασχηματισμός του Fourier του προηγούμενου) αποτελεί μεγεθυμένη απεικόνιση του αντικειμένου. Το ενδιάμεσο αυτό είδωλο, μέσω ενός τελευταίου φακού (φακός προβολής), προβάλλεται, μετά από μία τελευταία μεγέθυνση, σε φθορίζουσα οθόνη, για παρατήρηση ή φωτογράφιση[17].



Εικόνα 2.10: Δειγματοφορέας TEM για δείγματα σε μορφή σκόνης ή νανοδοματιδίων

2.2.4 Προφίλομετρία

Η προφίλομετρία χωρίζεται χοντρικά σε δύο κατηγορίες:



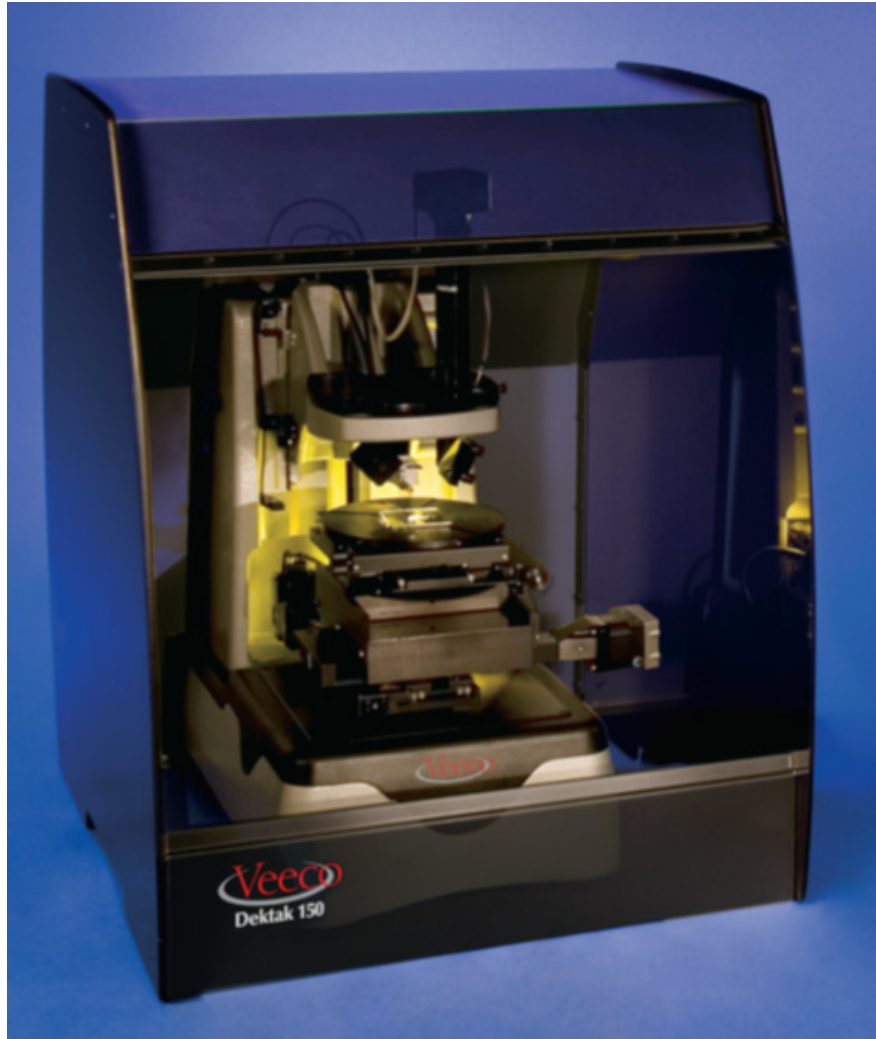
Εικόνα 2.11: Κατηγορίες Profiler

1. Contact Profilometry – προφίλομετρία επαφής
2. Non-Contact Profilometry - Οπτική προφίλομετρία

Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν όλα τα όργανα που μετράει προφίλ επιφανειών όπου είναι αναγκαία η επαφή με το δείγμα. Κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι τα προφιλόμετρα τύπου Stylus. Το προφίλ μετράται με τη χρήση μιας βελόνας από διαμάντι “Stylus tip” που σέρνεται ουσιαστικά πάνω στο δείγμα. Η κατακόρυφη μετατόπιση μεταφράζεται με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού ή ενός diode laser και ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή σε προφίλ. Έτσι προσδιορίζεται μια γραμμή – προφίλ του δείγματος, και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για άλλες γραμμές εάν χρειαστεί. Τυπικά χαρακτηριστικά ενός Stylus είναι το μέγεθος της βελόνας (διάμετρος 2 μ m), το tip load (0,05mg) και η ακρίβεια που θεωρείται κοντά στα 10 \AA .

Τα θετικά στοιχεία της τεχνικής Stylus είναι ότι είναι σχετικά ακριβείς, είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά και κυρίως ότι μπορούμε να μετρήσουμε το προφίλ μιας πολύ μεγάλης γραμμής με μία μέτρηση. Τα αρνητικά στοιχεία είναι κυρίως ότι πρόκειται για μια μέθοδο που απαιτεί επαφή με το δείγμα, συνεπώς μετά την μέτρηση ενός δείγματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αυτό να έχει αλλοιωθεί. Με την ίδια λογική η χρήση ενός Stylus δεν είναι δυνατή σε μαλακά δείγματα όπως ιστοί και άλλα βιολογικά υλικά. Άλλα αρνητικά είναι ότι έχουμε μέτρια εκτίμηση βάθους λόγω όγκου του tip, με μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για κάθε μέτρηση και ότι μπορούμε κάθε φορά να μετράμε μόνο το προφίλ μιας γραμμής και όχι μιας επιφάνειας. Η δεύτερη κατηγορία προφιλόμετρων χωρίζεται σε πολλές υποκατηγορίες που θα αναφερθούν επιγραμματικά:

1. Focus Sensing Techniques – Συνεστιακή Μικροσκοπία
2. Interferometry based Methods
 - a) Laser Interferometry με κύριο εκπρόσωπο την τεχνική που ονομάζεται Phase Shifting Interferometry (PSI)
 - b) White Light Interferometry



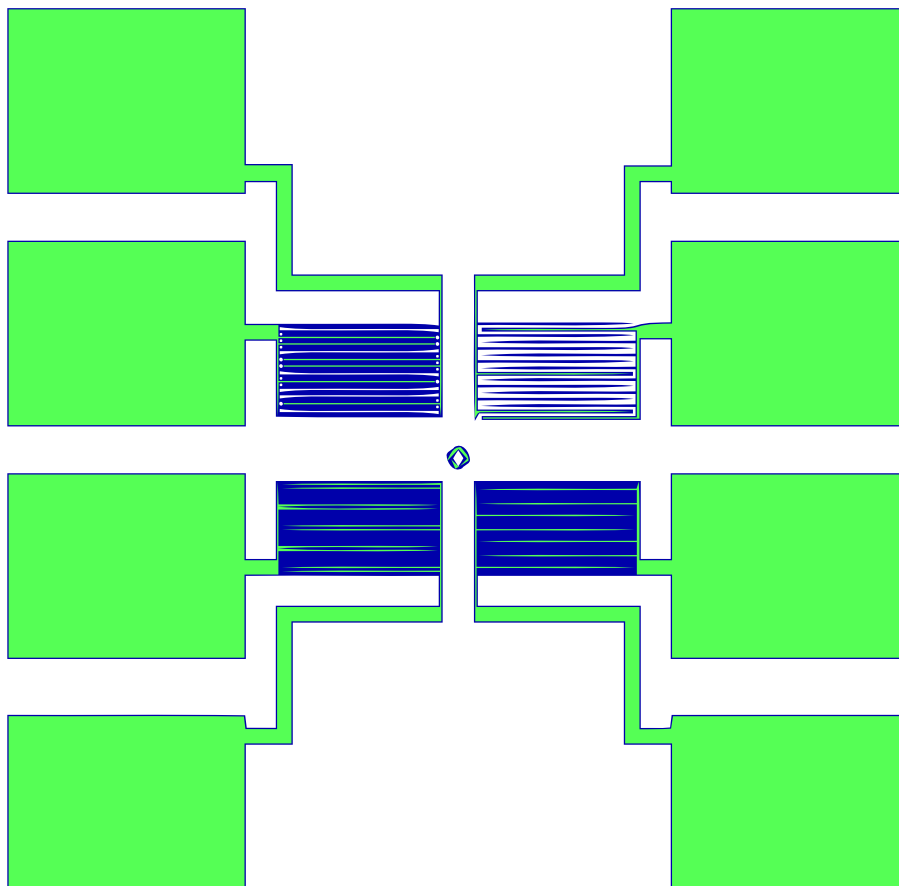
Εικόνα 2.12: Dektak 150 Stylus Profiler από την Veeco

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

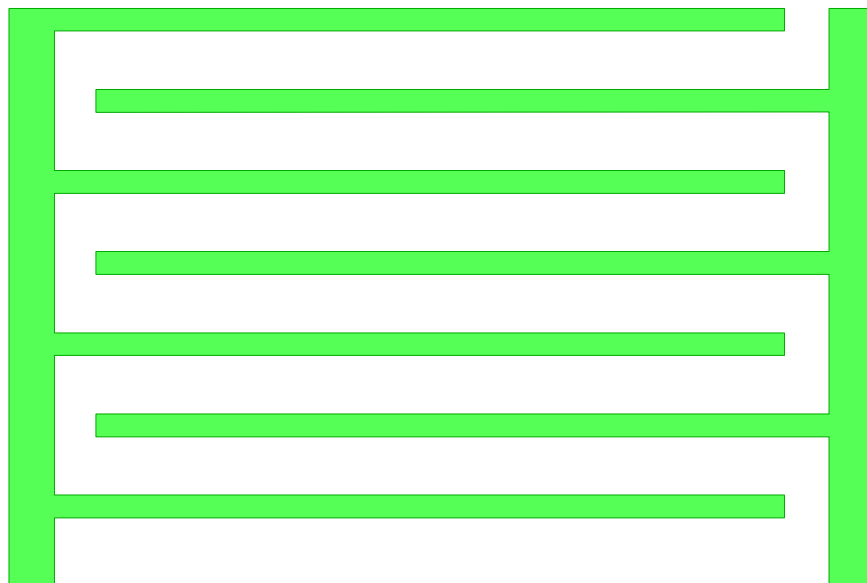
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

3.1 Σχεδιασμός της μάσκας των ηλεκτροδίων

Ο σχεδιασμός της μάσκας ηλεκτροδίων είχε γίνει παλαιότερα στο εργαστήριο αλλά λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων χρειάστηκε να τροποποιηθεί το σχέδιο ώστε να διευρυνθούν οι περιοχές επαφής και συνδεσμολογίας των ηλεκτροδίων (pads) ώστε η σύνδεσή τους με κάποιο όργανο μέτρησης να είναι ευκολότερη (και να μην είναι η μοναδική επιλογή το wire bonding). Η μάσκα κατασκευάστηκε από την deltamask στην Ολλανδία. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τμήμα της νέας μάσκας με διευρυνμένα pads (Σχ. 3.1 και 3.2).



Σχήμα 3.1 Τετράδα ηλεκτροδίων με αποστάσεις ηλεκτροδίων 2, 5, 10, 30 μm



Σχήμα 3.2 Μεγέθυνση σε ζεύγος ηλεκτροδίων με απόσταση 30 μm

3.2 Λιθογραφία για τη δημιουργία των ηλεκτροδίων

Στο εργαστήριο εκτελέστηκε λιθογραφία αρνητικού τόνου για την τον σχηματισμό των ηλεκτροδίων κάθε αισθητήρα ως εξής:

- Καθαρισμός υποστρώματος για λίγα λεπτά στους υπέρηχους έχοντας βυθιστεί σε ακετόνη
- Καθαρισμός από την ακετόνη σε προπανόλη και στην συνέχεια σε διπλά απιονισμένο νερό, κατόπιν το υπόστρωμα στεγνώνεται με πίεση αζώτου.
- Τοποθέτηση υποστρώματος στον spin coater, έλεγχος με δοκιμαστική περιστροφή για την σταθερότητα του δείγματος. Ακολουθεί η εναπόθεση ρητίνης αρνητικού τόνου (όσο χρειαστεί για να καλυφτεί όλη η επιφάνεια) και η περιστροφή στις 5000 στρ/λεπτό για ένα λεπτό.
- Ανόπτηση του υποστρώματος για 90 δευτερόλεπτα στους 110°C
- Ευθυγράμμιση της μάσκας πάνω από το δείγμα και στη συνέχεια δημιουργία κενού για την επαφή της μάσκας στο δείγμα.

- Έκθεση σε UV για 3 δευτερόλεπτα
- Ανόπτηση για 90 δευτερόλεπτα στους 120°C
- Έκθεση σε UV (χωρίς τη μάσκα) για 6 δευτερόλεπτα
- Εμφάνιση για 45 δευτερόλεπτα, καθαρισμός από τον developer με διπλά απιονισμένο νερό, κατόπιν στέγνωμα με πίεση αζώτου.

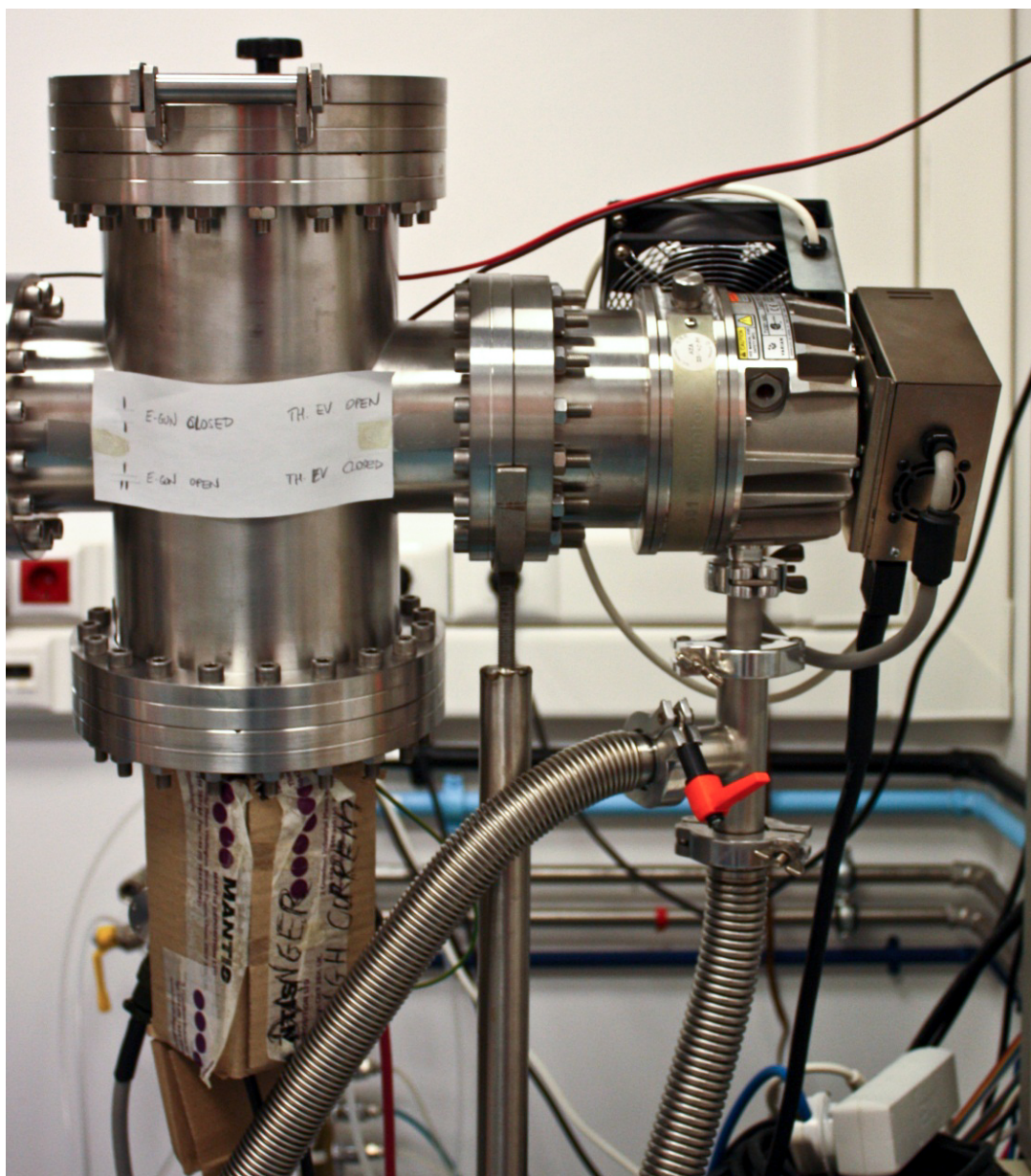
3.3 Περιγραφή του συστήματος PVD (e-Gun) για εναπόθεση υμενίων Ti και Au και διαδικασία εξάχνωσης

Η διάταξη PVD (εικόνα 3.3) που χρησιμοποιήθηκε για την εναπόθεση χρυσού αποτελείται από έναν κυλινδρικό θάλαμο ο οποίος στην βάση του φέρει ειδική υποδοχή (4 rockets για ταυτόχρονη εξάχνωση) για κομμάτια μετάλλου συνδεδεμένα με ηλεκτρόδια. Στο καπάκι του θαλάμου υπάρχουν κατάλληλα διαμορφωμένα σύρματα για να συγκρατούν τα δείγματα. Ο θάλαμος συνδέεται με δύο αντλίες για την επίτευξη κενού μέχρι $\sim 10^{-6}$ mbar.

Διαδικασία Εξάχνωσης: Η διαδικασία εξάχνωσης είναι ιδιαίτερη απλή στην εφαρμογή της αλλά αρκετά χρονοβόρα. Αρχικά, επιλέγουμε την ποσότητα χρυσού που θα εξαχνωθεί για να προκύψει το επιθυμητό πάχος του λεπτού υμενίου. Έχει υπολογισθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του υμενίου συναρτήσει της μάζας χρυσού που χρησιμοποιείται είναι περίπου 25 Å/mgr. Έτσι, εάν για παράδειγμα θέλουμε να κατασκευάσουμε λεπτό υμένιο ύψους 130nm απαιτείται χαλκός μάζας τουλάχιστον 60mgr. Εισάγουμε τα δείγματα στους υποδοχείς, σφραγίζουμε τον θάλαμο, και θέτουμε σε λειτουργία την μηχανική αντλία. Μετά από δέκα λεπτά περίπου η πίεση εντός του θαλάμου έχει μειωθεί από την ατμοσφαιρική στο 1 mbar. Για να μειωθεί η πίεση στην επιθυμητή τιμή απαιτείται γύρω στη μια ώρα.

Μόλις επιτευχθεί το κενό ανοίγουμε την ροή νερού ώστε να ψύχεται ο εξάχνωτής, τροφοδοτούμε τα ηλεκτρόδια με ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα και ανεβάζουμε την ισχύ (10W ανά δύο λεπτά) ως ότου ανιχνεύσουμε ρεύμα 36nA (στο rocket τιτανίου). Κατόπιν ανοίγουμε το κλείστρο και κάνουμε εναπόθεση τιτανίου από 2 έως 3 λεπτά. Αυτός ο σχηματισμός λειτουργεί ως στρώμα σύνδεσης του υποστρώματος με το χρυσό. Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για το χρυσό για 35 λεπτά και με ρεύμα 100nA. Έπειτα, λύνουμε το καπάκι και αφαιρούμε τα δείγματα στα οποία έχει δημιουργηθεί το λεπτό

υμένιο χρυσού. Τα δείγματα βυθίζονται σε ακετόνη και με την βοήθεια των υπερήχων απομακρύνουμε το χρυσό από τα μη επιθυμητά σημεία. (Λεγόμενη διεργασία Lift Off).

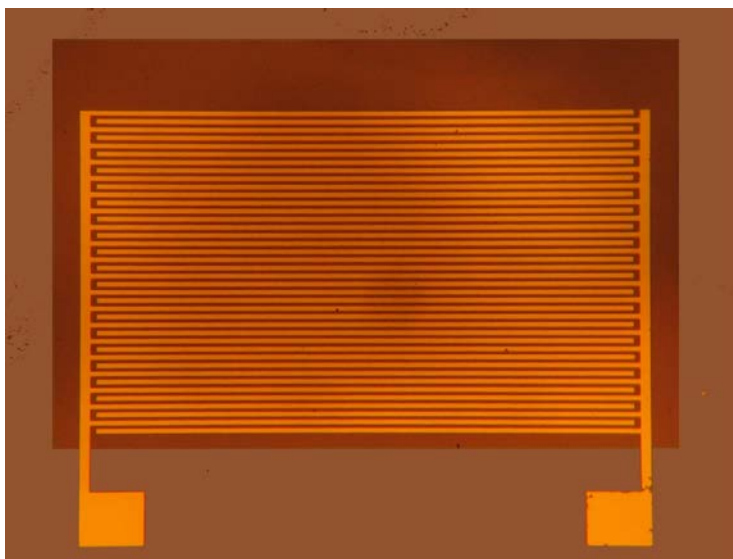


Εικόνα 3.3: Διάταξη PVD στο Clean Room του Πολυτεχνείου

3.4 Λιθογραφία για τη δημιουργία περιοχών εναπόθεσης νανοσωματιδίων

Στο στάδιο αυτό επαναλαμβάνεται η διεργασία της λιθογραφίας αλλά αυτή τη φορά η ευθυγράμμιση του υποστρώματος με τα ηλεκτρόδια γίνεται με διαφορετική μάσκα. Η μάσκα αυτή έχει γεωμετρικές δομές (περιοχές σχήματος ορθογώνιου παραλληλόγραμμου) που

τοποθετούνται επάνω από τις περιοχές των σχηματισμένων ηλεκτροδίων. Το στάδιο αυτό της λιθογραφίας πραγματοποιείται ώστε τα νανοσωματίδια να εναποτεθούν στη συνέχεια μόνο στις περιοχές των ηλεκτροδίων για να αποφευχθούν παρασιτικά ρεύματα κατά τις ηλεκτρικές μετρήσεις. Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται μια διάταξη με δεύτερο στάδιο λιθογραφίας.



Εικόνα 3.4 Ηλεκτρόδια απόστασης 2 μ m μετά από το δεύτερο στάδιο λιθογραφίας

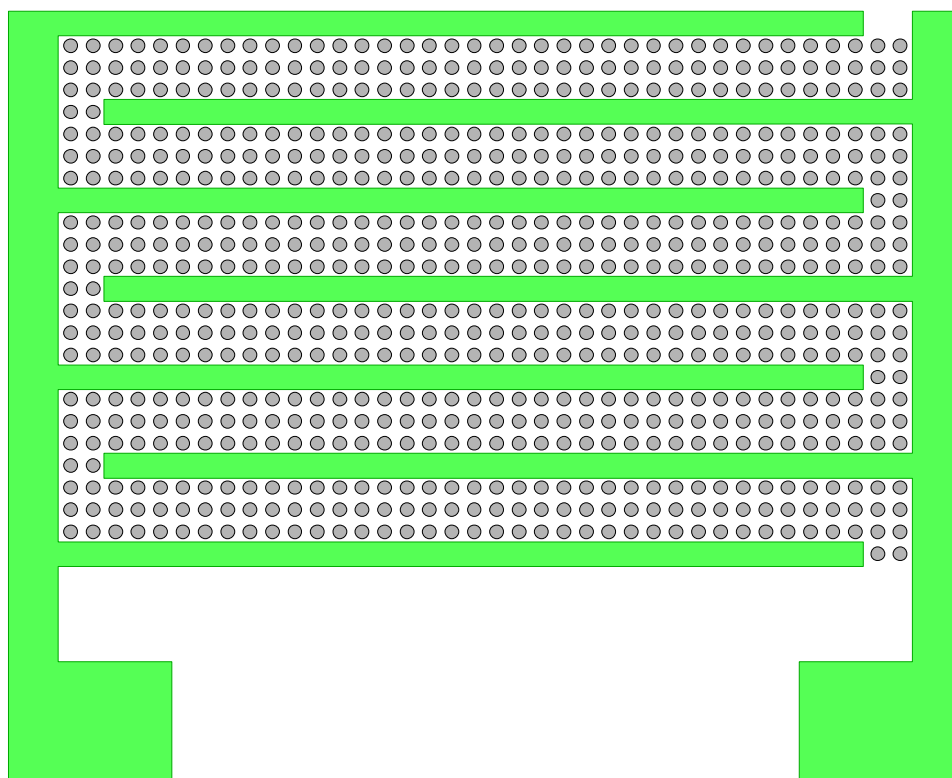
3.5 Εναπόθεση νανοσωματιδίων

Η εναπόθεση νανοσωματιδίων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον κενού με στόχο από πλατίνα (Pt) υπό εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση και βομβαρδιζόμενη από αέριο αργού. Η διαδικασία για την εναπόθεση των νανοσωματιδίων έγινε ως εξής:

1. Τοποθέτηση δειγμάτων μέσα στο σύστημα
2. Σφράγιση του θαλάμου και δημιουργία κενού (περίπου μια ώρα για να δημιουργηθεί κενό 10^{-6} mbar)
3. Εκκίνηση περιστροφής δειγμάτων με περίπου 30 στροφές ανά λεπτό (με το διάφραγμα κλειστό)
4. Άνοιγμα βαλβίδας για την ροή Αργου και ρύθμιση ροής από 30 έως 70cc/min
5. Ρύθμιση της τάσης στα 310V και όριο ρεύματος στα 0,1A

6. Μετά από αναμονή ενός λεπτού (ώστε να απομακρυνθεί το πρώτο λεπτό στρώμα επάνω από τον στόχο που μπορεί να έχει ακαθαρσίες) ανοίγουμε το κλείστρο και ξεκινά η εναπόθεση. Κατά την εναπόθεση είχε μεγάλη σημασία να διατηρείται ο ρυθμός εναπόθεσης σταθερός.
7. Τα δείγματα βυθίζονται σε ακετόνη και με την βοήθεια των υπερήχων απομακρύνουμε το resist της προηγούμενης λιθογραφίας από της επιφάνεια του υποστρώματος. (Lift Off).

Οι εναποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν για την δημιουργία των αισθητήρων έγιναν με όλες τις παραμέτρους σταθερές εκτός αυτής του χρόνου και της την ροής Αργού (6 έως 32 λεπτά εναπόθεσης και με ρυθμό 0.20, 0.40, 0.60, και 0.80 Ang/s).



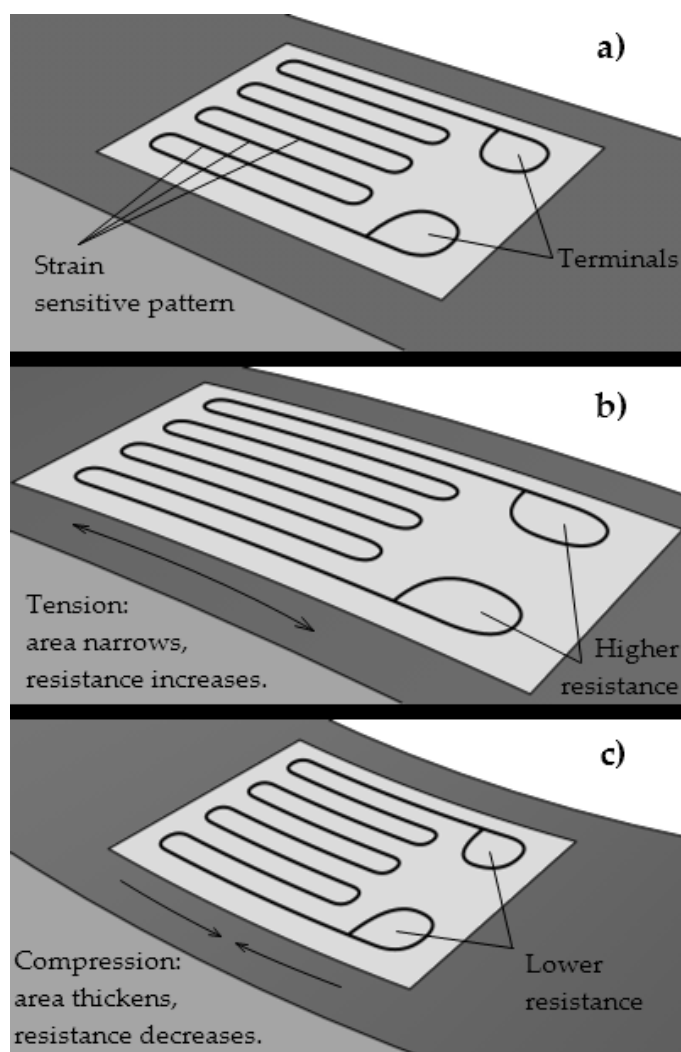
Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροδίων μετά από εναπόθεση νανοσωματιδίων

3.6 Λειτουργία σημερινών αισθητήρων παραμόρφωσης

Οι κυριότερες κατηγορίες αισθητήρων μέτρησης παραμόρφωσης μέσω της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα είναι οι εξής:

3.6.1 Αισθητήρες παραμόρφωσης από μεταλλικά υμένια:

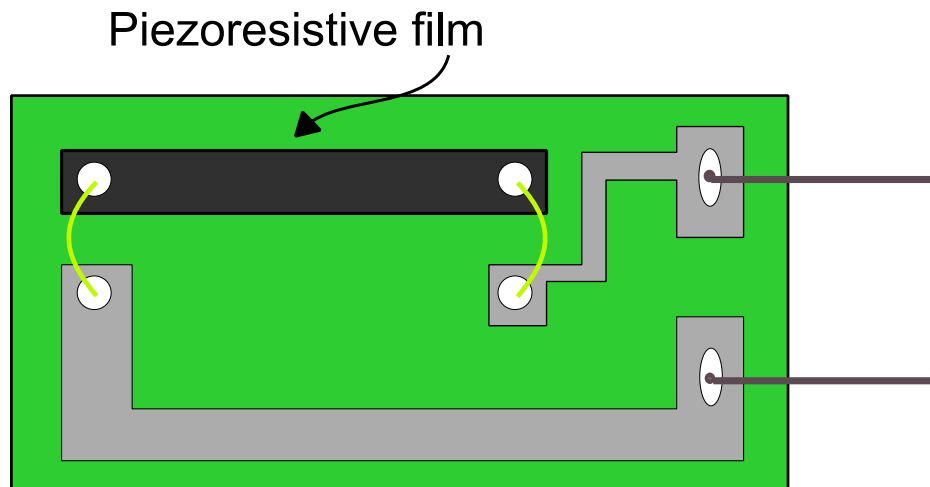
Αποτελούνται από υμένιο μετάλλου πάνω σε εύκαμπτο υπόστρωμα (ή σύρμα). Ο περισσότερο διαδεδομένος αισθητήρας παραμόρφωσης είναι ο μεταλλικός. Αυτός αποτελείται από ένα πολύ λεπτό μεταλλικό στοιχείο σε σχήμα μαιάνδρου (σύρμα, ή συνήθως λεπτό μεταλλικό υμένιο) (Εικόνα 3.6). Η παραμόρφωση εφαρμόζεται παράλληλα προς την επιφάνειά του και παράλληλα στις διαμήκεις γραμμές του σχήματός του. Η διατομή του μεταλλικού στοιχείου επιλέγεται να είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με το μήκος του, ώστε η παραμόρφωση να ανιχνεύεται από την μεταβολή της αντίστασης (μεταβολή στο πάχος της διατομής).



Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα παραμόρφωσης α) σε ηρεμία, β) σε εφελκυσμό και γ) σε συμπίεση

3.6.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης από στοιχεία πιεζοαντίστασης ημιαγωγών

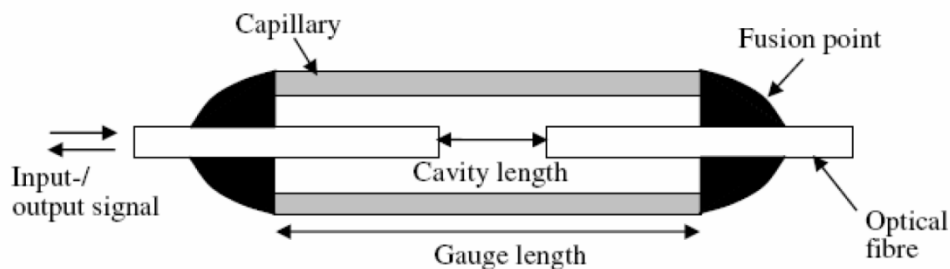
Πρόσφατα έχουν κατασκευασθεί μετρητές παραμορφώσεων που χρησιμοποιούν ημιαγωγικό υλικό αντί για φύλλο μετάλλου. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι η αντίσταση τους μεταβάλλεται πολύ περισσότερο για μια δεδομένη παραμόρφωση από ότι αυτή του κοινού σύρματος, συνεπώς μπορούν να μετρήσουν μικρότερες παραμορφώσεις. Ακόμα έχουν καλή συχνότητα απόκρισης, σταθερό κύκλο υστέρησης και μπορούν να κατασκευαστούν με πολύ μικρές διαστάσεις. Μειονεκτήματα τους το κόστος και η ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας καθώς και σε κτυπήματα.



Εικόνα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα παραμόρφωσης πιεζοηλεκτρικού υμενίου

3.6.3 Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fibre Optic Sensors) χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες ανίχνευσης παραμόρφωσης, εκμεταλλευόμενοι την μεταβολή του μήκους κύματος του φωτός που διέρχεται από αυτούς κατά την διαστολή ή τη συστολή τους. Υπάρχουν πολλοί αισθητήρες οπτικών ινών από τους οποίους, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι για τη μέτρηση και παρακολούθηση της ανάπτυξης των παραμενουσών τάσεων είναι οι αισθητήρες οπτικής ίνας Bragg (Fibre Bragg Grating) και οι εξωτερικοί αισθητήρες συμβολομετρίας Fabry-Perot (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensors). Οι αισθητήρες EFPI μετράνε τις τάσεις μέσω της αλλαγής του μήκους κοιλότητας που βρίσκεται στο εσωτερικό τους (Εικόνα 3.8), η οποία συσχετίζεται με την διαφορά φάσης ανάμεσα στο εισερχόμενο και το εξερχόμενο σήμα και την αντανάκλαση των οπτικών ινών[18].

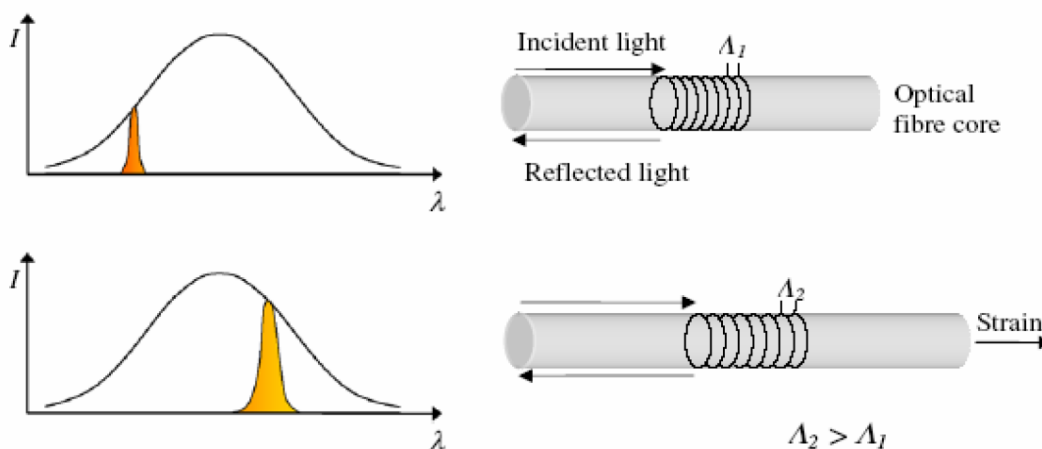


Εικόνα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα συμβολομετρίας Fabry-Perot

Οι αισθητήρες οπτικής ίνας Bragg χαρακτηρίζονται από το μικρό μέγεθός τους (μικρή διάμετρος) καθώς και την υψηλή ακρίβεια τους[19-21]. Η απόκρισή τους στις διάφορες θερμοκρασίες και τάσεις χαρακτηρίζεται από αλλαγή στο μήκος κύματος Bragg λ . Το κεντρικό μήκος κύματος του ανακλώμενου σήματος πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση Bragg[21, 22]:

$$\lambda = 2 n \Lambda$$

όπου n ο δείκτης της διάθλασης και Λ η περίοδος της διάθλασης.



Εικόνα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα οπτικής ίνας Bragg

Η παραμόρφωση προκαλεί μετατόπιση στο μήκος κύματος Bragg $\Delta\lambda_B$. Η σχετική μετατόπιση στο μήκος κύματος Bragg $\Delta\lambda_B/\lambda_B$, λόγω της παραμόρφωσης δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση : $\Delta\lambda_B/\lambda_B = CS \cdot \epsilon$, όπου CS συντελεστής παραμόρφωσης και ϵ η μεταβολή της παραμόρφωσης προς την αρχική κατάσταση. Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι ότι παρουσιάζουν εξαιρετική ακρίβεια και μεγάλη αντοχή

στο χρόνο ενώ το βασικότερο μειονέκτημα τους είναι το κόστος παραγωγής που είναι αρκετά υψηλότερο συγκριτικά με τους υπόλοιπους αισθητήρες ανίχνευσης παραμόρφωσης.

3.6.4 Αισθητήρες παραμόρφωσης από στρώσεις μεταλλικών νανοσωματιδίων

Οι αισθητήρες αυτοί είναι το αντικείμενο ενασχόλησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

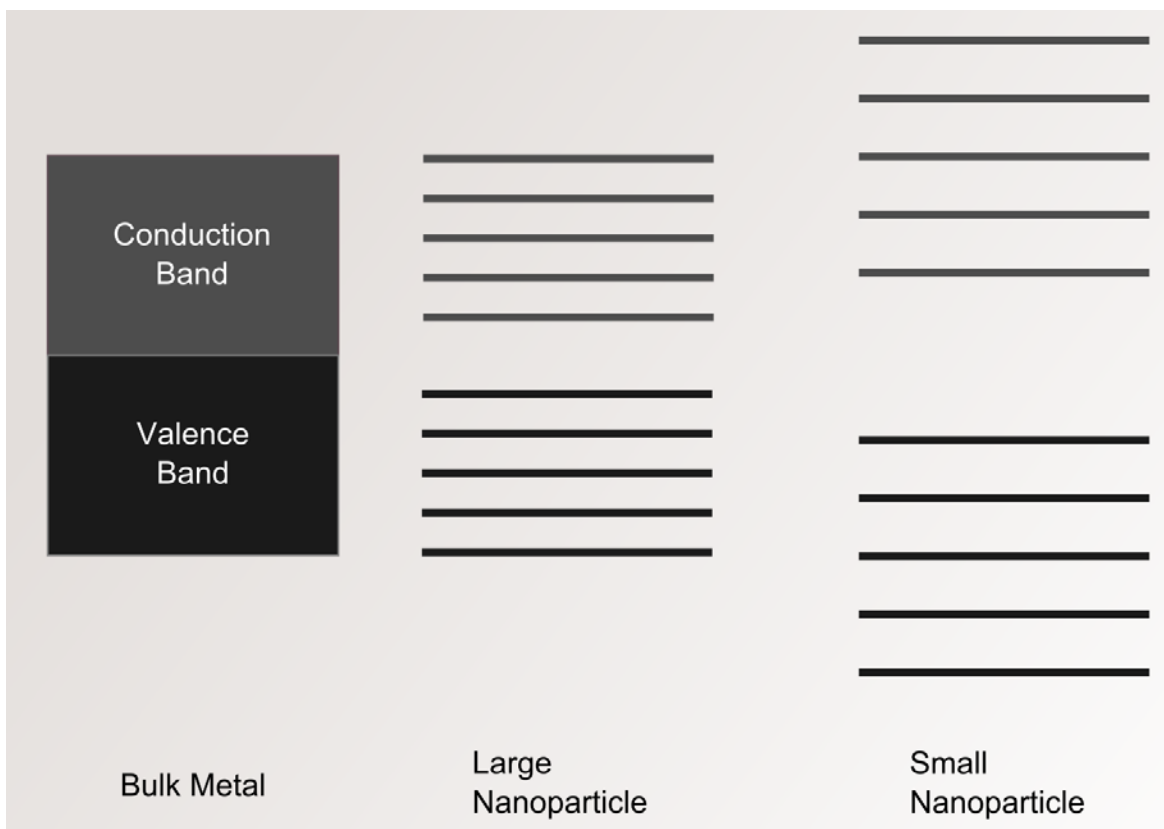
4.1 Λειτουργία του αισθητήρα κατασκευής

Ο τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα στηρίζεται στην μεταβολή της απόστασης των νανοσωματιδίων καθώς το υπόστρωμα κάμπτεται[1] (Εικόνα 3.12). Επάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (με SiO_2 για τελευταίο στρώμα ώστε να αποφεύγονται τα βραχυκυκλώματα ή άλλα παρασιτικά ρεύματα) ή σε εύκαμπτο υμένιο από πολυιμίδιο, αναπτύσσονται ηλεκτρόδια από χρυσό και τα μεταξύ τους κενά καλύπτονται από μια στρώση μεταλλικών νανοσωματιδίων (στην συγκεκριμένη περίπτωση από πλατίνα) μέσης διαμέτρου 5nm. Η απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων είναι ο βασικότερος παράγοντας για τον σχηματισμό «μονοπατιών» αγωγιμότητας, ώστε τα ηλεκτρόνια που φεύγουν από το ένα ηλεκτρόδιο να βρίσκουν δρόμους διέλευσης και να περνάνε στο άλλο ηλεκτρόδιο.

Τα νανοσωματίδια γενικά εμφανίζουν διακριτές ενεργειακές στάθμες λόγω κβαντικού εντοπισμού των κυματοσυναρτήσεων των ηλεκτρονίων των ατόμων τους. Πιο συγκεκριμένα καθώς το μέγεθος του νανοσωματιδίου μειώνεται, η απόσταση ανάμεσα στις ενεργειακές καταστάσεις αυξάνεται (δηλαδή το χάσμα Kubo[23], Εικόνα 3.10). Τα νανοσωματίδια, όταν σχηματίσουν μια στρώση επάνω σε μια επιφάνεια (μοντέλο 2D), λειτουργούν ως διακριτές κβαντικές νησίδες χωρισμένες από ένα φράγμα δυναμικού μειώνοντας έτσι την ικανότητα διέλευσης ηλεκτρονίων σε σχέση με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το αντίστοιχο συμπαγές υλικό (μοντέλο 3D)[24].

Τα τελευταία χρόνια έχουν βρεθεί αρκετοί μηχανισμοί αγωγιμότητας για νανοσωματιδιακές δομές οι οποίοι έχουν επιβεβαιωθεί και πειραματικά[25-27]. Οι επικρατέστεροι ανάμεσά τους είναι: η διέλευση ρεύματος λόγω του φαινομένου σήραγγας (tunneling effect) και η διαδικασία αλμάτων ηλεκτρικού φορτίου (thermally activated electron exchange). Ο μηχανισμός της αγωγιμότητας μέσω φαινομένου σήραγγας κυριαρχεί όταν οι μεταξύ αποστάσεις των νανοσωματιδίων είναι από μερικά Angstrom[24] έως 10nm. Ο μηχανισμός της αγωγιμότητας μέσω αλμάτων φορτίου εξαρτάται έμμεσα από την μεταξύ

απόσταση και το μέγεθος των νανοσωματιδίων (λόγω της ενέργειας ενεργοποίησης) αλλά κυρίως από την θερμοκρασία.



Εικόνα 3.10 Αναπαράσταση ενεργειακών σταθμών μειωμένου του χαρακτηριστικού μεγέθους

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν ένας χαρακτηριστικός μηχανισμός αγωγιμότητας για μια στρώση νανοσωματιδίων επάνω σε μια επιφάνεια είναι αυτός που δίνεται από την σχέση[28] :

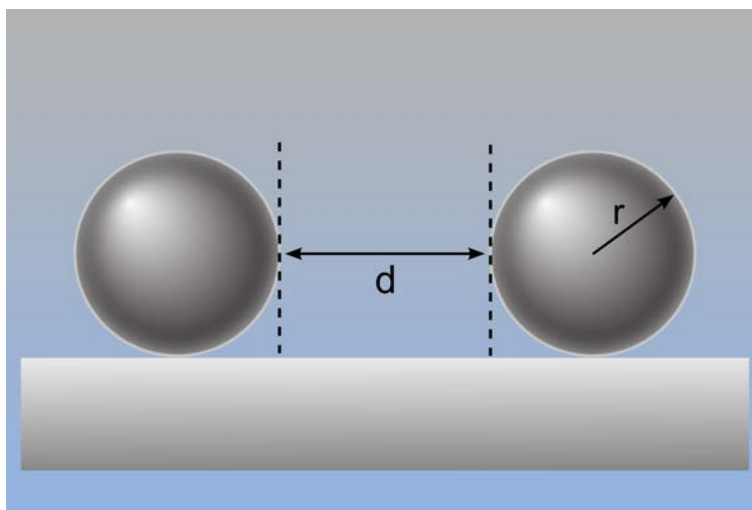
$$\sigma \sim \exp(-\beta\delta) \exp\left(\frac{-E_A}{K_B T}\right) \text{Error! Bookmark not defined. 28}$$

Όπου β η σταθερά εξασθένησης λόγω του φαινομένου σήραγγας, δ η απόσταση που διαχωρίζει τα μεταλλικά νανοσωματίδια, T η θερμοκρασία, k_B η σταθερά Boltzmann και E_A η ενέργεια ενεργοποίησης. Και

$$E_A = 0.5e^2 \frac{r^{-1} - (r + d)^{-1}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}$$

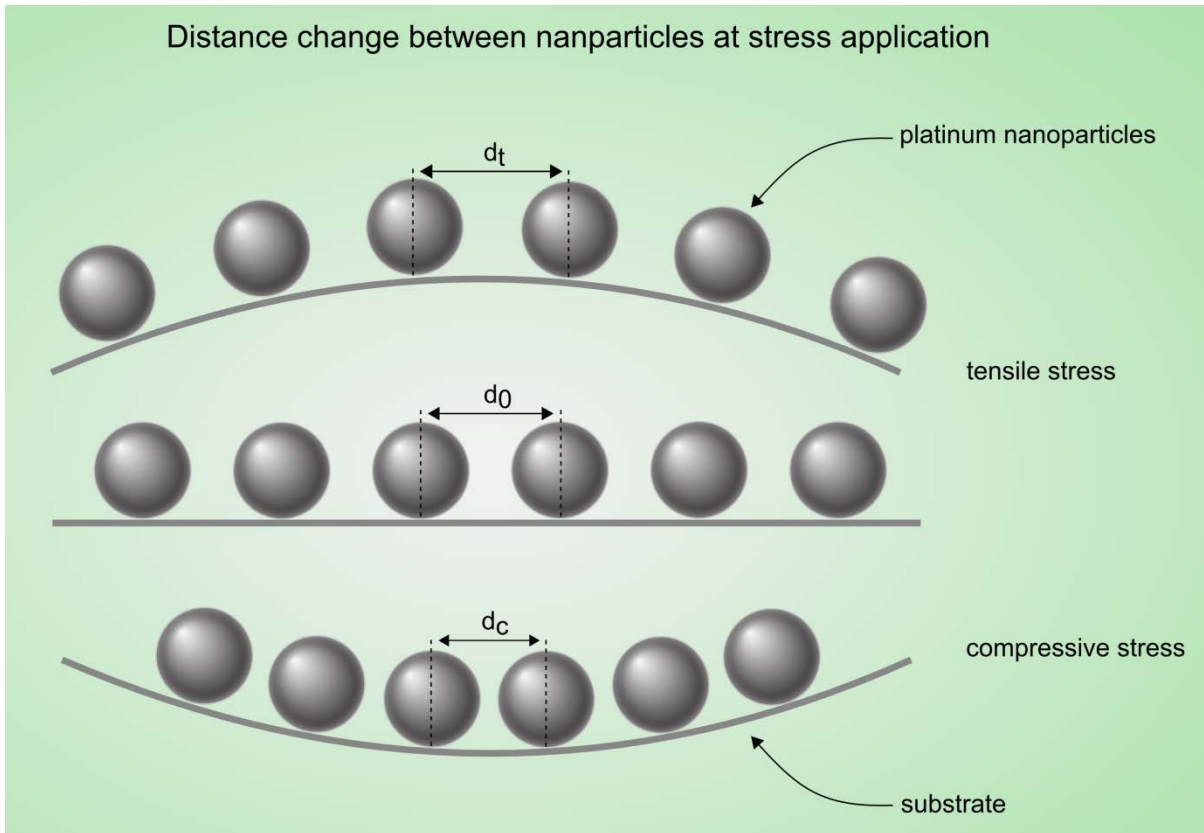
Όπου r μια μέση ακτίνα των νανοσωματιδίων, d η απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων. Η παραπάνω εξίσωση δίνεται σε μονάδες ενέργειας και μπορεί κανείς να παρατηρήσει μετά από κάποια βήματα, πως ισούται με το γινόμενο του φορτίου με την διαφορά δυναμικού που συναντά ένα ηλεκτρόνιο για να μεταβεί από την θέση $r+d$ στην θέση r .

$$E_A = 0.5e^2 \frac{r^{-1} - (r+d)^{-1}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} = 0.5e * \left\{ \frac{e}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r} - \frac{e}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 (r+d)} \right\} = 0.5e * (V_r - V_{r+d})$$



Εικόνα 3.11 Σχηματική αναπαράσταση απόστασης και μεγέθους μεταξύ δύο νανοσωματιδίων

Βάση αυτού του μοντέλου ενεργοποιούμενου φαινομένου σήραγγας (activated tunnel process model) για την αγωγιμότητα, περιμένουμε να αναλύσουμε και κάποια από τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μας μετρήσεων αλλά κυρίως να εξηγήσουμε την λειτουργία των διατάξεών μας ως αισθητήρες παραμόρφωσης εξαρτώμενοι από την αντίσταση. Οι παράγοντες οι οποίοι και παίζουν ρόλο συνεπώς όπως και γίνεται φανερό και από την παραπάνω σχέση, είναι η απόσταση ανάμεσα στα μεταλλικά νανοσωματίδια αλλά και το μέγεθος των νανοσωματιδίων[29-31]. Με την αύξηση του μεγέθους των νανοσωματιδίων αναμένουμε και ταυτόχρονα την αύξηση της αγωγιμότητας ενώ με την αύξηση της μεταξύ τους απόστασης αναμένουμε την μείωσή της.



Εικόνα 3.12 Σχηματική αναπαράσταση μεταβολής απόστασης μεταξύ των νανοσωματιδίων καθώς το υπόστρωμα κάμπτεται

Κατά την εφαρμογή συμπιεστικής τάσης κάθετης προς τα ηλεκτρόδια οι αποστάσεις μεταξύ των νανοσωματιδίων μικραίνουν και ως συνέπεια αυτού η πιθανότητα μεταπήδησης ενός ηλεκτρονίου από το ένα στο άλλο αυξάνεται οπότε παρουσιάζεται πτώση της αντίστασης. Κατά την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης η απόσταση αυτή μεγαλώνει και έτσι η πιθανότητα διέλευσης μειώνεται οπότε η αντίσταση του αισθητήρα αυξάνεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Για την επίτευξη αυτής της διπλωματικής χρειάστηκε να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν δύο συστήματα εφαρμογής τάσης μιας και το θέμα αυτό πραγματοποιείται για πρώτη φορά στο Ε.Μ.Π. Κατασκευάστηκε μια διάταξη για μικρές μεταβολές τάσεων που αφορούσαν δείγματα που αναπτύχθηκαν επάνω σε πυρίτιο και μια για αρκετά μεγαλύτερες που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για αυτά που αναπτύχθηκαν επάνω σε λεπτά φύλλα πολυιμίδιου. Λίγο πριν την περιγραφή των συστημάτων αξίζει να αναφερθούν συνοπτικά δύο έννοιες που είναι άμεσα συνδεδεμένα με αυτά, η παραμόρφωση ϵ και ο μετρητικός παράγοντας η (αλλιώς η ευαισθησία).

5.1 Η παραμόρφωση (ϵ)

Μελετώντας την φυσική συμπεριφορά των μηχανικών κατασκευών συχνά περιλαμβάνουμε στις μετρήσεις μας ένα φαινόμενο γνωστό ως μηχανική παραμόρφωση (strain). Ο όρος της παραμόρφωσης ορίζεται ως την φυσική μεταβολή ενός αντικειμένου υπό την επίδραση ενός ή περισσότερων εξωτερικών διεγέρσεων που εφαρμόζονται στο ίδιο το αντικείμενο. Συχνότατα οι εξωτερικές διεγέρσεις αυτές περιλαμβάνουν γραμμικές δυνάμεις, δυνάμεις πίεσεων, δυνάμεις στρέψεων και δυνάμεις που οφείλονται στην διαστολή ή τη συστολή λόγω έντονων θερμοκρασιακών διαφορών. Η μηχανική παραμόρφωση μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση ή την συστολή του αντικειμένου. Όταν το αντικείμενο επιμηκύνεται το συμβολίζουμε με ένα χαρακτήρα (+), ενώ όταν συστέλλεται με ένα χαρακτήρα (-).

Η παραμόρφωση είναι ένας σπουδαίος παράγοντας σε πλήθος εφαρμογών και ιδιαίτερα σε αυτές που σχετίζονται μηχανικές και μηχανολογικές κατασκευές καθώς σε αυτές σημαντικός παράγοντας είναι ο προσδιορισμός της μηχανικής πίεσης που δέχεται το αντικείμενο. Τότε μόνο, με τα κατάλληλα δεδομένα που θα συγκεντρωθούν μέσω των αναλύσεων των αποτελεσμάτων, θα βρεθεί η κατασκευαστική αξιοπιστία, ο μέσος χρόνος συντήρησης καθώς και άλλοι καθοριστικοί μηχανολογικοί παράγοντες. Οι βασικές αρχές των

μετρήσεων της παραμόρφωσης μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν και σε άλλους τύπους μετρήσεων που σχετίζονται με την παρουσία δυνάμεων. Τέτοιες είναι μετρήσεις πίεσης, στρέψης και βάρους. Η μηχανική παραμόρφωση υπολογίζεται σαν την μεταβολή του μήκους ενός αντικειμένου διαιρεμένη από το ανά μονάδα μήκος (unit length) του ίδιου του αντικειμένου.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Σε συνηθισμένες συνθήκες είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με το μήκος του αντικειμένου. Για παράδειγμα εάν μια ράβδος ενός μέτρου (1000mm) συμπιεστεί κατά 0.01mm τότε αυτή η αλλαγή μπορεί να υπολογιστεί σαν 0.01mm/1000mm και εκφράζεται σαν παραμόρφωση 0.00001 ή 10 micro-strain (micro-strain = 10^{-6} , $\varepsilon = \Delta l/l$ προκύπτει καθαρός αριθμός).

5.2 Ο Μετρητικός Παράγοντας (Gauge Factor, g)

Ο όρος μετρητικός παράγοντας, Gauge Factor (g), περιγράφει τον αναλογία μεταβολής της αντίστασης σε σχέση ως προς την μεταβολή της παραμόρφωσης (ε). Η μαθηματική εξίσωση του G_F είναι η εξής:

$$g = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

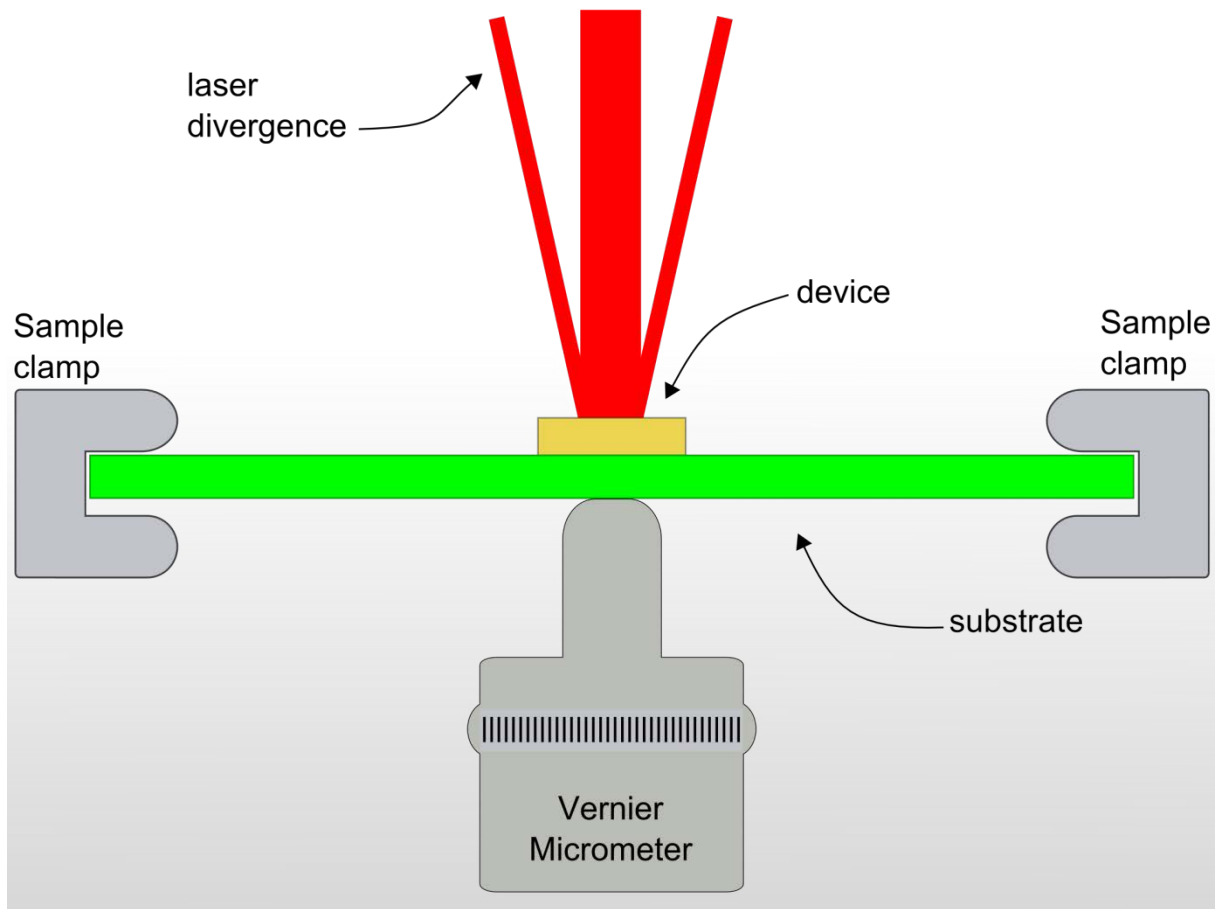
Ένας τυπικός μετρητικός παράγοντας είναι η τιμή δυο (2). Οι κατασκευαστές αισθητηρίων παραμόρφωσης πρέπει να καθορίζουν τον ακριβή μετρητικό παράγοντα για καθένα από τα αισθητήρια τους ξεχωριστά. Δέκα βαθμοί καταπόνησης δηλαδή 10 micro-strain εάν εφαρμοστούν σε ένα αισθητήριο που έχει μετρητικό παράγοντα την τιμή δυο (2) θα έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της αντίστασης του αισθητηρίου κατά 20 micro-Ohm ($20 \cdot 10^{-6}$ Ohm). Αυτό είναι το αποτέλεσμα του παραπάνω μαθηματικού τύπου, αφού $\Delta R/R = \varepsilon * g$

Τα περισσότερα μεταλλικά αντικείμενα, η μέγιστη επιφανειακή παραμόρφωση που συναντάμε είναι της τιμής των 5000 micro-strain και αν αναλογιστούμε ότι ο συχνότερα επαρκής μετρητικός παράγοντας είναι ο $g=2$, τότε η μέγιστη μεταβολή της αντίστασης του αισθητηρίου μπορεί να φτάσει στα 10000 micro-Ohms (0.01Ω). Για τον λόγο αυτό τα

μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούμε πρέπει να έχουν το ελάχιστο μετρητικό βήμα του $1\mu\Omega$ ή $1\mu V$.

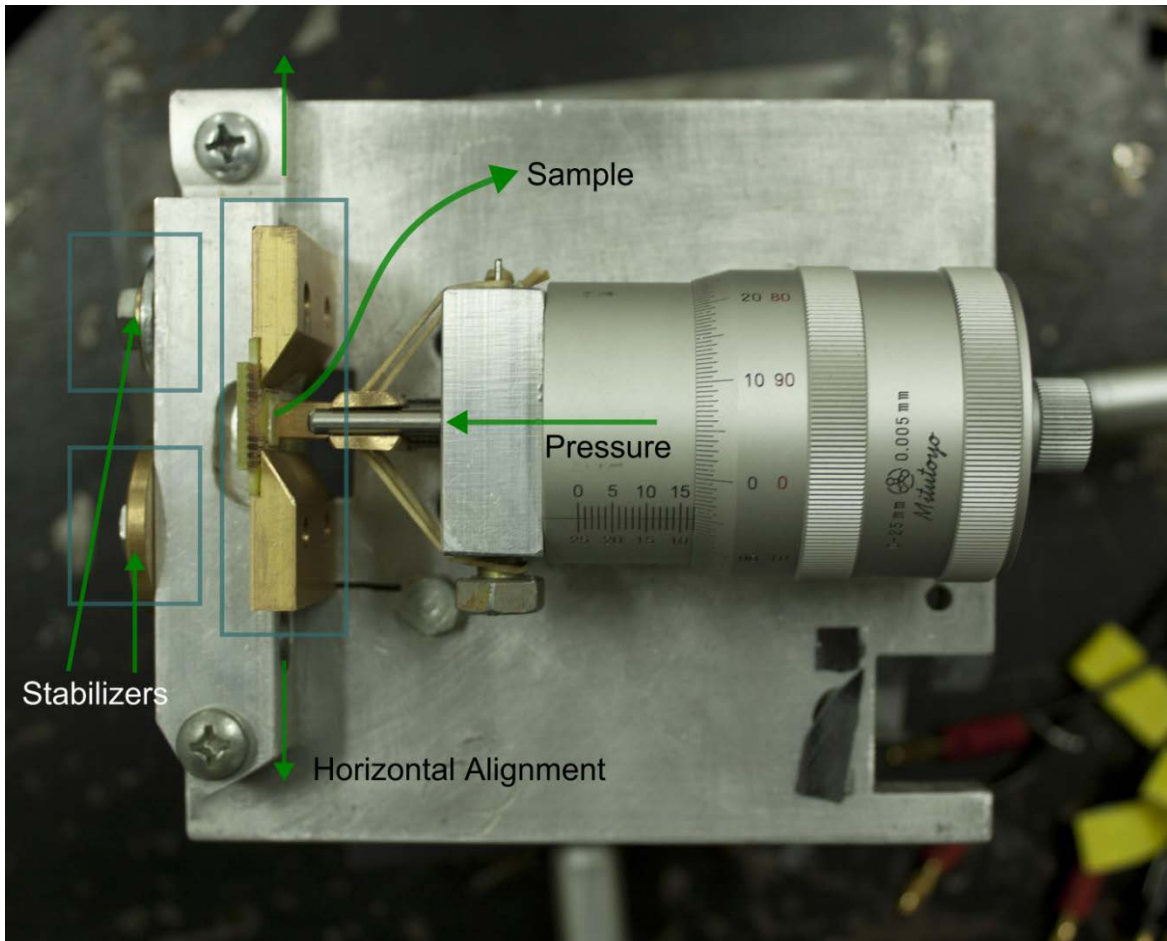
5.3 Σύστημα παραμόρφωσης για υπόστρωμα πυριτίου

Το σύστημα εφαρμογής τάσης τοποθετήθηκε σε τράπεζα οπτικής λόγω της συμμετοχής ενός laser HeNe στα πειράματα, για την μέτρηση αλλά και επαλήθευσης της κάθε ακτίνας καμπυλότητας. Το σύστημα αποτελείται από μια μεταλλική βάση στην οποία είναι τοποθετημένα: ένας μικρομετρικός κοχλίας και ένας μεταβλητός κατά οριζόντιο άξονα (κάθετο στο μικρομετρικό κοχλίας) δειγματοφορέας. Αυτή η μεταλλική βάση είναι στερεωμένη σε μια μικρομετρική τράπεζα x-y οριζόντιας μετατόπισης για μπορεί να προσανατολίζεται κάθετα πάντα η ακτίνα του laser στο δείγμα. Στον δειγματοφορέα τοποθετείται το PCB με το δείγμα. Το δείγμα τοποθετείται κάθετα στο κέντρο του εμβόλου του κοχλίας και συγκρατείται από τα άκρα του ώστε να αναπτύσσονται, ομοιόμορφα, σταθερές τάσεις σε όλη την επιφάνεια του πυριτίου για κάθε κάμψη (Σχήμα 4.1). Η άκρη του εμβόλου μάλιστα έχει σχήμα τοξωτό (ανήκει σε πλευρικό κομμάτι επιφάνειας κυλίνδρου) ώστε να διατηρείται η ομοιομορφία της τάσης με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

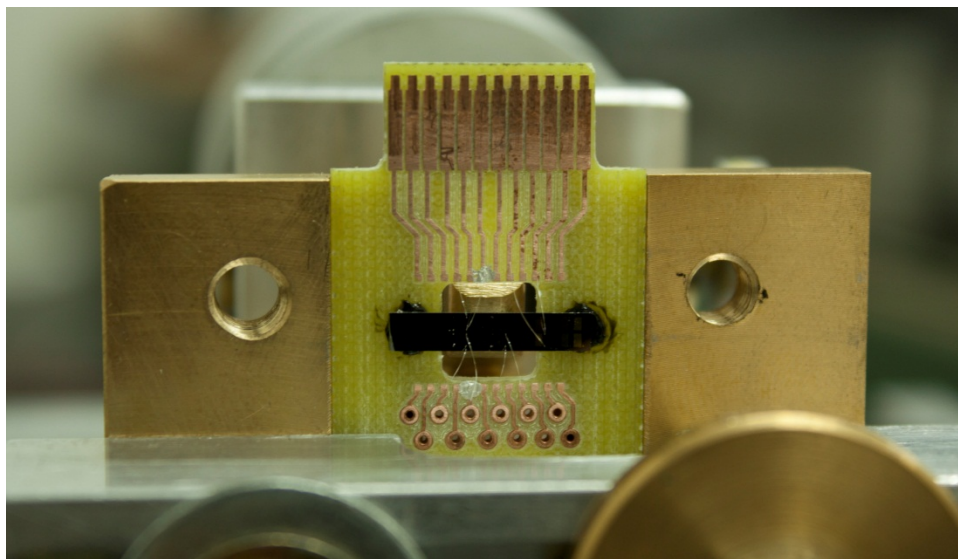


Εικόνα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού δημιουργίας κάμψης (παραμόρφωσης)

Όλα τα δείγματα έχουν μήκος περίπου 14mm και πλάτος περίπου 3mm, ενώ το διάστημα που κάμπτεται είναι 10mm. Τα άκρα του δείγματος είναι κολλημένα με μια ελαστική κόλλα επάνω στο PCB για να μπορέσει να γίνει το wire bonding των ηλεκτροδίων με τα pads του PCB (Εικόνα 4.3) αλλά να μπορεί και να μετακινείται ελεύθερα επάνω στο PCB (περίπου 1mm από τη αρχική του θέση) κατά την κάμψη. Το PCB συνδέεται με ένα HP4140B picoampere meter, όπου από αυτό καταγράφονται χαρακτηριστικές I-V σε ένα υπολογιστή για κάθε παραμόρφωση. Το PCB μετά την τοποθέτηση του στον δειγματοφορέα ακινητοποιείται και από την μπροστινή πλευρά από δύο μέταλλα (βιδώνουν στις υποδοχές στην εικόνα 4.3) τα οποία εμποδίζουν την λωρίδα πυριτίου να ξεκολλήσει από τα άκρα και επίσης αφήνουν πάντα μόνο 10mm άνοιγμα για να σχηματιστεί η κάμψη.



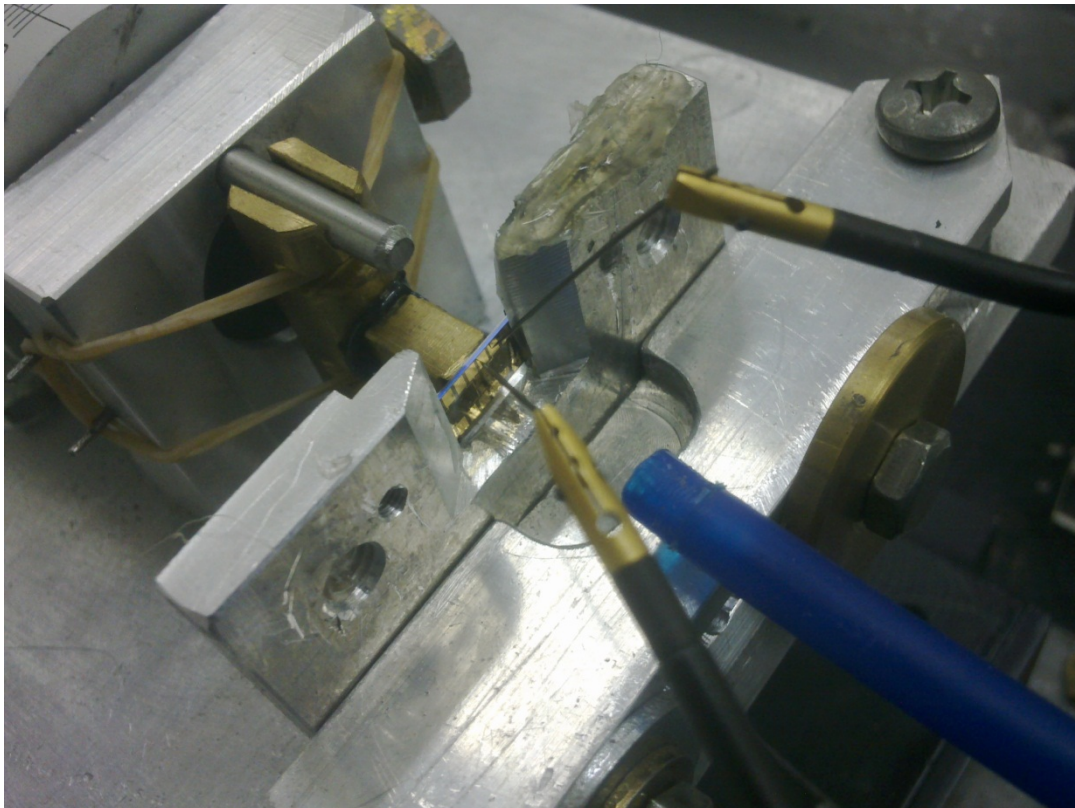
Εικόνα 4.2 Μηχανισμός δημιουργίας κάμψης



Εικόνα 4.3 Δείγμα πυριτίου κολλημένο στο PCB συνδεδεμένο με wire-bonding, πίσω διακρίνεται το έμβολο

Κατά την διάρκεια της εργασίας προέκυψε ένα πρόβλημα με το wire-bonding και οδηγηθήκαμε στον επανασχεδιασμό της μάσκας φωτολιθογραφίας, δημιουργώντας μεγαλύτερα Pads ώστε να μπορεί να γίνει ένωση λεπτών «καλωδίων» με κάποια ηλεκτρικά αγώγιμη κόλλα ή να μπορούν να ακουμπάμε επάνω τους probes χωρίς την βοήθεια μικροσκοπίου (αφενός διότι ήταν πολύ πιο δύσκολο να ενσωματωθεί ένα μικροσκόπιο επάνω στο σύστημα και αφετέρου θα ήταν πολύ επίπονο το «σημάδεμα» των μικρών Pads για κάθε κάμψη). Ακόμα με το μηχάνημα του wire-bonding δεν μπορούσαν να γίνουν ενώσεις επάνω σε Pads που είχαν φτιαχτεί σε εύκαμπτο υπόστρωμα (πολυιμίδιο).

Μαζί με την νέα μάσκα φωτολιθογραφίας κατασκευάστηκε ένας δειγματοφορέας για να δέχεται το νέο σχήμα από τα υποστρώματα καθώς έγιναν πλατύτερα για να χωρέσουν τα μεγαλύτερα Pads και δεν χρειαζόταν πια το PCB.

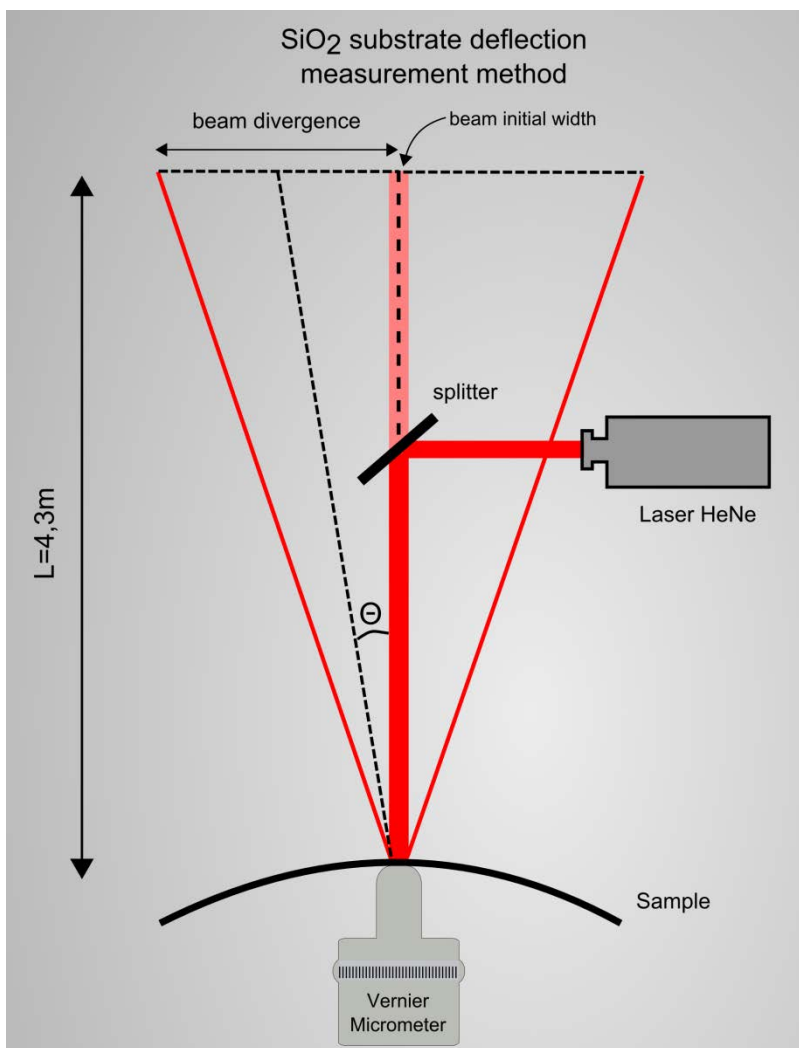


Εικόνα 4.4 Παραλλαγμένος δειγματοφορέας και σχήμα υποστρώματος πυριτίου

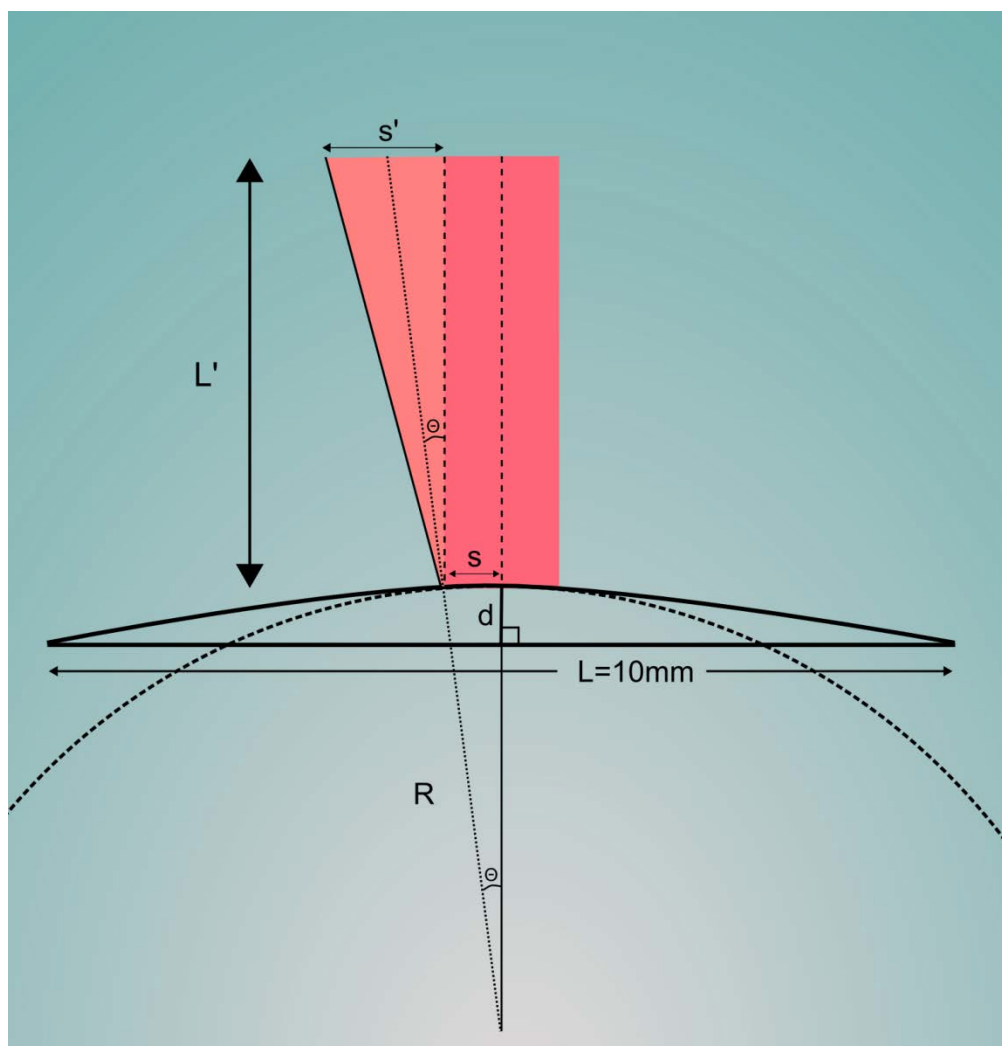
Σε αυτό τον δειγματοφορέα το υπόστρωμα ακινητοποιείται από την πίσω πλευρά ενώ διατηρήθηκε το άνοιγμα των 10mm για υπάρξει συσχέτιση με όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα. Τρόπος ηλεκτρικής σύνδεσης γίνεται πια με τους probes.

5.4 Μέτρηση κάθετης μετατόπισης με την βοήθεια του laser

Όταν το υπόστρωμα είναι σε ηρεμία (το έμβολο βρίσκεται σε επαφή με το πίσω μέρος του υποστρώματος), η ανακλώμενη ακτίνα έχει κηλίδα με διάμετρο 8 έως 12mm. Κατά την πίεση του υποστρώματος από το έμβολο η κηλίδα αρχίζει να διευρύνεται οριζόντια και με γεωμετρικούς υπολογισμούς μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την γωνία θ από την απόκλιση της δέσμης (Εικόνα 4.5 α κα β). Οι μεταβολές που έγιναν σε κάθε δείγμα πυριτίου από το έμβολο ήταν από 0 έως 50 μm (για μεγαλύτερες μετατοπίσεις το δείγμα οδηγούταν σε θραύση) με βάση την βαθμονόμηση του μικρομετρικού κοχλία και τη μέτρηση της διαμέτρου της κηλίδας όπου έγινε με ένα ψηφιακό παχύμετρο.



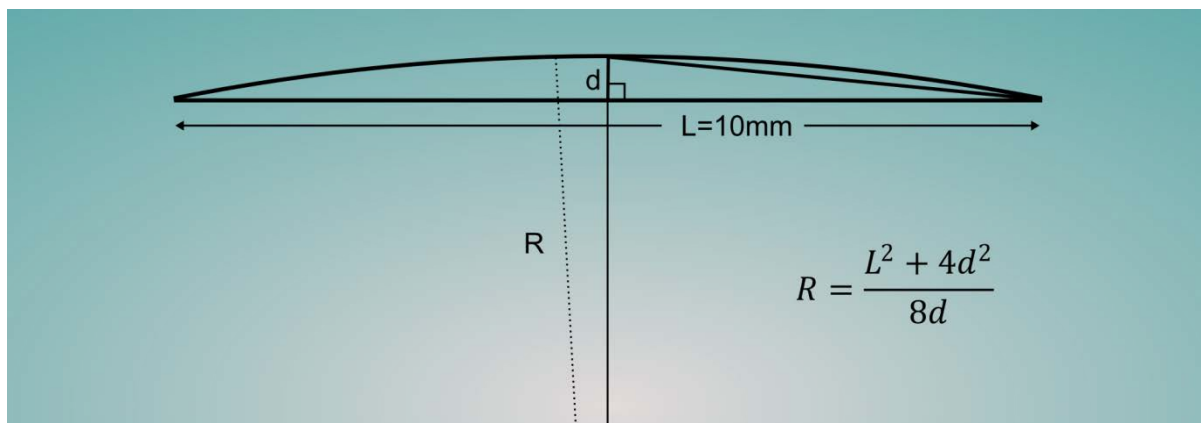
Εικόνα 4.5α Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης της ακτίνας καμπυλότητας μέσω της απόκλισης της δέσμης μιας ακτίνας laser[6]



Εικόνα 4.5β Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού της ακτίνας καμπυλότητας μέσω της απόκλισης της δέσμης μιας ακτίνας laser[6]

Στο παραπάνω σχήμα μπορεί εύκολα κανείς να παρατηρήσει πως $\theta = \frac{s}{R}$ αλλά και στην απόκλιση της δέσμης $2\theta = \frac{s'}{L'}$. Από αυτές τις δύο σχέσεις μπορούμε να απαλείψουμε το θ και να γράψουμε: $\frac{R}{s} = \frac{2L'}{s'} \Leftrightarrow R = 2L' \frac{s}{s'}$. Από αυτή τη σχέση μετρήθηκε η ακτίνα καμπυλότητας που ακολουθούσε το δείγμα στην περιοχή του μέσου του. Με την ίδια μέθοδο διερευνήθηκε όλη η επιφάνεια του υποστρώματος για το αν παρουσιάζει ομοιόμορφο σχηματισμό σε κάθε κάθετη μετατόπιση. Από αυτή την διερεύνηση βρέθηκε πως όσο απομακρύνονταν η δέσμη από το μέσο του δείγματος, το s' γινόταν μικρότερο, το οποίο έδειξε πώς η επιφάνεια στο μέσο ακολουθούσε διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας (διακεκομμένος κύκλος στο σχήμα 4.5β) από αυτή που ακολουθούσαν τα άκρα τους. Τα κύρια σφάλματα που μπορεί κανείς να

εισάγει για να ορίσει την αξιοπιστία της οπτικής μέτρησης είναι τα εξής: α) το laser έχει μια αρχική γωνιακή απόκλιση $\theta_0=1\text{mrad}$, η οποία συμβάλει αρνητικά στην ακρίβεια της μέτρησης του S' , β) η δέσμη καλύπτει όλη την περιοχή που βρίσκονται τα ηλεκτρόδια επάνω στο υπόστρωμα τα οποία δημιουργούν φαινόμενα περίθλασης (κατά των οριζόντιο άξονα) στην προβολή της δέσμης στο πέτασμα και γ) επικαλούμαστε την ακρίβεια του ματιού μας ως όργανο μέτρησης των S' και S . Όλα αυτά δίνουν στην μέτρηση ένα σχετικό σφάλμα.



Εικόνα 4.6 Σχηματική αναπαράσταση θεωρητικού υπολογισμού της ακτίνας καμπυλότητας από την ένδειξη του μικρομετρικού κοχλία

Αναζητώντας την ιδανική περίπτωση εύρεσης μιας ομοιόμορφης παραμόρφωσης του δείγματος που να ανήκει σε μια σταθερή ακτίνα καμπυλότητας υπολογίσαμε θεωρητικά πόση θα έπρεπε να ήταν αυτή η ακτίνα για κάθε μια κάθετη μετατόπιση. Από το παραπάνω σχήμα (εικόνα 4.6) μπορούμε να υπολογίσουμε από το πυθαγόρειο θεώρημα το R :

$$R^2 = (R - d)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \leftrightarrow 2Rd = d^2 + \frac{L^2}{4}$$

$$R = \frac{4d^2 + L^2}{8d}$$

Από τον παραπάνω υπολογισμό της κάθετης μετατόπισης μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε την θεωρητική ακτίνα καμπυλότητας που «ακολουθεί» το δείγμα κάθε φορά αν θεωρήσουμε πως το υπόστρωμα κάμπτεται ομοιόμορφα σε κάθε μια από τις κάθετες μετατοπίσεις (Εικόνα 4.6). Στη μέθοδο αυτή, το ενδεχόμενο σφάλμα προέρχεται από την παραδοχή ότι η επιφάνεια αποτελεί, σε όλη της την έκταση, τμήμα κυκλικού τόξου, που δεν φαίνεται όμως να ισχύει απόλυτα, απ' ότι δείχνουν και οι οπτικές μετρήσεις. Η ακτίνα

καμπυλότητας καθώς και το πάχος των υποστρωμάτων είναι οι βασικότερες παράμετροι για τον υπολογισμό της μεταβολής το μήκους l όπως και του ε . Λόγω των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε ως ακτίνα καμπυλότητας για τον υπολογισμό της ελαστικής παραμόρφωσης μια μέση ακτίνα καμπυλότητας από τις δύο προσεγγίσεις. Στον πίνακα 4.1 μπορούμε να παρατηρήσουμε πως με την αύξηση της κάθετης μετατόπισης οι δύο υπολογισμοί συγκλίνουν όλο και περισσότερο.

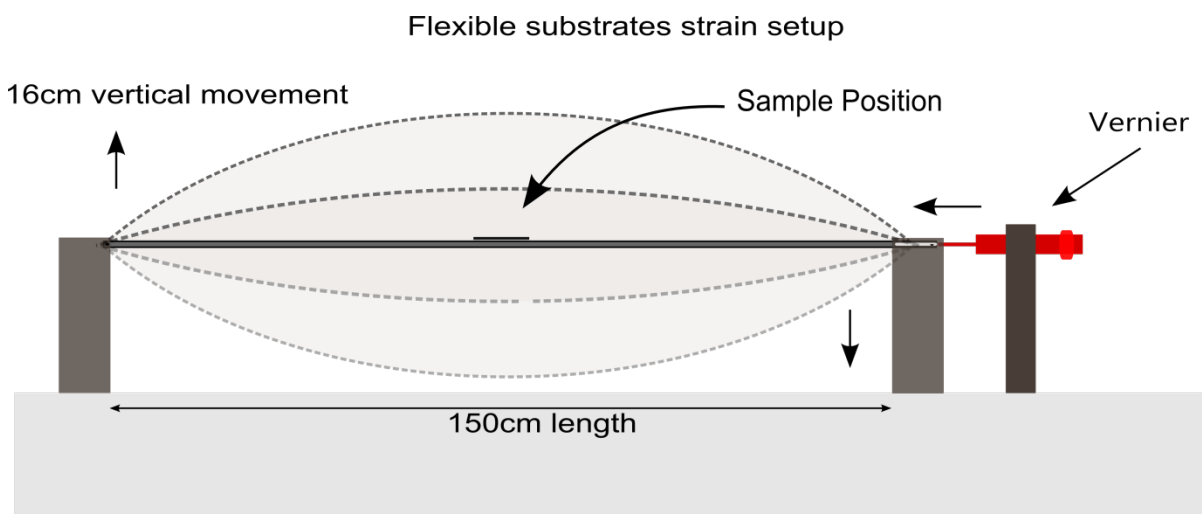
Πίνακας 4.1: Υπολογισμός μέσης ακτίνας καμπυλότητας από την θεωρητική και την οπτική προσέγγιση

R theoretical (cm)	R from optical measurements (cm)	R average (cm)
125	200	163±37
63	61	612±1
42	38	40±2
31	28	29.5±1.5
25	25	25

5.5 Σύστημα παραμόρφωσης για υποστρώματα λεπτού υμενίου από πολυιμίδιο

Το σύστημα εφαρμογής τάσης μεγάλων μετατοπίσεων τοποθετήθηκε και αυτό στην ίδια τράπεζα οπτικής λόγω του συστήματος αντικραδασμικότητας που είχε. Μια λωρίδα από Plexiglas διαστάσεων 150x8x0,5cm τοποθετήθηκε από την μια πλευρά σε ένα ακλόνητο σημείο ύψους 8 cm που μπορεί να αλλάζει γωνία στρέψης και από την απέναντι πλευρά αφέθηκε ελεύθερη να ακουμπάει επάνω σε μια ράγα (τα δύο άκρα βρίσκονται πάντα στο ίδιο ύψος). Στο μέρος της ελεύθερης πλευράς παράλληλα στην λωρίδα έχει τοποθετηθεί ένας μικρομετρικός κοχλίας ο οποίος πιέζοντας την πλευρά του Plexiglas το εξαναγκάζει να καμφθεί προς τα επάνω ή προς τα κάτω διαγράφοντας ένα ομοιόμορφο τόξο (Εικόνα 4.7). Σε αυτό το σύστημα μας δίνεται η δυνατότητα να μελετήσουμε και την συμπεριφορά της επιφάνειας του υποστρώματος. Η ακτίνα καμπυλότητας υπολογίστηκε από τον παραπάνω θεωρητικό τύπο $R = \frac{4a^2 + L^2}{8d}$ που χρησιμοποιήθηκε και για τα υποστρώματα πυριτίου. Η ακτίνα καμπυλότητας υπολογίστηκε από την προβολή ενός τομέα του τόξου

στον οριζόντιο άξονα (για $L=30\text{cm}$ και $L=15\text{cm}$) στην οποία αντιστοιχούσε και ένα συγκεκριμένο βέλος τόξου (κάθετη μετατόπιση d) στο μέσο της ράβδου. Για μέγιστη κάθετη εκτροπή της ράβδου από Plexiglas από την οριζόντια θέση κατά 16cm υπολογίστηκε η μέση ακτίνα καμπυλότητας $\langle R \rangle = 174 \pm 2\text{cm}$.



Εικόνα 4.7 Σχηματική αναπαράσταση συστήματος για μεγάλες μετατοπίσεις

Ακόμα για την περαιτέρω μελέτη μεγαλύτερων κάμψεων χρησιμοποιήθηκαν τα εσωτερικά και εξωτερικά μέρη από κυλινδρικές επιφάνειες ακτίνων καμπυλότητας: $7,15\text{cm}$ – $1,62\text{cm}$. στις οποίες προσκολλήθηκε το ελαστικό υπόστρωμα με τέτοιο τρόπο ώστε να «ακολουθεί» την κυρτότητα τους. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν αποκλειστικά με τους probers. Το υμένιο σταθεροποιούταν πρώτα στην επιφάνεια με κολλητική ταινία και στην συνέχεια μέσω μικρομετρικών κινήσεων κατευθύνονταν οι probers επάνω από τα pads όπου έρχονταν σε επαφή. Χαρακτηριστικές I-V λήφθηκαν για κάθε κυρτή επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε με τάση εισόδου από 2 έως 5v.

Τα πολυιμίδια είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα ομάδα πολυμερών. Είναι πάρα πολύ ανθεκτικά στην θερμοκρασία αλλά και στην έκθεση τους σε διάφορα ισχυρά χημικά. Πιο συγκεκριμένα χάνουν την στερεά μορφή τους στους 250°C . Χωρίζονται σε άκαμπτα και εύκαμπτα., τα εύκαμπτα έχουν μεγάλη ανοχή πριν περάσουν στην πλαστική παραμόρφωση ($75\text{--}90\text{MPa}$). Κάτι που τα κάνει κατάλληλα για αισθητήρες παραμόρφωσης. Γενικά ανάλογα με την μορφή του, το πολυιμίδιο έχει μεγάλη εφαρμογή στην βιομηχανία, επίσης είναι παρά πολύ ελαφρύ και έχει χαμηλό κόστος κατασκευής.

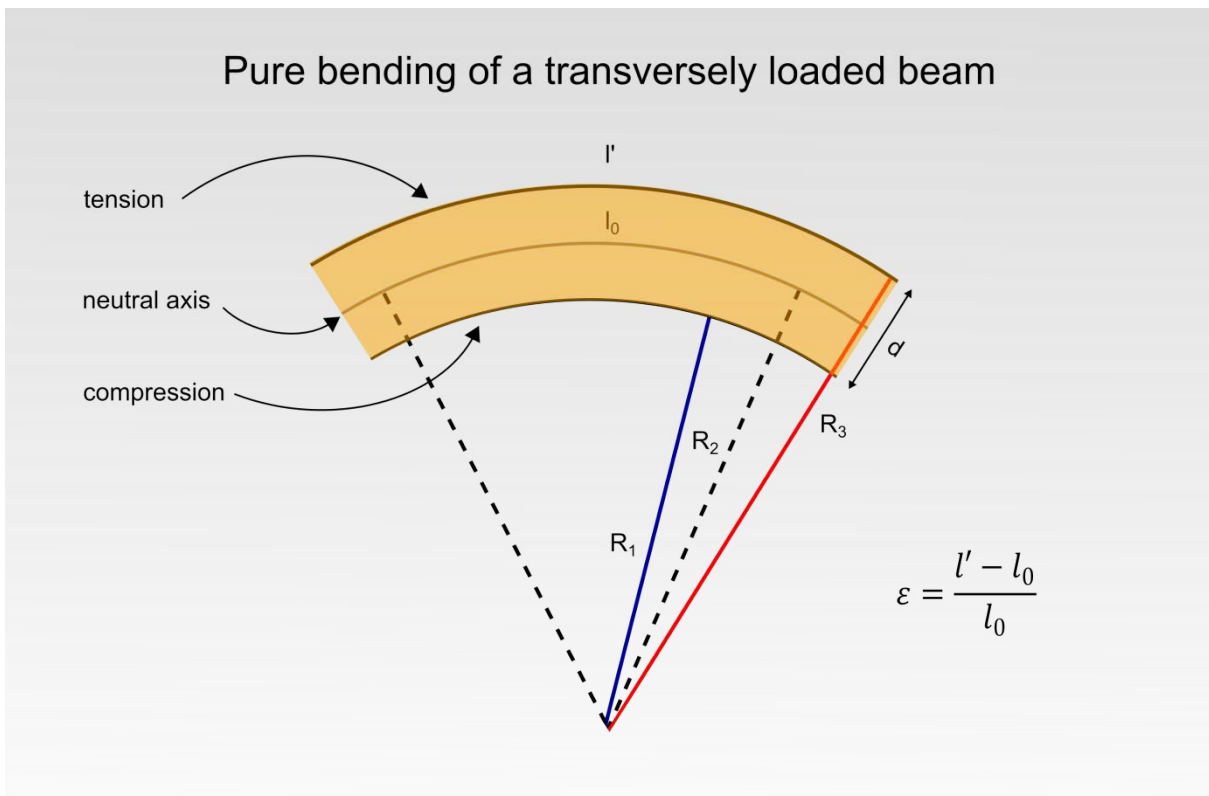
5.6 Υπολογισμός του ε

Έστω υμένιο πάχους $d=R_3-R_1$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.8). Αν το υμένιο υποστεί κάμψη ακτίνας καμπυλότητας R_2 τότε αναπτύσσεται μία εφελκυστική τάση στο επάνω μέρος της επιφάνειάς του και μια συμπιεστική στο κάτω. Θεωρώντας πως το μήκος l_0 στο μέσο του υμενίου παραμένει σταθερό[32] και ότι το πάχος του υμενίου παραμένει σταθερό, το επάνω μέρος επιμηκύνεται σε l' που ανήκει σε τομέα κύκλου ακτίνας R_3 ενώ το κάτω μέρος μικραίνει και αντιστοιχεί σε τομέα κύκλου ακτίνας $R_1 < R_2$. Αν θεωρήσουμε τμήμα από υμένιο πάχους d σε ομοιόμορφη κάμψη που αντιστοιχεί σε γωνία θ τότε το l' μπορεί να βρεθεί ως εξής:

$$l' = \left(R_2 + \frac{d}{2} \right) d\theta$$

Και το αρχικό μήκος μπορεί να υπολογιστεί στο μέσο του d με τον ίδιο τρόπο:

$$l_0 = R_2 d\theta$$



Εικόνα 4.8 Σχηματική αναπαράσταση υπολογισμού παραμόρφωσης[32]

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούμε εύκολα να βρούμε το ε :

$$\varepsilon = \frac{l' - l_0}{l_0} = \frac{\frac{d}{2} d\theta}{R_2 d\theta} = \frac{d}{2R_2}$$

Αν παρατηρήσουμε ότι R_1, R_2, R_3 είναι περίπου ίσες με $\langle R \rangle$ όταν αφού η μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας που μετρήσαμε ήταν 25 cm και το μέγιστο πάχος των υποστρωμάτων ήταν μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα, μπορούμε να γράψουμε στην παραπάνω σχέση: $R_2 = R_1 + \frac{d}{2} \cong \langle R \rangle$ οπότε:

$$\varepsilon = \frac{d}{2 \langle R \rangle}$$

Γνωρίζοντας το πάχος του υποστρώματος και την ακτίνα καμπυλότητας $\langle R \rangle$ μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε την ελαστική παραμόρφωση. Το πάχος για τα υμένα από πολυιμίδιο που μετρήθηκαν ήταν 75 μm και για τα υποστρώματα πυριτίου 530 μm . Μπορούμε ακόμα να υπολογίσουμε και αρνητικές τιμές του ε . Στα εύκαμπτα υμένα θα μελετηθούν και οι συμπιεστικές τάσεις. Με την παραπάνω μέθοδο μπορούμε να υπολογίσουμε το $\Delta l > 1\mu\text{m}$ δειγμάτων φυσικού μήκους 10mm με μεγάλη ακρίβεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

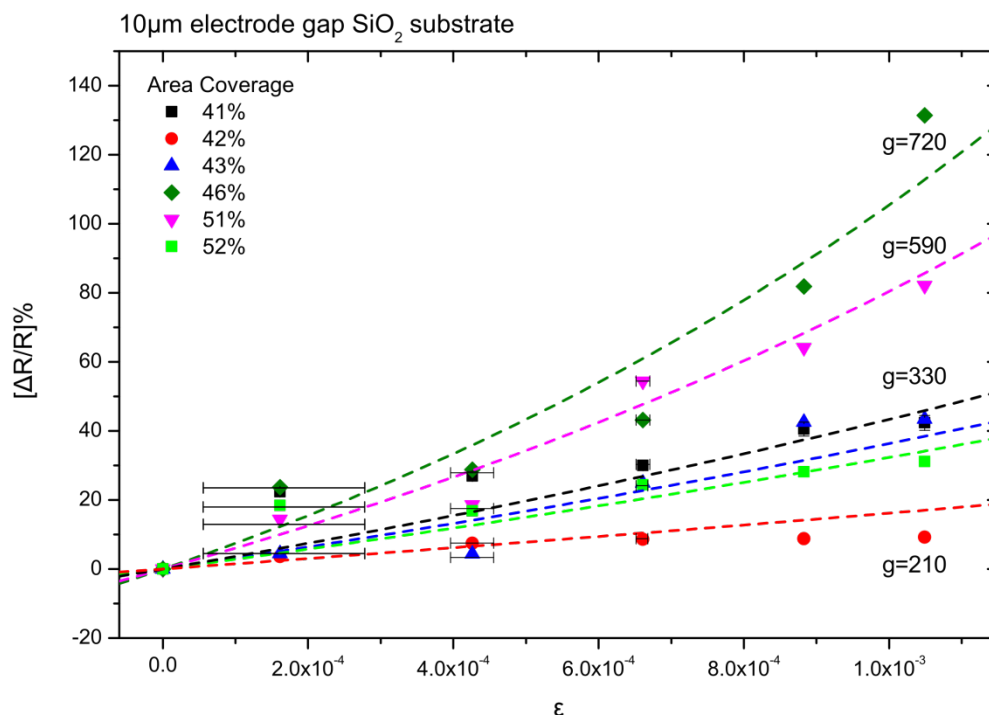
5.1 Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που ακολουθούσαν μια συγκεκριμένη λογική. Για παράδειγμα με την αύξηση της πυκνότητας περιμένουμε και την ελάττωση της αντίστασης, σε συνθήκες μηδενικής παραμόρφωσης, οπότε τα δείγματα που έγιναν αποδεκτά ήταν μόνο αυτά που ακολουθούσαν αυτήν την πορεία. Για τα υπόλοιπα θα γίνει μια απόπειρα στο να εξηγήσουμε τα πιθανά προβλήματα που προέκυψαν. Παρόλα αυτά, όλα τα δείγματα έδειξαν την ίδια συμπεριφορά και επαναληψιμότητα, δηλαδή όσο αυξανόταν η μεταβολή του μήκους, η αντίσταση αύξανε και αυτή. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτροδίων με απόσταση 10μm (και στα δύο υποστρώματα) όπου έδειξαν και την μεγαλύτερη ευαισθησία (highest g).

Sample Name	Dep. Time (min)	Av. Rate (Ang/s)	SiO ₂ Res. 10um (Ohm)	Polyimide Res. 10um (Ohm)	Area coverage (%)	Density Particles/cm ²
Pt6014	14	0.60	1.123*10 ⁶	1.41*10 ¹¹	41	1.993*10 ¹²
Pt4016	16	0.40	8.55*10 ⁸	1.02*10 ¹¹	42	2.031*10 ¹²
Pt4018	18	0.40	2.9*10 ⁶	5.44*10 ¹⁰	43	2.358*10 ¹²
Pt6016	16	0.60	3.968*10 ⁶	3.16*10 ⁹	46	2.552*10 ¹²
Pt2032	32	0.20	-	2.41*10 ¹⁰	47	2.575*10 ¹²
Pt4020	20	0.40	5.43*10 ⁸	3.65*10 ⁸	49	2.734*10 ¹²
Pt8014	14	0.80	-	4.39*10 ⁸	50	2.753*10 ¹²
Pt4022	22	0.40	916.73*10 ³	1.3*10 ⁶	51	3.094*10 ¹²
Pt4024	24	0.40	748.1*10 ³	8.7*10 ⁵	52	3.277*10 ¹²

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εναποθέσεων νανοσωματιδίων από πλατίνα σε ηλεκτρόδια αποστάσεως 10μm.

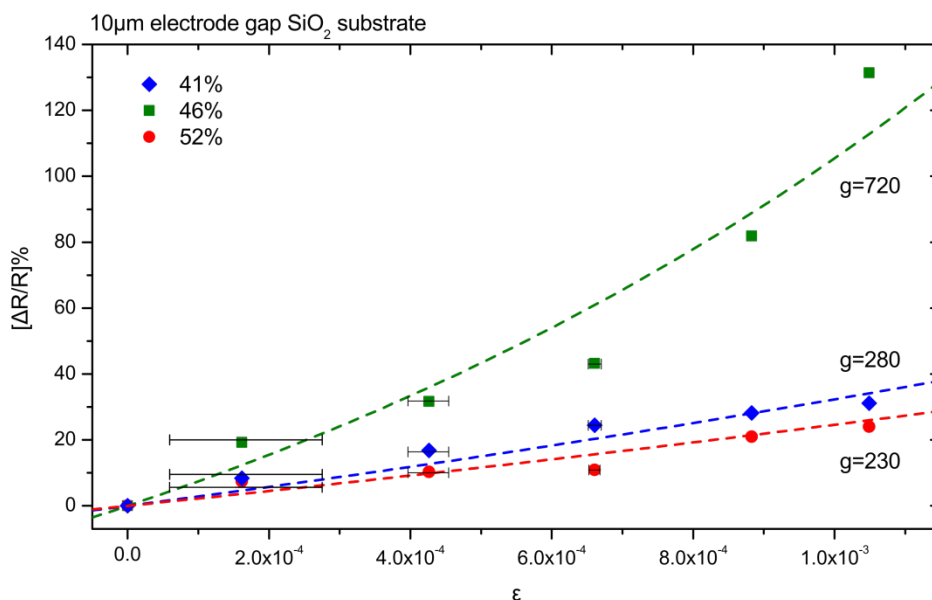
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η σχετική μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της παραμόρφωσης για δείγματα υποστρώματος πυριτίου που παρουσίασαν την υψηλότερη ευαισθησία.



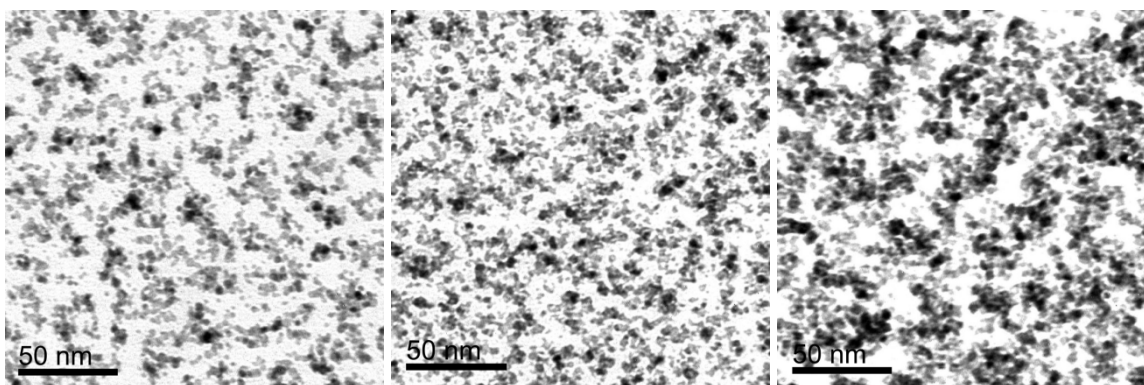
Διάγραμμα 5.1 : Σχετική μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της παραμόρφωσης δειγμάτων υποστρώματος πυριτίου

Έχει αναφερθεί σε αρκετές πρόσφατες εργασίες που έχουν γίνει επάνω σε δυσδιάστατο μοντέλο αγωγιμότητας πως η μεταβολή του $\Delta R/R$ γίνεται με εκθετικό ρυθμό.

Εδώ μπορούμε να παρατηρήσουμε πως τα περισσότερα δείγματα έδειξαν $g > 210$ και το μέγιστο επιτεύχθηκε σε $g=720$ το οποίο είναι επτά φορές μεγαλύτερο από αυτό που παρουσιάζουν οι ημιαγώγμοι αισθητήρες παραμόρφωσης.



Διάγραμμα 5.2 : Σχετική μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της παραμόρφωσης δειγμάτων υποστρώματος πυριτίου συσχετιζόμενων δειγμάτων

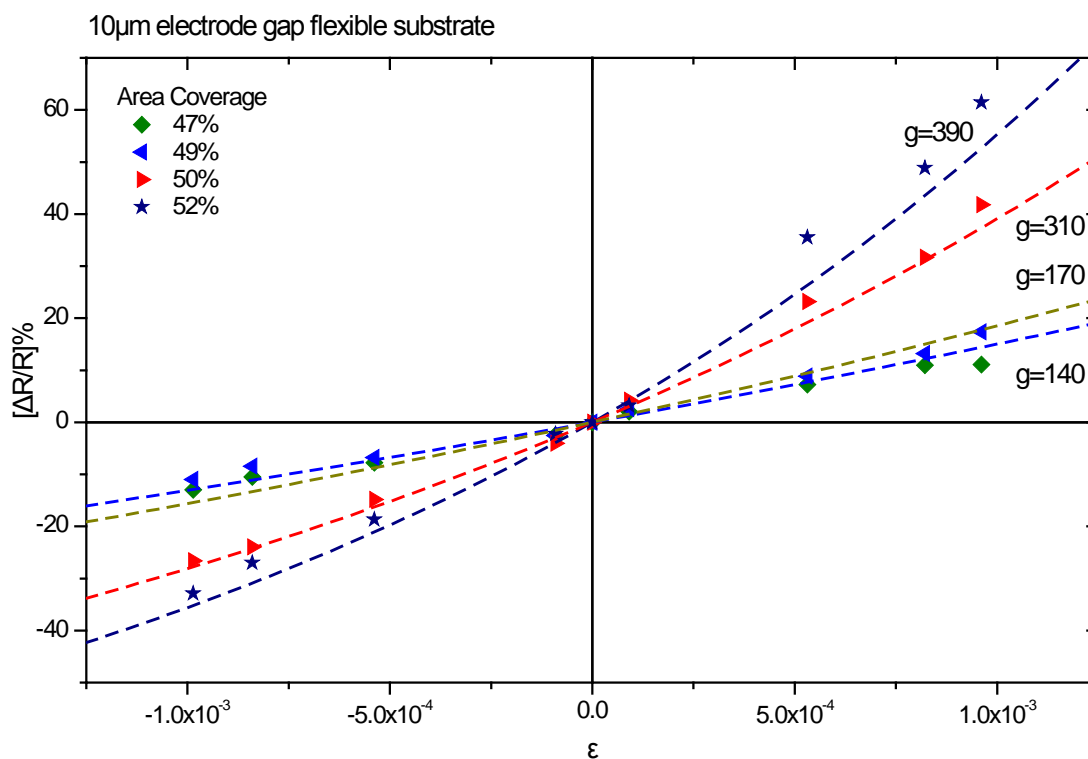


Εικόνα 5.3 : Εικόνες TEM από τρεις διαφορετικές εναποθέσεις, Από αριστερά προς τα δεξιά: 41%, 46% και 52%

Στα υποστρώματα πυριτίου παρατηρήθηκε πως με την αύξηση της πυκνότητας, έως κάποια συγκεκριμένη τιμή, υπήρχε και αύξηση της ευαισθησίας (κάλυψη επιφάνειας 46%). Από εκεί και έπειτα το g άρχισε να μειώνεται με εκθετικό ρυθμό. Όσο η πυκνότητα αυξανόταν τόσο το g μειωνόταν και σταθεροποιήθηκε γύρω από την τιμή 5 όπου είναι και η συμπεριφορά συνεχούς μεταλλικού φιλμ (κάλυψη επιφάνειας 64%). Στην εικόνα 5.3

μπορούμε να δούμε τον σχηματισμό όλο και περισσότερων συσσωματωμάτων με την αύξηση την επιφανειακής κάλυψης. Επίσης το g παρατηρείται υψηλότερο στα πρώτα στάδια παραμόρφωσης ενώ όσο αυξάνεται το τελικό μήκος σε σχέση με το αρχικό, η συσκευή γίνεται όλο και πιο «αναίσθητη» και σταθεροποιείται σε κάποια τιμή που και πάλι είναι πολύ υψηλή συγκριτικά με τους συμβατικούς αισθητήρες παραμόρφωσης (μεταλλικούς αλλά και ημιαγωγικούς).

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται η σχετική μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της παραμόρφωσης. Τα δείγματα αυτά είναι συσχετισμένα και παρουσίασαν την υψηλότερη ευαισθησία.



Διάγραμμα 5.4 : Σχετική μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της παραμόρφωσης δειγμάτων υποστρώματος πολυιμίδιου συσχετιζόμενων δειγμάτων

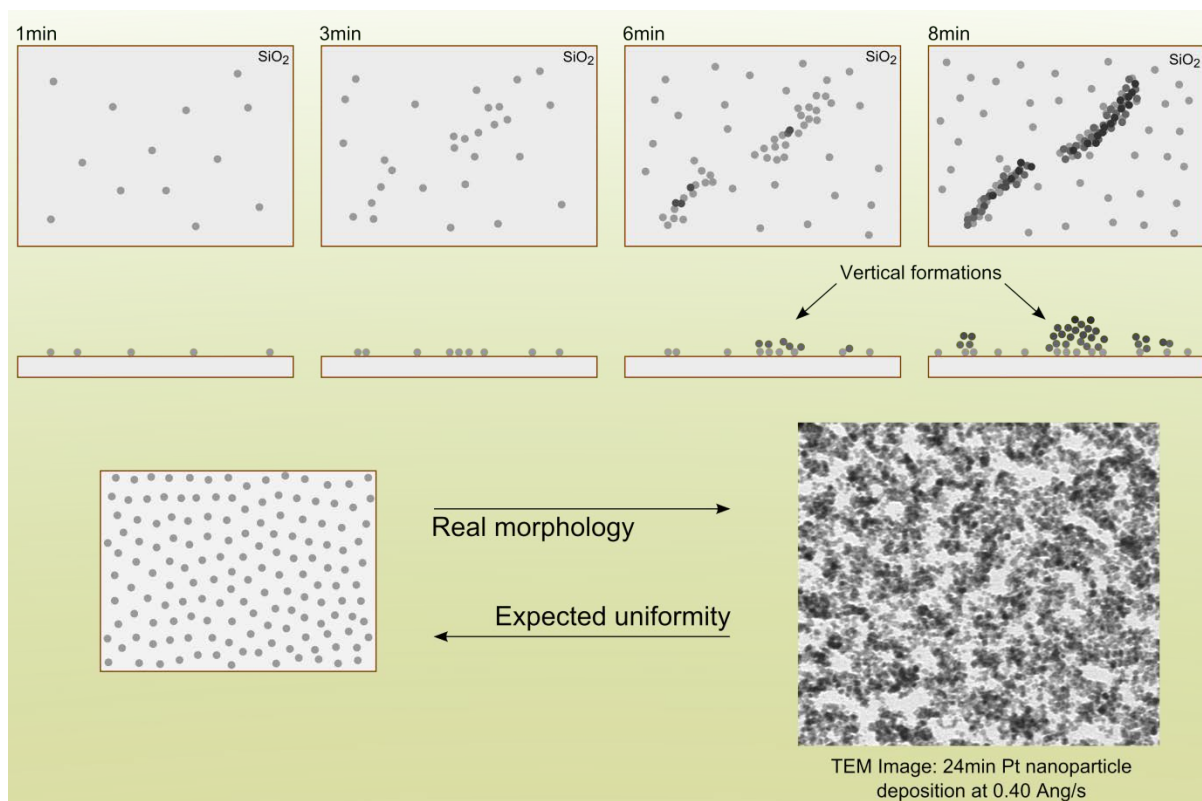
Για την ίδια εναπόθεση νανοσωματιδίων πλατίνης παρατηρούμε στον πίνακα 5.1 ότι τα δύο διαφορετικά υποστρώματα διαφέρουν στη αντίσταση κατά 3 έως 4 τάξεις μεγέθους. Τα υποστρώματα από πολυιμίδιο έχουν την μεγαλύτερη αντίσταση και αυτό λόγω της επιφανειακής τραχύτητας τους (το πυρίτιο είναι κρυσταλλογραφικά λείο). Τα νανοσωματίδια,

κατά την εναπόθεση, κάθονται σε κοιλάδες και υψώματα επάνω στο υλικό με αποτέλεσμα κατά την μετάβαση μιας διαφοράς ύψους από την μία περιοχή στην άλλη να αποκόπτονται ηλεκτρικά μονοπάτια και η διάταξη να παρουσιάζει συνολικά υψηλότερη αντίσταση συγκριτικά με την αντίστοιχη στο διοξείδιο του πυριτίου. Εδώ παρατηρούμε (διάγραμμα 5.4) πως τα δείγματα με επιφανειακή κάλυψη 50% και 52% παρουσίασαν την μεγαλύτερη ευαισθησία. Τα δείγματα αυτά εμφάνισαν ευαισθησία αντίστοιχη με αυτή που βρέθηκε για επιφανειακή κάλυψη 46% για το πυρίτιο όπως και παραπλήσια αντίσταση. Ακόμα για μικρές μεταβολές του $Δl$ γύρω από το αρχικό μήκος παρατηρούμε την μεγαλύτερη ευαισθησία και κατά την περεταίρω συμπίεση ή εφελκυσμό το g δείχνει να σταθεροποιείται σε κάποια τιμή. Αξίζει να σημειωθεί πως για τις αρχικές παραμορφώσεις σημειώθηκε g μεγαλύτερο του 700. Οι διατάξεις που είχαν μικρότερη επιφανειακή κάλυψη από 49% ή μεγαλύτερη από 52% έδειξαν αντίστοιχη συμπεριφορά και με μέγιστη ευαισθησία να μην ξεπερνά το $g=170$. Επίσης και εδώ παρατηρήθηκε μεταλλική συμπεριφορά για ποσοστό επιφανειακής κάλυψης μεγαλύτερο του 60% και αντίστασης μικρότερης του 0,5kΩ.

5.2 Συμπεράσματα - Συζήτηση

Αξιοποιώντας την τεχνική εναπόθεσης νανοσωματιδίων σε κενό μέσω της Magnetron Ιοντοβολής, δημιουργήθηκαν διατάξεις κατάλληλες για την ανίχνευση επιφανειακής παραμόρφωσης. Οι αισθητήρες αυτοί εμφάνισαν μεγάλη ευαισθησία για το εύρος παραμόρφωσης που μελετήθηκε ($\epsilon=2,2 \cdot 10^{-4}$ έως $1 \cdot 10^{-3}$). Κύριο χαρακτηριστικό όλων των εναποθέσεων ήταν η ανομοιόμορφη κατανομή των νανοσωματιδίων και στα δύο είδη των υποστρωμάτων. Τα νανοσωματίδια κατά την εναπόθεση φορτίζονται και ταξιδεύουν από τον στόχο του υλικού προς το δειγματοφορέα. Τα νανοσωματίδια επειδή φτάνουν σε μη αγώγιμη επιφάνεια (SiO_2 , Polyimide), θα πρέπει να διατηρούν το φορτίο τους. Κάθε ένα που κάθεται επάνω στην επιφάνεια, έχοντας ένα αρνητικό φορτίο, πρέπει να απωθεί το επόμενο που πλησιάζει και να το κατευθύνει σε τέτοια απόσταση μακριά του ώστε η δύναμη με την οποία θα προσδεθεί αυτό στην επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη ή ίση της απωστικής που αναπτύσσεται με το προϋπάρχων. Σε όλες τις εναποθέσεις που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή κατά την διάρκεια της εναπόθεσης φαίνεται τα νανοσωματίδια που πλησιάζουν στην επιφάνεια να προσελκύνονται (στατιστικά) από ήδη υπάρχοντα και να

προσκολλώνται δίπλα αλλά και επάνω τους, δημιουργώντας έτσι συσσωματώματα (Εικόνα 5.5). Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε γιατί τα νανοσωματίδια φτάνουν στην επιφάνεια χωρίς φορτίο είτε διότι όταν φτάνουν χάνουν το φορτίο τους για κάποιο λόγο και στη συνέχεια έλκουν τα επόμενα που πλησιάζουν (electric-focusing)[33-35].



Εικόνα 5.5 : Σχηματισμός συσσωματωμάτων κατά την εναπόθεση νανοσωματιδίων

Τα συσσωματώματα αυτά με την αύξηση του χρόνου εναπόθεσης διευρύνονται σε εμβαδόν αλλά αυξάνουν και σε ύψος. Το συγκεκριμένο φαινόμενο θα μπορούσε να διερευνηθεί εκτός των πλαισίων αυτής της διπλωματικής εργασίας μιας και θα μπορούσε, αν κατανοηθεί καλύτερα, να βαθμονομηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές. Η ανάπτυξη συσσωματωμάτων δεν αποτέλεσε πρόβλημα σε αυτή την μελέτη αλλά ένα καθοριστικό στοιχείο για την κατασκευή πολύ ευαίσθητων διατάξεων για την ανίχνευση μονοδιάστατης παραμόρφωσης.

Στα νανοσωματίδια λόγω των μικρών διαστάσεών μπορούν να φιλοξενήσουν μικρές χωρητικότητες φορτίου (από 1 έως μερικά ηλεκτρόνια). Έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενες μελέτες[36] μια δυσκολία μετάβασης των ηλεκτρονίων σε ήδη φορτισμένα νανοσωματίδια

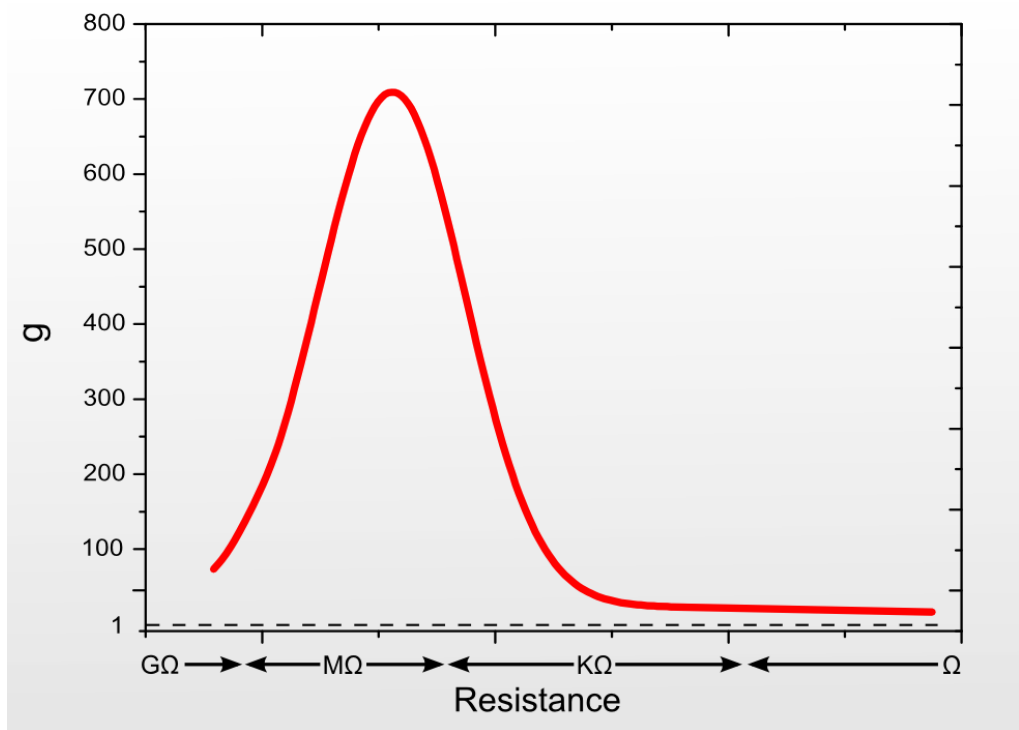
κάτω από κάποια τιμή της θερμοκρασίας, όπως και χαμηλότερα από την τιμή αυτή γίνεται η μετάβαση των ηλεκτρονίων στα νανοσωματίδια αδύνατη. Το φαινόμενο αυτό καλείται φράγμα Coulomb (Coulomb blockade) και οι βασικότερες παράμετροι που παίζουν ρόλο στη χωρητικότητα είναι $C=2\pi\epsilon\epsilon_0(2r)$, όπου r είναι η ακτίνα ενός σφαιρικού νανοσωματίδιου. Η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να μπει μέσα σε ένα ήδη φορτισμένο νανοσωματίδιο είναι:

$$E_{cb} = \frac{e^2}{2C}$$

Παρατηρούμε πως όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του νανοσωματιδίου τόσο μεγαλύτερη ενέργεια πρέπει να δώσουμε στο ηλεκτρόνιο για να καταφέρει να εισέλθει στο εσωτερικό του. Ο σχηματισμός συσσωματωμάτων (αν υποθέσουμε πως τα νανοσωματίδια που αποτελείται το καθένα βρίσκονται σε επαφή) μειώνουν το φαινόμενο του φραγμού Coulomb αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα διέλευσης των ηλεκτρονίων μέσω το φαινομένου της σήραγγας.

Βάση του μοντέλου του ενεργοποιούμενου φαινομένου σήραγγας βλέπουμε πως με την αύξηση του όγκου των συσσωματωμάτων η απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης μειώνεται οπότε η αγωγιμότητα μεταξύ των συσσωματωμάτων αυξάνεται. Όσο αυτά αυξάνουν μέγεθος τόσο μοιάζουν περισσότερο με νησίδες και επειδή όλες διευρύνονται ανάλογα, μικραίνει και η μεταξύ τους απόσταση δ οπότε η αγωγιμότητα αυξάνεται ακόμα περισσότερο (λόγω μείωσης της μεταξύ τους απόστασης η πιθανότητα μετάβασης μέσω του φαινομένου της σήραγγας γίνεται μεγαλύτερη). Στην μελέτη των Herrmann et al.[1] αναφέρεται πως επιτεύχθηκε $g_{max}=200$, αυτό όμως προέκυψε από ένα πολύστρωματικό υμένιο από νανοσωματίδια (18nm) που μεταξύ τους διαχωρίζονταν από ένα μονωτικό οργανικό υλικό. Επίσης αναφέρεται σαν μια εκτίμηση πως αν το υμένιο αποτελούταν από συσσωματώματα θα μπορούσαν να πετύχουν μεγαλύτερη ευαισθησία. Στις διατάξεις που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο παρατηρήθηκε πως μετά από σχηματισμό ορισμένου μεγέθους συσσωματωμάτων (περίπου 15-20nm) η ευαισθησία ξεπέρασε το $g=200$ και έγινε μέγιστη για $g_{max}=720$ (όπου η μέση διάμετρος των συσσωματωμάτων ήταν περίπου 30nm). Από εκεί και έπειτα με την περαιτέρω διεύρυνση τους σε σχηματισμό μεγαλύτερων νησίδων αγωγιμότητας η ευαισθησία αρχίζει και μειώνεται όπου σταθεροποιείται για $g=5$ όταν πια η

μορφή της επιφάνειας μοιάζει περισσότερο με συνεχές φιλμ (οι νησίδες έχουν ενωθεί σχεδόν με όλες τις γειτονικές τους).

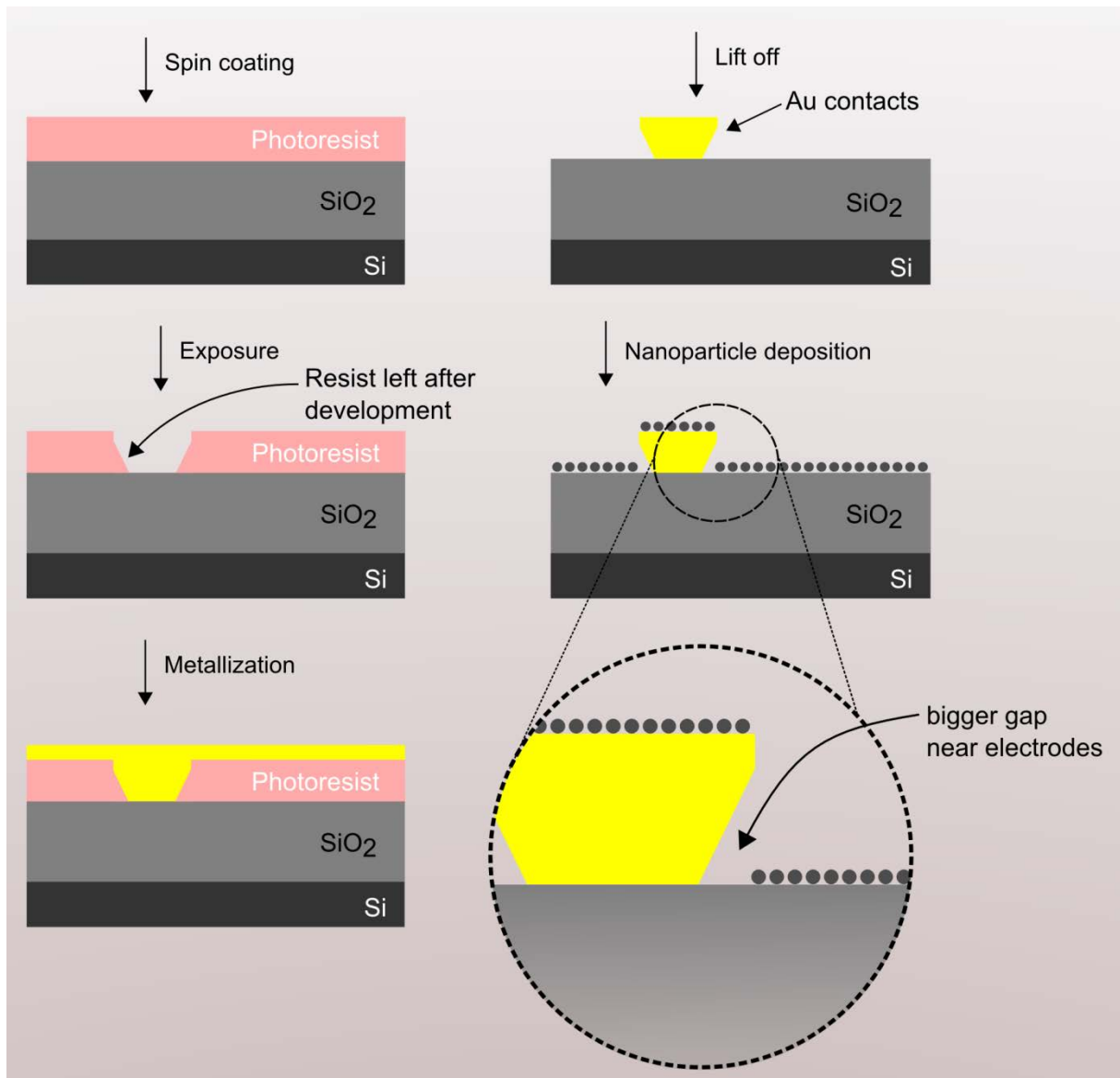


Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα εξέλιξης ευαισθησίας συναρτήσει της αντίστασης

Όταν αρχίζουν να εμφανίζονται τα συσσωματώματα το ενεργοποιημένο μοντέλο φαινομένου σήραγγας αρχίζει και γίνεται εντονότερο λόγω του ότι η ενέργεια ενεργοποίησης αρχίζει να μειώνεται, οι μεταξύ τους αποστάσεις όμως παραμένουν περίπου ίδιες οπότε η πιθανότητα διέλευσης παραμένει σχεδόν η ίδια (Εικόνα 5.6, περιοχή μερικών GΩ). Όσο τα συσσωματώματα αυξάνουν μέγεθος διευρύνονται και στην περιφέρεια τους οπότε οι αποστάσεις μεταξύ τους αρχίζουν και μειώνονται, εδώ η ενέργεια ενεργοποίησης γίνεται μικρότερη λόγω αύξησης του μεγέθους τους και επίσης αρχίζει να αυξάνεται η πιθανότητα διέλευσης λόγω της μείωσης της μεταξύ τους απόστασης. Η μεταβολή της απόστασης κατά την παραμόρφωση αλλάζει την πιθανότητα διέλευσης όπου είναι και ο κυρίαρχος μηχανισμός λειτουργίας της διάταξης. Εδώ ακόμα παρατηρείται πως για κάποιο συνδυασμό της μέσης απόστασης και του μέσου μεγέθους των συσσωματωμάτων προέκυψε η μέγιστη ευαισθησία $g \approx 720$ (περίπου από 0,5 έως 5 MΩ). Σε μεγαλύτερες επιφανειακές πυκνότητες παρουσιάζεται μικρότερη αντίσταση η οποία οφείλεται στην ύπαρξη μεγαλύτερων νησίδων αλλά και των πολύ μικρότερων μεταξύ αποστάσεων. Με την εφαρμογή της παραμόρφωσης οι

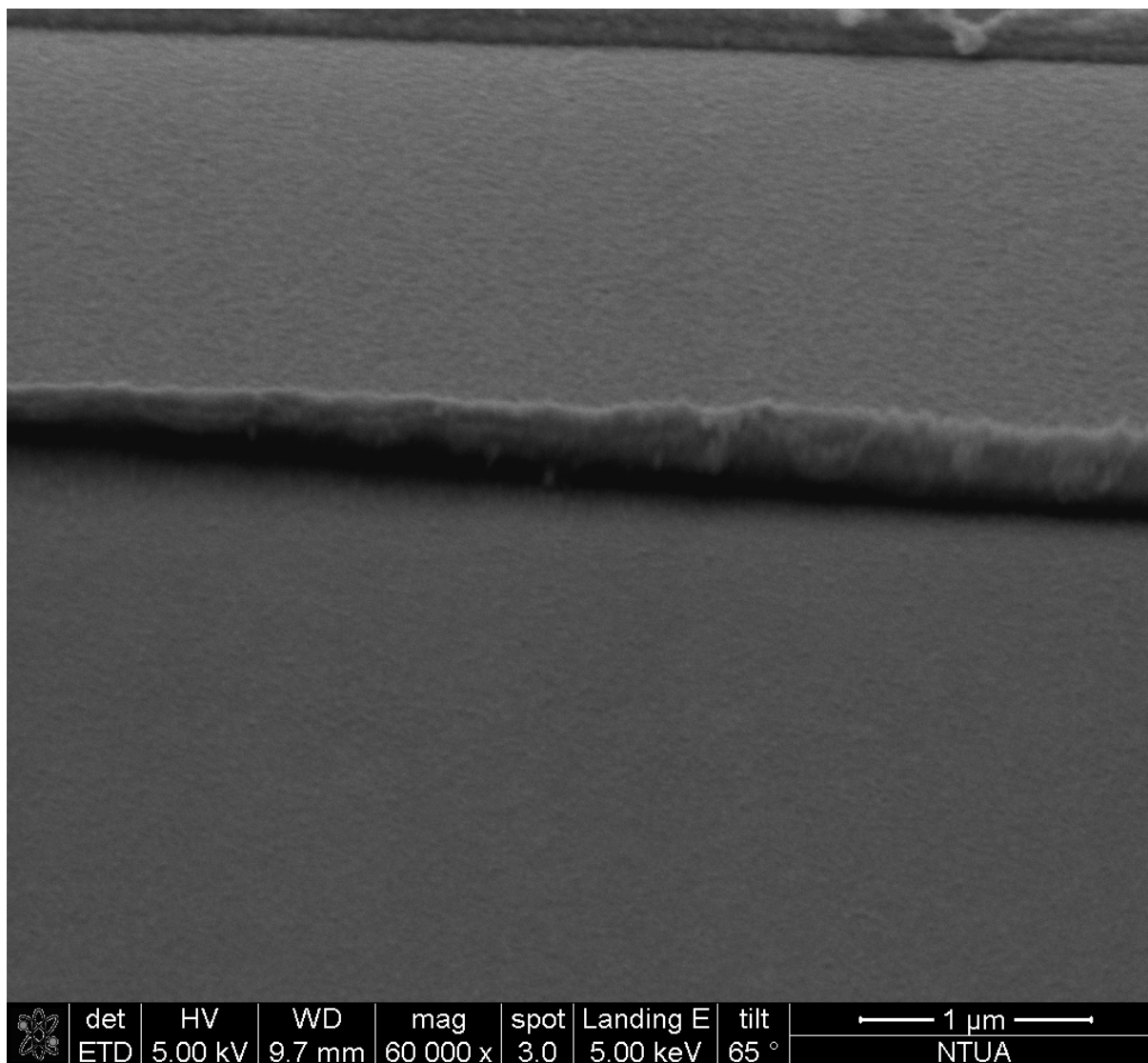
μεταξύ αποστάσεις μεταβάλλονται αλλά λόγω πολύ μικρότερης ενέργειας ενεργοποίησης που χρειάζεται και των περισσότερων ηλεκτρικών μονοπατιών που έχουν σχηματιστεί η μεταβολή της πιθανότητας διέλευσης δεν συμβάλει στατιστικά τόσο πολύ, γιατί τα ηλεκτρόνια βρίσκουν άλλα υπάρχοντα διαθέσιμα αγώγιμα μονοπάτια, επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη σε αυτήν την περίπτωση τα πλευρικά σημεία των ηλεκτροδίων τα οποία δεν μεταβάλλουν την αντίσταση τους κατά την παραμόρφωση. Οι παραπάνω λόγοι είναι οι κυριότεροι που κάνουν τις πιο αγώγιμες διατάξεις πιο «αναίσθητες» και με την περαιτέρω αύξηση της επιφανειακής πυκνότητας αποκτούν μεταλλικό χαρακτήρα. Μια σημαντική παρατήρηση από την εξέλιξη της ευαισθησίας με την παραμόρφωση είναι ότι για τα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης υπήρξε και μεγαλύτερη ευαισθησία, αυτό πιθανότατα συνέβη γιατί αρχικά συμβάλανε στατιστικά περισσότερες διελεύσεις λόγω φαινομένου σήραγγας και όσο αυξανόταν η παραμόρφωση όλο και περισσότερα μονοπάτια αδρανοποιούνταν γιατί το δ γίνονταν πάρα πολύ μεγάλο. Τέλος οι διατάξεις με επιφάνεια κάλυψης έως 54% από ηλεκτρικές μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες βρέθηκαν να έχουν ημιαγωγιμό χαρακτήρα ενώ πάνω από αυτό το ποσοστό μεταλλικό.

Κατά την δημιουργία των διατάξεων εντοπίστηκαν κάποια κατασκευαστικά λάθη τα οποία οδήγησαν στην μη ικανότητα συσχέτισης κάποιων δειγμάτων με τα υπόλοιπα. Κατά την διεργασία της λιθογραφίας πιθανότατα λόγω κάποιας μειωμένης σε χρόνο έκθεσης UV να μην κατάφεραν τα ηλεκτρόδια να αποκτήσουν σωστή γεωμετρική δομή και να δημιουργήσαν φαινόμενα «σκίασης» κατά την εναπόθεση των νανοσωματιδίων. Ένας ακόμα λόγος που μπορεί να δημιούργησε το ίδιο πρόβλημα είναι η δημιουργία ηλεκτροδίων μεγάλου ύψους. Στο παρακάτω σχήμα (5.7) παρουσιάζονται τα βήματα των διεργασιών που οδήγησαν σε κακό σχηματισμό μερικών ηλεκτροδίων. Παρατηρείται σχηματισμός κενού περίπου 50nm από την βάση των ηλεκτροδίων.



Εικόνα 5.7 : Φαινόμενο «σκίασης» κατά την εναπόθεση νανοσωματιδίων

Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε μια εικόνα SEM σε tilt mode 65° ενός ηλεκτροδίου που έχει προκαλέσει σκίαση στα άκρα του και έχει εμποδίσει την τοποθέτηση των νανοσωματιδίων στην βάση του ώστε δημιουργηθεί το επιθυμητό κανάλι αγωγιμότητας. Οι διατάξεις αυτές παρουσίασαν σαφώς μεγαλύτερη αντίσταση από την αναμενόμενη.



Εικόνα 5.8: Εικόνα SEM υπό γωνία 65°

5.3 Σκέψεις για το μέλλον

Οι αισθητήρες ανίχνευσης επιφανειακής παραμόρφωσης είναι πάρα πολύ χρήσιμοι και βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς. Αυτοί που κατασκευάζονται επάνω σε υπόστρωμα πυριτίου εκμεταλλεύονται τις υπάρχουσες διεργασίες πυριτίου και μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορα μικρομηχανικά συστήματα, δίνοντας έτσι την δυνατότητα ανίχνευσης περισσότερων παραμέτρων από μία μόνο διάταξη. Οι αισθητήρες σε υπόστρωμα

εύκαμπτου πολυμερούς όπως το πολυιμίδιο δίνουν νέες δυνατότητες ανάπτυξης αισθητήρων σε τομείς που δεν κατάφερε να εισχωρήσει η τεχνολογία πυριτίου. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ανιχνευτές καμπυλότητας σε μεγάλες υάλινες επιφάνειες (όπως πατώματα, γυάλινες πλευρικές επιφάνειες κτηρίων), ανιχνευτές κατανομής ροής. Σε ιατρικούς τομείς θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την παρακολούθηση φλεγμονών, οιδημάτων, ανίχνευση παλμών, ανίχνευση λειτουργίας μηχανημάτων όπως τεχνητής αναπνοής. Στον πολλά υποσχόμενο τομέα ανάπτυξης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επάνω σε ρούχα (wearable computing) όπως και διάφορων εύκαμπτων ηλεκτρονικών συσκευών, μπορούν να ενσωματωθούν σε μεμβράνες που περιέχουν διάφορα κυκλώματα και άλλους αισθητήρες και να πληροφορούν κάθε στιγμή για την κάμψη ώστε να αλλάζουν τα ρεύματα για να διατηρείται το σύστημα σε λειτουργία.

Μια περαιτέρω μελέτη θα ήταν πολύ χρήσιμη για την βελτιστοποίηση τέτοιων διατάξεων. Ξεκινώντας από την διεργασία της λιθογραφίας, μπορεί να βελτιστοποιηθεί η μέθοδος κατασκευής της δημιουργίας ηλεκτροδίων χαμηλού ύψους τα οποία να είναι πιο στενά στο τελείωμα τους και πιο πλατιά στη βάση, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα στην εναπόθεση των νανοσωματιδίων. Θα μπορούσε επίσης να γίνουν ομοιόμορφες εναποθέσεις (με κάποια χημική ή φυσική διεργασία) στα ίδια ποσοστά επιφανειακής κάλυψης, ώστε να μπορέσει να συγκριθεί ο μετρητικός παράγοντας ευαισθησίας με τα ήδη υπάρχοντα. Μια άλλη σκέψη είναι η εναπόθεση διαφορετικού υλικού όπως νικέλιο, χρυσός, παλλάδιο ή άργυρος για την μελέτη της συμπεριφοράς των διατάξεων. Τέλος πολύ χρήσιμο θα ήταν να γίνει με μια εναπόθεση νιτριδίου του πυριτίου για την προστασία των διατάξεων από το περιβάλλον όπως και για την διατήρηση των ιδιοτήτων τους στο χρόνο.

Βιβλιογραφία

1. Herrmann J, Muller KH, Reda T, Baxter GR, Raguse B, de Groot GJJ, et al. Nanoparticle films as sensitive strain gauges. *Applied Physics Letters* 2007,**91**:183103-183105.
2. Chang FY, Wang RH, Yang H, Lin YH, Chen TM, Huang SJ. Flexible strain sensors fabricated with carbon nano-tube and carbon nano-fiber composite thin films. *Thin Solid Films* 2010,**518**:7343-7347.
3. Maune H, Bockrath M. Elastomeric carbon nanotube circuits for local strain sensing. *Applied Physics Letters* 2006,**89**:173131-173133.
4. Skotadis E, Tang J, Tsouti V, Tsoukalas D. Chemiresistive sensor fabricated by the sequential ink-jet printing deposition of a gold nanoparticle and polymer layer. *Microelectronic Engineering* 2010,**87**:2258-2263.
5. Tang J, Verrelli E, Tsoukalas D. Assembly of charged nanoparticles by self - electrodynamic focusing. In: *Solid State Device Research Conference, 2009. ESSDERC '09. Proceedings of the European; 2009.* 456-459.
6. Goustouridis D, Tsoukalas D, Normand P, Kontos AG, Raptis Y, Anastassakis E. Parameters influencing the flatness and stability of capacitive pressure sensors fabricated with wafer bonding. *Sensors and Actuators, A: Physical* 1999,**76**:403-408
7. Fraden J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Third ed: Springer; 2003.
8. Elgar P. *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2000.
9. Καλαϊτζάκης Κ. *Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες*. Κλειδάριθμος Ε.Π.Ε, Αθήνα, 2010.
10. Plummer JD, Deal, M.D., Griffin, P.B. *Silicon VLSI Technology*, Prentice Hall Upper Saddle River NJ. 2000.
11. Campbell SA. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press. 2001.
12. Jie-Qiong Bao QW, Xin Liu, Liang Ding. Site-selective deposition of copper by controlling surface reactivity of SAMs with UV-irradiation. *Surface Science* 2008,**602** 2250–2255.

13. F. E. Kruis HF, A. Peled, J. Aerosol Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications. *Sci.* 1998,**29**:511-535
14. Eliezer Sea. Synthesis of nanoparticles with femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. B*, 2004,**69**:14411.
15. Swihart MT. Vapor-phase synthesis of nanoparticles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 2003,**8**:127-133.
16. Urban Iii FK, Hosseini-Tehrani A, Griffiths P, Khabari A, Kim YW, Petrov I. Nanophase films deposited from a high-rate, nanoparticle beam. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 2002,**20**:995-999.
17. Williams DB CC. *Transmission Electron Microscopy*. New York: Plenum Press, 1996.
18. Zhou GS, LM. Damage detection and assessment in fibereinforced composite structures with embedded fibre optic sensors. *Smart Mater Structures* 2002,**11**:925-939.
19. Sorensen LG, T. Botsis, J. . Residual strain development in laminated thermoplastic composites measured using fibre Bragg grating sensors. *Proceedings of CompTest conference, Bristol, UK, 21 – 23 September, 2004*:145-146.
20. Okabe Y YS, Kosaka T, Takeda N. Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors. *Smart Mater Structures* 2000,**9**:832-838.
21. Okabe Y MT, Yashiro S, Takeda N. . Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors. *Composites Science and Technology* 2002,**62**:951-958.
22. Y.J R. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering* 1999,**31**:297-324.
23. Rao C.N.R. GUK, P.J Thomas and P.P. Edwards. Metal nanoparticles and their assemblies. *Chemical Society* 2000,**29** 27-35.
24. Neugebauer CA, Webb MB. Electrical Conduction Mechanism in Ultrathin, Evaporated Metal Films. *Journal of Applied Physics* 1962,**33**:74-82.

25. Kretshmer R. aWF. Pearl Chain Formation of Nanoparticles in microelectrode gaps by DEP. *Langmuir* 2004,**20**:11797 - 11801.
26. Davies J.H. *The Physics of low dimensional semiconductors*: Cambridge University Press 1998
27. Hanson G.W. *Fundamentals of nanoelectronics*: Pearson Education International, 2008.
28. Abeles B, Sheng P, Coutts MD, Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films. *Advances in Physics* 1975,**24**:407-461.
29. Snow Arthur W. aHW. Size-Induced Metal to Semiconductor Transition in a Stabilized Gold Cluster Ensemble. *Chemistry of Materials* 1998,**10**:947-949.
30. Swanson JG, Campbell DS, Anderson JC. A study of electrical conduction in island structure nickel and 80:20 nickel-chromium films. *Thin Solid Films* 1968,**1**:325-342.
31. Torma V, Vidoni O, Simon U, Schmid G. Charge-Transfer Mechanisms between Gold Clusters. *European Journal of Inorganic Chemistry* 2003,**2003**:1121-1127.
32. Senturia SD. *Microsystem Design*: Kluwer Academic Publishers; 2001.
33. Tsai D-H , Kim SH, Corrigan TD, Phaneuf RJ, Zachariah MR, Electrostatic directed deposition of nanoparticles on a field generating substrate, *Nanotechnology*, 2005, **16**:1856-1862.
34. Tang J, Verrelli E, Tsoukalas D. Selective deposition of charged nanoparticles by self-electric focusing effect. *Microelectronic Engineering* 2009,**86**:898-901.
35. Kim H, Kim J, Yang H, Suh J, Kim T, Han B, et al. Parallel patterning of nanoparticles via electrodynamic focusing of charged aerosols. *Nature nanotechnology* 2006,**1**:117-121.
36. Lambe J, Jaklevic RC. Charge-Quantization Studies Using a Tunnel Capacitor. *Physical Review Letters* 1969,**22**:1371-1375.