



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια
σε εύκαμπτα υποστρώματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΑΚΩΒΟΥ Γ. ΣΑΝΤΟΡΙΝΑΙΟΥ

Επιβλέπων: Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Τομέας Φυσικής

Αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια σε εύκαμπτα υποστρώματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΑΚΩΒΟΥ Γ. ΣΑΝΤΟΡΙΝΑΙΟΥ

Επιβλέπων: Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Τσουκαλάς Δημήτριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κόντος Αθανάσιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κυρίτσης Απόστολος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024

(Υπογραφή)

.....

ΙΑΚΩΒΟΣ Γ. ΣΑΝΤΟΡΙΝΑΙΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανικός Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών,
Ε.Μ.Π.

© 2024 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Τομέας Φυσικής

Copyright ©–All rights reserved Ιάκωβος Γ. Σαντοριναίος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Τσουκαλά που με δέχθηκε στην ομάδα του και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστώ και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής εξέτασης της διπλωματικής μου εργασίας, τον κ. Αθανάσιο Κόντο και τον κ. Απόστολο Κυρίτση, για την πολύτιμη συμβολή τους στην εργασία.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Παναγιώτη Μπούσουλα και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεώργιο Κλειτσιώτη για την καθοδήγηση και τη βοήθεια στο εργαστηριακό τμήμα της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τα φιλικά μου πρόσωπα που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Ανέκαθεν ο άνθρωπος, από την παιδική του ακόμα ηλικία, ήταν περιέργος να γνωρίσει εκτενώς τον κόσμο γύρω του και προσπαθούσε να τον ανακαλύψει. Στην πορεία του αυτή χρησιμοποιούσε όλες εκείνες τις αισθήσεις που διαθέτει: όραση, αφή, γεύση, όσφρηση, ακοή. Με το πέρασμα των χρόνων, η επιστήμη και η τεχνολογία εξελίχθηκαν με αποτέλεσμα την εφεύρεση πιο πολύπλοκων δομών και, συνεπώς, την ύπαρξη πιο δυσδιάκριτων ερεθισμάτων προς τα αισθητήριά μας όργανα, όπως είναι διάφορες βιοχημικές ουσίες, των οποίων η ανίχνευση από εμάς μπορεί να μην καθίσταται εφικτή. Παράλληλα, όσο αναπτύσσονται οι διάφοροι επιστημονικοί κλάδοι, τείνει να απαιτείται επιπρόσθετη ακρίβεια ώστε να εμβαθύνει κανείς, ακρίβεια που οι ίδιοι είτε δεν μπορούμε καθόλου είτε είναι εξαιρετικά δύσκολο να την παρέχουμε. Για αυτό τον λόγο εισέρχονται όλο και περισσότερο σε ποικίλες πτυχές της ζωής μας να μας διευκολύνουν οι αισθητήρες, οι οποίοι χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες και έχουν διάφορα χαρακτηριστικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε αισθητήρες παραμόρφωσης, που ανήκουν στην κατηγορία των μηχανικών αισθητήρων, και έρχονται να δώσουν λύση στον ακριβή προσδιορισμό των καταπονήσεων που δέχονται πολλά αντικείμενα γύρω μας. Βεβαίως, δεν μπορεί να λείπει από την μελέτη και η νανοτεχνολογία που τις τελευταίες δεκαετίες διαδραματίζει καίριο ρόλο στην ανάπτυξη πολλών επιστημονικών τομέων, όπως είναι και οι τεχνικές εναπόθεσης στην τεχνολογία των μικροσυστημάτων, στην οποία υπάγεται και η τεχνολογία κατασκευής σύγχρονων αισθητήρων, και που έτσι συμβάλλει στην καλύτερη απόδοση αυτών. Για αυτό το λόγο μελετούμε συγκεκριμένα αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας σε εύκαμπτα υποστρώματα πολυιμιδίου (kapton). Αρχικά, παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές εναπόθεσης νανοσωματιδίων στους αισθητήρες και τα φυσικά φαινόμενα στα οποία βασίζεται η λειτουργία αυτών, που έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι μεταβάλλεται η αντίσταση των αισθητήρων λόγω των νανοσωματιδίων. Έπειτα, μελετώνται ένας προς έναν ως προς την λειτουργικότητα και την ευαισθησία τους και συγκρίνονται τέτοιοι αισθητήρες, μερίδα των οποίων περιέχουν επιπλέον στρώματα από κάποια οξειδία, τα οποία έχουν εναποτεθεί με διάφορες από τις περιγραφόμενες μεθόδους εναπόθεσης. Τέλος, παρουσιάζονται οι προοπτικές αυτών των αισθητήρων για μελλοντική αξιοποίησή τους.

Λέξεις Κλειδιά

Αισθητήρες, Παραμόρφωση, Νανοτεχνολογία, Νανοσωματίδια πλατίνας, Ιοντοβολή, Φυσική εξάχνωση ατμών, Εύκαμπτο υπόστρωμα, Υπόστρωμα πολυιμιδίου, Υπόστρωμα οξειδίου,

Αλουμίνα, Οξείδιο αργιλίου, Επίστρωση αλουμίνας, Πυριτία, Οξείδιο πυριτίου, Χαφνία, Οξείδιο χαφνίου, Τιτανία, Οξείδιο τιτανίου, Ανόπτηση οξειδίου, Άξονας πλοίου.

Abstract

Humans have always been curious to extensively understand the world around them since childhood, striving to discover it. In this process, they have used all their available senses: sight, touch, taste, smell, and hearing. Over the years, science and technology have evolved, resulting in the invention of more complex structures and the existence of more subtle stimuli to our sensory organs, such as various biochemical substances, the detection of which may not even be possible without technological means. At the same time, as the various scientific fields develop, additional precision tends to be required in order to go deeper, precision that we ourselves can hardly provide. For this reason, sensors are increasingly entering into various aspects of our lives to facilitate us, which are divided into many categories and have various characteristics. In this particular thesis we will study strain sensors, which belong to the category of mechanical sensors, and come to provide a solution to accurately determine the stresses that many objects around us are subjected to. Of course, nanotechnology cannot be ignored by this study, as in the last decades it has played a key role in the development of many scientific fields, such as deposition techniques in microsystems technology, which includes the technology for the fabrication of modern sensors, thus contributing to their better performance. For this reason, we study strain sensors with platinum nanoparticles on flexible polyimide (kapton) substrates. Firstly, we present various techniques for depositing nanoparticles on the sensors and the physical phenomena on which their operation is based, which mainly lies in the fact that the resistance of the sensors is changed due to the nanoparticles. Then, such sensors, some of which contain additional layers of some oxides deposited by various of the described deposition methods, are studied one by one for their functionality and sensitivity and compared with each other. Finally, the prospects of these sensors for their future utilization are presented.

Keywords

Sensors, Strain, Deformation, Nanotechnology, Platinum Nanoparticles, Sputtering, Electron gun, Physical vapor deposition, Flexible Substrate, Polyimide Substrate, Kapton, Oxide Substrate, Alumina, Aluminum Oxide, Alumina Coating, Silica, Silicon Oxide, Hafnia, Hafnium Oxide, Titania, Titanium Oxide, Oxide Annealing, Ship shaft.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Αισθητήρες	13
1.1 Συστήματα μετρήσεων και αισθητήρες	13
1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων	14
1.3 Κατηγορίες αισθητήρων	16
2 Νανοτεχνολογία	19
2.1 Τι είναι η Νανοτεχνολογία	19
2.2 Ο αντίκτυπος της μετάβασης στη νανοκλίμακα	19
2.3 Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας	21
2.4 Τεχνικές παρασκευής νανοϋλικών	22
2.4.1 Χημική Εναπόθεση Ατμών (Chemical Vapor Deposition, CVD)	22
2.4.2 Εναπόθεση ατομικού στρώματος (Atomic Layer Deposition, ALD)	24
2.4.3 Φυσική Εναπόθεση Ατμών (Physical Vapor Deposition, PVD)	26
2.4.3.1 Ιοντοβολή (sputtering)	26
2.4.3.2 RF sputtering	26
2.4.3.3 DC sputtering	27
2.4.3.4 Electron gun (e-gun) evaporation	30
3 Αισθητήρες παραμόρφωσης	33
3.1 Χρήσιμες έννοιες	33
3.2 Φυσική των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια	35

3.2.1	Μοντέλα αγωγιμότητας	35
3.2.2	Επίδραση φαινομένων φόρτισης	39
3.3	Γενικά περί αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια	42
3.4	Δομή των εύκαμπτων αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας	43
3.4.1	Υπόστρωμα Kapton	43
3.4.2	Εναπόθεση νανοσωματιδίων	44
3.4.3	Εναπόθεση ηλεκτροδίων	44
3.5	Επικάλυψη αλουμίνας	44
3.5.1	Προστασία κατά της υγρασίας	44
3.5.2	Ρωγμές (Cracks) αλουμίνας	45
4	Πειραματική μέτρηση Gauge Factor	49
4.1	Όργανα μέτρησης για την μέτρηση του Gauge Factor (GF)	49
4.2	Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα για μέτρηση GF	52
4.2.1	Μοντέλο παραμόρφωσης μονοστρωματικού αισθητήρα	52
4.2.2	Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα σε υπόστρωμα PCB	52
4.3	Τύπος για εξαγωγή GF	53
4.4	Εργαστηριακές μετρήσεις	56
4.4.1	Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας	57
4.4.2	Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση αλουμίνας (Al_2O_3) με την τεχνική της εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD)	62
4.4.3	Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση οξειδίων (HfO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3) με την τεχνική της ιοντοβολής	66
4.4.4	Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση οξειδίων με την τεχνική της ιοντοβολής και θερμική ανόπτηση (annealing)	67
5	Συμπεράσματα και Προοπτικές	73
5.1	Συμπεράσματα	73
5.2	Προοπτικές	74
	Βιβλιογραφία	76

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Βασικά συστήματα ενός συστήματος μέτρησης ή επεξεργασίας-πληροφορίας [1]	14
2.1	Χρώματα νανοσωματιδίων χρυσού (διάμετρος 20 nm αριστερά, > 100nm στη μέση) σε σύγκριση με τον μακροσκοπικό υλικό (δεξιά) (εικόνα της Stephanie Mitchell) [5]	20
2.2	Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Top-down (αριστερά) και Bottom-up (δεξιά) [13]	22
2.3	Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος CVD [14]	23
2.4	Διαδικασία ALD: σχηματική αναπαράσταση ενός κύκλου ALD ανάπτυξης Al_2O_3 [17]	24
2.5	Σχηματική αναπαράσταση συσκευής για sputtering [21]	27
2.6	Σχηματική αναπαράσταση της DC magnetron sputtering γεννήτριας νανοσωματιδίων [22]	29
2.7	Σχηματική αναπαράσταση ενός e-gun εξατμιστή [23]	30
3.1	Εύκαμπτοι αισθητήρες παραμόρφωσης [28]	35
3.2	Ενεργειακά διαγράμματα για μία ζεύξη σήραγγας αποτελούμενη από δύο ηλεκτρόδια για (a) $V_b=0$ και (b) $V_b>0$ [34]	37
3.3	Αγώγιμο νανοσωματίδιο ακτίνας R διαχωρισμένο από αγώγιμο περιβάλλον με διηλεκτρικό μέσο σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και με μία μέση απόσταση s . [41]	40
3.4	Πολυϊμίδιο Kapton [57]	43
4.1	Ηλεκτρόδια με ακίδες βολφραμίου	50
4.2	Μικρόμετρο (βερνιέρος) με προσαρτημένο χάλκινο μεταλλικό πρόβολο στερεωμένο σε ξύλινη βάση	51
4.3	Laser He-Ne (αριστερά) και ανακλαστήρας δέσμης laser (δεξιά)	51
4.4	Σχηματική αναπαράσταση της ακτίνας καμπυλότητας [79]	52
4.5	Γεωμετρία της παραμόρφωσης [80]	53
4.6	Σχηματική αναπαράσταση υποστρώματος πολυϊμιδίου (Kapton) σε υπόστρωμα PCB [2]	53
4.7	Γραφική αναπαράσταση των διακένων μεταξύ των νησίδων νανοσωματιδίων. Πριν (a) και μετά (b) την εφαρμογή της τάσης [63]	54

4.8	Ιδανικό γράφημα $R(\Omega)$ - t (s)	57
4.9	Ευανάγνωστα διαγράμματα $R(M\Omega)$ - t (s)	58
4.10	Δυσανάγνωστα διαγράμματα $R(\Omega)$ - t (s)	59
4.11	Διαγράμματα $R(\Omega)$ - t (s) για τους αισθητήρες με αδυναμία επεξεργασίας	59
4.12	Διαγράμματα $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$ για τους αισθητήρες με ευκρινή διαγράμματα $R - t$	60
4.13	Διαγράμματα $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$ για τους αισθητήρες με δυσδιάκριτα διαγράμματα $R - t$	61
4.14	Αισθητήρας B2, $GF1 = 43.49$	63
4.15	Αισθητήρας B3, $GF1=35.60$, $GF2=70.03$	63
4.16	Αισθητήρας B4, $GF1=36.22$, $GF2=52.00$	64
4.17	Αισθητήρας B5, $GF = 168.14$	64
4.18	Αισθητήρας B6, $GF = 253.45$	65
4.19	Εικόνες SEM από το εργαστήριο που υποδεικνύουν την ύπαρξη ρωγμών στο στρώμα Al_2O_3 μετά τη διαδικασία εκπαίδευσης	65
4.20	Αισθητήρας $\Gamma 1$ με υπόστρωμα TiO_2 , $GF1=7.87$, $GF2=9.02$	67
4.21	Αισθητήρας $\Delta 1$ με υπόστρωμα HfO_2 , $GF1=8.71$, $GF2=14.39$	68
4.22	Αισθητήρας $\Delta 2$ με υπόστρωμα HfO_2 , $GF1=9.36$, $GF2=19.48$	68
4.23	Αισθητήρας $\Delta 3$ με υπόστρωμα HfO_2 , $GF1=6.78$, $GF2=14.16$	69
4.24	Διάφοροι αισθητήρες με στρώμα αλουμίνας στους οποίους έγινε ανόπτηση σε θερμοκρασίες $150^\circ C$, $200^\circ C$ και $250^\circ C$	71
5.1	Αναπαράσταση άξονα πλοίου με προσκολλημένους αισθητήρες παραμόρφωσης για τη μέτρηση ροπών [116]	75

Κατάλογος Πινάκων

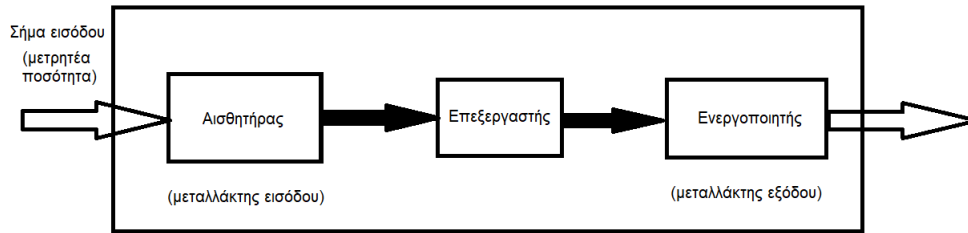
4.1	Καλύτερες ως τώρα μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας	62
4.2	Καλύτερες ως τώρα μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 3nm και στρώμα Al_2O_3 από ALD στους $150^\circ C$	66
4.3	Μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 3nm και επιφανειακής πυκνότητας νανοσωματιδίων ίση με $2 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ και στρώμα οξειδίου TiO_2 , HfO_2 από sputtering ύστερα από ανόπτηση στους $250^\circ C$	69
4.4	Βέλτιστοι αισθητήρες από κάθε κατηγορία	71

Κεφάλαιο 1

Αισθητήρες

1.1 Συστήματα μετρήσεων και αισθητήρες

Ανέκαθεν ο άνθρωπος προσπαθούσε να συλλέγει πληροφορίες από το περιβάλλον γύρω του μέσω των ιδίων μετρητικών συστημάτων, δηλαδή μέσω των «αισθήσεών» του. Αυτές οι αισθήσεις είναι η όραση, η ακοή, η αφή, η όσφρηση και η γεύση και μετρούν φυσικές και χημικές ιδιότητες τού περιβάλλοντος. Πέραν όμως από την απλή συλλογή πληροφοριών για το περιβάλλον του, ο άνθρωπος καλείται να επεξεργαστεί αποδοτικά αυτές τις πληροφορίες. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με την χρήση του εγκεφάλου και των αντίστοιχων νεύρων για την λήψη αποφάσεων, όπως είναι η επιλογή τροφής. Το βιολογικό σύστημα μέτρησης τού ανθρώπου επιτρέπει την ολοκλήρωση πολυάριθμων απλών και πολύπλοκων εργασιών της καθημερινής ζωής, καθώς διαθέτει αξιοσημείωτες ικανότητες, όπως είναι η γρήγορη επεξεργασία τεράστιου όγκου δεδομένων με τρόπο προσαρμοσμένο στην ανοχή λαθών. Από τα παλαιότερα χρόνια ο άνθρωπος σχεδίασε και χρησιμοποίησε όργανα και εργαλεία για τον ποσοτικό έλεγχο μέτρησης σχεδιάζοντας μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούν φυσικές και χημικές ιδιότητες για τη λήψη ποσοτικών δεδομένων και την επεξεργασία τους. Σε ένα σύστημα μέτρησης το σήμα εισόδου συχνά ονομάζεται *μετρήσιμη ποσότητα* (measurand) [1], η οποία είναι η προς μέτρηση φυσική ή χημική ποσότητα, όπως μετατόπιση, πίεση, συγκέντρωση αερίου. Η μετρήσιμη ποσότητα ανιχνεύεται ή γίνεται αντιληπτή από αυτό που συνήθως ονομάζεται *αισθητήρας* (sensor) ή *μεταλλάκτης* (transducer). Ως αισθητήρας μπορεί να οριστεί η διάταξη που μετατρέπει μια μη ηλεκτρική φυσική ή χημική ποσότητα σε μετρούμενη ποσότητα-ηλεκτρικό σήμα. Συχνά απαιτείται επεξεργασία αυτού του ηλεκτρικού σήματος ώστε να επιτευχθεί η αξιοποίησή του. Ως *επεξεργαστής* μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διάταξη που τροποποιεί το ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από έναν αισθητήρα, χωρίς όμως να αλλάξει τη μορφή της ενέργειας τού σήματος. Πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ της κύριας μονάδας επεξεργασίας και της *μονάδας προετοιμασίας σήματος*. Η τελευταία αναφέρεται ως *προεπεξεργαστής* ή *μετατροπέας* (converter). Τελικά, το σήμα από τον επεξεργαστή χρησιμοποιείται για να απεικονίσει πληροφορίες στον χειριστή, για παράδειγμα μέσω μιας οθόνης ή μέσω της καταγραφής σε χαρτί, μαγνητικό δίσκο, ολοκληρωμένο κύκλωμα. Κάθε τέτοια συσκευή που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μια φυσική ή χημική ποσότητα αναφέρεται ως *ενεργοποιητής* ή *με-*



Σχήμα 1.1: Βασικά συστήματα ενός συστήματος μέτρησης ή επεξεργασίας-πληροφορίας [1]

ταλλάκτης (μετατροπέας) εξόδου. Για παράδειγμα, η απεικόνιση πληροφορίας σε μια οθόνη απαιτεί τη μετατροπή ενός ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί, να τροποποιηθεί και να δεχτεί την παρέμβαση από έναν χειριστή. Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι μπορούν να υπάρξουν πολλές βαθμίδες σε ένα σύστημα επεξεργασίας πληροφορίας με τα βασικότερα στοιχεία να είναι ένας αισθητήρας, ένας επεξεργαστής σήματος (που περιλαμβάνει και τον προεπεξεργαστή) και ένας ενεργοποιητής.

1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η επιλογή ενός αισθητήρα εξαρτάται από τη φύση των παραμέτρων που πρέπει να μετρηθούν, καθώς και από άλλους παράγοντες, όπως: κόστος, αξιοπιστία, ποιότητα, χρόνος και χώρος αξιοποίησης της απαιτούμενης πληροφορίας, περιβάλλον χρήσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθορίζονται από το μέγεθος που μετράται και το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών. Κάθε εφαρμογή απαιτεί την επιλογή του αισθητήρα με την καλύτερη απόκριση στα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ισχύουν όταν το σύστημα του μεγέθους που μετράται και ο αισθητήρας βρίσκονται σε ισορροπία, δηλαδή ο αισθητήρας δεν ανιχνεύει καμία μετρήσιμη αλλαγή. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι [2]:

- **Ακρίβεια:** η απόκλιση της πραγματικής τιμής της μετρούμενης ποσότητας από την τιμή που δίνει ο αισθητήρας. Η ακρίβεια μπορεί να εκφραστεί ως απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης είτε ως ποσοστό της κλίμακας εισόδου είτε ως ποσοστό της κλίμακας εξόδου. Ουσιαστικά, η ακρίβεια του αισθητήρα σχετίζεται με το στατικό σφάλμα του που οφείλεται σε διάφορα αίτια και είναι διαφορετικό για κάθε μετρούμενη τιμή.
- **Ευαισθησία:** υποδεικνύει την απόκριση του αισθητήρα σε μια δεδομένη αλλαγή μεγέθους. Είναι ίση με την αναλογία της απόκρισης του αισθητήρα προς την ποσότητα της ουσίας που μετράται. Ομοίως, η διασταυρούμενη ευαισθησία αναφέρεται στη συμβολή άλλων, ανεπιθύμητων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόκριση του αισθητήρα.
- **Αξιοπιστία:** η ικανότητα του αισθητήρα να πληροί τις τεχνικές προδιαγραφές όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υπό καθορισμένες συνθήκες. Εκφράζει τη σταθερότητα και την εγκυρότητα των σημάτων εξόδου του αισθητήρα. Επιπλέον, αναφέρεται στον χρόνο λειτουργίας της συσκευής.

- **Επαναληψιμότητα:** Η επαναληψιμότητα ενός αισθητήρα καθορίζει την ικανότητα του αισθητήρα να δίνει την ίδια τιμή για κάθε μέτρηση όταν η ποσότητα που μετράται δεν αλλάζει.
- **Εύρος τιμών:** μας δείχνει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας.
- **Σφάλμα υστέρησης:** Ένας αισθητήρας ενδέχεται να δώσει διαφορετική μέτρηση για την ίδια τιμή μιας μετρούμενης ποσότητας, ανάλογα με τη μορφή της μεταβολής της εισόδου του αισθητήρα, όπως είναι η περίπτωση μεταβολής διαρκούς αύξησης ή διαρκούς μείωσης. Η απόκλιση αυτή μεταξύ των διαφορετικών μετρήσεων ονομάζεται σφάλμα υστέρησης.
- **Νεκρή ζώνη (dead zone):** το μέγιστο εύρος τιμών εισόδου για το οποίο η τιμή εξόδου δεν αλλάζει.
- **Κατώφλι (threshold):** η ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου για το οποίο το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι μη μηδενικό.
- **Ολίσθηση (drift):** η φυσική τάση αισθητήρα ή συστήματος να μεταφέρει τα χαρακτηριστικά του με το χρόνο λόγω γήρανσης υλικών και λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών (π.χ. μεταβολή θερμοκρασίας), που συχνά οδηγεί σε εμφάνιση μεταβολής στην έξοδο του αισθητήρα, ενώ η είσοδός του παραμένει αμετάβλητη.
- **Διακριτική ικανότητα (resolution):** η απαιτούμενη ελάχιστη αλλαγή του σήματος εισόδου προκειμένου να αλλάξει το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα.
- **Αναστρεψιμότητα:** Αναστρεψιμότητα στην εξάρτηση της απόκρισης του αισθητήρα από την προηγούμενη έκθεσή του σε αναλυτές.
- **Επιλεκτικότητα:** η ικανότητα ενός αισθητήρα να ανταποκρίνεται κυρίως σε ένα μόνο ερέθισμα παρουσία διαφορετικών ερεθισμάτων.
- **Όριο ανίχνευσης (Limit of Detection):** η χαμηλότερη συγκέντρωση ενός αναλυτή που μπορεί να ανιχνευθεί.
- **Απόκριση:** Ο χρόνος απόκρισης αναφέρεται συνήθως στο χρόνο που χρειάζεται ένας αισθητήρας για να φτάσει το 70% της σταθερής του τιμής.
- **Μη γραμμικότητα (Non linearity):** Στους περισσότερους αισθητήρες η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αισθητήρα είναι μη γραμμική. Όμως συχνά στην πράξη ο προσδιορισμός της μέτρησης από την ένδειξη του αισθητήρα γίνεται θεωρώντας πως η σχέση αυτή είναι γραμμική.

Εκτός από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα που έχουν νόημα μόνο όταν ο αισθητήρας δεν ανιχνεύει καμία αλλαγή, δηλαδή όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, υπάρχουν επίσης δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως ήδη αναφέρθηκε, που παίζουν σημαντικό ρόλο όταν το σήμα εισόδου μεταβάλλεται. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- **Ταχύτητα απόκρισης (Speed of Response):** η ταχύτητα με την οποία ο αισθητήρας ανταποκρίνεται στις μεταβολές του μετρούμενου μεγέθους και μπορεί να εκτιμηθεί μετρώντας το χρόνο απόκρισης, δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται η έξοδος του αισθητήρα για να φθάσει στο 90% της τελικής τιμής της, όταν στην είσοδο του αισθητήρα εφαρμόζεται βηματικό σήμα.
- **Καθυστερήση (Lag):** η διαφορά μεταξύ της χρονικής τιμής στην οποία συμβαίνει μια μεταβολή της εισόδου του αισθητήρα και της χρονικής στιγμής στην οποία η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή στην έξοδο του αισθητήρα.
- **Δυναμικό σφάλμα (Dynamic Error):** η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους που μεταβάλλεται με το χρόνο και της αντίστοιχης μέτρησης του αισθητήρα, όταν θεωρείται ότι δεν υπάρχει καθόλου στατικό σφάλμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η βέλτιστη λειτουργία ενός αισθητήρα επιτυγχάνεται όταν τα χαρακτηριστικά του λαμβάνουν ιδανικές τιμές, όπως στιγμιαία απόκριση, άπειρο εύρος κ.λπ. Στην πράξη, όμως, δεν μπορεί να κατασκευαστεί ιδανικός αισθητήρας αφού υπάρχουν παράμετροι -όπως κατασκευαστικά ελαττώματα, το περιβάλλον λειτουργίας, διάφορα μέρη του κυκλώματος κ.λπ. - που το καθιστούν αδύνατο. Ως εκ τούτου, αυτό που επιδιώκεται είναι η καλύτερη δυνατή προσέγγιση των ιδανικών τιμών με τη βελτίωση κάποιων χαρακτηριστικών που προκαλούν την αλλοίωση του σήματος εξόδου. Μερικά από αυτά είναι η έλλειψη γραμμικότητας, το μικρό εύρος λειτουργίας, άρα περιορισμένο εύρος μέτρησης και χαμηλή ευαισθησία, ο θόρυβος που μεταφέρει λανθασμένες πληροφορίες και περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου και πολλά άλλα.

1.3 Κατηγορίες αισθητήρων

Όλοι οι αισθητήρες μπορούν να εμπίπτουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: παθητικούς και ενεργητικούς. *Παθητικοί* είναι οι αισθητήρες που δεν χρειάζονται πρόσθετη πηγή ενέργειας για να λειτουργήσουν, καθώς έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν την ενέργεια εισόδου που προκαλείται από εξωτερικό ερέθισμα σε σήμα εξόδου. Τυπικά παραδείγματα παθητικών αισθητήρων είναι τα θερμοζεύγη, οι φωτοδιόδοι και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες. Σε αντίθεση με τους παθητικούς αισθητήρες, οι *ενεργοί* αισθητήρες απαιτούν τροφοδοσία για τη λειτουργία τους, το οποίο ονομάζεται σήμα διέγερσης. Αυτό το σήμα μετατρέπεται από τον αισθητήρα σε σήμα εξόδου. Για παράδειγμα, ένα θερμίστορ είναι μια θερμοευαίσθητη αντίσταση, η οποία από μόνη της δεν παράγει σήμα εξόδου, αλλά, εάν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, μπορούμε να μετρήσουμε την τιμή της αντίστασης υπολογίζοντας τη μεταβολή του ρεύματος και της τάσης. Η πιο κοινή ταξινόμηση των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται βασίζεται στη μορφή της ενέργειας που μεταδίδεται από το σήμα και παρατίθεται παρακάτω.

- **Μηχανικοί αισθητήρες:** αποτελούνται από μια μηχανική δομή, η οποία παραμορφώνεται και μας επιτρέπει να μετρήσουμε ένα φυσικό μέγεθος. Τα κύρια μεγέθη που μπορούμε να μετρήσουμε είναι η καταπόνηση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η ελαστικότητα,

η παραμόρφωση, η ροπή κ.λπ., ενώ οι πιο συνηθισμένες κατασκευές που χρησιμοποιούνται είναι τα διαφράγματα, οι μεμβράνες και οι πλωτοί δίσκοι. Η παραμόρφωση της κατασκευής προκαλείται συνήθως από μηχανική τάση, στατικό ηλεκτρισμό, θερμοκρασία, πίεση κ.λπ.

- **Θερμικοί αισθητήρες:** μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια σε αντίστοιχη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να επεξεργαστεί και να μετρηθεί. Ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το σήμα εξόδου τους: ηλεκτρικοί και μη ηλεκτρικοί. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει θερμοστοιχεία, θερμίστορ, διακόπτες κυκλώματος κ.λπ. ενώ η δεύτερη κατηγορία θερμομέτρα, θερμικούς αισθητήρες οπτικών ινών, αισθητήρες επιφανειακών ακουστικών κυμάτων κ.λπ.
- **Μαγνητικοί αισθητήρες:** μετατρέπουν την αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο σε ένα ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα. Ταξινομούνται σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους σε χβαντικά κύτταρα ικανά να ανιχνεύουν εξαιρετικά ασθενή πεδία (της τάξης του pico-tesla), ακουστικά που βασίζονται στην τροποποίηση των ακουστικών χαρακτηριστικών ενός μαγνητοελαστικού υλικού παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, εκμεταλλευόμενου του φαινομένου Hall.
- **Αισθητήρες ακτινοβολίας:** ανιχνεύουν ακτινοβολία που δεν γίνεται αντιληπτή με γυμνό μάτι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετατροπή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: αισθητήρες πυρηνικής ενέργειας και αισθητήρες πυρηνικών σωματιδίων. Οι πρώτες ανιχνεύουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όπως οι ακτίνες X και γ και οι δεύτερες έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν σωματίδια που εκπέμπονται από ένα ραδιενεργό υλικό όπως τα σωματίδια α και β, τα νετρόνια και τα πρωτόνια.
- **Οπτικοί αισθητήρες:** χρησιμοποιούν οπτικές ίνες ή ενσωματωμένα οπτικά συστήματα και προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και σύντομους χρόνους απόκρισης. Το επίπεδο βιο/χημικής-οπτικής μετατροπής (μετατροπέας) παρέχει επιλεκτικότητα αφού η μετρήσιμη ποσότητα είναι χημικά επιλεκτική. Οι επιθυμητές φυσικές ιδιότητες του μετατροπέα είναι η ταχύτητα, το μικρό μέγεθος και το κόστος, η ασφάλεια, η φορητότητα ή ο τηλεχειρισμός (ανάλογα με την εφαρμογή).
- **Χημικοί αισθητήρες:** είναι συσκευές που έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν μια χημική αλλαγή σε ένα ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα. Η δομή ενός τυπικού χημικού αισθητήρα αποτελείται από ένα μέσο επιλεκτικής ανίχνευσης, το οποίο έχει την ικανότητα να ανιχνεύει την υπό ανίχνευση ουσία, έναν μετατροπέα που θα ανιχνεύει την αλλαγή που προκαλείται από τον αναλυτή και θα τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Ο αναλυτής είναι συνήθως σε υγρή ή αέρια φάση και συνήθως περιβάλλεται από άλλες ουσίες. Οι πιθανές εφαρμογές των χημικών αισθητήρων καλύπτουν ένα τεράστιο εύρος.
- **Βιολογικοί αισθητήρες** ή βιοαισθητήρες: είναι χημικοί ανιχνευτές που εκμεταλλεύονται την υψηλή εκλεκτικότητα και ευαισθησία των βιολογικά ενεργών υλικών. Ένας

βιοαισθητήρας είναι μια αναλυτική συσκευή που μπορεί να μετατρέψει μια βιολογική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα. Αποτελείται από τρία μέρη: τον υποδοχέα, που είναι συνήθως βιολογικό μόριο, τον μορφοτροπέα, που βρίσκεται σε επαφή με τον υποδοχέα και το ηλεκτρονικό μέρος.

Κεφάλαιο 2

Νανοτεχνολογία

2.1 Τι είναι η Νανοτεχνολογία

Η Νανοτεχνολογία [3] είναι η κατανόηση και ο έλεγχος της ύλης στη νανοκλίμακα, σε διαστάσεις μεταξύ περίπου 1 και 100 νανομέτρων, όπου μοναδικά φαινόμενα επιτρέπουν νέες εφαρμογές. Η ύλη μπορεί να εμφανίσει ασυνήθιστες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες στη νανοκλίμακα, που διαφέρουν με σημαντικούς τρόπους από τις ιδιότητες των μακροσκοπικών (bulk) υλικών, των μεμονωμένων ατόμων και των μορίων. Ορισμένα νανοδομημένα υλικά είναι ισχυρότερα ή έχουν διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλες μορφές ή μεγέθη του ίδιου υλικού. Άλλα είναι καλύτερα στην αγωγιμότητα ή της θερμότητας ή του ηλεκτρισμού. Μπορεί να γίνονται πιο χημικά δραστικά, να αντανακλούν καλύτερα το φως ή να αλλάζουν χρώμα καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος ή η δομή τους. Η νανοτεχνολογία δεν είναι απλώς η εργασία σε όλο και μικρότερες διαστάσεις- αντίθετα, η εργασία στη νανοκλίμακα επιτρέπει στους επιστήμονες να κατανοήσουν και να αξιοποιήσουν τις μοναδικές φυσικές, χημικές, μηχανικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών που εμφανίζονται σε αυτή την κλίμακα.

2.2 Ο αντίκτυπος της μετάβασης στη νανοκλίμακα

Όταν δημιουργούνται σωματίδια με διαστάσεις περίπου 1-100 νανόμετρα, οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να αλλάξουν σημαντικά σε σχέση με εκείνες σε μεγαλύτερες κλίμακες. Αυτή είναι η κλίμακα μεγέθους όπου τα κβαντικά φαινόμενα μπορούν να καθορίσουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των σωματιδίων. Ένα συναρπαστικό και ισχυρό αποτέλεσμα των κβαντικών φαινομένων της νανοκλίμακας είναι η έννοια της “ρυθμισιμότητας“ των ιδιοτήτων. Δηλαδή, αλλάζοντας το μέγεθος του σωματιδίου, ένας επιστήμονας μπορεί κυριολεκτικά να ρυθμίσει μια υλική ιδιότητα που τον ενδιαφέρει. Στη νανοκλίμακα, ιδιότητες όπως το σημείο τήξης, ο φθορισμός, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα και η χημική αντιδραστικότητα μπορούν να αλλάξουν ως συνάρτηση του μεγέθους του σωματιδίου. Κατά τη μετάβαση από ένα μακροσκοπικό (bulk) υλικό στη νανοκλίμακα μεταβάλλονται πολλές από τις κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζουν τις ιδιότητες του υλικού. Αυτές οι αλλαγές στις μακροσκοπικές ιδιότητες του υλικού έχουν προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον γύρω από τα νανοδομημένα

υλικά. Όταν το μέγεθος του κρυσταλλικού υλικού μειώνεται και τελικά φτάνει σε νανομετρικές διαστάσεις, το μήκος κύματος των ηλεκτρονίων σθένους είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του κρυστάλλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις για τα ηλεκτρόνια να γίνονται διακριτές λόγω του φαινομένου του κβαντικού εντοπισμού και η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων εξαρτάται από το μέγεθος του νανοκρυσταλλίτη. Η μέση ενεργειακή διαφορά μεταξύ διαδοχικών ενεργειακών επιπέδων (δ) είναι γνωστή ως χάσμα Kubo [4]:

$$\delta = \frac{E_F}{3N}$$

όπου E_F η ενέργεια Fermi του νανοκρυστάλλου και N ο αριθμός των ατόμων στο νανοκρυστάλλο. Είναι προφανές ότι όσο μειώνεται το μέγεθος του κρυστάλλου τόσο αυξάνεται ο διαχωρισμός μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων. Στην πραγματικότητα, όταν το χάσμα Kubo γίνει μεγαλύτερο από τη θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων, ο νανοκρυστάλλος μετατρέπεται από αγώγιμο σε μονωτικό υλικό (Metal to Insulator Transition, MIT). Οι αναλογίες μεταξύ ατόμων και νανοσωματιδίων εκτείνονται πέρα από τα διακριτά ενεργειακά επίπεδα. Καθώς τα άτομα είναι τα δομικά στοιχεία κάθε υλικού, τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τεχνητά δομικά στοιχεία για τη σύνθεση νέων μακροσκοπικών υλικών με ξεχωριστές ιδιότητες. Στα συμβατικά υλικά οι ιδιότητες αυτές προκύπτουν γενικά από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων καθώς και από τη διάταξή τους στο χώρο. Οι ιδιότητες των νανοδομημένων υλικών εξαρτώνται αντίστοιχα από το μέγεθος, τη σύνθεση, το σχήμα, το υλικό σύνδεσης και τη διάταξη των νανοσωματιδίων. Ο χρυσός σε νανοκλίμακα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα που απεικονίζει τις μοναδικές ιδιότητες που εμφανίζονται στη νανοκλίμακα.



Σχήμα 2.1: Χρώματα νανοσωματιδίων χρυσού (διάμετρος 20 nm αριστερά, > 100nm στη μέση) σε σύγκριση με τον μακροσκοπικό υλικό (δεξιά) (εικόνα της Stephanie Mitchell) [5]

Ο χρυσός σε νανοκλίμακα μπορεί να εμφανίζεται κόκκινος ή μοβ ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου. Τα νανοσωματίδια χρυσού αλληλεπιδρούν διαφορετικά με το φως σε σύγκριση με τα σωματίδια χρυσού μεγαλύτερης κλίμακας λόγω κβαντικών φαινομένων.

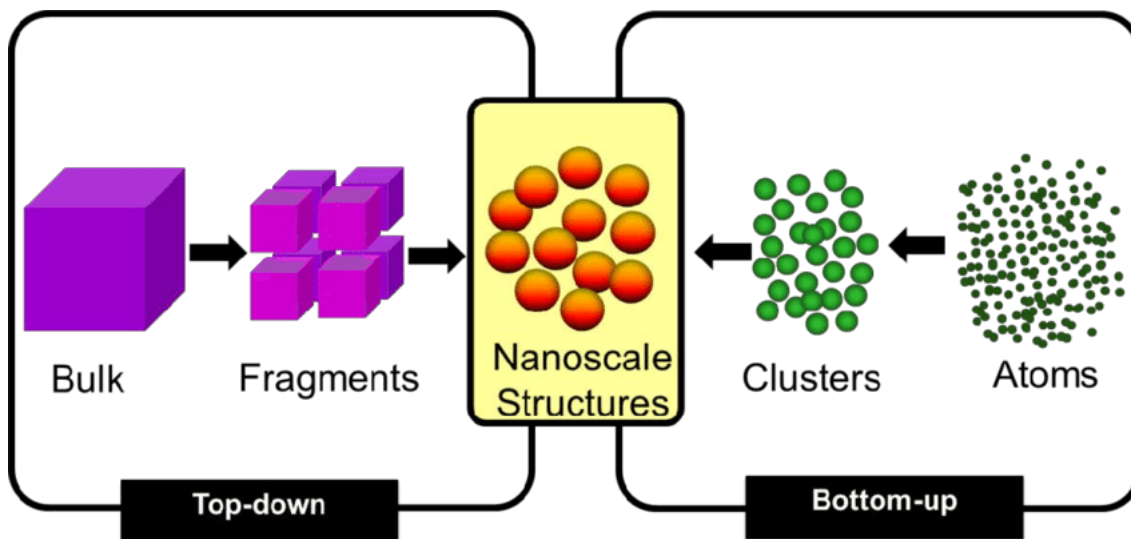
2.3 Εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας

Η Νανοτεχνολογία έχει συμβάλει σε πολλούς κλάδους της επιστήμης. Τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας τροφίμων, της φαρμακολογίας, της ιατρικής και της κοσμετολογίας, και αποτελούν μέρος ευρέως χρησιμοποιούμενων συμπληρωμάτων διατροφής, προϊόντων υγιεινής και συσκευασίας. Η νανοτεχνολογία, επίσης, έχει συμβάλει σε μεγάλο βαθμό σε σημαντικές προόδους στον τομέα της πληροφορικής και των ηλεκτρονικών, δηλαδή στον τομέα όπου εντάσσεται και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οδηγώντας σε ταχύτερα, μικρότερα και πιο φορητά συστήματα που μπορούν να διαχειρίζονται και να αποθηκεύουν όλο και μεγαλύτερες ποσότητες πληροφοριών. Μερικές από αυτές τις συνεχώς εξελισσόμενες εφαρμογές αποτελούν:

- Τα τρανζίστορ [6], οι βασικοί διακόπτες που επιτρέπουν όλους τους σύγχρονους υπολογιστές, έχουν γίνει όλο και μικρότερα μέσω της νανοτεχνολογίας. Στις αρχές του αιώνα, ένα τυπικό τρανζίστορ είχε μέγεθος 130-250 nm. Το 2014, η Intel δημιούργησε ένα τρανζίστορ 14 nm [7], στη συνέχεια, η IBM δημιούργησε το πρώτο τρανζίστορ 7 nm το 2015 [8], και στη συνέχεια το Lawrence Berkeley National Lab παρουσίασε ένα τρανζίστορ 1 nm το 2016 [9]! Τα μικρότερα, ταχύτερα και καλύτερα τρανζίστορ μπορεί να σημαίνουν ότι σύντομα ολόκληρη η μνήμη του υπολογιστή μας μπορεί να αποθηκεύεται σε ένα μόνο μικροσκοπικό σιπ.
- Η μαγνητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (MRAM), με τη βοήθεια της οποίας οι υπολογιστές θα μπορούν να “εκκινούν” σχεδόν αμέσως. Η MRAM [10] ενεργοποιείται από μαγνητικές επαφές σήραγγας κλίμακας νανομέτρου και μπορεί να αποθηκεύει γρήγορα και αποτελεσματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια τερματισμού λειτουργίας του συστήματος ή να ενεργοποιεί λειτουργίες συνέχισης της αναπαραγωγής.
- Τα εύκαμπτα, ευλίγιστα, αναδιπλούμενα, κυλιόμενα και εκτάσιμα ηλεκτρονικά συστήματα που επεκτείνονται σε διάφορους τομείς και ενσωματώνονται σε μια ποικιλία προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των wearables, των ιατρικών εφαρμογών, των αεροδιαστημικών εφαρμογών και του Internet Of Things. Τα εύκαμπτα ηλεκτρονικά έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, νανομεμβράνες ημιαγωγών για εφαρμογές σε οθόνες smartphone. Άλλα νανοϋλικά, όπως το γραφένιο και τα κυτταρινικά νανοϋλικά, χρησιμοποιούνται για διάφορους τύπους εύκαμπτων ηλεκτρονικών για να ενεργοποιούν αισθητήρες που μπορούν να φορεθούν, φωτοβολταϊκά που μπορούν να ενσωματωθούν σε ρούχα [11] και ηλεκτρονικό χαρτί [12] που μπορεί να τυλιχτεί σε ρολό. Η κατασκευή επίπεδων, εύκαμπτων, ελαφρών, μη εύθραυστων και εξαιρετικά αποδοτικών ηλεκτρονικών συστημάτων διευρύνει τους ορίζοντες για την κατασκευή αμέτρητων έξυπνων προϊόντων.

2.4 Τεχνικές παρασκευής νανοϋλικών

Μια ταξινόμηση των μεθόδων κατασκευής τις διακρίνει σε τεχνικές κατασκευής “από πάνω προς τα κάτω” (top-down) και “από κάτω προς τα πάνω” (bottom-up).

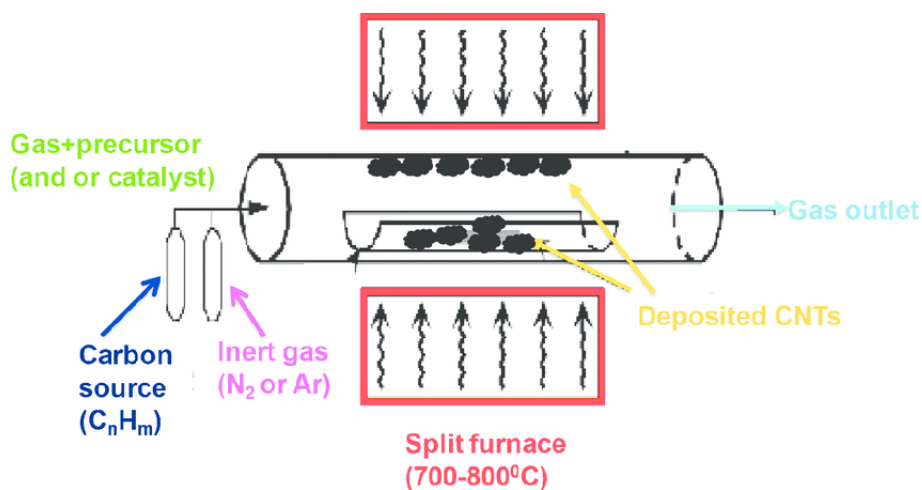


Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Top-down (αριστερά) και Bottom-up (δεξιά) [13]

Η top-down κατασκευή μειώνει μεγάλα κομμάτια υλικού σε νανοκλίμακα, όπως κάποιος που σκαλίζει ένα μοντέλο αεροπλάνου από ένα κομμάτι ξύλο. Η προσέγγιση bottom-up στη νανοκατασκευή δημιουργεί προϊόντα χτίζοντάς τα από συστατικά ατομικής και μοριακής κλίμακας. Οι προσεγγίσεις bottom-up περιλαμβάνουν επίσης ορισμένα συστατικά μοριακής κλίμακας που αυθόρμητα ‘αυτοσυναρμολογούνται’ σε διατεταγμένες δομές. Εντός των κατηγοριών της νανοκατασκευής “από πάνω προς τα κάτω” και “από κάτω προς τα πάνω”, υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός νέων διαδικασιών που επιτρέπουν τη νανοκατασκευή.

2.4.1 Χημική Εναπόθεση Ατμών (Chemical Vapor Deposition, CVD)

Η CVD είναι μια bottom-up χημική διαδικασία που χρησιμοποιείται συνήθως στη βιομηχανία ημιαγωγών για την εφαρμογή λεπτών υμενίων μιας ουσίας πάνω σε μια επιφάνεια που αποτελείται από μια άλλη ουσία. Κατά την εναπόθεση, τα αέρια εισάγονται σε ένα θάλαμο εναπόθεσης και αντιδρούν πάνω από ένα υπόστρωμα, στην επιφάνεια του οποίου σχηματίζεται το επιθυμητό υλικό. Τα αέρια αυτά μεταφέρουν τις χημικές ενώσεις από τις αντιδράσεις (πρόδρομες ουσίες) από τις οποίες θα σχηματιστεί το νέο υλικό. Οι πρόδρομες ουσίες είναι σε υγρή, αέρια ή στερεή μορφή αποθηκευμένες σε δοχεία έξω από το θάλαμο και παρασύρονται από τη ροή ενός αερίου φορέα που μπορεί να είναι υδρογόνο ή αργό ή άζωτο υψηλής καθαρότητας. Συνήθως ο θάλαμος και το υπόστρωμα βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία, η οποία μπορεί να φτάσει τους 1000 °C.



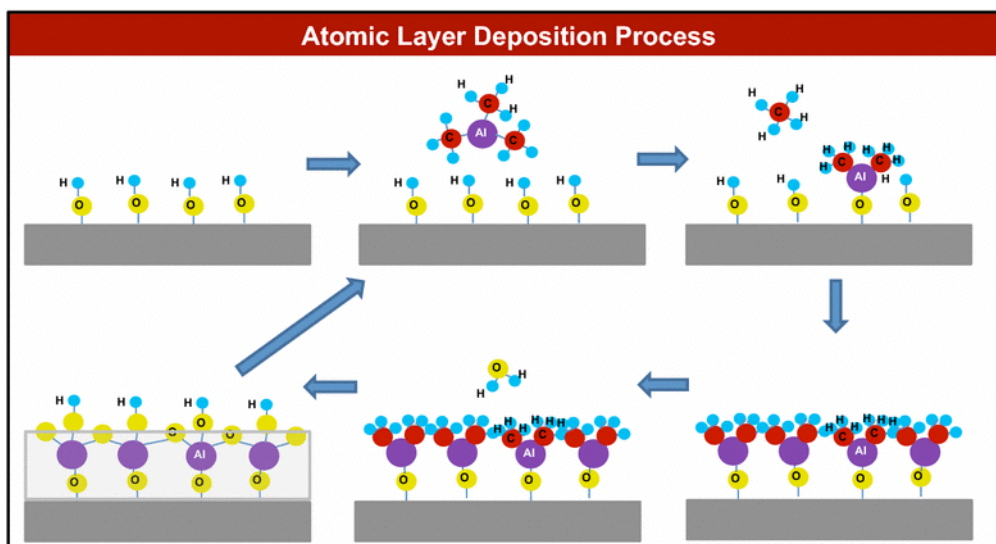
Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος CVD [14]

Παραλλαγές της τεχνικής περιλαμβάνουν επίσης Low Pressure CVD (LPCVD), Plasma-enhanced CVD (PECVD) και High Density Plasma (HDPCVD). Στην περίπτωση του LPCVD, οι αντιδράσεις διεξάγονται σε πιέσεις μεταξύ 0.25 και 2 Torr και σε θερμοκρασίες μεταξύ 300-900 °C. Όσο χαμηλότερη είναι η πίεση, τόσο μικρότερη είναι η κατανάλωση αερίου και τόσο ταχύτερη είναι η διάχυση των αντιδρώντων στο υπόστρωμα. Επίσης, το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι συνεπάγεται τη δυνατότητα πυκνότερης διάταξης των υποστρωμάτων (Si wafers) και συνεπώς τη μεγαλύτερη επεξεργασία wafer ανά εναπόθεση. Στην περίπτωση της PECVD, το αέριο πλάσματος χρησιμοποιείται για να παρέχει μέρος της ενέργειας που απαιτείται από την υψηλή κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων και των ιόντων του πλάσματος, οδηγώντας σε εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας από τα θερμαντικά στοιχεία του θαλάμου. Αυτή η τεχνική είναι εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις όπου τα υποστρώματα δεν αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας είναι μέχρι 200-350 °C, αν και αυτή η τεχνική επιτρέπει τη δημιουργία εναποθέσεων ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου. Πιο συγκεκριμένα, μέσα στον θάλαμο εναπόθεσης υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο ανόδου και το υπόστρωμα είναι γειωμένο στην κάθοδο. Η θερμοκρασία του υποστρώματος μπορεί να ελεγχθεί από θερμαντικά στοιχεία. Εφαρμόζοντας υψηλή τάση στην άνοδο, συνήθως σε συχνότητα 13,56 MHz, το αέριο που εισέρχεται στο θάλαμο σε πιέσεις 50 mTorr - 5 Torr και μεταφέρει τα αντιδρώντα ιονίζεται, δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα. Τα ηλεκτρόνια υψηλής κινητικής ενέργειας συγκρούονται με τα μόρια των αντιδρώντων ιονίζοντάς τα ή διασπώντας τα σε άλλες ενώσεις. Με αυτόν τον τρόπο τα προϊόντα αυτών των αντιδράσεων αντιδρούν στην επιφάνεια του υποστρώματος και σχηματίζουν το επιθυμητό υλικό. Τέλος, στην HDPCVD, η εφαρμογή πλάσματος συνοδεύεται από εναλλασσόμενη εναπόθεση ιόντων πεδίου στο υπόστρωμα, το οποίο βομβαρδίζεται από ιόντα πλάσματος με αποτέλεσμα πιο πυκνά υλικά με λιγότερα κενά στο εσωτερικό του. Η CVD χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, στην κατασκευή επιταξιακού πυριτίου, διοξειδίου του πυριτίου, νιτριδίου του πυριτίου, αλλά, επίσης, σε δισδιάστατα ανόργανα και οργανικά υλικά (γραφένιο, MoS₂). Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνουν την κατασκευή μεμβρανών με καλή ομοιο-

μορφία και χαμηλό πορώδες.

2.4.2 Εναπόθεση ατομικού στρώματος (Atomic Layer Deposition, ALD)

Η τεχνική εναπόθεσης ατομικού στρώματος είναι μια χημική μέθοδος σύνθεσης λεπτών μεμβρανών στην επιφάνεια του υποστρώματος με πολύ καλό έλεγχο πάχους και δυνατότητα δημιουργίας μονοατομικής στρώσης ή στρώσης λίγων nm ακόμη και σε επιφάνειες με υψηλή γεωμετρική αναλογία διαστάσεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις (υψηλή αναλογία απεικόνισης). Οι μεμβράνες που συντίθενται με αυτή την τεχνική έχουν υψηλό βαθμό ομοιογένειας και ομοιομορφίας πάχους, χαμηλή συγκέντρωση προσμίξεων και συνήθως είναι άμορφες. Με αυτήν την τεχνική μπορούν να κατασκευαστούν ανόργανα και οργανικά υλικά και στοιχειώδη υλικά (π.χ. καθαρά μέταλλα ή ημιαγωγοί). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οξειδία μετάλλων, νιτρίδια, ιόντα χαλκού (π.χ. σουλφίδια, σεληνίδια κ.λπ.), μέταλλα, ενώσεις ημιαγωγών [15], αλλά και πολυμερή όπως το πολυαμιδίο και το πολυιμίδιο [16]. Η μέθοδος συνίσταται στην μεμονωμένη αντίδραση προδρόμων ενώσεων ή αντιδραστηρίων, τα οποία απομονώνονται μεταξύ τους και οδηγούνται στον θάλαμο στον οποίο βρίσκεται το υπόστρωμα, αντιδρώντας με αυτό. Δηλαδή, τα αντιδρώντα (τουλάχιστον δύο, A και B) αντιδρούν μεμονωμένα με το υπόστρωμα, χωρίς ταυτόχρονα να βρίσκονται στον θάλαμο αντίδρασης και ένας διαδοχικός αριθμός εναλλασσόμενων κύκλων A και B έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τού φιλμ με σχεδόν μονοατομικό στρώμα κάθε φορά. Σε αντίθεση με την τεχνική CVD, τα αντιδρώντα είναι παρόντα την ίδια στιγμή και αντιδρούν μεταξύ τους στην επιφάνεια τού υποστρώματος δημιουργώντας έτσι συνεχείς στρώσεις υλικού.



Σχήμα 2.4: Διαδικασία ALD: σχηματική αναπαράσταση ενός κύκλου ALD ανάπτυξης Al_2O_3 [17]

Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα σχηματισμού φιλμ στην απλούστερη περίπτωση δύο πρόδρομων ουσιών είναι τα εξής:

1. Η πρώτη πρόδρομη ουσία A εισέρχεται στον θάλαμο και αντιδρά με κάποιες επιφανειακές χημικές ομάδες του υποστρώματος.
2. Εισάγεται ένα αδρανές αέριο για να αφαιρέσει τα μόρια της ουσίας που δεν αντέδρασαν και τα παραπροϊόντα της πρώτης αντίδρασης. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως εκκαθάριση.
3. Η δεύτερη πρόδρομη ουσία B εισέρχεται στον θάλαμο και αντιδρά με την τροποποιημένη επιφάνεια λόγω της πρώτης αντίδρασης, προετοιμάζοντας παράλληλα το υπόστρωμα για επανάληψη της αντίδρασης με την ουσία A.
4. Επαναλαμβάνεται ο καθαρισμός με το αδρανές αέριο.
5. Η διαδικασία στα βήματα 1-4 επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο πάχος μεμβράνης.

Αυτή η ρουτίνα τεσσάρων βημάτων ονομάζεται “κύκλος εναπόθεσης” και στο τέλος σχηματίζεται ένα μεμονωμένο στρώμα του υλικού. Ένας κύκλος χωρίζεται σε δύο μισούς κύκλους που περιλαμβάνουν τις αντίστοιχες αντιδράσεις της ουσίας A και B με το υπόστρωμα. Οι πρόδρομες ουσίες συνήθως μεταφέρονται στον θάλαμο μέσω ενός φέροντος αερίου το οποίο χρησιμοποιείται επίσης στους ενδιάμεσους καθαρισμούς μεταξύ των προδρόμων. Λόγω της ύπαρξης αυτοτερματιζόμενων αντιδράσεων, το πάχος της μεμβράνης ελέγχεται από τον αριθμό των κύκλων, οδηγώντας έτσι σε ακριβή έλεγχο πάχους. Η πίεση που πρέπει να επικρατεί στο θάλαμο εναπόθεσης πρέπει να είναι στο επίπεδο 1 Torr, ώστε η ροή του αδρανούς αερίου να είναι ομαλή και να μεταφέρει αποτελεσματικά τους πρόδρομους από αυτόν [18]. Οι πρόδρομες ουσίες που χρησιμοποιούνται είναι αέριες, υγρές ή στερεές. Πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, όπως να είναι πτητικές σε θερμοκρασία ίση ή υψηλότερη από τη θερμοκρασία δωματίου, να μην αποσυντίθενται στις θερμοκρασίες λειτουργίας του εναποθέματος και αντιδράσεις αερίου-στερεάς φάσης που πληρούν το κριτήριο αυτοτερματισμού. Σε μια αυτοτερματιζόμενη αντίδραση όλες οι επιφανειακές ομάδες του υποστρώματος αντιδρούν με τα αντιδρώντα μόρια (χορεσμός) και η περίσσεια μορίων που περισσεύει δεν συμβάλλει στις αντιδράσεις. Οι επιφανειακές αντιδράσεις στην ALD συνίστανται στην προσρόφηση των μορίων των αέριων προδρόμων ουσιών στο υπόστρωμα και στην αντίδραση (ή στην αποσύνθεση στην επιφάνεια) με ομάδες επιφανειών. Η προσρόφηση χωρίζεται σε φυσική προσρόφηση και χημική προσρόφηση. Κατά τη διάρκεια της φυσικής προσρόφησης, το μόριο αλληλεπιδρά με την ομάδα επιφανειών ασθενώς και μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα, ενώ η δομή του μορίου μπορεί να αλλοιωθεί ελαφρώς. Κατά τη χημική προσρόφηση, σχηματίζονται ή διαλύονται χημικοί δεσμοί μεταξύ του μορίου και της επιφανειακής ομάδας. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μονοστιβάδας. Σε αντίθεση με τη φυσική προσρόφηση, πολλαπλά στρώματα μπορούν να αναπτυχθούν στην επιφάνεια λόγω της δυσδιάκριτης σύνδεσης των μορίων στα επιφανειακά άτομα ή ομάδες. Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες, πέραν από το είδος των αντιδρώντων, που επηρεάζουν τον ρυθμό ανάπτυξης του φιλμ (ανάπτυξη ανά κύκλο), δηλαδή το πάχος ανά κύκλο εναπόθεσης [19]. Ένας παράγοντας είναι ο αριθμός των κύκλων. Κατά τον πρώτο κύκλο, τα μόρια που αντιδρούν βλέπουν μια ελεύθερη επιφάνεια, όπου όλα τα

ενεργά σημεία είναι διαθέσιμα για προσρόφηση. Καθώς αναπτύσσεται το στρώμα, όλο και περισσότερες κηλίδες καλύπτονται και μικρότερο ποσοστό της αρχικής επιφάνειας εκτίθεται στα πρόδρομα μόρια, ενώ στο υπόλοιπο ποσοστό της επιφάνειας τα αντιδρώντα αλληλεπιδρούν με το εναποτιθέμενο υλικό που έχει δημιουργηθεί. Τελικά, όταν σχηματίζεται ένα συνεχές στρώμα υλικού, τα αντιδρώντα μόρια δεν αλληλεπιδρούν πλέον μόνο με την επιφάνεια του επιθυμητού υλικού. Μια δεύτερη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ανάπτυξη ανά κύκλο κατά την εναπόθεση είναι η θερμοκρασία. Τα φαινόμενα που οφείλονται στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σχετίζονται με την επίδραση στον αριθμό και τον τύπο των ενεργών θέσεων και τις κατάλληλες για ενέργεια αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα [20]. Σε χαμηλές θερμοκρασίες είτε οι πρόδρομοι θα συμπυκνωθούν στην επιφάνεια (αυξάνοντας την ανάπτυξη ανά κύκλο), είτε οι επιθυμητές αντιδράσεις λόγω χαμηλής θερμικής ενέργειας δεν θα ολοκληρωθούν (μείωση ανάπτυξης ανά κύκλο). Σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να συμβεί αποσύνθεση των επιφανειακών ειδών, είτε με αποτέλεσμα την προσρόφηση περισσότερων μορίων στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα την αύξηση της ανάπτυξης, είτε, αντίθετα, οι επιφανειακές ομάδες μπορεί να εκροφηθούν, οδηγώντας σε λιγότερες αντιδράσεις και συνεπώς μείωση της ανάπτυξης.

2.4.3 Φυσική Εναπόθεση Ατμών (Physical Vapor Deposition, PVD)

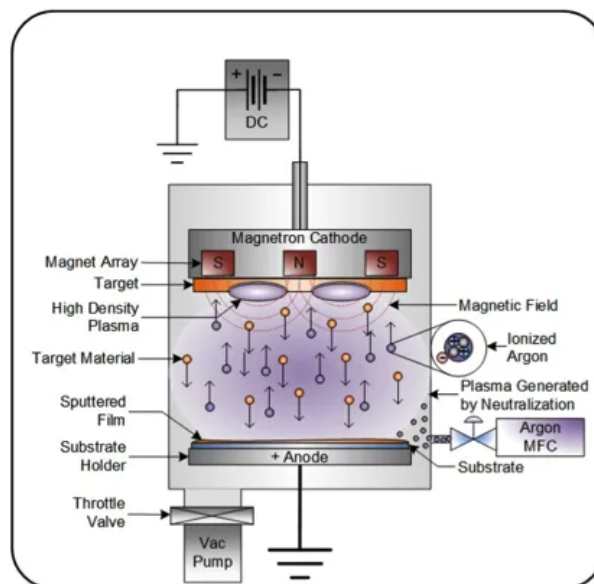
2.4.3.1 Ιοντοβολή (sputtering)

Η ιοντοβολή είναι μια bottom-up μέθοδος για την κατασκευή λεπτών υμενίων μετάλλων και διηλεκτρικών καθώς και νανοσωματιδίων και χρησιμοποιείται ευρέως στη μικροηλεκτρονική. Ως ιοντοβολή ορίζεται ο βομβαρδισμός μιας επιφάνειας με ιόντα υψηλής ενέργειας με αποτέλεσμα την επακόλουθη αποκόλληση ατόμων του υλικού της επιφάνειας (στόχος). Η πολλαπλή ελαστική σκέδαση των ιόντων στο στόχο, παράγει δευτερογενή ηλεκτρόνια και την εκπομπή ακτίνων X και φωτονίων άλλων συχνοτήτων λόγω της διέγερσης και αποδιέγερσης των ατόμων του στόχου.

2.4.3.2 RF sputtering

Για να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα ο μονωτικός στόχος πολώνεται με εναλλασσόμενη τάση με ραδιοκυματική συχνότητα (εξ ου και ο όρος RF). Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, υπάρχει ένας συνεχής βομβαρδισμός της επιφάνειας στόχου με ιόντα καθώς είναι πιο δυσκίνητα στην απόκρισή τους στο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, ενώ τα ηλεκτρόνια ακολουθούν τις εναλλαγές του ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση, η συσσώρευση θετικού φορτίου στην επιφάνεια του στόχου εξουδετερώνεται από τη σύγκρουση ηλεκτρονίων στο δεύτερο μισό της περιόδου της εναλλασσόμενης τάσης. Αυτό επιτρέπει στα θετικά ιόντα να χτυπούν ανεμπόδιστα την επιφάνεια του μονωτή και το πλάσμα να είναι σταθερό στον θάλαμο.

Το ηλεκτρόδιο στόχος και η άνοδος -λόγω της ταλάντωσης του ηλεκτρονιακού φορτίου- αναπτύσσουν ένα συνεχές δυναμικό πιο αρνητικό από το δυναμικό του πλάσματος, έτσι ώστε τα πιο αργά ιόντα αερίων κατά την ταλάντωση του πεδίου να «αισθάνονται» ένα μέσο συνεχές πεδίο και να βομβαρδίζουν τον στόχο. Ταυτόχρονα, το ηλεκτρόδιο της ανόδου βομβαρδίζεται,



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση συσκευής για sputtering [21]

αλλά η αναλογία των δυναμικών της ανόδου και της καθόδου εξαρτάται από την αναλογία των επιφανειών των ηλεκτροδίων. Καθώς η περιοχή της ανόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του στόχου (η άνοδος είναι γειωμένη μαζί με τα τοιχώματα του θαλάμου), η πτώση τάσης στον στόχο θα είναι πολύ μεγαλύτερη, επομένως ο ιονισμός θα είναι πολύ πιο έντονος στην επιφάνεια του στόχου. Με την εκτόξευση ραδιοσυχνότητας, ο ιονισμός των ατόμων του αερίου, λόγω της ενέργειας του εναλλασσόμενου πεδίου, γίνεται πιο αποτελεσματικός επιτρέποντας τη λειτουργία σε χαμηλότερες πιέσεις. Με αυτή την τεχνική, εναποτίθενται λεπτές μεμβράνες μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτικών υλικών, όπως οξειδία και νιτρίδια μετάλλων.

2.4.3.3 DC sputtering

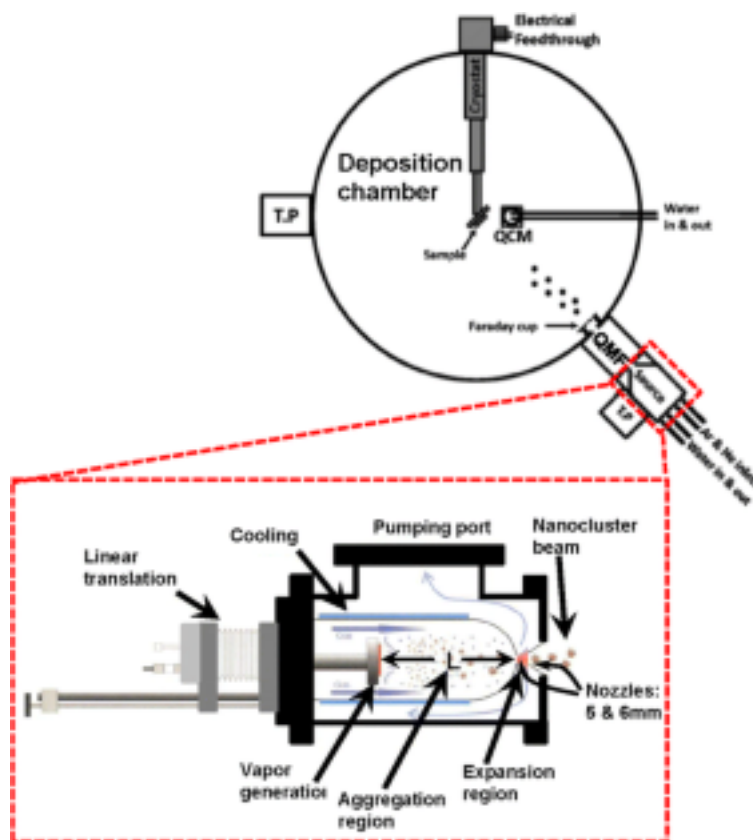
Αυτή η τεχνική, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην εκτόξευση συνεχούς ρεύματος, λαμβάνει χώρα σε έναν θάλαμο πολύ χαμηλής πίεσης, όπου ο στόχος πολώνεται υπό σταθερή αρνητική τάση μερικών εκατοντάδων έως λίγων χιλιάδων βολτ και το υπόστρωμα γειώνεται στο ηλεκτρόδιο ανόδου κατά μήκος με τα τοιχώματα του θαλάμου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5. Μέσα στον θάλαμο υπάρχει ένα αδρανές αέριο, το οποίο με την εφαρμογή της αρνητικής τάσης μετατρέπεται σε πλάσμα, με ένα μέρος των ατόμων του να είναι θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια σε θεωρητικά ίσους πληθυσμούς, ενώ τα υπόλοιπα είναι ουδέτερα άτομα του αερίου. Τα ιόντα κατευθύνονται προς τον αρνητικά πολωμένο στόχο, συγκρούονται με την επιφάνειά του και η ενέργεια που μεταφέρουν σπάει τους δεσμούς των ατόμων στόχου και τα αποσπά από την επιφάνεια. Στη συνέχεια οι ατμοί των ατόμων στόχου ταξιδεύουν στο υπόστρωμα και εναποτίθενται στην επιφάνειά του σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ. Κατά τη διάρκεια της ιοντοβολής συνεχούς ρεύματος ο στόχος πρέπει να είναι αγωγίμος, επομένως μόνο μέταλλα μπορούν να εναποτεθούν. Η εφαρμογή συνεχούς τάσης στην περίπτωση

μονωτικών υλικών, όπως οξειδία μετάλλων, θα είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση φορτίου στην επιφάνεια του μονωτή λόγω της σύγκρουσης ιόντων αερίου που θα εμπόδιζε τα επόμενα ιόντα να φτάσουν στην επιφάνεια, μειώνοντας την εφαρμοζόμενη τάση προς τον στόχο και τελικά την απόσβεση του πλάσματος. Στα συμβατικά συστήματα ιοντοβολής DC και RF, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, λόγω ανελαστικών συγκρούσεων με τα άτομα του αερίου, διαφεύγουν στην άνοδο και συμμετέχουν σε μικρό βαθμό στον ιονισμό του αδρανούς αερίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό ρυθμό ιονισμού και συνεπώς αύξηση του χρόνου εναπόθεσης. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται μια τεχνική εφαρμογής μαγνητικού πεδίου (*magnetron sputtering*) γύρω από τον στόχο για τη διατήρηση των ηλεκτρονίων σε μικρή απόσταση από αυτόν και την αύξηση του ποσοστού των ιόντων που εμπλέκονται στη διαδικασία.

Παραγωγή νανοσωματιδίων με τη μέθοδο DC magnetron sputtering

Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται με την τοποθέτηση ισχυρών μαγνητών πίσω από τον στόχο, οι οποίοι δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο με δυναμικές γραμμές κάθετες στο ηλεκτρικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί μια δύναμη Lorentz στα ηλεκτρόνια, αναγκάζοντάς τα σε μια σπειροειδή τροχιά γύρω από το στόχο και να παραμείνουν στο πλάσμα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερο ρυθμό ιονισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνική και τη χρήση χαμηλότερης πίεσης αδρανούς αερίου. Εκτός από την τεχνική του sputtering, είναι δυνατή η ταυτόχρονη εναπόθεση περισσότερων υλικών (*co-sputtering*) προκειμένου να δημιουργηθούν κράματα. Ως τεχνική είναι επίσης ευέλικτη, καθώς μπορεί να εναποτεθεί μεγάλη ποικιλία υλικών. Ωστόσο, η παρουσία αερίου στη θέση εναπόθεσης έχει ως αποτέλεσμα τον πιθανό σχηματισμό ακαθαρσιών καθώς αναπτύσσεται η μεμβράνη και το υπόστρωμα καταπονείται λόγω της πρόσκρουσης των φορτισμένων σωματιδίων. Τα νανοσωματίδια παράγονται με τη μέθοδο DC magnetron sputtering, ακολουθούμενη από συμπύκνωση αέριας φάσης. Τελικά, τα παραγόμενα νανοσωματίδια τείνουν να συγχρατούν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο και αυτό το πλεονάζον ηλεκτρόνιο επιτρέπει τον ηλεκτροστατικό χειρισμό τους. Τα νανοσωματίδια μπορούν να επιταχυνθούν στο υπόστρωμα παράγοντας μια μεγάλη ποικιλία μορφολογιών, όπως οι μεμονωμένες νησίδες μέχρι πολύ λεπτά στρώματα φιλμ επίστρωσης. Το σχήμα των νανοσωματιδίων επηρεάζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Η κεφαλή του magnetron sputtering μπορεί να μετακινηθεί εντός της ζώνης συμπύκνωσης. Με τη μείωση της απόστασης από την κεφαλή έως το άνοιγμα διαστολής, η απόσταση και ο χρόνος συμπύκνωσης μειώνονται - με αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου μεγέθους των νανοσωματιδίων. Η πηγή επιτρέπει την εισαγωγή αερίου (αργού) που θα λειτουργήσει ως φορέας των παραγόμενων νανοσωματιδίων. Με την αύξηση του ρυθμού ροής του αερίου, παρατηρείται μείωση του μέσου μεγέθους των παραγόμενων νανοσωματιδίων, λόγω της μείωσης του χρόνου παραμονής τους στη ζώνη συσσωμάτωσης. Η πίεση στη ζώνη άντλησης (ή συσσωμάτωσης) των νανοσωματιδίων είναι περίπου $1 \cdot 10^{-3}$ mbar, ενώ η πίεση στον θάλαμο αποθήκευσης είναι περίπου $5 \cdot 10^{-5}$ mbar. Λόγω αυτής της κλίσης στην πίεση, τα νανοσωματίδια παρασύρονται στον θάλαμο εναπόθεσης και εναποτίθενται στο δείγμα. Σε ένα σύστημα DC magnetron

sputtering η κατάσταση συνεχούς ροής πλάσματος προκαλείται από το αδρανές αέριο που βρίσκεται κοντά στον στόχο χάρη στο μαγνητικό πεδίο του DC magnetron sputtering. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία υπερκορεσμένων ατμών στόχου που περιέχει τα άτομά του.



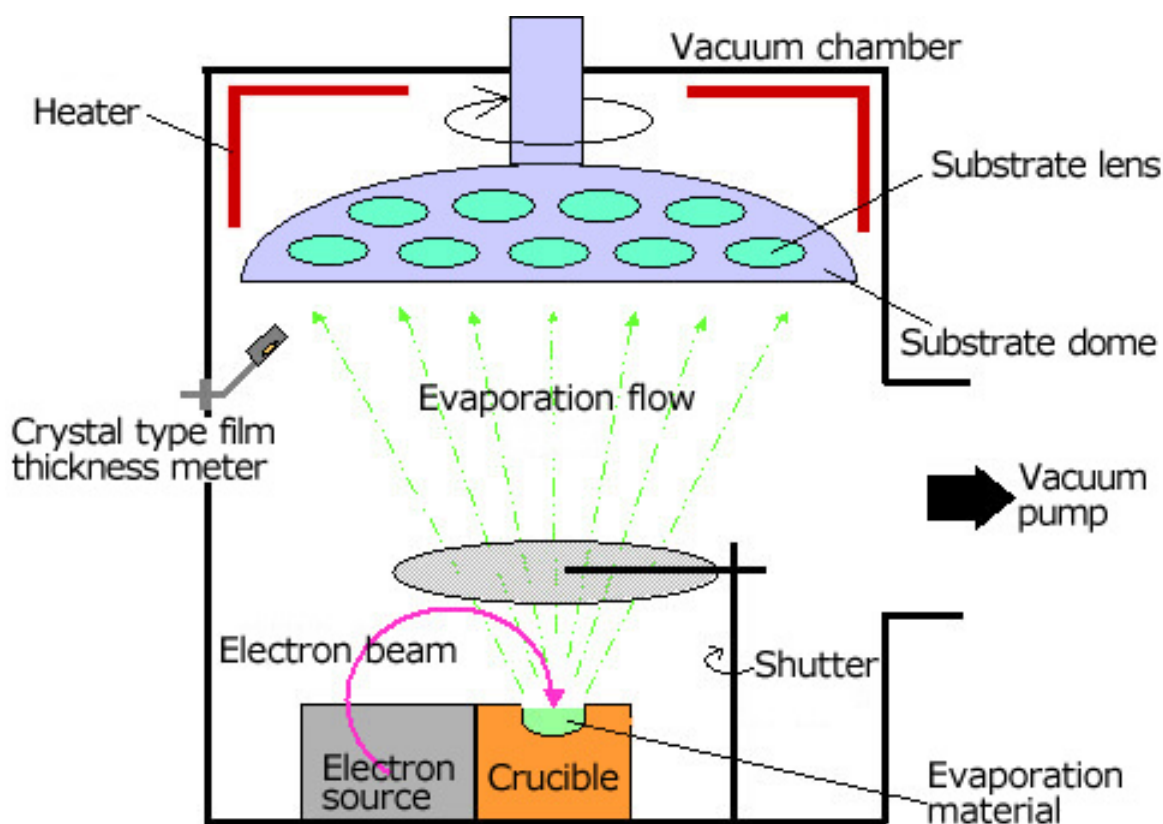
Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της DC magnetron sputtering γεννήτριας νανοσωματιδίων [22]

Τυπικά, μπαίνοντας στη ζώνη συσσωμάτωσης όπου υπάρχει το αέριο, γίνεται η διαδικασία συμπύκνωσης και πυρήνωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κατανομής νανοσωματιδίων με ποικιλία μεγεθών. Τα άτομα-στόχοι με πολύ υψηλές κινητικές ενέργειες ψύχονται από το αέριο (ισοδύναμα οδηγούνται σε καταστάσεις χαμηλότερης κινητικής ενέργειας) προκαλώντας σχηματισμό πυρήνα από τα σωματίδια-στόχους (συστάδες σωματιδίων). Η πυρήνωση αυτών των μικρών σωματιδίων (κοκκία) ακολουθείται από την ανάπτυξη των κόκκων σε μεγαλύτερα σωματίδια (συστάδες). Η ανάπτυξη σμήνους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από συγκρούσεις διατομής (εδώ γίνεται εμφανής η παρουσία αδρανούς αερίου). Δεδομένου ότι το αδρανές αέριο είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνο για τη διαδικασία σχηματισμού συστάδων (συμπύκνωση), η πίεσή του χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατανομής του μεγέθους του συμπλέγματος. Η ανάπτυξη και η πυρήνωση του συμπλέγματος διακόπτεται καθώς το σύμπλεγμα εισέρχεται από μια μικρή οπή στη ζώνη διήθησης, όπου επικρατεί σημαντικά χαμηλότερη πίεση. Σε αυτή τη φάση σχηματίζονται τα νανοσωματίδια που θα εναποτεθούν στο υπόστρωμα. Οι συνθήκες εναπόθεσης που επηρεάζουν την επιφανειακή πυκνότητα των νανοσωματιδίων και την κατανομή του μεγέθους τους είναι η θερμοκρασία του υποστρώματος, ο χρόνος εναπόθεσης, η ισχύς

της εναπόθεσης και ο ρυθμός ροής αδρανούς αερίου.

2.4.3.4 Electron gun (e-gun) evaporation

Η εξάχνωση με πιστόλι ηλεκτρονίων είναι μια άλλη κοινή bottom-up τεχνική φυσικής εναπόθεσης ατμών, για τη δημιουργία λεπτών μεμβρανών σε υποστρώματα. Το αποτιθέμενο υλικό τοποθετείται σε δοχείο (crucible) υψηλής θερμικής αντίστασης σε θάλαμο κενού ($< 10^{-5}$ mbar) και θερμαίνεται είτε με θερμαντικό στοιχείο (θερμική εξάχνωση) είτε με πρόσκρουση δέσμης ηλεκτρονίων στο δοχείο (εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων). Η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται εξαχνώνει το υλικό και οι ατμοί των ατόμων του ταξιδεύουν σχηματίζοντας έναν κώνο υλικού, που συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του υποστρώματος σχηματίζοντας ένα φιλμ. Καθώς η εναπόθεση λαμβάνει χώρα σε χαμηλή πίεση και απουσία οποιουδήποτε άλλου αερίου, οι τροχιές των ατόμων είναι λιγότερο τυχαίες και οι γωνίες πρόσπτωσης έχουν μικρότερη διασπορά. Στην περίπτωση της θερμικής εξάχνωσης, που πρωτοαναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή αλουμινίου, το δοχείο αποτελείται από πυρίμαχο κεραμικό (π.χ. αλουμίνα Al_2O_3 , ζιρκόνιο ZrO_2) ή πυρίμαχο μέταλλο (π.χ. μολυβδαίνιο Mo) που θερμαίνεται είτε μέσω αντίστασης (στην περίπτωση του κεραμικού), είτε με εφαρμογή υψηλής τάσης (5-100V) στο δοχείο (στην περίπτωση του μεταλλικού). Υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως το ασήμι και ο χρυσός, εναποτίθενται ευκολότερα με την εξάχνωση με e-gun.



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση ενός e-gun εξατμιστή [23]

Στην περίπτωση της εξάτμισης με e-gun, τα ηλεκτρόνια που παράγονται θερμικά από ένα νήμα (filament) βολφραμίου (W) που διαρρέεται από μικρό ρεύμα σχηματίζουν δέσμη που κατευθύνεται και χτυπά το δοχείο του στόχου όταν αυτό είναι πολωμένο σε υψηλό δυναμικό (4-10 kV). Η κινητική ενέργεια που μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια κατά την πρόσκρουση στην επιφάνεια του δοχείου θερμαίνει το υλικό-στόχο. Κατά την εναπόθεση, το δοχείο-στόχος ψύχεται. Η ισχύς του νήματος W και το υψηλό δυναμικό που εφαρμόζεται είναι αυτά που ελέγχουν τον ρυθμό εναπόθεσης. Η στοχευμένη θέρμανση με δέσμη ηλεκτρονίων επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών και συνεπώς την εναπόθεση μετάλλων. Επιπλέον, η συνεχής ψύξη του στόχου σε συνδυασμό με την τοπική θέρμανση μειώνει τους ατμούς από άλλα περιφερειακά υλικά, όπως οι μεταλλικές αντιστάσεις. Αυτό εξασφαλίζει το σχηματισμό φιλμ με λιγότερες προσμίξεις. Τα μειονεκτήματα της τεχνικής περιλαμβάνουν τον μικρότερο κώνο εκπομπής υλικού. Οι απαιτούμενες θερμοκρασίες για την εξάτμιση ποικίλλουν από υλικό σε υλικό, αλλά οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται τοπικά είναι της τάξης των λίγων χιλιάδων °C. Ως εκ τούτου, οι ρυθμοί εναπόθεσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό και ειδικότερα από την τάση των ατμών τους (vapour pressure), σε αντίθεση με το sputtering. Το μικρό εύρος γωνιών πρόσπτωσης και το μικρό εμβαδόν του στόχου έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερη ομοιομορφία στο φιλμ σε σχέση με το sputtering. Επίσης, με αυτή την τεχνική παράγεται μικρότερη γκάμα υλικών. Το πλεονέκτημά του είναι, μεταξύ άλλων, η υψηλή καθαρότητα των υλικών, καθώς κατασκευάζονται υπό χαμηλή πίεση και το εναποτιθέμενο υλικό προέρχεται από ένα μικρό μέρος στην κορυφή του στόχου και δεν μολύνεται από το υλικό του δοχείου (όπως στην περίπτωση της εξάχνωσης με δέσμη ηλεκτρονίων). Η εξάτμιση με e-gun χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη μικροηλεκτρονική για την κατασκευή μεταλλικών επαφών σε κυκλώματα, καθώς η φύση της τεχνικής επιτρέπει την επιλεκτική εναπόθεση υλικού σε δομές που αποτυπώνονται στο υπόστρωμα με λιθογραφία [24].

Κεφάλαιο 3

Αισθητήρες παραμόρφωσης

3.1 Χρήσιμες έννοιες

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Ο πιεζοηλεκτρισμός [25] είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών υλικών αλλά και μερικών κεραμικών υλικών) να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τον Pierre Curie το 1880. Οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες και αποτελεί φαινόμενο πρώτης τάξης. Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_2\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θειικό λίθιο, ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride), κτλ.

Φαινόμενο πιεζοαντίστασης

Το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης [26] είναι η μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενός ημιαγωγού ή μετάλλου όταν εφαρμόζεται μηχανική τάση. Σε αντίθεση με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλεί μεταβολή μόνο της ηλεκτρικής αντίστασης και όχι του ηλεκτρικού δυναμικού.

Παραμόρφωση (Strain)

Στη μηχανική, η παραμόρφωση (ϵ) είναι μια μονάδα μέτρησης της παραμόρφωσης που υφίσταται ένα υλικό ως απόκριση σε μια εξωτερική δύναμη ή φορτίο. Περιγράφεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους (ΔL) ή του σχήματος του υλικού προς το αρχικό (L_0).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Η τάση, ή η δύναμη που εφαρμόζεται ανά μονάδα επιφάνειας, σχετίζεται με την παραμόρφωση μέσω της δυσκαμψίας ή της ελαστικότητας του υλικού. Η παραμόρφωση μπορεί να γραφεί ως ποσοστό ή κλασματική τιμή. Η παραμόρφωση αποτελεί θεμελιώδη ιδέα στη μηχανική και είναι σημαντική για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση μηχανικών συστημάτων και κατασκευών. Η παραμόρφωση και κατά συνέπεια η αλλαγή στις διαστάσεις ενός αντικειμένου μετρώνται με αισθητήρες αντίστασης, οι οποίοι βασίζονται σε υπόστρωμα πυριτίου ή σε πολυμερές εύκαμπτο υπόστρωμα. Το πυρίτιο, λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων του, προτάθηκε από πολύ νωρίς [27] ως υλικό στην ευρύτερη οικογένεια μηχανικών αισθητήρων για τη μέτρηση διαφόρων ποσοτήτων, όπως πίεση, δύναμη και επιτάχυνση. Κοινή αρχή λειτουργίας όλων των μηχανικών αισθητήρων είναι η αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού κατά την εφαρμογή μηχανικής τάσης (π.χ. κατά την κάμψη του υποστρώματος).

Συντελεστής ευαισθησίας (Gauge Factor, GF)

Η αντίσταση R μιας ταινίας μεταλλικού υλικού μήκους L , εμβαδού διατομής S και ειδικής αντίστασης ρ είναι:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα ολικού διαφορικού στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Η κλασματική μεταβολή του εμβαδού ενός ομογενούς υλικού συσχετίζεται κατά προσέγγιση με την κλασματική μεταβολή μήκους διαμέσου του λόγου Poisson, ν_m :

$$\frac{\Delta R}{R} \approx (1 + 2\nu_m) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει την κλασματική μεταβολή της αντίστασης και περιέχει έναν όρο εξαρτώμενο από το μήκος ($\frac{\Delta L}{L}$) και έναν όρο πιεζοαντίστασης ($\frac{\Delta \rho}{\rho}$) που εξαρτάται από την ιδιότητα κυρίου όγκου. Οι μετρητές παραμόρφωσης με μεταλλικό φύλλο αποτελούνται από ένα λεπτό μεταλλικό έλασμα με μονωτικό υποστήριγμα. Το φαινόμενο πιεζοαντίστασης στα μέταλλα είναι μικρό και έτσι η προηγούμενη εξίσωση παίρνει την μορφή:

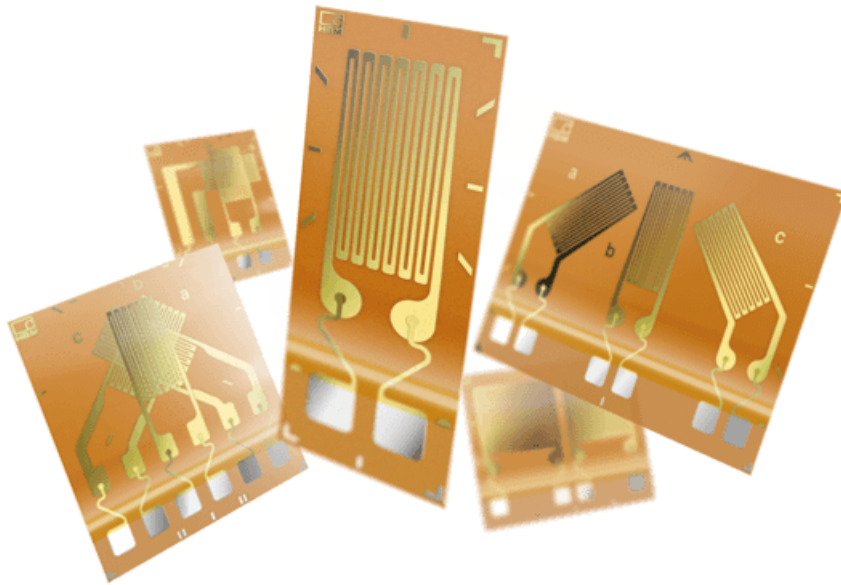
$$\frac{\Delta R}{R} \approx (1 + 2\nu_m) \frac{\Delta L}{L}$$

Ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης ή ευαισθησίας (Gauge Factor) του αισθητήρα ως:

$$g = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Σε αυτό το απλοποιημένο παράδειγμα, η αλλαγή στην αντίσταση, που αντιπροσωπεύει το σήμα εξόδου, είναι ευθέως ανάλογη με την καταπόνηση ϵ του αισθητήρα, που αντιπροσωπεύει

το σήμα εισόδου. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας των πρώτων εμπορικών μεταλλικών αισθητήρων. Μέχρι σήμερα, συνήθως, ένα λεπτό στρώμα από κράμα μετάλλων (π.χ. χαλκό-νικέλιο, νικέλιο-χρώμιο) σε μορφή μαιάνδρου, δομημένο σε εύκαμπτο υπόστρωμα είναι η συσκευή αισθητήρα, η αλλαγή της αντίστασης της οποίας μεταφράζεται σε τιμή παραμόρφωσης. Ο συντελεστής ευαισθησίας g ενός τέτοιου αισθητήρα είναι περίπου 2 έως 4 και η αντίστασή του κυμαίνεται σε μερικές εκατοντάδες Ω . Τα εύκαμπτα υποστρώματα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παραμορφώσεων από 0,001% έως 4%. Παρακάτω, φαίνεται παράδειγμα εύκαμπτων αισθητήρων παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.1: Εύκαμπτοι αισθητήρες παραμόρφωσης [28]

3.2 Φυσική των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια

3.2.1 Μοντέλα αγωγιμότητας

Τα νανοσωματίδια, λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο, παρουσιάζουν διαφορετικές οπτικές, ηλεκτρονικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες από τα μακροσκοπικά υλικά. Ένα από τα χαρακτηριστικά τους είναι η μεγάλη επιφάνεια επαφής τους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση νανοσωματιδίων ευγενών μετάλλων ως ενισχυμένων καταλυτών και τη χημική τροποποίηση της επιφάνειάς τους για την ανίχνευση μορίων σε συσκευές αισθητήρων. Η αγωγιμότητα σε μια δομή μεταλλικών νανοσωματιδίων, όπως ένα δισδιάστατο πλέγμα ή ένα νανосуρμα, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς συμβαίνουν κρίσιμα φαινόμενα κβαντικής αγωγιμότητας που δεν συμβαίνουν σε ένα συνεχές υλικό. Ακολουθούν διάφορες προσεγγίσεις της κλασικής και κβαντικής θεωρίας που βασίζονται στην πειραματική μελέτη της βιβλιογραφίας.

φίας μεταφοράς φορτίου σε τέτοιες δομές. Στο κλασικό μοντέλο αγωγιμότητας, τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσω του υλικού ως σωματίδια που σχεδιάζονται από τις ταλαντώσεις του πλέγματος του μετάλλου. Σε περίπτωση που τα νανοσωματίδια έρθουν σε επαφή, σχηματίζοντας μια συνεχή αγωγίμη διαδρομή, τα ηλεκτρόνια διασκορπίζονται λόγω διαφορετικών κρυσταλλικών επιπέδων των νανοσωματιδίων. Όταν το μέγεθος του νανοσωματιδίου μειώνεται σημαντικά, η ελαστική σκέδαση συμβάλλει σημαντικά στην αγωγιμότητα, καθώς η μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ δύο διαδοχικών σχεδιάσεων είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος του νανοσωματιδίου, αναγκάζοντας τα ηλεκτρόνια να διανύσουν μικρότερη διαδρομή πριν σχεδαστούν από το νανοσωματίδιο ή το λεπτό φιλμ. Δύο μοντέλα σκέδασης φορτίου έχουν προταθεί για τη σκέδαση ηλεκτρονίων σε λεπτές πολυκρυσταλλικές μεταλλικές μεμβράνες ή νανοσύρματα. Σύμφωνα με το μοντέλο των Fuchs και Sondheimer [29] που υπολόγισαν πειραματικά την ειδική αντίσταση λεπτών φιλμ, όταν το πάχος μιας μεταλλικής μεμβράνης είναι συγκρίσιμο με τη μέση ελεύθερη διαδρομή l του μακροσκοπικού υλικού, τότε ένα ποσοστό των ηλεκτρονίων υπόκειται σε σκέδαση που οδηγεί σε διάχυση στα σύνορα του φιλμ. Επομένως, η διέλευση του φορτίου γίνεται πιο δύσκολη και η ειδική αντίσταση αυξάνεται. Αργότερα, οι Mayadas και οι Shatzkes πρότειναν το μοντέλο της «κατοπτρικής σκέδασης» ηλεκτρονίων στα όρια των κόκκων σε ένα πολυκρυσταλλικό φιλμ [30]. Επομένως, καθώς το πάχος ή το πλάτος του φιλμ ενός νανοσύρματος ή συσσωματώματος νανοσωματιδίων μειώνεται, οι διακριτοί κόκκοι που συνθέτουν το υλικό αυξάνονται και το μέσο μέγεθός τους μειώνεται, καθιστώντας το συγκρίσιμο ή μικρότερο από l και επομένως το υλικό ειδικής αντίστασής του αυξάνεται. Σύμφωνα με το μοντέλο των Mayadas και Shatzkes, η ειδική αντίσταση του υλικού θα δοθεί από την ακόλουθη εξίσωση [31]:

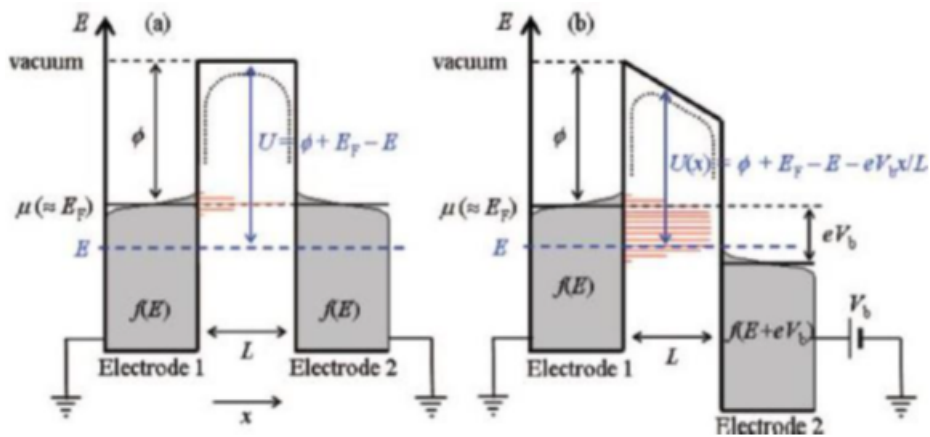
$$\rho = \frac{\rho_0}{3 \left(\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2} + \alpha^2 + \alpha^3 \ln \left(\frac{1}{\alpha} + 1 \right) \right)}$$

Όπου $\alpha = \frac{lR}{D_g(1-R)}$, R ο συντελεστής ανάκλασης των ηλεκτρονίων από τα σύνορα των κόκκων και D_g η μέση διάμετρος των κόκκων.

Οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις φαίνεται να εξηγούν ικανοποιητικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσυρμάτων Au και Cu ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους. Επιπλέον, στο έργο των Durkan et al. [32] και Huang et al. [33], προτείνεται ότι η ειδική αντίσταση σε λεπτά φιλμ εξαρτάται από τη μέση ελεύθερη διαδρομή, το πάχος και το πλάτος του φιλμ, το ποσοστό των ηλεκτρονίων που σχεδιάζονται στη διεπιφάνεια των κόκκων και το μέσο μέγεθος κόκκου. Ως αποτέλεσμα, η αγωγιμότητα στο απόλυτο μηδέν είναι χαμηλότερη -και επομένως η ειδική αντίσταση είναι μεγαλύτερη- στην περίπτωση των νανοσωματιδίων, καθώς η ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία ελαστική σκέδαση λόγω των φαινομένων κλίμακας συμβάλλει σημαντικά. Αναφέρεται ότι οι τιμές ειδικής αγωγιμότητας των φιλμ νανοσωματιδίων έχουν μετρηθεί χαμηλότερες από τις τιμές συνεχών υλικών για διάφορα μέταλλα, όπως ο χρυσός και το ασήμι. Για παράδειγμα, η ειδική αγωγιμότητα των μεμβρανών νανοσωματιδίων Au βρέθηκε να κυμαίνεται από $10^{-1} \Omega^{-1} \text{ cm}$ έως $2.5 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \text{ cm}$, σε σχέση με την ειδική αγωγιμότητα του bulk Au που είναι έτσι ίση με $4.5 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \text{ cm}$.

Όταν η διάταξη των νανοσωματιδίων στο χώρο είναι τέτοια που οι αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων τους είναι μεγάλες (π.χ. αρκετά nm), τότε η αντίσταση του φιλμ νανοσωματιδίων

είναι πολύ υψηλή, καθώς το φορτίο δεν μπορεί να διαδοθεί στο κενό μεταξύ δύο νανοσωματιδίων. Ωστόσο, όταν τα νανοσωματίδια είναι πολύ κοντά, σε απόσταση 1-2 nm, τότε υπάρχει πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να μεταφερθεί από το ένα νανοσωματίδιο στο άλλο μέσω ενός φαινομένου σήραγγας (tunneling effect). Τα φαινόμενα σήραγγας επιτρέπουν την ροή φορτίου μεταξύ ασθενώς συζευγμένων νησίδων νανοσωματιδίων (περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει σημαντική επικάλυψη μεταξύ των κυματοσυναρτήσεων των νησίδων και αυτές εντοπίζονται κυρίως εντός των νησίδων). Αν προσεγγίσουμε δύο γειτονικά μεταλλικά νανοσωματίδια, ως ηλεκτρόδια με απόσταση L , μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται διηλεκτρικό μέσο με διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και υπάρχει φράγμα δυναμικού U , τότε το ενεργειακό διάγραμμα των δύο νανοσωματιδίων χωρίς και με ασκούμενη εξωτερική διαφορά δυναμικού, V_b , αντίστοιχα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.2: Ενεργειακά διαγράμματα για μία ζεύξη σήραγγας αποτελούμενη από δύο ηλεκτρόδια για (a) $V_b=0$ και (b) $V_b > 0$ [34]

Το φράγμα δυναμικού δίνεται από την εξίσωση:

$$U = \phi_m + E_F - E$$

Όπου ϕ_m είναι η ενέργεια εξαγωγής μετάλλου, E_F είναι η ενέργεια επιπέδου Fermi και E είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων. Κάθε διηλεκτρικό μέσο δίνει έναν x όρο ηλεκτροσυγγένειας του μέσου, που μειώνει αυτό το φράγμα δυναμικού αλλά αγνοείται με την πρώτη ματιά (π.χ. για απόλυτο κενό $x = 0$). Η πιθανότητα μια στάθμη ενέργειας E να καταλαμβάνεται από το ηλεκτρόνιο στο ένα ηλεκτρόδιο και να είναι άδεια στο άλλο, έτσι ώστε να συμβεί σήραγγα, είναι $f(E)(1 - f(E))$, όπου $f(E)$ η συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac της πιθανότητας κατάληψης ενός ενεργειακού επιπέδου E .

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - \mu}{kT}}}$$

Η εφαρμογή μιας εξωτερικής διαφοράς δυναμικού V_b στα δύο ηλεκτρόδια θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ενεργειακών σταθμών των ηλεκτροδίων και την τροποποίηση του

φράγματος δυναμικού, το οποίο σε μια πρώτη προσέγγιση δίνεται ως εξής:

$$U = \phi_\mu + E_F - E - \frac{eV_b x}{L} + \phi_{\text{image}}$$

Το εικονικό δυναμικό φόρτισης ϕ_{image} είναι μια συμβολή που λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο του Simmons [35], σύμφωνα με το οποίο, όταν το ηλεκτρόνιο φεύγει από το ηλεκτρόδιο, το φορτίζει, προκαλώντας ένα εικονικό αντίθετο φορτίο που ασκεί δύναμη στο ηλεκτρόνιο και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\phi_{\text{image}} = -1.15 \cdot \frac{e^2 \ln 2}{16\pi\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{L}{x(L-x)}$$

Όπου ϵ_0 και ϵ_r οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές του κενού και του μέσου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το ύψος του φράγματος τροποποιείται ως εξής:

$$U = \phi_\mu + E_F - E - \frac{eV_b x}{L} - 1.15 \cdot \frac{e^2 \ln 2}{16\pi\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{L}{x(L-x)}$$

Το συνολικό δυναμικό προσεγγίζεται με μια μέση τιμή που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\bar{U} = \frac{1}{L} \int_0^L U(x) dx$$

Λόγω της πεπερασμένης πιθανότητας ένα ηλεκτρόνιο από το επίπεδο Fermi να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού και να βρισκείται στο επίπεδο Fermi του γειτονικού ηλεκτροδίου, υπάρχει ρεύμα ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο στο χαμηλότερο δυναμικό προς το ηλεκτρόδιο στο υψηλότερο δυναμικό, όπως και ρεύμα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το ρεύμα σήραγγας προκύπτει από την αφαίρεση των δύο ρευμάτων και δίνεται από την εξίσωση:

$$I_t = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_0^{+\infty} \rho(E)\rho(E+eV_b)|T(E)|^2 [f(E) - f(E+eV_b)] dE$$

Όπου $\rho(E)$ και $\rho(E+eV_b)$ είναι οι πυκνότητες καταστάσεων στο ενεργειακό επίπεδο E σε ένα νανοσωματίδιο και στο ενεργειακό επίπεδο $E+V_b$ στο διπλανό νανοσωματίδιο με το υψηλότερο δυναμικό αντίστοιχα.

$$|T(E)|^2 \sim e^{-2\kappa L}$$

Όπου $T(E)$ είναι η πιθανότητα διέλευσης από μια σήραγγα, η οποία εξαρτάται εκθετικά από την απόσταση s και τη σταθερά απόσβεσης κ που δίνεται από την εξίσωση:

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m_e \bar{U}}{\hbar^2}}$$

Για τιμές ενέργειας E πολύ κοντά στο επίπεδο Fermi και χαμηλές τιμές $eV_b \ll E_F$ προκύπτει με βάση τα παραπάνω η σχέση:

$$I_t = \frac{4\pi e}{\hbar} \rho(E_F)^2 |T(E)|^2 \int_0^{+\infty} [f(E) - f(E+eV_b)] dE = GV_d$$

Όπου $G = \frac{4\pi e}{h} \rho(E_F)^2 |T(E)|^2$ είναι η αγωγιμότητα του φαινομένου της σήραγγας για πολύ χαμηλές τιμές V_b . Από τα παραπάνω διασφαλίζεται ότι η ειδική αγωγιμότητα μιας σήραγγας μεταξύ δύο νανοσωματιδίων ακολουθεί την εξάρτηση:

$$\sigma \propto \exp(-\beta L)$$

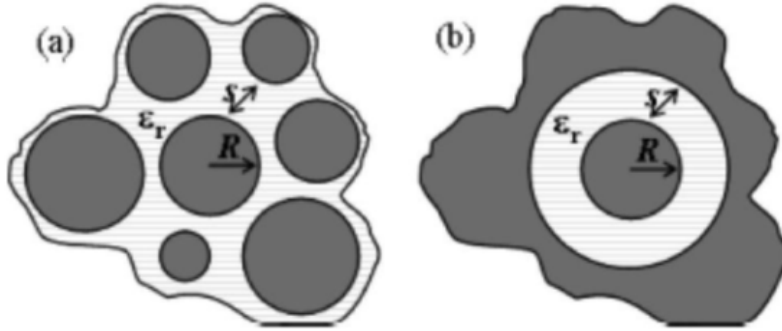
Όπου $\beta = 2k$ η σταθερά σύζευξης των ηλεκτρονίων. Η αγωγιμότητα σήραγγας είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

Οι επιφάνειες των χημικά παρασκευασμένων φιλμ νανοσωματιδίων έχουν μοριακές αλυσίδες που γεφυρώνουν τα νανοσωματίδια μεταξύ τους, κρατώντας τα σε απόσταση. Σε αυτή την περίπτωση, η σταθερά β εξαρτάται από τον τύπο του μορίου και το μέγεθος του νανοσωματιδίου, καθώς συνήθως το φράγμα δυναμικού είναι χαμηλότερο από τα «γυμνά» νανοσωματίδια, λόγω του ενεργειακού χάσματος κάθε μορίου που σχηματίζει το φράγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το β να είναι μικρότερο και επομένως το ρεύμα της σήραγγας μέσω αυτών των ενδιάμεσων μορίων να είναι μεγαλύτερο. Πρόσθετες συνεισφορές στο φράγμα δυναμικού προέρχονται από το δυναμικό που αντιστοιχεί στο φορτίο του χώρου των ηλεκτρονίων και το δυναμικό ανταλλαγής-συσχέτισης ηλεκτρονίων [36]. Το τελευταίο σχετίζεται με την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου που συμβαίνει με βάση τη θεωρία της ύπαρξης ενός σωματιδίου σε ένα νέφος ηλεκτρονίων. Σύμφωνα με τον Zhang [37], η συνεισφορά αυτών των δύο τελευταίων όρων στον υπολογισμό του ρεύματος της σήραγγας έχει ως αποτέλεσμα έναν διαφορετικό υπολογισμό του ρεύματος σήραγγας από αυτόν που προβλέπεται από το μοντέλο του Simmons, και έτσι εισάγεται ένα νέο αυτοσυνεπές μοντέλο (Self Consistency Model, SCM). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το μοντέλο Simmons ισχύει για πλάκες παράλληλων ηλεκτροδίων, ενώ για σφαιρικά ηλεκτρόδια ισχύει όταν $L \ll r$, με r την ακτίνα των ηλεκτροδίων. Για εφαρμοζόμενο δυναμικό $V_b < 1$ και εύρος $L = 1\text{nm}$, το μοντέλο Simmons υπολογίζει ικανοποιητικά το ρεύμα της σήραγγας, αλλά στην περιοχή των υψηλότερων τιμών V_b , $1 < V_b < 10\text{V}$, η εκτίμηση της συμβολής των δύο δυναμικών προβλέπει μεγαλύτερο ρεύμα σήραγγας (περίπου κατά 1 τάξη μεγέθους μεγαλύτερο), αν και το μοντέλο του Simmons εξακολουθεί να είναι ακριβές. Αντίθετα, στην περιοχή $V_b > 10\text{V}$, το μοντέλο Simmons δεν μπορεί να εφαρμοστεί και το SCM πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αναφέρεται επίσης ότι για $L < 1\text{nm}$ (επαφές υπο-νανομέτρων) το μοντέλο SCM δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα.

3.2.2 Επίδραση φαινομένων φόρτισης

Η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου σε ένα μεταλλικό νανοσωματίδιο απαιτεί την παροχή μιας ποσότητας ενέργειας για να φορτιστεί το ουδέτερο νανοσωματίδιο και κατά συνέπεια να δημιουργηθεί μια οπή στο αρχικό νανοσωματίδιο. Αυτό το φορτίο είναι ισοδύναμο με ένα φραγμό δυναμικού που πρέπει να ξεπεράσει το ηλεκτρόνιο, το λεγόμενο φράγμα Coulomb. Σε θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν, το ηλεκτρόνιο έχει μια πεπερασμένη ποσότητα θερμικής ενέργειας, η οποία του επιτρέπει να υπερπηδήξει το φράγμα Coulomb καθώς η θερμική ενέργεια υπερβαίνει τη τιμή της δυναμικής. Αυτή η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια ονομάζεται επίσης ενέργεια ενεργοποίησης και σχετίζεται με το μέγεθος του νανοσωματιδίου [38, 39]. Συγκεκριμένα για μειούμενη διάμετρο νανοσωματιδίου απαιτούνται και μεγαλύτερες ενέργειες

ενεργοποίησης, όπως είναι και αναμενόμενο, κάτι το οποίο φαίνεται να προκύπτει από την φόρτιση των νανοσωματιδίων με φορείς αγωγιμότητας. Μία προσέγγιση για να προκύψει η έκφραση για την ενέργεια φόρτισης ενός νανοσωματιδίου είναι να θεωρηθεί το νανοσωματίδιο (ακτίνας R) διαχωρισμένο, με μία μέση απόσταση s , από ένα αγώγιμο περιβάλλον νανοσωματιδίων [40] όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 3.3: Αγώγιμο νανοσωματίδιο ακτίνας R διαχωρισμένο από αγώγιμο περιβάλλον με διηλεκτρικό μέσο σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r και με μία μέση απόσταση s . [41]

Ανάμεσα στο νανοσωματίδιο και στο αγώγιμο περιβάλλον μπορεί γενικά να υποτεθεί διηλεκτρικό με διηλεκτρική σταθερά ϵ_r . Σε αυτή την προσέγγιση η χωρητικότητά του νανοσωματιδίου είναι:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+s} \right)^{-1}$$

Η ενέργεια λόγω του φορτίου του νανοσωματιδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$E_C = \frac{e^2}{2C}$$

Και καταλήγουμε στη σχέση:

$$E_C = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+s} \right)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ενέργεια ενεργοποίησης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ακτίνα και την απόσταση μεταξύ των σωματιδίων, καθώς και με τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου. Επομένως, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του σωματιδίου, τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για την ηλεκτροστατική φόρτιση του σωματιδίου. Με βάση αυτό το αποτέλεσμα, προτάθηκε το μοντέλο του θερμικά ενεργοποιημένου φαινομένου σήραγγας, σύμφωνα με το οποίο η ειδική αγωγιμότητα ενός συνόλου νανοσωματιδίων εξαρτάται από την πιθανότητα των ηλεκτρονίων να διέρχονται μέσω φαινομένου σήραγγας και την πιθανότητα υπερπήδησης τού φράγματος Coulomb σε σχέση με τη θερμική κατάσταση του συστήματος. Το μοντέλο μπορεί να συνοψιστεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\beta s} e^{-\frac{E_C}{kT}}$$

Όπου σ_0 είναι μια εκθετική σταθερά. Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία ακολουθεί μια εξίσωση Arrhenius:

$$\ln \sigma \propto -\frac{1}{r}$$

Όπου η αγωγιμότητα, λόγω του φράγματος Coulomb, αυξάνεται λόγω της θερμοκρασίας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια, με αυξημένη θερμοκρασία, είναι στατιστικά πιο πιθανό να υπερπηδήσουν το φράγμα Coulomb μεταξύ των νανοσωματιδίων, λόγω της θερμικής τους ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, η θερμοκρασιακή συμπεριφορά της αγωγιμότητας διαφέρει από την κλασική θεωρία των μετάλλων, στην οποία η αγωγιμότητα μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία (και η αντίσταση) ως αποτέλεσμα της διασποράς των φωνονίων του πλέγματος του υλικού. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα μεταξύ δύο νανοσωματιδίων αποτελείται από μια αντίσταση και μια χωρητικότητα που συνδέονται παράλληλα. Αυτό το μοντέλο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και, όπως αναφέρεται παρακάτω, υπάρχουν διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας. Επιπλέον, μπορεί να παρουσιάσει διάφορους μηχανισμούς αγωγιμότητας, ανάλογα με τη δομή του φιλμ νανοσωματιδίων. Όπως μπορεί να εξαχθεί από τις προηγούμενες εξισώσεις, όταν η θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων $\sim kT$ γίνεται συγκρίσιμη με την ενέργεια φορτίου, ο όρος $\exp(-E_C/(kT))$ συμβάλλει σημαντικά καθώς τα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να ξεπεράσουν το φράγμα Coulomb και το ρεύμα αυξάνεται. Αυτό εκδηλώνεται επίσης από τη σχέση ρεύματος-τάσης $I(V)$. Από πειραματικές μελέτες δομών νανοσωματιδίων έχει προκύψει εμπειρικά ένας νόμος ισχύος στη σχέση ρεύματος-τάσης, ο οποίος συνοψίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$I \propto (V - V_t)^\zeta$$

Όπου $V_t = \alpha N E_c$ είναι η τιμή της οριακής τάσης με α μια παράμετρο που εξαρτάται από τη διάσταση και τη γεωμετρία ενός συστήματος και N ο αριθμός των σωματιδίων που δημιουργούν μια αγωγή διαδρομή από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Η παράμετρος ζ παίρνει συνήθως τιμές από 2 έως 3.5 και εξαρτάται από τη διάσταση του συστήματος. Η παραπάνω σχέση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι λόγω του φράγματος Coulomb υπάρχει μια κρίσιμη οριακή τάση πάνω από την οποία το ηλεκτρόνιο έχει επαρκή ποσότητα ενέργειας για να πηδήξει πάνω από το φράγμα. Θεωρητικά, κάτω από αυτή την τάση το ρεύμα είναι μηδέν για $T = 0$, καθώς τα ηλεκτρόνια δεν έχουν διαθέσιμη θερμική ενέργεια, ενώ απαιτείται μια τάση κατωφλίου που θα τους παρέχει αυτήν την ενέργεια. Σε μια θερμοκρασία $T > 0$ θα υπάρχει πάντα ένα ρεύμα λόγω του φαινομένου σήραγγας και του φαινομένου Joule, καθώς ορισμένα ηλεκτρόνια θα μπορούν να ξεπεράσουν στατιστικά το φράγμα. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η συμβολή του δεύτερου μηχανισμού θα γίνεται πιο σημαντική. Επιπλέον, η τιμή του V_t εξαρτάται από τη θερμοκρασία, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα ηλεκτρόνια απαιτούν χαμηλότερη τάση κατωφλίου λόγω της αυξημένης θερμικής ενέργειας.

Η πειραματική επίδειξη μηχανισμών αγωγιμότητας που αποκλίνουν από την εξάρτηση του Arrhenius από τα φιλμ νανοσωματιδίων οδήγησε στη διαμόρφωση άλλων μοντέλων αγωγιμότητας για να εξηγήσουν αυτές τις αποκλίσεις. Αυτές οι αποκλίσεις φαίνεται να έχουν την προέλευσή τους στην απόκλιση του σχήματος, του μεγέθους και των αποστάσεων μεταξύ των σωματιδίων των μεταλλικών νανοσωματιδίων που στην πραγματικότητα παρουσιάζουν τα φιλμ.

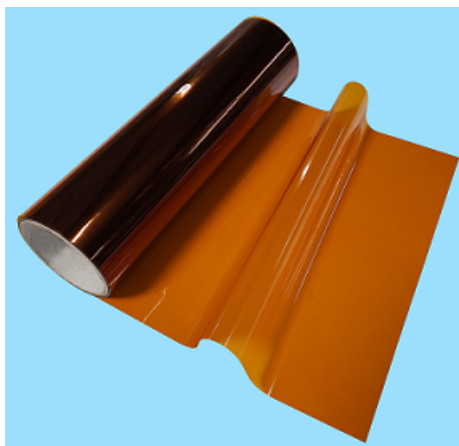
Κατά συνέπεια, προκύπτει διασπορά των τιμών της ενέργειας φόρτισης και η τροποποίησή της σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η εξάρτηση αγωγιμότητας-θερμοκρασίας μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sigma \approx e^{-\left(\frac{T}{T_0}\right)^\nu}$$

Όπου T_0 μια σταθερά και ν μια παράμετρος που παίρνει τιμές από 0 ως 1. Στην περίπτωση όπου $\nu = 1$, η παραπάνω σχέση εκφράζει την εξάρτηση Arrhenius. Η περίπτωση με $\nu = 1/2$ συνήθως έχει παρατηρηθεί [42] σε περιβάλλον με χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στην τελευταία περίπτωση, έχει προταθεί το μοντέλο του άλματος ηλεκτρονίων (electron jumping/hopping) με βάση το μοντέλο του Mott [43] για τις μεταπτώσεις φορτίου ενέργειας σε ημιαγωγούς με προσμίξεις. Σύμφωνα με το μοντέλο του Mott, υπάρχει η πιθανότητα ένα φορτίο στην ενεργειακή κατάσταση E_i με την κατάλληλη θερμική ενέργεια να μεταπηδήσει σε άλλο σημείο του πλέγματος σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση E_j . Σε αυτή την διαδικασία η μεταπήδηση στην κοντινότερη διαθέσιμη “γειτονική” τοποθεσία δεν είναι πάντα η προφανής επιλογή μια και μπορεί να υπάρχουν ενεργειακά προτιμότερες τοποθεσίες (μικρότερο ΔE_{ij}) σε πιο απομακρυσμένα σωματίδια. Η διαδικασία μεταπήδησης όμως μέσω φαινομένων σήραγγας δυσχεραίνεται για αυξανόμενες αποστάσεις μεταξύ τοποθεσιών και τελικά η ενεργειακά βέλτιστη επιλογή μέσω αυτών των δυο διαδικασιών οδηγεί σε κλασματικές τιμές τον συντελεστή ν .

3.3 Γενικά περί αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια

Ο κύριος λόγος για τον οποίο μιλάμε για αισθητήρες παραμόρφωσης με βάση νανοσωματίδια είναι η αυξημένη ευαισθησία των αισθητήρων παραμόρφωσης που βασίζονται σε υμένα νανοσωματιδίων [44–47], σε σύγκριση με τους υπάρχοντες μεταλλικούς αισθητήρες παραμόρφωσης που ενσωματώνουν τεχνολογία λεπτών υμενίων [48]. Επιπλέον, οι χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας που απαιτούνται στην περίπτωση των διατάξεων ανίχνευσης παραμόρφωσης με βάση τα νανοσωματίδια, τις καθιστούν πλήρως συμβατές με την τεχνολογία εύκαμπτων υποστρωμάτων [49]. Αυτές οι ιδιότητες τούς επιτρέπουν να βρουν νέες εφαρμογές, για παράδειγμα, στην υγειονομική περίθαλψη και στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών περιοχών δέρματος [50]. Για το λόγο αυτό, πολλές ερευνητικές ομάδες εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στην αύξηση της ευαισθησίας των αισθητήρων με βάση τα νανοσωματίδια. Για να το επιτύχουν αυτό, συνήθως ενσωματώνουν νανο-υμένα με διαφορετικές αγωγιμότητες, ώστε να ρυθμίζουν τους μηχανισμούς μεταφοράς φορτίου της διάταξης [44]. Οι Lee et al., για παράδειγμα, μελέτησαν τον συνδυασμό μεταλλικών και μονωμένων νανοσωματιδίων ως ευαίσθητων υλικών συνδυάζοντας νανοσωματίδια Au, CdSe και νανορωγμές [51]. Ως αποτέλεσμα, έχει επιτευχθεί ένας συντελεστής ευαισθησίας έως και 5045. Στον τομέα των βιο-αισθητήρων, έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά ρωγμές, έτσι ώστε να αυξηθεί ριζικά η ευαισθησία του αισθητήρα. Στη μελέτη των Han et al., δημιουργήσαν έναν αισθητήρα παραμόρφωσης βασισμένο σε ρωγμές, εναποθέτοντας νανοσωματίδια Au πάνω από ένα ραγισμένο υπόστρωμα PDMS, αποκτώντας έτσι μια ευαισθησία 5888. Ωστόσο, υψηλές ευαισθησίες είναι επίσης δυνατές χωρίς ρωγμές



Σχήμα 3.4: Πολυϊμίδιο Kapton [57]

στο υπόστρωμα. Στην περίπτωση των Shengbo et al. [52] συνδύασαν τα νανοσωματίδια Ag και νανوسύρματα, επιτυγχάνοντας ευαισθησία έως και 3766. Οι προαναφερθείσες μελέτες επικεντρώθηκαν στην αύξηση της ευαισθησίας των αισθητήρων παραμόρφωσης με τη χρήση διαφόρων νανοσωματιδίων.

3.4 Δομή των εύκαμπτων αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας

Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται σε αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια Pt, τα οποία κατασκευάζονται σε υποστρώματα οξειδωμένου πυριτίου μέσω της τεχνικής DC sputtering. Οι Zheng et al. [53] κατασκεύασαν επίσης εύκαμπτους αισθητήρες παραμόρφωσης βασισμένους σε νανοσωματίδια (Cr) χρησιμοποιώντας την τεχνική DC sputtering, τονίζοντας την ανώτερη απόδοσή τους έναντι των μετρητών ημιαγωγών. Οι αισθητήρες νανοσωματιδίων Pt επιδεικνύουν αυξημένη ευαισθησία [54], αλλά χρειάζονται μέτρα για την προστασία τους από την υγρασία, όπως είναι η επικάλυψη με Αλουμίνα (Al_2O_3) [55]. Συνοπτικά, για την προετοιμασία των αισθητήρων χρειάζεται να ολοκληρωθούν οι διαδικασίες εναπόθεσης αλουμίνας, εναπόθεσης νανοσωματιδίων και εναπόθεσης ηλεκτροδίων, η πρώτη εκ των οποίων δεν είναι υποχρεωτική.

3.4.1 Υπόστρωμα Kapton

Για την κατασκευή του αισθητήρα είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η απόσταση των νανοσωματιδίων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του εύκαμπτου πολυϊμιδίου Kapton [56] που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για τα νανοσωματίδια και ταυτόχρονα παρέχει μηχανική στήριξη, ελαστικότητα και σταθερότητα των διαστάσεών του σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, καθώς επίσης αντοχή και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ιδιότητα θεμιτή κατά την κατασκευή του αισθητήρα.

Γενικά, πέραν από το πολυϊμίδιο Kapton μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον αισθητήρα θεω-

ρητικά οποιοδήποτε ελαστικό υλικό που μπορεί να αντέξει τις θερμοκρασίες και πιέσεις της διαδικασίας εναπόθεσης ηλεκτροδίων και νανοσωματιδίων. Ένα τέτοιο υλικό είναι η αλουμίνα (Al_2O_3), αλλά και άλλα οξείδια, όπως η χαφνία (HfO_2), η πυριτία (SiO_2) και η τιτανία (TiO_2).

3.4.2 Εναπόθεση νανοσωματιδίων

Η εναπόθεση των νανοσωματιδίων πάνω στο υπόστρωμα πραγματοποιείται μέσω DC sputtering, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4. Η επιφανειακή κάλυψη του υποστρώματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται η διάρκεια της διαδικασίας sputtering. Εν προκειμένω, επετεύχθη επιφανειακή πυκνότητα νανοσωματιδίων πλατίνας της τάξης του $2 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$. Η σχέση μεταξύ της επιφανειακής κάλυψης των νανοσωματιδίων και της ευαισθησίας του αισθητήρα έχει ήδη διερευνηθεί [54], οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι οι συσκευές με τις καλύτερες επιδόσεις επιτυγχάνονται όταν η επιφανειακή κάλυψη είναι ακριβώς κάτω από το κατώφλι διήθησης (επιφανειακή κάλυψη νανοσωματιδίων $\approx 50\%$).

3.4.3 Εναπόθεση ηλεκτροδίων

Το τελευταίο βήμα για την κατασκευή των αισθητήρων περιλαμβάνει την εναπόθεση ηλεκτροδίων χρυσού πάνω στα νανοσωματίδια με τη χρήση φυσικής εναπόθεσης ατμών. Για να επιτευχθεί αυτό αξιοποιείται η μέθοδος εξάχνωσης με κανόνι ηλεκτρονίων (e-gun evaporation), όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.4. Για τους αισθητήρες χρειάστηκε να αφαιρεθεί μια λωρίδα κατάλληλου πάχους ακάλυπτη από ηλεκτρόδιο. Αυτή η περιοχή θα δράσει ως η αισθητήρια πηγή του ανιχνευτή. Για να μείνει ακάλυπτη αυτή η λωρίδα, χρησιμοποιήθηκε μία μάσκα (shadow mask) [58], η οποία είναι μία μεταλλική λωρίδα που τοποθετείται ανάμεσα στην τροχιά των ατμών του στόχου και του υποστρώματος. Η κατασκευή των ηλεκτροδίων απαιτούσε τη χρήση δύο μετάλλων. Το πρώτο ήταν τιτάνιο που εναποτέθηκε μέσω εξάτμισης με ηλεκτρονική δέσμη σε πάχος περίπου 10nm και λειτουργούσε ως στρώμα προσκόλλησης, ενώ το δεύτερο χρυσός πάχους 50nm που εναποτέθηκε με θερμική εξάτμιση πάνω από το τιτάνιο, για να αποφευχθεί η οξειδωση των ηλεκτροδίων.

3.5 Επικάλυψη αλουμίνας

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η εναπόθεση αλουμίνας δεν αποτελεί υποχρεωτική διαδικασία. Ωστόσο, η χρήση αυτής σύμφωνα με τη βιβλιογραφία φαίνεται να διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην προστασία και απόδοση του αισθητήρα.

3.5.1 Προστασία κατά της υγρασίας

Η υγρασία είναι γνωστό ότι επηρεάζει τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια [59] και για αυτό καθίσταται κρίσιμη η διερεύνηση της σχέσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο. Τα χαρακτηριστικά αντοχής των αισθητήρων παραμόρφωσης σε εύκαμπτα υποστρώματα, οι οποίοι βασίζονται σε διασυνδεδεμένα νανοσωματίδια χρυσού, μετά την εκτέλεση μεγάλου αριθμού κύκλων παραμόρφωσης-χαλάρωσης έχουν επίσης

αναφερθεί από τους Ketelsen et al. [60]. Ωστόσο, κατά τις δοκιμές τους δεν πραγματοποιείται καμία τροποποίηση του περιβάλλοντος υγρασίας. Όπως έχει προταθεί από τους Digianantonio et al. [61] χρησιμοποιώντας μετρήσεις SAXS (Small-angle X-ray scattering), τα μόρια νερού που ενσωματώνονται μεταξύ των νανοσωματιδίων έχουν ως αποτέλεσμα τη διόγκωση του φιλμ νανοσωματιδίων που αυξάνει την αντίσταση του δικτύου νανοσωματιδίων με ανταγωνιστικό τρόπο στη μετρούμενη τάση. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να διερευνηθεί ο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας των εύκαμπτων αισθητήρων παραμόρφωσης από την υγρασία, καθώς και η αποτελεσματικότητα της ίδιας της προστασίας σε αυξημένη καταπόνηση, που προσφέρεται από την αυξημένη ευκαμψία του υποστρώματος πολυϊμιδίου. Μια απροστάτευτη συσκευή έχει την τάση να είναι πιο ευαίσθητη και, εκτός αυτού, όπως αναφέρεται από τους Kano et al. [62], έχει γραμμική απόκριση στην υγρασία και θα μπορούσε επομένως να χρησιμοποιηθεί επίσης ως αισθητήρας υγρασίας. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αβεβαιότητα της τιμής του εφαρμοζόμενου εξωτερικού ερεθίσματος καθώς και σε αύξηση του ορίου ανίχνευσης τάσεων του αισθητήρα. Τούτου λεχθέντος, η διατήρηση της υψηλής ευαισθησίας των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια -χωρίς όμως να συσχετίζονται με οποιεσδήποτε μεταβολές της υγρασίας- είναι ζωτικής σημασίας για τη χρήση τους. Στην εργασία των Aslanidis et al. [63] αξιολογήθηκε η ικανότητα λεπτών υμενίων Al_2O_3 που αναπτύχθηκαν με τη μέθοδο ALD, να λειτουργούν ως προστατευτικές επιστρώσεις έναντι της υγρασίας, ενώ βρίσκονται σε δυσμενείς συνθήκες, όπως διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας και επαναλαμβανόμενες μηχανικές καταπονήσεις. Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικά πάχη αλουμίνιας (5 και 11 nm) και μελετήθηκε η επίδρασή τους στην προστασία από την υγρασία μέσω της παρακολούθησης της αντίστασης του αισθητήρα. Ακόμη και στην περίπτωση δυσμενών συνθηκών εργασίας και για αυξημένη μηχανική καταπόνηση (έως 1.2%), διαπιστώνεται ότι ένα στρώμα αλουμίνιας 11nm παρέχει επαρκή προστασία του αισθητήρα. Όσον αφορά τα εύκαμπτα υποστρώματα που μελετήθηκαν, η επιστροφή αλουμίνιας πάχους 5.5nm δεν μπόρεσε να προστατεύσει τον αισθητήρα από την υγρασία. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό είναι ο σχηματισμός ρωγμών στο στρώμα αλουμίνιας σε υψηλές τιμές παραμόρφωσης, γεγονός που δημιουργεί ελεύθερες διαδρομές για τη διείσδυση των μορίων του νερού στο φιλμ. Με βάση την εργασία των Patsiouras et al. [55], η επιστροφή με ένα προστατευτικό στρώμα τουλάχιστον 10nm πάχους Al_2O_3 φαίνεται να λύνει το μακροπρόθεσμο πρόβλημα απορρόφησης υγρασίας.

3.5.2 Ρωγμές (Cracks) αλουμίνιας

Τα πειράματα παραμόρφωσης προκαλούν ρωγμές στη μεμβράνη αλουμίνιας, οι οποίες ενισχύουν την μετατόπιση των νανοσωματιδίων κοντά στις ρωγμές, με αποτέλεσμα να έχουν πολύ υψηλότερο GF -όπως έχει ήδη αναφερθεί από τους Ketelsen et al. [60] που πραγματοποίησαν δοκιμές κόπωσης σε αισθητήρες με διασυνδεδεμένα νανοσωματίδια χρυσού. Αναφέρθηκε ότι μετά από 1000 κύκλους καταπόνησης παρατηρήθηκε αύξηση της αντίστασης κατά 5%, αλλά στη συνέχεια η απόδοση του αισθητήρα παρέμεινε αμετάβλητη για έως και 10000 κύκλους. Η ομάδα απέδωσε αυτή τη συμπεριφορά στο σχηματισμό μικρορωγμών μέσα στο φιλμ των δικτυωμένων νανοσωματιδίων. Γενικά, έχουν γίνει αρκετές αναφορές [64-66] για την βελτίωση της

ευαισθησίας του αισθητήρα με cracks αλουμίνας. Πολλές ερευνητικές ομάδες που μελέτησαν την επίδραση των ραγισμένων μεταλλικών μεμβρανών στην παραμόρφωση [65, 67–74], αποδίδουν την αυξημένη ευαισθησία στο σταδιακό άνοιγμα των ρωγμών που έχει ως αποτέλεσμα τη διάρρηξη της συνέχειας του μεταλλικού φιλμ που αυξάνει σημαντικά την ειδική αντίσταση της παραμορφωμένης μεμβράνης. Ωστόσο, οι αισθητήρες με βάση τις ρωγμές μετάλλου δεν παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας, καθώς η ευαισθησία εξαρτάται από τη μεταβολή της διαφορικής αντίστασης στην εφαρμοζόμενη τάση και είναι πολύ υψηλή όταν οι ρωγμές είναι ανοιχτές, ενώ για μικρές παραμορφώσεις η συνέχεια του φιλμ δεν διαταράσσεται ιδιαίτερα, επομένως η ευαισθησία παραμένει σχετικά χαμηλή. Οι Zou et al. [68] κατάφεραν να αναπτύξουν έναν αισθητήρα παραμόρφωσης με ρωγμές σε ένα υπόστρωμα πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (PDMS) με σχηματισμό ρωγμών που μπορούσε να προβλεφθεί, ο οποίος είναι ικανός να επιτύχει GF έως και 2585 όταν η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από 60%. Στη μελέτη τους, οι Kang et al. [64] κατέδειξαν για πρώτη φορά έναν αισθητήρα τάσης με βάση τη ρωγή σε ένα υπόστρωμα ακρυλικής πολυουρεθάνης (PUA) με $GF \approx 2000$ για παραμορφώσεις έως και 2% και οι Li et al. [71] ανέπτυξαν έναν αισθητήρα με βάση ρωγμές σε PDMS χρησιμοποιώντας ένα ραγισμένο φιλμ Ag ως αισθητήριο υλικό, επιτυγχάνοντας έτσι $GF \approx 44013$ για τιμή παραμόρφωσης 0.88%. Οι Han et al. [65] εναπόθεσαν επίσης το Au σε ένα υπόστρωμα PDMS, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο GF έως 5885.59 για τιμές παραμορφώσεων μεταξύ 1.5% και 2% και GF έως 945.65 για τιμές παραμορφώσεων μεταξύ 0% και 1.5%.

Οι πρώτοι που ανέφεραν τη χρήση νανοσωματιδίων σε αισθητήρα με βάση ρωγμές ήταν οι Schwebke et al. [75] το 2018. Μελέτησαν τη συμπεριφορά των νανοσωματιδίων Pt που είναι ενσωματωμένα στο νιτρίδιο του βορίου καθώς και σε μεμβράνες οξειδίου του αλουμινίου ως αισθητήρες παραμόρφωσης σε υποστρώματα πολυιμιδίου. Έδειξαν πως η παρουσία νανοσωματιδίων πλατίνας μέσα στο φιλμ αλουμίνας έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ρωγμών, ο οποίος αυξάνει πολύ την αντίσταση του αισθητήρα. Οι Rafael et al. [76] διερεύνησαν περαιτέρω το αποτέλεσμα και ανέπτυξαν έναν αισθητήρα παραμόρφωσης με ρωγμές με νανοσωματίδια Pt σε ένα φιλμ αλουμίνας, που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο ALD, σε υπόστρωμα πολυιμιδίου, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλό GF έως και 20000, σε τιμές παραμόρφωσης 0.3%. Το μειονέκτημα της μεθόδου τους ήταν ότι τα νανοσωματίδια καλύπτονταν από το φιλμ αλουμίνας, έχοντας ως αποτέλεσμα πολύ υψηλή αρχική αντίσταση (220 MΩ) και πολύ χαμηλό εύρος λειτουργίας στην παραμόρφωση (μόλις 1%).

Τέλος, σε εργασία τους οι Aslanidis et al. [77] επέδειξαν εξαιρετικά ευαίσθητους εύκαμπτους αισθητήρες παραμόρφωσης που σχηματίζονται από ένα δίκτυο μεταλλικών νανοσωματιδίων που αναπτύσσονται υπό κενό πάνω σε ένα ραγισμένο λεπτό φιλμ αλουμίνας το οποίο έχει εναποτεθεί με τη μέθοδο ALD. Απέδειξαν ότι η ευαισθησία του αισθητήρα εξαρτάται από την επιφανειακή πυκνότητα των νανοσωματιδίων καθώς και από το πάχος των λεπτών υμενίων αλουμίνας που μπορούν και τα δύο να ελεγχθούν καλά μέσω των τεχνικών εναπόθεσης με το πάχος της αλουμίνας. Οι αισθητήρες με λεπτότερα φιλμ αλουμίνας επιτυγχάνουν την καλύτερη ευαισθησία για όλο και μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης. Σε κάθε περίπτωση, οι ευαίσθητες των αισθητήρων παραμόρφωσης με ρωγμές παραμένουν μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν

να επιτευχθούν χωρίς ρωγμές. Είναι λοιπόν σαφές ότι με τον έλεγχο του πάχους της αλουμίνιας μπορούν να αναπτυχθούν αισθητήρες με υψηλές ευαισθησίες σε συγκεκριμένες περιοχές παραμορφώσεων, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες της επιθυμητής εφαρμογής. Τα παχύτερα υμένα αλουμίνια (20 nm) οδηγούν σε ευρύτερα ανοίγματα ρωγμών, γεγονός που αυξάνει σταδιακά τις τιμές αντίστασης του αισθητήρα και κατά συνέπεια την ευαισθησία του. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την επίτευξη της τιμής ρεκόρ ευαισθησίας στην παραμόρφωση $2.6 \cdot 10^8$ σε παραμόρφωση 7.2%, ενώ παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία σε ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων από 0.1% έως 7.2%.

Κεφάλαιο 4

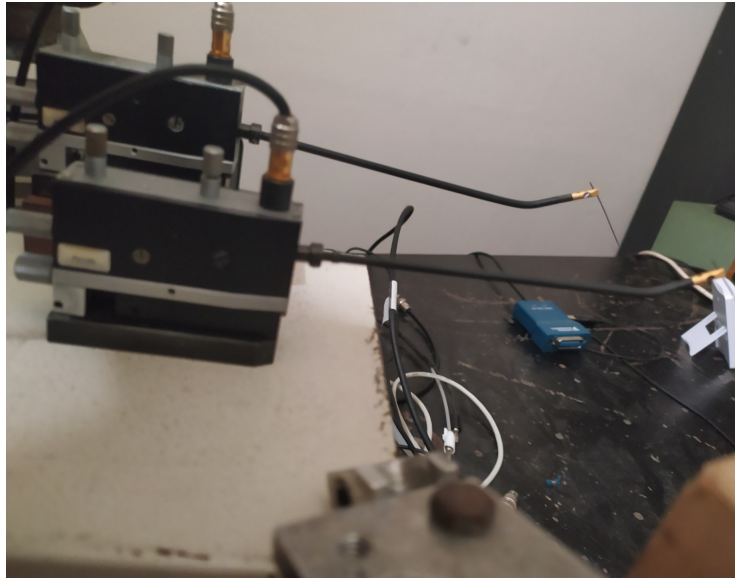
Πειραματική μέτρηση Gauge Factor

Στα προηγούμενα κεφάλαια επιχειρήθηκε να εξηγηθεί η φυσική και η μηχανική της κατασκευής των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια και παρατέθηκαν διάφορα παραδείγματα αισθητήρων και τα αντίστοιχα Gauge Factors (GF). Γεννιέται όμως το εύλογο ερώτημα τού τρόπου με τον οποίο εξάγουμε το GF του αισθητήρα.

4.1 Όργανα μέτρησης για την μέτρηση του Gauge Factor (GF)

Ο χαρακτηρισμός των αισθητήρων παραμόρφωσης έγινε κατά την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης. Όπως θα σημειωθεί στη συνέχεια, μας ενδιαφέρει να μετράμε την μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα σε σχέση με την μεταβολή της ασκούμενης τάσης. Για την μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα μέτρησης αντίστασης Keithley 2400 [78], στο οποίο συνδέθηκαν σαν συσκευή εισόδου δύο κατάλληλα ηλεκτρόδια ακίδας βολφραμίου (probers) (σχήμα 4.1) που συνδέονται με τα ηλεκτρόδια χρυσού του αισθητήρα. Ο μετρητής αντίστασης συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω κατάλληλου λογισμικού ελεγχόταν η λειτουργία του και καταγράφονταν τα δεδομένα (συγκεκριμένα το γράφημα της αντίστασης συναρτήσει του χρόνου).

Επιπλέον, αντί του συστήματος Keithley 2400, για πολλές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο και φορητό αυτοσχέδιο σύστημα αποτελούμενο από έναν ελεγκτή MCU Arduino DUE (CORTEX M3), ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone με κατάλληλες αντιστάσεις και έναν AD7190 24-bit από αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα. Η γέφυρα Wheatstone είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας άγνωστης ηλεκτρικής αντίστασης με την εξισορρόπηση δύο σκελών ενός κυκλώματος γέφυρας, το ένα σκέλος του οποίου περιλαμβάνει το άγνωστο στοιχείο, και παρέχει ακριβείς μετρήσεις. Αυτό το φορητό σύστημα, πέραν του ότι επιτυγχάνει την μείωση του κόστους αντί του συστήματος Keithley 2400, λόγω του μικρού του όγκου και βάρους εξυπηρετεί στις επιτόπου μετρήσεις σε εφαρμογές εκτός του εργαστηρίου, όπου η μεταφορά όλου του άλλου συστήματος δεν είναι εύκολη.



Σχήμα 4.1: Ηλεκτρόδια με ακίδες βολφραμίου

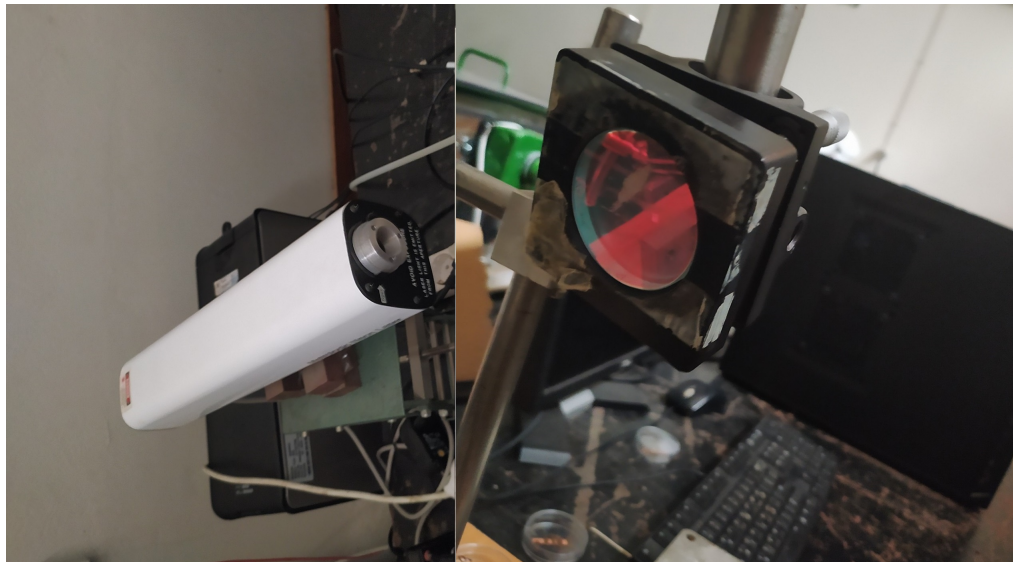
Πρώτα, ο αισθητήρας προσκολλάται πάνω σε υλικό PCB (μήκους $L_s = 13\text{mm}$ και πάχους $H_s = 450\mu\text{m}$). Αυτό συμβαίνει ώστε να διατηρηθεί η ακεραιότητα του αισθητήρα και η κάμψη του να ακολουθεί έναν κυκλικό τομέα, μοντέλο που θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Ο αισθητήρας προσαρτήθηκε σε έναν μεταλλικό δειγματολήπτη αλουμινίου ώστε να στηρίζεται και στα δύο άκρα της κάτω πλευράς του δειγματολήπτη με ταινία άνθρακα. Ο δειγματολήπτης βιδώθηκε σε μια ξύλινη βάση, στο κάτω μέρος της οποίας τοποθετήθηκε ένα μικρόμετρο (βερνιέρος). Στο άκρο του βερνιέρου είναι προσαρτημένο ένα χάλκινο μεταλλικό στήριγμα-πρόβολος που κινείται κάθετα προς την κατεύθυνση του δείγματος και μετατοπίζει το κέντρο του υπό δοκιμή αισθητήρα προς τα πάνω κατά ελεγχόμενα διαστήματα, ενώ τα άκρα αυτού παραμένουν ακλόνητα. Το δείγμα υποβλήθηκε έτσι σε κάμψη τριών σημείων. Η περιστροφή του βερνιέρου κατά 1mm αντιστοιχεί σε κατακόρυφη μετατόπιση του προβόλου κατά $10\mu\text{m}$. Η όλη συσκευή ήταν τοποθετημένη σε σιδερένιο οπτικό τραπέζι για την αποφυγή κραδασμών (σχήμα 4.6).

Ο αισθητήρας μαζί με το PCB, πάνω στο οποίο έχει προσκολληθεί, αρχικά είναι επίπεδος (δεν έχει γίνει ακόμα επαφή με τον πρόβολο ώστε να μην επέλθει κάμψη) και έρχεται σε επαφή με τους probes, ώστε να μετρηθεί η αρχική του αντίσταση. Για να διαπιστωθεί πιο εύκολα η ύπαρξη επαφής -ότι όντως κλείνει δηλαδή κύκλωμα- χρησιμοποιήθηκε ένα laser He-Ne χαμηλής έντασης (1mW). Η δέσμη αυτού καθοδηγήθηκε σε ένα κάτοπτρο (σχήμα 4.3) του οποίου η θέση και γωνία μπορούσε να μεταβληθεί, έτσι ώστε η ανακλώμενη δέσμη να κατευθύνεται προς τον στερεωμένο αισθητήρα, ώστε εύκολα να ανακλασθεί ξανά από αυτόν αφού χτυπήσει την επιφάνειά του, η οποία αποτελείται κυρίως από τα ηλεκτρόδια χρυσού, δηλαδή μέταλλο με καλές οπτικές ιδιότητες.

Τέλος, η δέσμη ανακλάται από την επιφάνεια του αισθητήρα με κατεύθυνση προς τον τοίχο του εργαστηρίου για να παρατηρούμε διαρκώς την όποια μετακίνησή της και έτσι να καταλαβαίνουμε αν μεταβάλλεται η τάση που ασκείται στον αισθητήρα. Έτσι, στην αδιατάρακτη κατάσταση του συστήματος ήταν βέβαιο ότι η ανάκλαση προέρχεται από επίπεδο αισθητήρα,



Σχήμα 4.2: Μικρόμετρο (βερνιέρος) με προσαρτημένο χάλκινο μεταλλικό πρόβολο στερεωμένο σε ξύλινη βάση



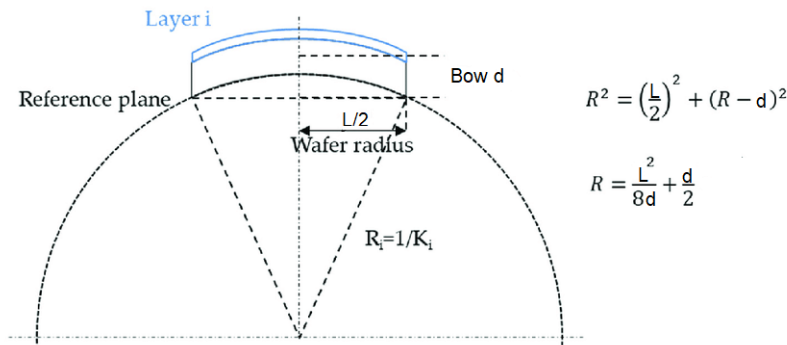
Σχήμα 4.3: Laser He-Ne (αριστερά) και ανακλαστήρας δέσμης laser (δεξιά)

ενώ όταν ο βερνιέρος περιστράφηκε, ώστε ο πρόβολος να ανυψωθεί τόσο ώστε να μετακινηθεί ελάχιστα το ίχνος της δέσμης στον τοίχο, εντοπίστηκε το σημείο μηδενικής παραμόρφωσης τού αισθητήρα.

4.2 Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα για μέτρηση GF

4.2.1 Μοντέλο παραμόρφωσης μονοστρωματικού αισθητήρα

Για τον θεωρητικό υπολογισμό της εφαρμοζόμενης τάσης θεωρούμε απαραίτητο τον προσδιορισμό της ακτίνας καμπυλότητας (R) του υποστρώματος για μια συγκεκριμένη τιμή μετατόπισης (d) του προβόλου.



Σχήμα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση της ακτίνας καμπυλότητας [79]

Στη συνέχεια, η ακτίνα καμπυλότητας R_b που είναι κάθετη στο ευθύγραμμο τμήμα του τόξου που σχηματίζει ένα ορθογώνιο τρίγωνο, δίνεται από το Πυθαγόρειο Θεώρημα (σχήμα 4.4):

$$R_b^2 = (R_b - d)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \implies R_b = \frac{l^2 + 4d^2}{8d}$$

Εάν το υπόστρωμα είναι λυγισμένο, η μπροστινή του πλευρά επιμηχύνεται, ενώ, ταυτόχρονα, η πίσω πλευρά συμπιέζεται. Στο μέσο της διατομής του υποστρώματος υπάρχει μια νοητή γραμμή, ο ουδέτερος άξονας, όπου το μήκος l παραμένει αμετάβλητο (σχήμα 4.5). Για να υπολογίσουμε τη μεταβολή του μήκους σε l' στην επιφάνεια του υποστρώματος πάχους d , θεωρούμε ότι αντιστοιχεί σε τμήμα τόξου με γωνία θ και ακτίνα καμπυλότητας R_b .

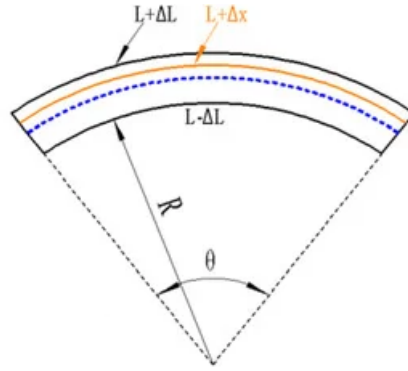
$$l' = \left(R_b + \frac{d}{2}\right)d\theta$$

Για $l = R_b d \theta$:

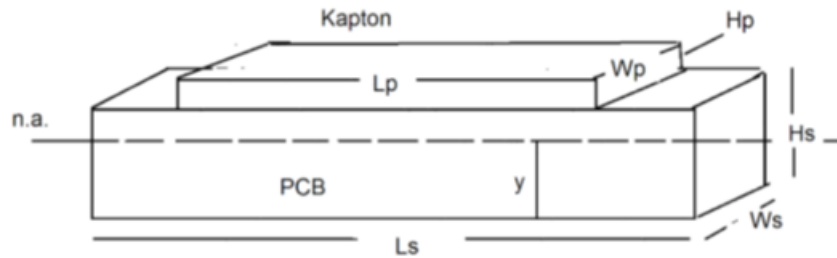
$$\varepsilon = \frac{l' - l}{l} = \frac{\left(R_b + \frac{d}{2} - R_b\right)d\theta}{R_b d \theta} = \frac{d}{2R_b}$$

4.2.2 Μοντέλο παραμόρφωσης αισθητήρα σε υπόστρωμα PCB

Σε περίπτωση ύπαρξης δύο υποστρωμάτων, η απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα (neutral axis) υπολογίζεται ως εξής:



Σχήμα 4.5: Γεωμετρία της παραμόρφωσης [80]



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση υποστρώματος πολυϊμιδίου (Kapton) σε υπόστρωμα PCB [2]

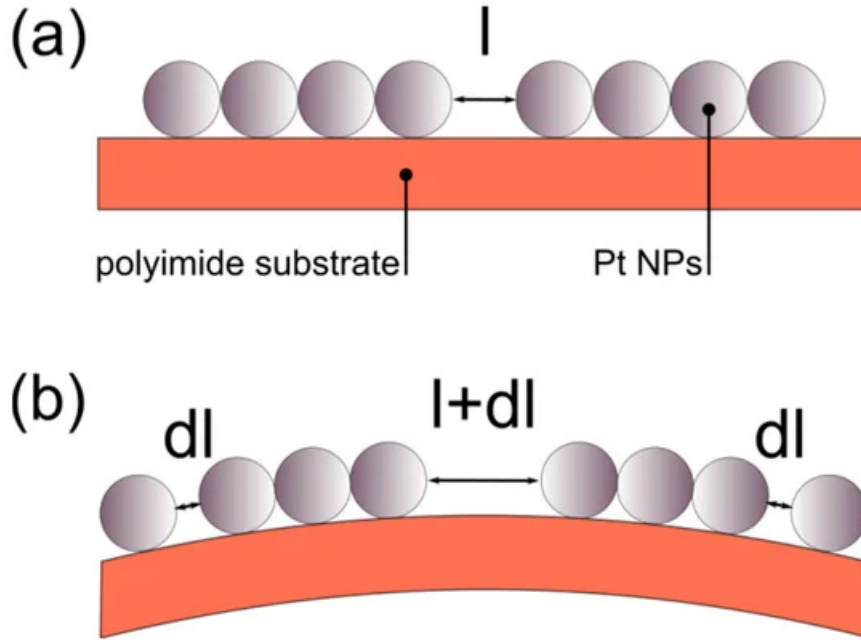
$$y = \frac{L_s \cdot W_s \cdot \frac{H_s}{2} + L_p \cdot W_p \cdot (H_p + \frac{H_s}{2})}{L_s \cdot W_s + L_p \cdot W_p}$$

Επομένως, η ακτίνα καμπυλότητας θα είναι $R'_b = R_b + y$, όπου στην αρχική ακτίνα καμπυλότητας R θεωρούμε ως μήκος το L_s . Λαμβάνοντας υπόψη ότι $H_s + H_p = d$, το συνολικό πάχος των δύο υποστρωμάτων, η παραμόρφωση θα προσδιοριστεί από τη σχέση $\varepsilon = \frac{(d-y)}{R'_b}$. Στην περίπτωση που έχουμε την πλακέτα PCB: μήκος $L_s = 13\text{mm}$, πλάτος $W_s = 60\text{mm}$ και πάχος $H_s = 450\text{mm}$. Για διαστάσεις αισθητήρα $L_p = 12\text{mm}$, $W_p = 6\text{mm}$ και $H_p = 125\text{mm}$, $y = 296,8\text{mm}$ άρα $d - y = 278,2\text{mm}$. Όλα τα παραπάνω νούμερα αποτελούν πραγματικές μετρήσεις που πάρθηκαν στο εργαστήριο.

4.3 Τύπος για εξαγωγή GF

Η λειτουργική αρχή των αισθητήρων παραμόρφωσης που βασίζονται σε νανοσωματίδια, όπως σημειώθηκε και στην παράγραφο 3.2.2, βασίζεται στο γεγονός ότι τα νανοσωματίδια έχουν απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και η μεταφορά φορτίου συμβαίνει λόγω του φαινομένου σήραγγας. Αν υποθέσουμε ότι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων είναι l , η αγωγιμότητα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R = r_0 \cdot e^{(\beta l)} \cdot e^{\left(\frac{E_c}{k_B T}\right)}$$



Σχήμα 4.7: Γραφική αναπαράσταση των διακένων μεταξύ των νησίδων νανοσωματιδίων. Πριν (a) και μετά (b) την εφαρμογή της τάσης [63]

όπου β είναι η σταθερά της σήραγγας, r_0 μια προεκθετική σταθερά, k_B είναι η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία και E_C η ενέργεια ενεργοποίησης που δίνεται από τον τύπο:

$$E_C = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right)$$

όπου r είναι το μέγεθος των νανοσωματιδίων και ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού μέσου. Η θεωρία που προτάθηκε από τον Herrmann et al. [47] προτείνει ότι η μεταβολή της διαφορικής αντίστασης, σε θερμοκρασία δωματίου, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\Delta R}{R} = e^{g\varepsilon} - 1$$

όπου, g είναι ο παράγοντας ευαισθησίας (gauge factor). Για μικρές παραμορφώσεις ε , η παραπάνω εξίσωση προσεγγίζεται ως:

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

Αυτό το μοντέλο προηγείται του ότι τα νανοσωματίδια είναι διασταυρωμένα και έχουν όλα ένα αρχικό διασωματιδιακό χάσμα l . Με την εφαρμογή της παραμόρφωσης, όλα τα διασωματιδιακά κενά αλλάζουν από l σε $l + dl$ (σχήμα 4.7).

Η σύγκριση της παραπάνω εξίσωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα των αισθητήρων παραμόρφωσης που κατασκευάζονται σε εύκαμπτα υλικά με τη χρήση διασταυρωμένων νανοσωματιδίων, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία [60, 63, 81, 82], έδειξε ότι το παραπάνω μοντέλο περιγράφει επαρκώς την απόκριση των αισθητήρων.

Τελικά, εν προκειμένω καταλήγουμε στον εξής τύπο:

$$\frac{\Delta R}{R} = g\varepsilon = g \frac{d-y}{R'_b}$$

για την εύρεση του Gauge Factor (g) του αισθητήρα που προσκολλάται πάνω σε υπόστρωμα PCB και συγκεκριμένα:

$$\frac{\Delta R}{R} = g \frac{278.2\text{mm}}{296.8\text{mm} + \frac{(13\text{mm})^2 + 4d^2}{8d}}$$

για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων στο εργαστήριο δειγμάτων και θα παραμείνει ίδιος για όλους τους αισθητήρες που μετρήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Όμως, από τη βιβλιογραφία [2,53,63,83], αλλά και από τις μετρήσεις που λήφθηκαν στο εργαστήριο, όπως θα φανεί στην επεξεργασία παρακάτω, φαίνεται ότι υπάρχει γενικά και δεύτερη γραμμική περιοχή στον αισθητήρα, δηλαδή συνολικά δύο περιοχές παραμόρφωσης με διαφορετικό GF για καθεμία. Η σχετική μεταβολή της αντίστασης εμφανίζει διαφορετικές γραμμικές περιοχές που έχουν διαφορετικές κλίσεις. Περιοχές παραμόρφωσης που μπορούν να περιγραφούν με την εξίσωση $\frac{\Delta R}{R} = g\varepsilon$ και άλλες που με επίσης ίδια συμπεριφορά αλλά με διαφορετική κλίση και, συνεπώς, διαφορετική ευαισθησία. Ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν υψηλότερες τάξεις προσέγγισης Taylor για την προσαρμογή των δεδομένων των γυμνών νανοσωματιδίων η προσαρμογή παραμένει γραμμική λόγω της πολύ μικρής τιμής της παραμόρφωσης. Το ήδη υπάρχον μοντέλο είναι απολύτως επαρκές για να περιγράψει την ευαισθησία των δικτυωμένων νανοσωματιδίων, αλλά δεν προβλέπει αλλαγή της τιμής GF εντός του αναφερόμενου εύρους μέτρησης.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης, τα νανοσωματίδια Pt είναι γυμνά και προσγειώνονται στο υπόστρωμα τυχαία, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών όπου όλα τα νανοσωματίδια βρίσκονται σε επαφή (επομένως δημιουργούνται νησίδες νανοσωματιδίων) και άλλων περιοχών όπου υπάρχει απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων είτε μεταξύ νησίδων είτε μεταξύ μεμονωμένων νανοσωματιδίων. Στη συνέχεια, μετά την εφαρμογή της τάσης, οι ήδη υπάρχουσες διασωματιδιακές αποστάσεις αυξάνονται, ενώ οι μεγαλύτερες νησίδες νανοσωματιδίων κατακεραματίζονται για να σχηματίσουν μικρότερες συστάδες νανοσωματιδίων- το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη επανεξέτασης του μοντέλου.

Για την παρούσα μελέτη ακολουθείται το μοντέλο των Aslanidis et al. [2,63], σε θερμοκρασία δωματίου, εάν η μέση τιμή της αρχικής απόστασης μεταξύ των σωματιδίων είναι l , η ειδική αντίσταση δίνεται από:

$$R_0 = r_0 e^{\beta l}$$

Και εφαρμόζοντας τάση, δημιουργούνται νέες αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων, επομένως η ειδική αντίσταση, R_s , θα δίνεται από:

$$R_s = r_0 e^{\beta(l+dl)} + N r_0 e^{\beta l}$$

Όπου ο πρώτος όρος προκύπτει από τις ήδη υπάρχουσες αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων και ο δεύτερος όρος προκύπτει από τις νέες. Το N είναι αδιάστατος αριθμός που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο αριθμός των νέων διασωματιδιακών αποστάσεων, καθώς και η ισχύς της συμβολής τους στη συνολική ειδική αντίσταση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που όλα τα νανοσωματίδια είναι συναρμολογημένα σε μια ευθεία γραμμή, όλες οι αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων θα συνεισφέρουν εξίσου. Στην περίπτωση μας όμως, στην οποία τα νανοσωματίδια δημιουργούν πολύπλοκες διαδρομές με πολλές πιθανές αγωγίμες διαδρομές που είναι παράλληλες μεταξύ τους, κάθε απόσταση μεταξύ των σωματιδίων συμβάλλει διαφορετικά στην τελική αντίσταση. Επιπλέον, το N εξαρτάται από την τιμή της τάσης που δημιουργεί τις νέες αποστάσεις μεταξύ των σωματιδίων. Εάν $N = k\varepsilon$, με το k να ορίζεται ως ο αριθμός των κενών/μονάδα παραμόρφωσης (αυτό ισχύει πάνω από μια κατώτατη τιμή παραμόρφωσης), η διαφορική μεταβολή της αντίστασης δίνεται τώρα από:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{r_0 e^{\beta(l+dl)} + k\varepsilon r_0 e^{\beta l} - R_0}{R_0} \implies \frac{\Delta R}{R} = e^{g\varepsilon} - 1 + \frac{k\varepsilon r_0 e^{g\varepsilon}}{R_0}$$

Για μικρές τιμές παραμόρφωσης, παίρνουμε κατά προσέγγιση τον τύπο:

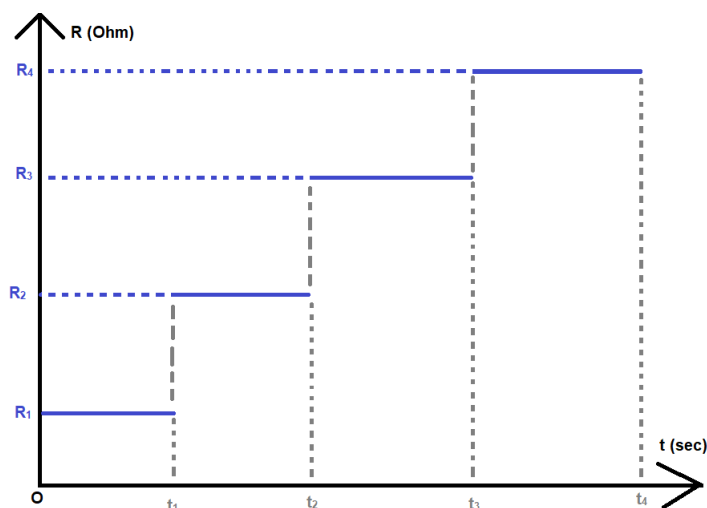
$$\frac{\Delta R}{R} = g\varepsilon + \frac{kr_0}{R_0}\varepsilon \implies \frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(g + \frac{kr_0}{R_0})$$

Όπου $g' = g + k\frac{r_0}{R_0}$ ο νέος GF για την 2η γραμμική περιοχή και g ο GF για την 1η γραμμική περιοχή.

4.4 Εργαστηριακές μετρήσεις

Από την προηγούμενη παράγραφο βλέπουμε την γραμμική σχέση μεταξύ του όρου $\frac{\Delta R}{R}$ (σχετική μεταβολή της αντίστασης) και του ε (παραμορφωση). Αρκεί λοιπόν να μετρούμε την αρχική αντίσταση (όταν $\varepsilon = 0$) και την αντίσταση κάθε φορά γνωρίζοντας την αντίστοιχη παραμόρφωση ($\varepsilon = \varepsilon(d)$). Για αυτό το σκοπό και για διευκόλυνση των μετρήσεων κάθε φορά ασκούνταν σταδιακά αυξανόμενη παραμόρφωση ή, ορθότερα, κάθετη μετατόπιση (d) μέσω του προβόλου του βερνιέρου. Συγκεκριμένα, κάθε φορά για την κάθετη μετατόπιση, έστω d_i , υπήρχε αντίστοιχη παραμόρφωση, ε_i , και αντίστοιχη μετρούμενη τιμή της αντίστασης, R_i . Στο εργαστήριο δε μετρούνταν απευθείας η καμπύλη $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$, αλλά μετρούνταν η καμπύλη $R - t(s)$ (χρόνος), ο οποίος δεν παίζει ρόλο στην εξαγωγή του GF. Ιδανικά, η καμπύλη $R - t$ θα έπρεπε να έχει την μορφή του σχήματος 4.8.

Δηλαδή κάθε φορά η αντίσταση παραμένει (χρονικά) σταθερή σε συγκεκριμένη τιμή για συγκεκριμένη τιμή της παραμόρφωσης ανεξαρτήτως της διάρκειας μέτρησης, και μάλιστα αυτό θα έπρεπε να ισχύει για αμφοτέρωτα τα αίτια μεταβολής της αντίστασης – είτε η μεταβολή συνέβη εξαιτίας αύξησης είτε μείωσης της παραμόρφωσης. Στην πράξη, αυτό δεν ισχύει καθώς οι αισθητήρες δεν μπορούν να είναι ιδανικοί, όπως σημειώθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, αλλά έχουν διαρκώς μεταβολές στην αντίσταση (π.χ. λόγω της διαρκούς κίνησης των νανοσωματιδίων, λόγω θορύβου υποβάθρου κ.ά.) και, επίσης, όσον αφορά την αλλαγή της φοράς του ερεθίσμα-

Σχήμα 4.8: Ιδανικό γράφημα $R(\Omega)$ - $t(s)$

τος του αισθητήρα (αντί να αυξάνεται η ασκούμενη παραμόρφωση, μπορεί να μειώνεται) μπορεί να εμφανίζεται υστερητική συμπεριφορά.

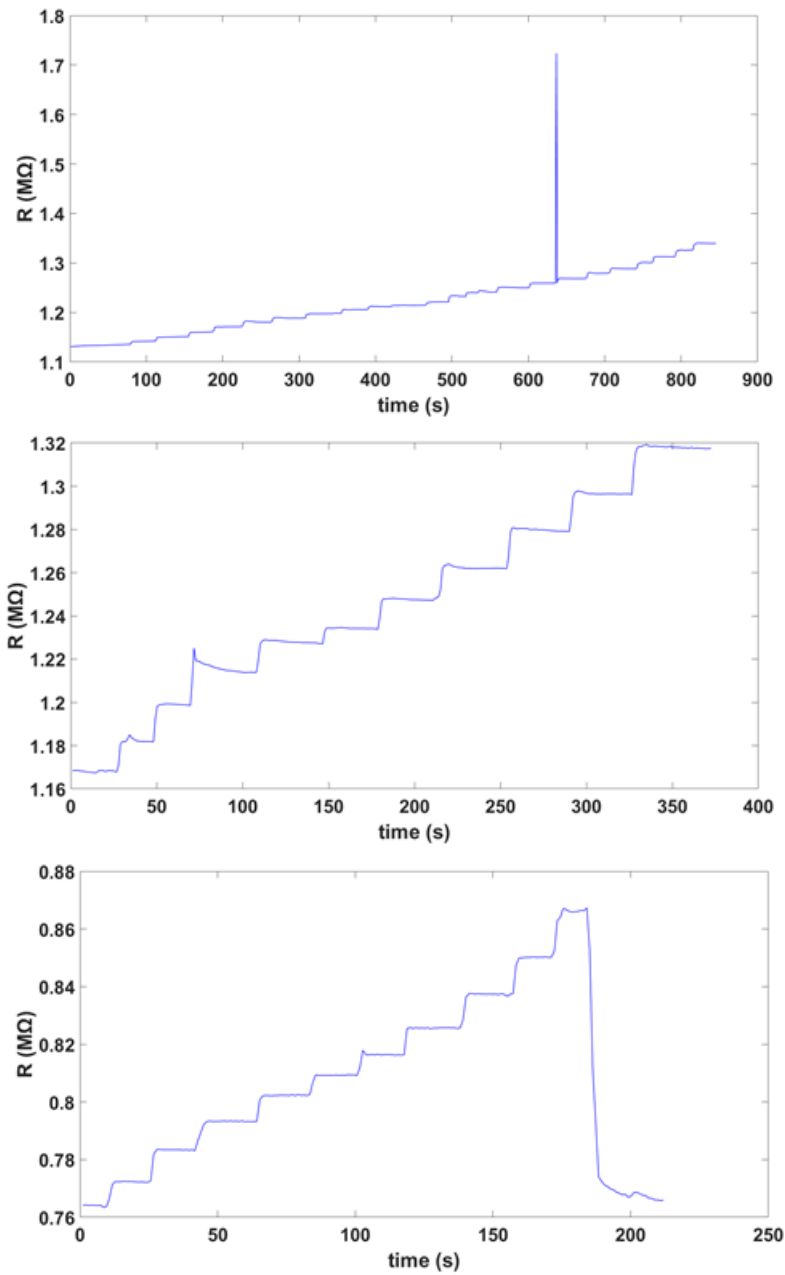
4.4.1 Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μετρήθηκαν διάφοροι αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας, οι οποίοι κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους εναπόθεσης με φυσική εξάχνωση που παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.4. Η μέση διάμετρος των νανοσωματιδίων που παρασκευάστηκαν ήταν 3nm και η επιφανειακή πυκνότητα νανοσωματιδίων των ρυθμίστηκε στα $2 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$. Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις $R - t$ κάποιων αισθητήρων, ώστε να φανούν στην πράξη οι διαφορές των πραγματικών μετρήσεων με το θεωρητικό ιδανικό διάγραμμα.

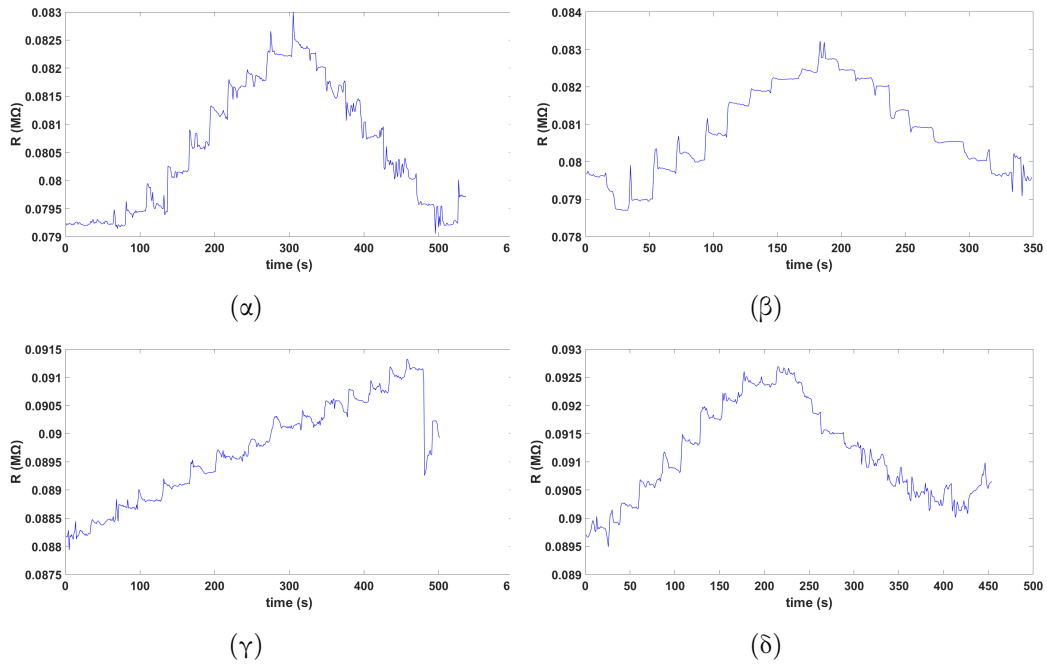
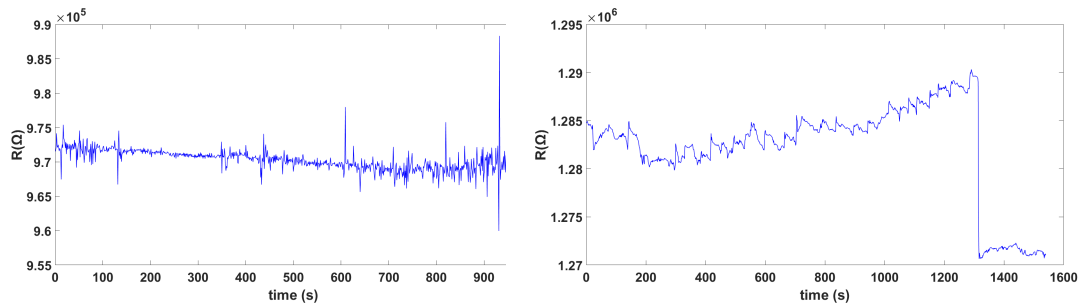
Πρακτικά, βλέπουμε ότι η μεταβολή της αντίστασης, από το «σκαλοπάτι» R_i σε R_{i+1} , για κάθε μεταβολή της παραμόρφωσης από ε_i σε ε_{i+1} δεν μπορεί να είναι απότομη, καθώς ο βερνιέρος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της παραμόρφωσης είναι αναλογικό όργανο και έτσι αναλογικά μεταβάλλεται και η παραμόρφωση.

Από το σχήμα 4.9 παρατηρούμε ευανάγνωστα «σκαλοπάτια» αντίστασης για κάθε σταθερή τιμή παραμόρφωσης, αν και κάποιες φορές υπάρχουν κάποιες απότομες αυξομειώσεις λόγω σφαλμάτων- για παράδειγμα, λόγω εξωτερικού θορύβου- που δεν λαμβάνονται υπόψη για την επεξεργασία. Δυστυχώς, υπήρξαν και πιο δυσανάγνωστα γραφήματα $R - t$, όπως αυτά του σχήματος 4.10

Στις μετρήσεις του σχήματος 4.10, πλην της μέτρησης (γ), εκτός από σταθερή αύξηση για την παραμόρφωση, ακολούθησε και σταθερή μείωση μέχρις ότου να ξανακαταλήξουμε σε κατάσταση μηδενικής παραμόρφωσης. Παρατηρήθηκε ότι για τα αντίστοιχα «σκαλοπάτια» παραμόρφωσης στην φθίνουσα πορεία υπάρχει αύξηση στην αντίσταση του αισθητήρα για κάθε αντίστοιχη τιμή της παραμόρφωσης, γεγονός που υποδεικνύει σε μικρό βαθμό υστερητική



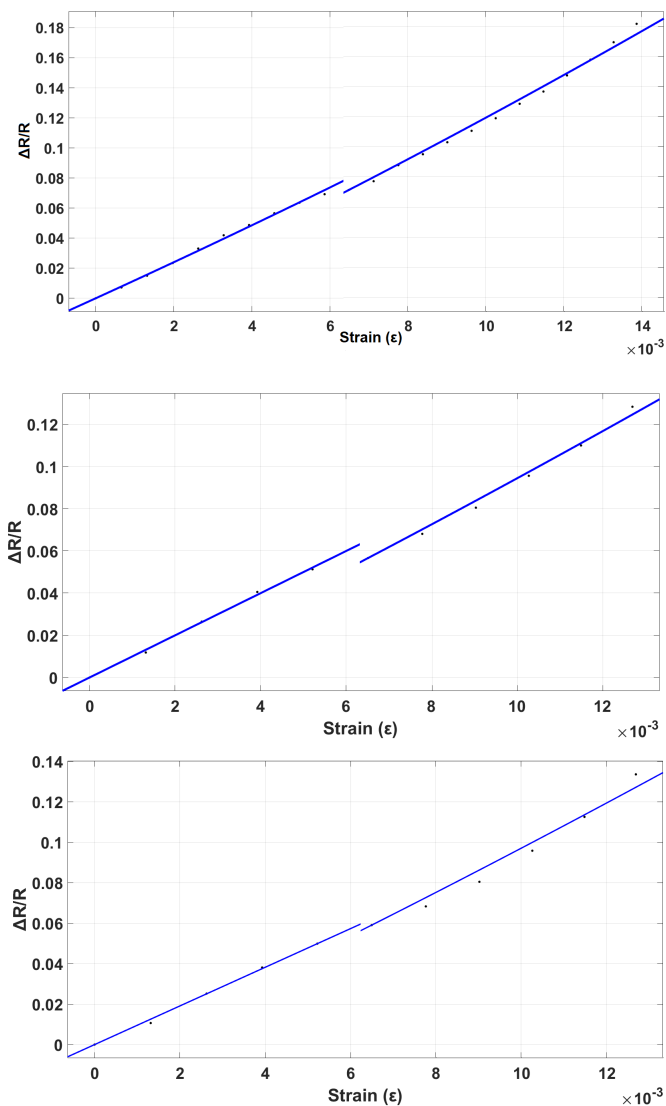
Σχήμα 4.9: Ευανάγνωστα διαγράμματα $R(M\Omega)-t(s)$

Σχήμα 4.10: Δυσανάγνωστα διαγράμματα $R(\Omega)$ - $t(s)$ Σχήμα 4.11: Διαγράμματα $R(\Omega)$ - $t(s)$ για τους αισθητήρες με αδυναμία επεξεργασίας

συμπεριφορά.

Φυσικά, δεν απουσίασαν και διαγράμματα (σχήμα 4.11 που δεν ήταν δυνατό να διαβαστούν και να επεξεργασθούν ώστε να γίνει εξαγωγή του GF, όπως παρακάτω. Σε αυτά τα σχήματα, δυστυχώς ακόμα και με καλή εστίαση και με οδηγό τις σημειώσεις μου κατά την λήψη των μετρήσεων για την χρονική στιγμή που αυξανόταν η παραμόρφωση, δεν είναι ευδιάκριτο το κάθε σκαλοπάτι αντίστασης. Ως εκ τούτου, δεν καθίσταται δυνατή η εξαγωγή του GF.

Έπειτα, ξέροντας την κάθετη μετατόπιση στην οποία αντιστοιχεί κάθε αντίσταση, R_i , βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή της παραμόρφωσης, ε_i , και τον όρο $\frac{\Delta R}{R}$, όπου R_0 η αρχική αντίσταση του αισθητήρα χωρίς παραμόρφωση ($\varepsilon_0 = 0$) και $\Delta R_i = R_i - R_0$. Τέλος, σχηματίζουμε την γραφική παράσταση $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$, η οποία προσεγγίζεται από μια ευθεία (ή δυο ευθείες αν περάσουμε το κατώφλι παραμόρφωσης και εισέλθουμε στην δεύτερη γραμμική περιοχή), η κλίση της οποίας ισούται με τον αντίστοιχο Gauge Factor του αισθητήρα και υπολογίζεται γραφικά μέσω του λογισμικού Matlab. Ουσιαστικά όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της α-

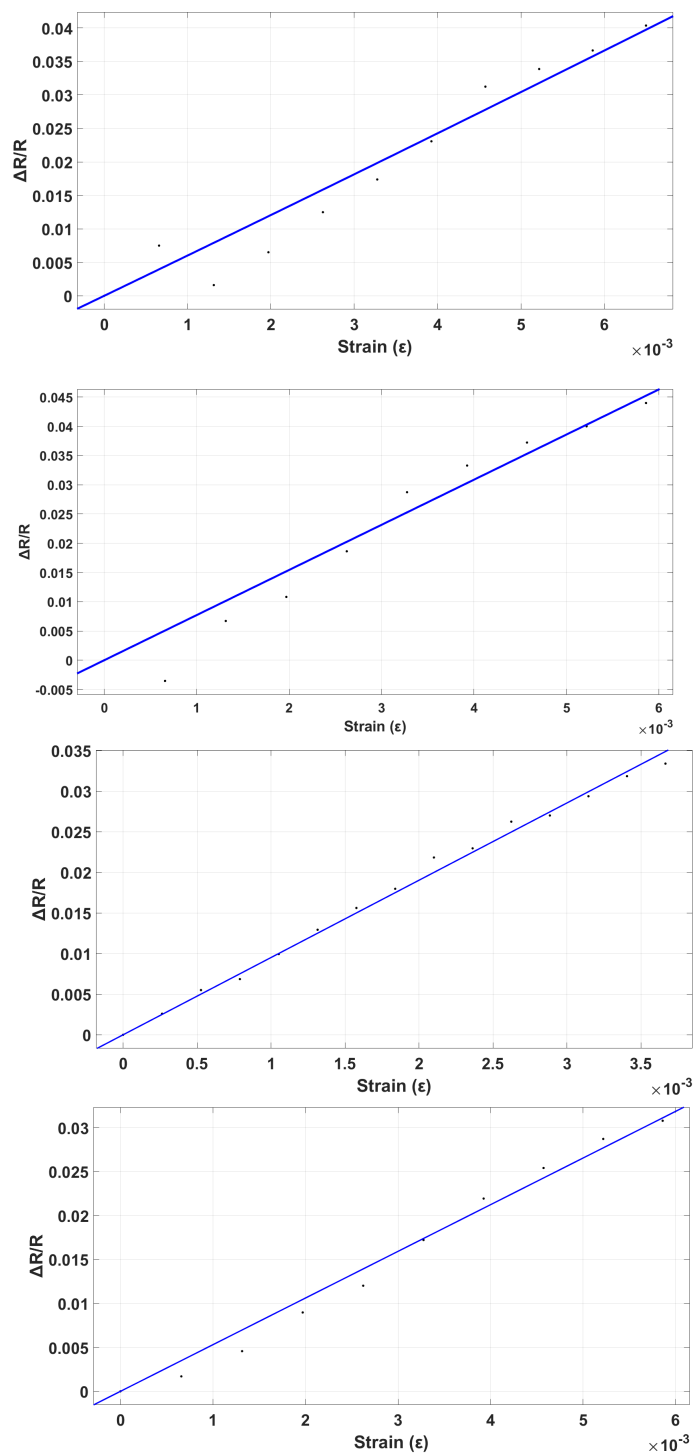


Σχήμα 4.12: Διαγράμματα $\frac{\Delta R}{R} - \epsilon$ για τους αισθητήρες με ευκρινή διαγράμματα $R - t$

ντίστασης για την ίδια μεταβολή της παραμορφώσης ενός αισθητήρα, τότε τόσο πιο ευαίσθητος αυτός καθίσταται, οπότε μεγαλύτερος θα πρέπει να είναι και ο αντίστοιχος GF.

Για τους παραπάνω αισθητήρες φαίνεται (σχήμα 4.12) να υπάρχει δεύτερη γραμμική περιοχή (GF2), η οποία ξεκινάει να υφίσταται για $\epsilon \approx 0.0064$, που συμφωνεί με την ακολουθούμενη βιβλιογραφία [2,63]. Επομένως, δύο διαφορετικές ευθείες χρησιμοποιήθηκαν για τον καλύτερο χαρακτηρισμό του αισθητήρα.

Στον πίνακα 4.3, συγκεντρώνονται οι μετρήσεις από τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας που επέτυχαν τις υψηλότερες τιμές ευαισθησίας.



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα $\frac{\Delta R}{R} - \epsilon$ για τους αισθητήρες με δυσδιάκριτα διαγράμματα $R - t$

Αισθητήρας	Ποσοστό NPs (cm^{-2})	Μέση Διάμετρος 3 nm	GF1	GF2
A1	$2 \cdot 10^{12}$	3	12.19	13.39
A2	$2 \cdot 10^{12}$	3	9.98	10.91
A3	$2 \cdot 10^{12}$	3	7.71	-
A4	$2 \cdot 10^{12}$	3	9.51	-

Πίνακας 4.1: Καλύτερες ως τώρα μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας

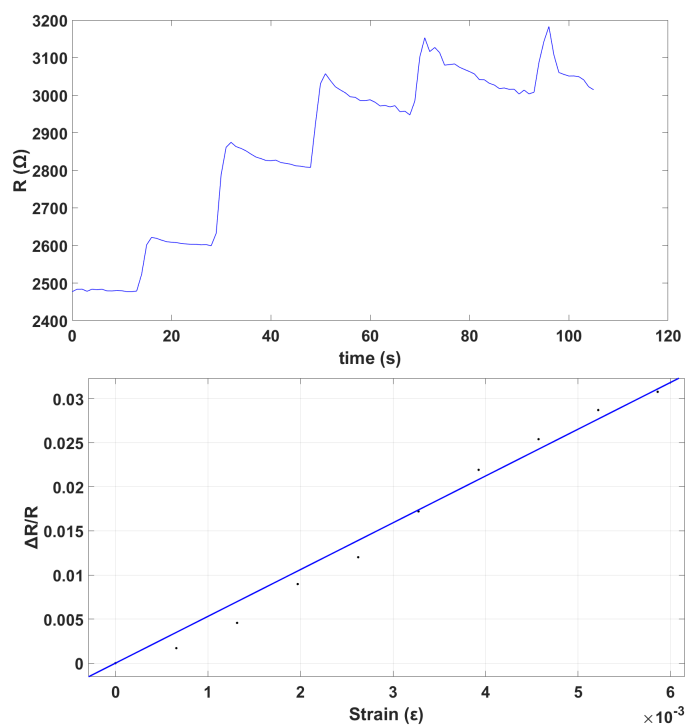
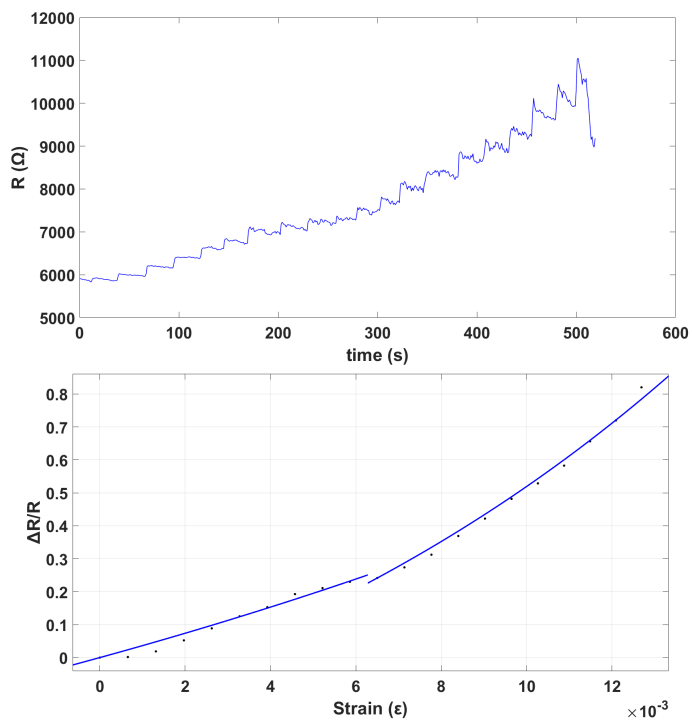
4.4.2 Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση αλουμίνας (Al_2O_3) με την τεχνική της εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD)

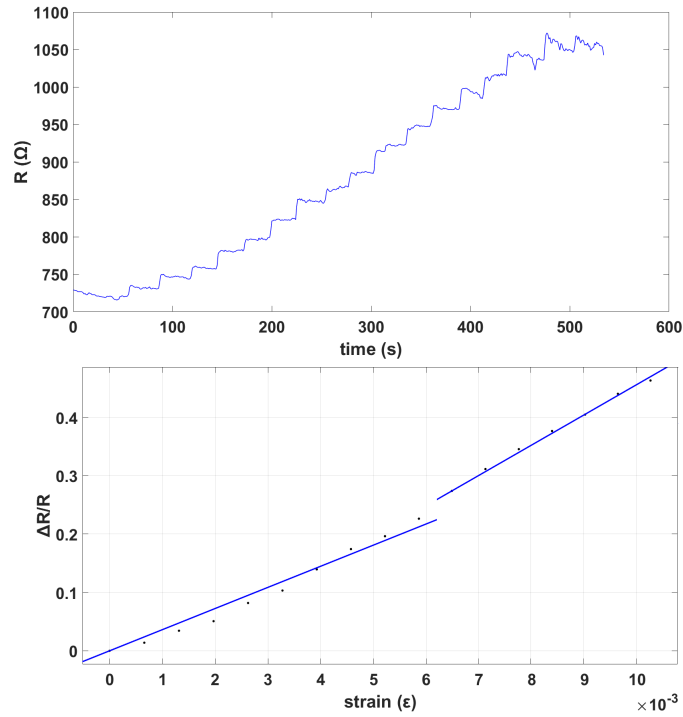
Αυτό το είδος αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας κατασκευάστηκε με αντίστοιχες μεθόδους, όπως και οι προηγούμενοι, με την διαφορά ότι εδώ υπάρχει ένα επιπλέον στρώμα, αυτό της αλουμίνας. Εν προκειμένω, πριν την εναπόθεση των ηλεκτροδίων και την εναπόθεση νανοσωματιδίων πλατίνας, εναποτίθεται στον αισθητήρα στρώμα αλουμίνας 30nm με την τεχνική της εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD) σε θερμοκρασία 150°C.

Παρακάτω ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις $R - t$ με τις αντίστοιχες $\frac{\Delta R}{R} - \epsilon$ που έγιναν σε τέτοιους αισθητήρες με επικάλυψη αλουμίνας και έδειξαν αυξημένες τιμές GF σε σχέση με την πρώτη κατηγορία αισθητήρων που μελετήσαμε. Ως τώρα οι αισθητήρες που έχουμε δει, χωρίς στρώμα αλουμίνας, εμφάνισαν μέγιστο $GF \approx 13.39$, ενώ αυτοί με αλουμίνα ήδη φάνηκε να τον ξεπερνούν. Όμως, στους αισθητήρες με αλουμίνα γενικά μπορούμε να επιτύχουμε αρκετά πιο υψηλά GFs, γεγονός που θα φανεί στις επόμενες μετρήσεις.

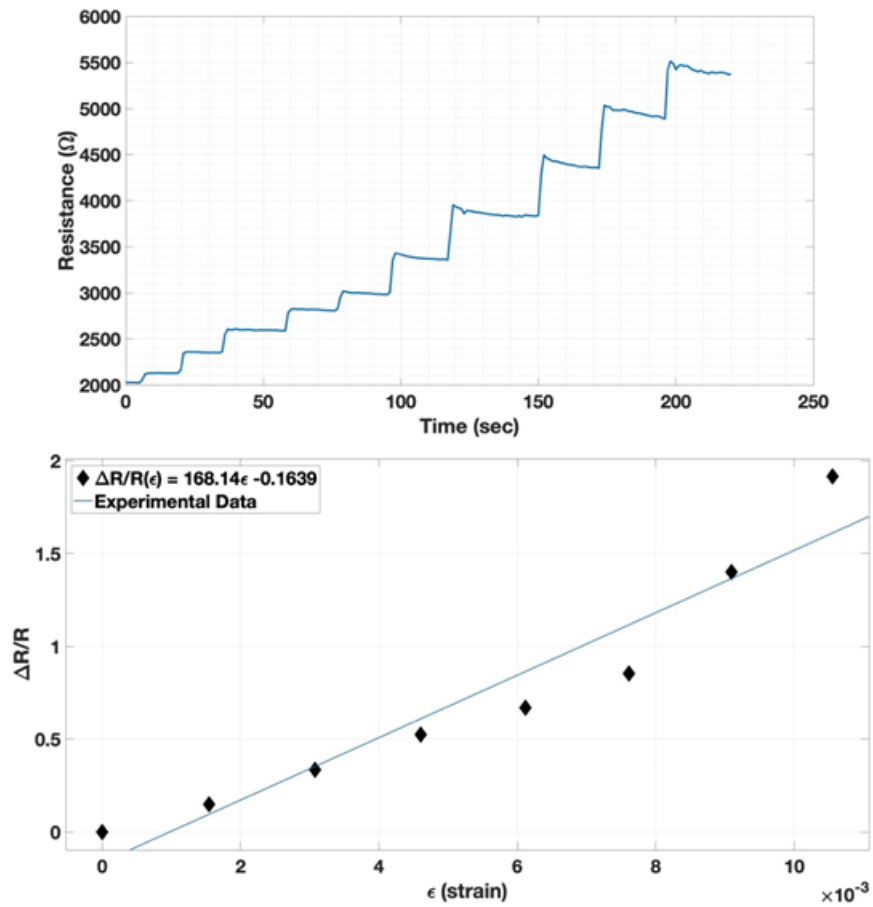
Ήδη φαίνεται από τα σχήματα 4.14,4.15,4.16 ότι αυτοί οι αισθητήρες ξεπέρασαν τους προηγούμενους κατά πολύ όσον αφορά την ευαισθησία. Ο λόγος για τον οποίο είναι πιο ευαίσθητοι οι αισθητήρες με αλουμίνα είναι ο σχηματισμός ρωγμών στην αλουμίνα. Η αλουμίνα είναι φαθυρό υλικό, με υψηλό μέτρο ελαστικότητας (της τάξης των 200GPa [84–87]) και έτσι σχηματίζονται ρωγμές (cracks) στο στρώμα αλουμίνας, που πιθανώς συμβάλλουν στην καλύτερη ευαισθησία.

Τέλος, στα σχήματα 4.17 και 4.18 βλέπουμε το μεγαλύτερο GF σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις.

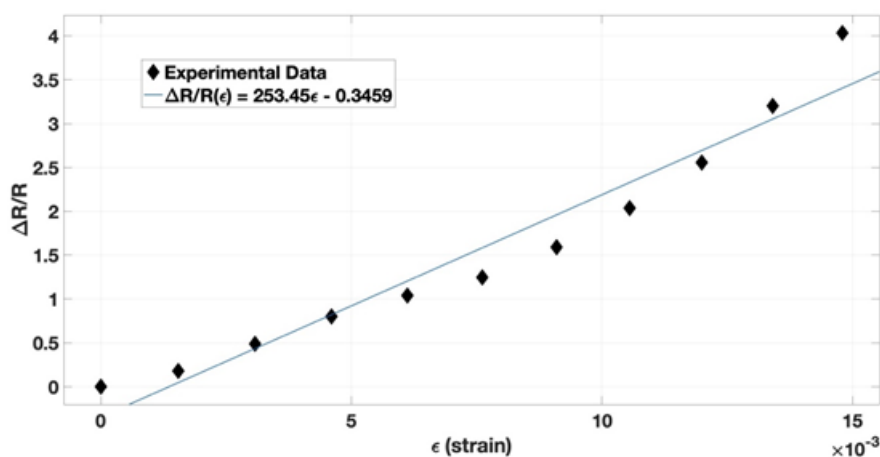
Σχήμα 4.14: Αισθητήρας B2, $GF1 = 43.49$ Σχήμα 4.15: Αισθητήρας B3, $GF1=35.60$, $GF2=70.03$



Σχήμα 4.16: Αισθητήρας B4, $GF_1=36.22$, $GF_2=52.00$.

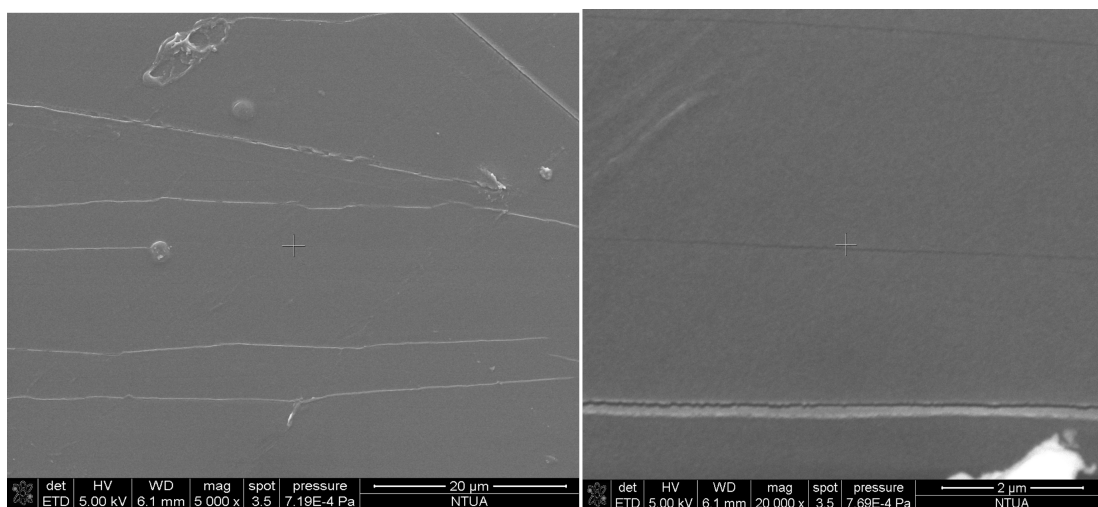


Σχήμα 4.17: Αισθητήρας B5, $GF = 168.14$



Σχήμα 4.18: Αισθητήρας B6, GF = 253.45

Στους δύο τελευταίους αισθητήρες με επικάλυψη αλουμίνια παρατηρούνται οι μέγιστοι GF που έχουμε δει ως τώρα στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Μάλιστα, για αυτούς τους αισθητήρες υπήρξε και η δυνατότητα για εργαστηριακό έλεγχο με SEM μικροσκόπιο.



Σχήμα 4.19: Εικόνες SEM από το εργαστήριο που υποδεικνύουν την ύπαρξη ρωγμών στο στρώμα Al_2O_3 μετά τη διαδικασία εκπαίδευσης

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα ο σχηματισμός ρωγμών στην αλουμίνια, που ενισχύει την θεωρία [60, 64–77] ότι τα cracks αυξάνουν την ευαισθησία του αισθητήρα.

Συνοπτικά, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τις μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας και στρώμα Al_2O_3 από ALD στους 150°C .

Αισθητήρας	Επιφανειακή πυκνότητα NPs (cm^{-2})	Πάχος Al_2O_3 από ALD (nm)	GF1	GF2
B1	$2 \cdot 10^{12}$	19	10.19	17.01
B2	$2 \cdot 10^{12}$	19	43.49	-
B3	$2 \cdot 10^{12}$	19	35.60	70.03
B4	$2 \cdot 10^{12}$	19	36.22	52.00
B5	$2 \cdot 10^{12}$	30	168.14	-
B6	$2 \cdot 10^{12}$	30	253.45	-

Πίνακας 4.2: Καλύτερες ως τώρα μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 3nm και στρώμα Al_2O_3 από ALD στους $150^\circ C$

4.4.3 Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση οξειδίων (HfO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3) με την τεχνική της ιοντοβολής

Για την πιο πολύπλευρη μελέτη των αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια κατασκευάστηκαν και αισθητήρες με υπόστρωμα οξειδίου (SiO_2 ή TiO_2 ή (HfO_2) ή (Al_2O_3)). Εν προκειμένω, η διαδικασία αρχίζει με την κοπή φύλλων πολυϊμιδίου (Kapton) σε σχήμα πλακέτας 3'. Τα φύλλα υποβάλλονται σε ηχοβολισμό για 5 λεπτά σε διάλυμα 2-προπανόλης για την απομάκρυνση τυχόν οργανικών προσμίξεων, πριν προχωρήσουν στο στάδιο της εναπόθεσης. Τα στρώματα οξειδίου HfO_2 (αντίστοιχα και για τα $(SiO_2$ και TiO_2 και $Al_2O_3)$) εναποτέθηκαν με τη μέθοδο RF Magnetron Sputtering.

Η πίεση του θαλάμου μειώθηκε σε, τουλάχιστον, $5 \cdot 10^{-5}$ mbar πριν από την ανάφλεξη του πλάσματος. Το πλάσμα αναφλέχθηκε αυξάνοντας την πίεση λειτουργίας του θαλάμου σε περίπου $5 \cdot 10^{-3}$ mbar που προκλήθηκε από σταθερή ροή Ar 20 sccm. Το υμένιο οξειδίου εναποτέθηκε με τη χρήση κεραμικού στόχου HfO_2 υψηλής καθαρότητας. Η ισχύς εναπόθεσης ρυθμίστηκε σε εύρος 200 - 250 Watt, ώστε να επιτευχθεί σταθερός ρυθμός $0.03 \text{ \AA}/\text{sec}$, πάντα με προσοχή στην κατάλληλη ρύθμιση της γεννήτριας, καθώς οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν ανάκλαση της ισχύος RF. Το τελικό πάχος οξειδίου ήταν περίπου 15-19 nm. Έπειτα, η εναπόθεση ηλεκτροδίων και νανοσωματιδίων έγιναν κατά τα γνωστά, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις.

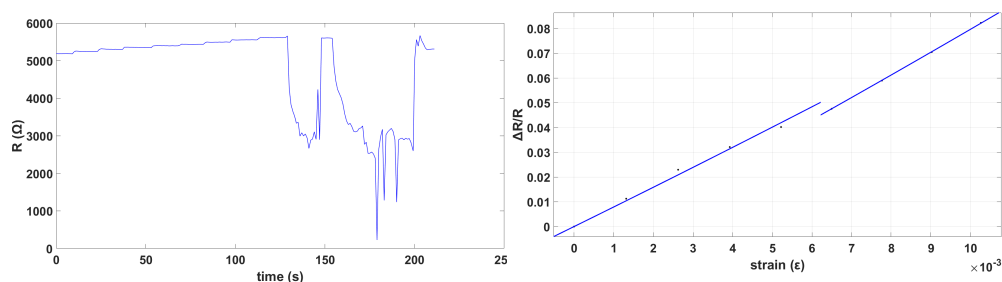
Κατά τον έλεγχο των αισθητήρων φάνηκε ότι κανένας από αυτούς δεν μπορούσε να μετρήσει με ακρίβεια. Ένας λόγος για τον οποίο μπορεί να συνέβη αυτό είναι ότι τα οξείδια παρουσιάζουν άμορφη κατάσταση κάτω από ορισμένες θερμοκρασίες [88–90], γεγονός που εμποδίζει το σχηματισμό των εγκάρσια διαδιδόμενων ρωγμών που απαιτούνται για τη λειτουργία του αισθητήρα παραμόρφωσης. Άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάζει την απόδοση των αισθητήρων είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus) [91], που είναι μια μηχανική ιδιότητα των στερεών υλικών που μετρά την εφελκυστική ή θλιπτική δυσκαμψία όταν μία δύναμη εφαρμόζεται κατά μήκος. Το μέτρο ελαστικότητας του Young αντιπροσωπεύει τη δυσκαμψία του υλικού που συσχετίζεται με την ατομική δομή και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις ηλεκτρικές ιδιότητες και τη θερμική σταθερότητα των επικαλύψεων. Σχετίζεται

με τον ενεργειακό δεσμό μεταξύ των ατόμων, όπου όσο υψηλότερο είναι το μέτρο Young, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ενέργεια ατομικού δεσμού. Η μικροδομή των λεπτών υμενίων μπορεί να αποκλίνει σαφώς από εκείνη των μακροσκοπικών (bulk) υλικών και μπορεί να εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες εναπόθεσης. Από αυτά εξάγεται, λοιπόν, ότι πρέπει να γίνεται έλεγχος, όσο καθίσταται εφικτό, και των μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων οξειδίων που χρησιμοποιούνται. Όπως θα φανεί παρακάτω, ανάλογα με τον τρόπο εναπόθεσης ή και μετέπειτα επεξεργασίας, μπορεί το ίδιο οξείδιο να εμφανίζει διαφορετικές ιδιότητες, ακόμα και στο μέτρο ελαστικότητας, και γενικότερα μπορεί να μην έχει πάντοτε τις επιθυμητές και αναγκαίες ιδιότητες.

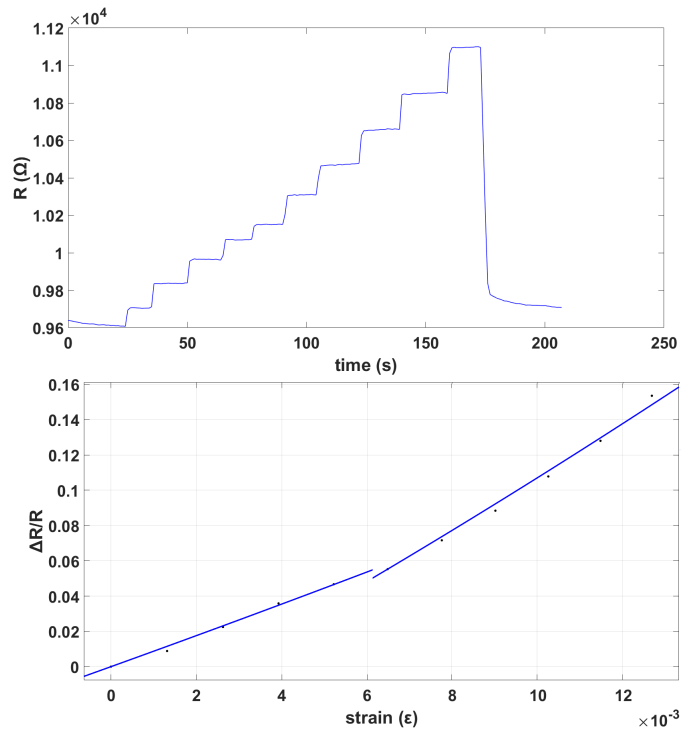
4.4.4 Κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και εναπόθεση οξειδίων με την τεχνική της ιοντοβολής και θερμική ανόπτηση (annealing)

Τη λύση στο προηγούμενο πρόβλημα έδωσε εν μέρει η διαδικασία ανόπτησης (annealing) που ακολουθήθηκε. Έπειτα κάποιοι αισθητήρες, αλλά δυστυχώς όχι όλοι, κατάφεραν να μετρήσουν. Ο όρος ανόπτηση [92] αναφέρεται σε εκείνη τη θερμική διαδικασία κατά την οποία ένα υλικό εκτίθεται για μια παρατεταμένη χρονική περίοδο σε υψηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια ψύχεται με αργό ρυθμό. Συνήθως η ανόπτηση εφαρμόζεται για την αποκατάσταση τάσεων, για την αύξηση της ευπλασίας, της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας ή/και για την παραγωγή μια ιδιαίτερης μικροδομής. Μια ποικιλία από θερμικές κατεργασίες ανόπτησης είναι πιθανό να εφαρμοστούν, οι οποίες χαρακτηρίζονται και από τις αλλαγές που επιφέρουν. Οι αλλαγές αυτές συχνά αφορούν στη μικροδομή του υλικού, ενώ είναι υπεύθυνες και για τη μεταβολή των μηχανικών του ιδιοτήτων. Έλαβε, λοιπόν, χώρα η διεργασία της ανόπτησης για τα δείγματα, που κατασκευάστηκαν με στρώμα οξειδίων με την τεχνική της ιοντοβολής, σε ατμοσφαιρική πίεση σε θερμοκρασίες 150, 200 και 250°C.

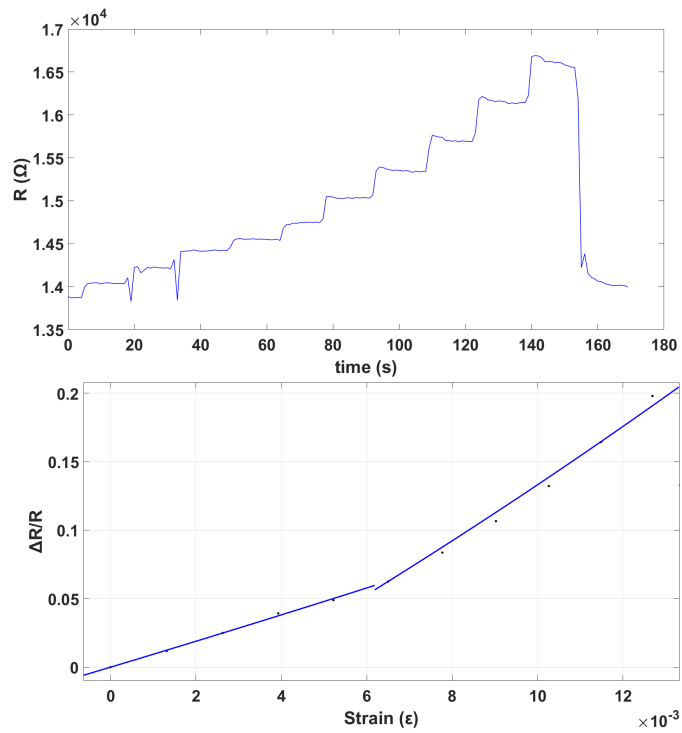
Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι οι αισθητήρες με το SiO_2 δε μετρούν καλά ούτε μετά την ανόπτηση, ενώ από αυτούς με TiO_2 λήφθηκε μέτρηση με τιμή $\text{GF1}=7.87$ και $\text{GF2}=9.02$, ενώ γενικά αυτοί με το οξείδιο HfO_2 μετά την ανόπτηση στο μεγαλύτερο ποσοστό τους μετρούσαν.



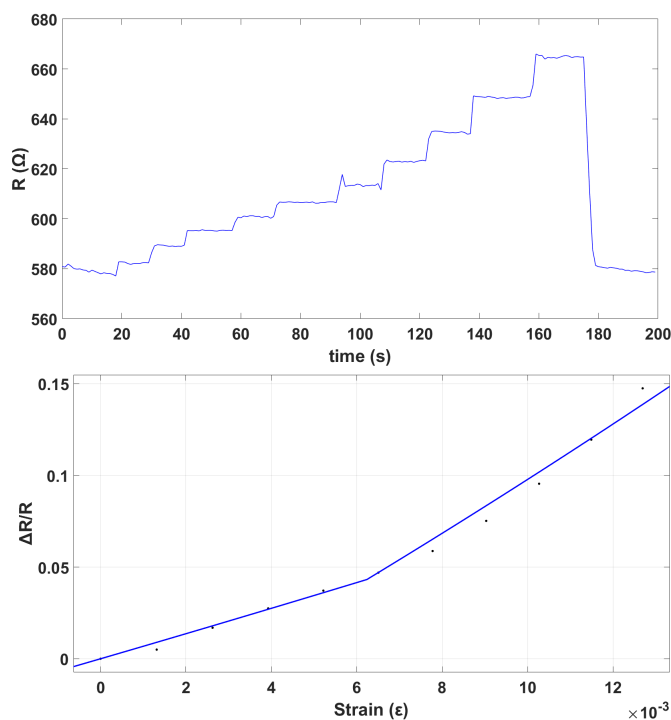
Σχήμα 4.20: Αισθητήρας G1 με υπόστρωμα TiO_2 , $\text{GF1}=7.87$, $\text{GF2}=9.02$



Σχήμα 4.21: Αισθητήρας $\Delta 1$ με υπόστρωμα HfO_2 , $\text{GF1}=8.71$, $\text{GF2}=14.39$



Σχήμα 4.22: Αισθητήρας $\Delta 2$ με υπόστρωμα HfO_2 , $\text{GF1}=9.36$, $\text{GF2}=19.48$



Σχήμα 4.23: Αισθητήρας Δ3 με υπόστρωμα HfO₂, GF1=6.78, GF2=14.16

Αισθητήρας	Είδος οξειδίου από sputtering NPs (cm^{-2})	Πάχος HfO ₂ (nm)	GF1	GF2
Γ1	TiO ₂	15	7.87	9.02
Δ1	HfO ₂	15	8.71	14.39
Δ2	HfO ₂	15	9.36	19.48
Δ3	HfO ₂	15	6.78	14.16
Δ4	HfO ₂	15	7.90	14.93
Δ5	HfO ₂	15	2.54	6.13
Δ6	HfO ₂	15	5.99	12.40
Δ7	HfO ₂	15	4.76	7.20
Δ8	HfO ₂	15	4.33	-

Πίνακας 4.3: Μετρήσεις για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 3nm και επιφανειακής πυκνότητας νανοσωματιδίων ίση με $2 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ και στρώμα οξειδίου TiO₂, HfO₂ από sputtering ύστερα από ανόπτηση στους 250°C.

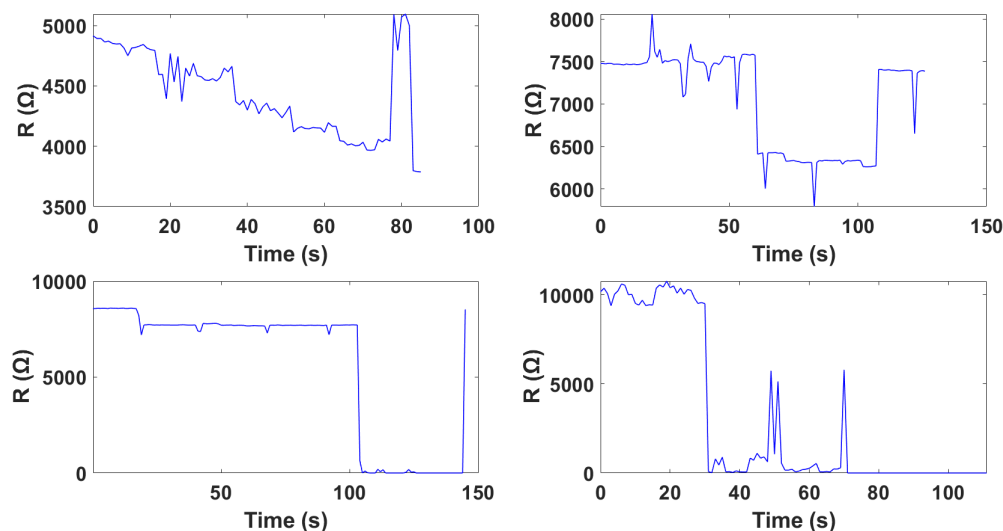
Ενώ τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δουλεύουν οι αισθητήρες με HfO₂, ίσως τελικά το γεγονός ότι δουλεύουν να μην έγκειται τόσο στην χρυστάλλωση του οξειδίου. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία τα υμένια HfO₂ τείνουν να έχουν χρυσταλλική δομή σε κάποιο βαθμό όταν η θερμοκρασία υποστρώματος φτάνει τους 250°C [93], όπως συνέβη εδώ με την θερμοκρασία ανόπτησης. Ωστόσο, η θερμοκρασία ανόπτησης των 250°C δεν επαρκεί ούτε για το οξείδιο TiO₂ που χρυσταλλώνει σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, της τάξης των 400°C [94, 95]

μέχρι και 800°C [96, 97], αλλά ούτε για το SiO₂ που απαιτεί θερμοκρασία υψηλότερη από 400°C [98]. Γενικά, φαίνεται ότι οι αισθητήρες με HfO₂ μετρούν στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους, αλλά δεν εμφανίζουν υψηλούς GF. Η τάξη μεγέθους των GF είναι όμοια με αυτή των αρχικών αισθητήρων παραμόρφωσης με νανοσωματίδια που μετρήθηκαν, οι οποίοι δεν περιείχαν ούτε κάποιο επιπλέον οξειδίο σαν τα προηγούμενα, ούτε επικάλυψη αλουμίνιας. Για να ελεγχθεί σωστότερα αν η χρυστάλλωση είναι αυτή που συμβάλλει καθοριστικά στην βελτίωση της ευαισθησίας των αισθητήρων με HfO₂ ίσως χρειάζεται περαιτέρω ανόπτηση σε υψηλότερες μάλιστα θερμοκρασίες που να ξεπερνούν τους 400°C, όπως υπέδειξαν οι Taube et al. [99], ενώ σύμφωνα με τους Cho et al. [100] μέχρι και σε θερμοκρασία ανόπτησης 500°C το HfO₂ παραμένει άμορφο και στους 600°C μετατρέπεται σε πολυκρυσταλλικό.

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας Young, αυτό βρέθηκε μεταξύ 120 και 180 GPa [88, 101] για το HfO₂, αλλά έφτασε και μέχρι την τιμή 220 ± 40 GPa [86]. Μάλιστα, αυτές οι τιμές τείνουν να πλησιάζουν την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Al₂O₃ που εναποτέθηκε με την τεχνική ALD [86, 87]. Γενικά, η αλουμίνια έχει σημειώσει και τιμές μέτρου ελαστικότητας μεταξύ 215 και 413 GPa [84], αλλά και χαμηλότερες [85], ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία επεξεργάζεται. Αντίθετα, το SiO₂ εμφανίζει αρκετά πιο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, σε τιμές 65-101 GPa [102, 103], ενώ όπως φάνηκε παραπάνω απαιτεί και πιο υψηλές θερμοκρασίες για να επιτευχθεί η χρυστάλλωση. Εντωμεταξύ, το TiO₂ που δούλεψε, απαιτεί και αυτό υψηλότερες θερμοκρασίες ώστε να επιτευχθεί η χρυστάλλωση. Όμως, εμφανίζει και αυτό αρκετά πιο υψηλό μέτρο ελαστικότητας από το SiO₂. Συγκεκριμένα, εμφανίζει τιμές 230-288 GPa [104], αν και έχει βρεθεί να έχει και μέτρο ελαστικότητας με τιμή 118.54 GPa [105]. Λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας των HfO₂ και TiO₂, που είναι συγκρίσιμο με αυτό του Al₂O₃, θα μπορούσαμε να αναρωτηθούμε αν αυτό τελικά συμβάλλει στην επίτευξη ευαισθησίας από τους αισθητήρες με τα αντίστοιχα οξείδια. Πιθανώς, λόγω ψαθυρότητας, σχηματίζονται ρωγμές και στα εν λόγω οξείδια, συνεισφέροντας έτσι στην ευαισθησία του αισθητήρα [106, 107].

Έχοντας δει ως τώρα ότι οι αισθητήρες με αλουμίνια που εναποτέθηκε με την τεχνική ALD παρουσίασαν τους πιο υψηλούς GF, έγινε προσπάθεια να φτιαχτούν και αισθητήρες με αλουμίνια η οποία εναποτέθηκε με sputtering, με αντίστοιχη διαδικασία όπως και τα προηγούμενα οξείδια. Κατασκευάστηκαν, λοιπόν, και τρεις παρτίδες από πέντε αισθητήρες με υπόστρωμα αλουμίνιας, που αρχικά είναι και αυτή άμορφη [108, 109], στους οποίους έγινε ανόπτηση σε θερμοκρασίες 150°C, 200°C και 250°C. Διαπιστώθηκε κατά τους κύκλους παραμόρφωσης ότι κανένας από αυτούς τους αισθητήρες δεν μπορούσε να μετρήσει παραμορφώσεις με ακρίβεια, όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω, καθώς ήταν εμφανές το φαινόμενο ολίσθησης (drift) και απλά γινόταν «ταλάντωση» της τιμής της αντίστασης (στο διάγραμμα $R-t$) χωρίς να ανταποκρίνεται στην ασκούμενη παραμορφώση. Εδώ, η αλουμίνια, όπως αντίστοιχα και τα οξείδια προηγούμενως, παραμένει άμορφη μέχρι τους 500°C [108], αφού δεν αρκεί για θερμική ανόπτηση ούτε θερμοκρασία της τάξης των 600°C [110], οπότε θα έπρεπε επιπλέον ανόπτηση να δοκιμαστεί και σε αυτή την περίπτωση, ενώ οι Chou et al. [109] παρατήρησαν χρυστάλλωση ύστερα από ανόπτηση στους 800°C και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 150GPa, που πιθανώς υποδεικνύει ότι στη δική μας περίπτωση με ανόπτηση στους 250°C το μέτρο

ελαστικότητα παραμένει ακόμα χαμηλότερο, χωρίς να επιτυγχάνεται η θεμιτή φαθυρότητα.



Σχήμα 4.24: Διάφοροι αισθητήρες με στρώμα αλουμίνιας στους οποίους έγινε ανόπτηση σε θερμοκρασίες 150°C, 200°C και 250°C

Συμπερασματικά, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τα χαρακτηριστικά από τους βέλτιστους αισθητήρες που μελετήθηκαν, με τη μέση διάμετρο των νανοσωματιδίων και τις επιφανειακές πυκνότητες των αισθητήρων ως προς τα νανοσωματίδια να είναι ίδια σε κάθε περίπτωση, στις τιμές των 3nm και $2 \cdot 10^{12}\text{cm}^{-2}$ αντίστοιχα.

	Αισθητήρας χωρίς οξείδια	Αισθητήρας με Al_2O_3 από ALD στους 150°C	Αισθητήρας με TiO_2 από RF magnetron sputtering μετά από ανόπτηση στους 250°C	Αισθητήρας με HfO_2 από RF magnetron sputtering μετά από ανόπτηση στους 250°C
Young Modulus οξειδίου (GPa)	-	215-413	230-288	65-101
Πάχος στρώματος οξειδίου (nm)	-	30	15	15
GF	13.39	253.45	9.02	19.48

Πίνακας 4.4: Βέλτιστοι αισθητήρες από κάθε κατηγορία

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα

Ως τώρα παρουσιάστηκε η θεωρία για τους αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια σε εύκαμπτο υπόστρωμα πολυιμιδίου (Kapton), οι μέθοδοι κατασκευής τους και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, καθώς και ο τρόπος μέτρησης της ευαισθησίας τους - του συντελεστή Gauge Factor - στο εργαστήριο. Αρχικά, μελετήθηκαν αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας, των οποίων ο παράγοντας ευαισθησίας βρέθηκε να μην ξεπερνάει την τιμή $GF = 15$. Εν συνεχεία, μελετήθηκαν όμοια με τους προηγούμενους κατασκευασμένοι αισθητήρες που περιείχαν και επιπλέον στρώμα Al_2O_3 , που εναποτέθηκε με την τεχνική ALD σε θερμοκρασία $150^\circ C$, των οποίων η ευαισθησία φάνηκε να εκτοξεύεται μέχρι και την τιμή $GF \approx 253$, δηλαδή την μέγιστη τιμή ευαισθησίας που σημειώθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Τέλος, μελετήθηκαν και άλλοι αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια πλατίνας, οι οποίοι περιείχαν στρώμα οξειδίου, το οποίο ήταν: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 ή HfO_2 και είχε εναποτεθεί με την τεχνική DC Magnetron Sputtering. Από τους τελευταίους κανένας αισθητήρας δεν είχε επαρκή ευαισθησία, καθώς τα εν λόγω οξείδια που εναποτέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με sputtering είναι άμορφα και για αυτό το λόγο έγινε ανόπτηση στα δείγματα σε θερμοκρασίες μέχρι και $250^\circ C$. Ύστερα από την ανόπτηση σε αυτή τη θερμοκρασία, μόνο οι αισθητήρες με οξείδιο HfO_2 και αυτοί με TiO_2 είχαν την δυνατότητα να λειτουργήσουν ικανοποιητικά, με μέγιστη ευαισθησία περίπου $GF \approx 14$. Φαίνεται λοιπόν πως τέτοια θερμοκρασία ανόπτησης κατέστη αρκετή μονάχα για τους αισθητήρες με τα HfO_2 και TiO_2 αλλά όχι με τα SiO_2 , Al_2O_3 . Οι λόγοι που μπορεί να συνέβαλαν σε αυτό είναι η αύξηση σε κάποιο βαθμό της κρυσταλλικότητας των δύο πρώτων οξειδίων ή και η αύξηση της ψαθυρότητας αυτών, που έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μικρορωγμών, όπως και στην περίπτωση της αλουμίνιας από ALD, και ομοίως την αύξηση της ευαισθησίας. Για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να μελετηθούν μελλοντικά τέτοιου τύπου αισθητήρες με καθένα από αυτά τα οξείδια ύστερα από ανόπτηση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ώστε να ελεγχθεί αν δουλεύουν και οι αισθητήρες με οξείδια SiO_2 , Al_2O_3 που εναποτέθηκαν με την τεχνική DC Magnetron Sputtering και να συγκριθεί η ευαισθησία για τις διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης. Έτσι, θα καταστεί δυνατή και μια σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών χρησιμοποιούμενων μεθόδων

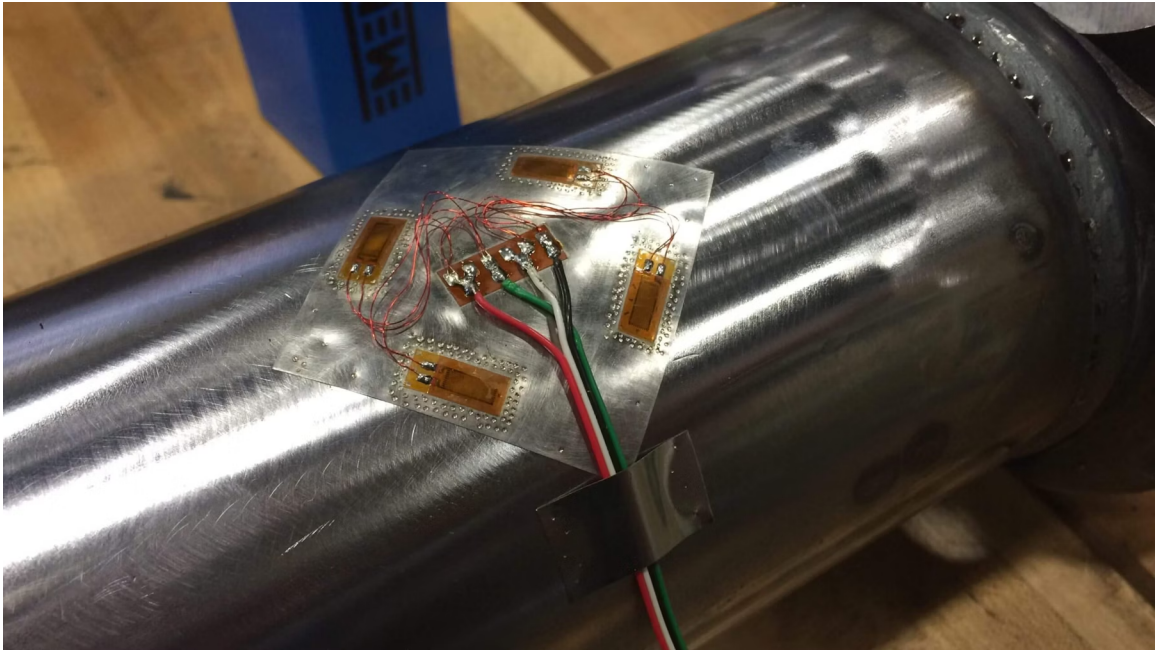
εναπόθεσης, από τις οποίες φαίνεται να υπερτερεί με άνεση η ALD.

5.2 Προοπτικές

Φυσικά όμως δεν παύουν τέτοιοι αισθητήρες να είναι πρακτικό εργαλείο για πολλές εφαρμογές και ως εκ τούτου είναι επιθυμητό και αναγκαίο να μελετώνται και να βελτιώνονται και να κατασκευάζονται. Οι μετρητές παραμόρφωσης βρίσκονται παντού γύρω μας. Δεν είναι απλώς αφηρημένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται από επιστήμονες ή μηχανικούς, αλλά βρίσκονται στα σπίτια μας, στις συσκευές, στα αυτοκίνητα, εκεί όπου εργαζόμαστε και σχεδόν παντού αλλού. Η παραμόρφωση που μετρούν, με τα συνοδευτικά της μεγέθη, όπως η τάση, το βάρος, το φορτίο και η δύναμη, είναι εξαιρετικά σημαντικό να μετρηθεί για αμέτρητες εφαρμογές, σε κάθε μεγάλη βιομηχανία, παντού στον κόσμο. Ήδη τέτοιοι αισθητήρες σαν αυτούς που πραγματεύεται η εργασία έχουν συναντηθεί σε πληθώρα πρόσφατων και τρεχουσών εφαρμογών. Μια πρώτη εφαρμογή είναι η κατασκευή συστοιχίας αισθητήρων παραμόρφωσης πάνω σε εύκαμπτα υποστρώματα [2]. Η ομάδα των Aslanidis et al. χρησιμοποίησε αισθητήρες που αναπτύχθηκαν σε εύκαμπτο υπόστρωμα kapton και τοποθετήθηκαν σε ένα λαστιχένιο γάντι ακριβώς πάνω στις μετακαρποφαλαγγικές αρθρώσεις του χεριού. Οι αισθητήρες ήταν ικανοί να ανιχνεύουν ακόμη και τις απλούστερες καθημερινές κινήσεις του χεριού, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη τεχνητού δέρματος και τεχνητών άκρων. Παρόμοιες προσπάθειες για e-skin έχουν πραγματοποιήσει και οι Lee et al. [44] και οι Shengbo et al. [52]. Επιπρόσθετα, επειδή η δύναμη, η ροπή, η παραμόρφωση, η τάση (πίεση) είναι αλληλένδετα μηχανικά μεγέθη - δηλαδή αν γνωρίζουμε το ένα, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε και τα υπόλοιπα - ο αισθητήρας δύναται να μετράει και πίεση. Ως εκ τούτου, οι Jheng et al. [111] χρησιμοποίησαν αισθητήρες παραμόρφωσης με νανοσωματίδια χρυσού για την παρακολούθηση του ανθρώπινου παλμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την λήψη των μετρήσεων στο εργαστήριο, παρατηρούνταν στο διάγραμμα $R - t$ απότομη στιγμιαία αύξηση της αντίστασης του αισθητήρα με το άκουσμα εξωτερικών δυνατών θορύβων, που σημαίνει ότι οι αισθητήρες μας είναι σε θέση να ανιχνεύουν διάφορες ηχητικές δονήσεις. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνεται και από τους Min et al. [112, 113], τους Yi et al. [114] και τους Aslanidis et al. [115], που κατασκεύασαν αισθητήρες για την ανίχνευση δονήσεων. Υπάρχουν ποικίλες βιομηχανικές, και όχι μόνο, εφαρμογές αισθητήρων παραμόρφωσης, όπως εν συντομία σε συστήματα ζύγισης, σε δοκιμές περιστρεφόμενων εξαρτημάτων, δοκιμές ανεμογεννητριών, δοκιμές κρίσιμων εξαρτημάτων, εφαρμογές μετρητών παραμόρφωσης για την αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημικές εφαρμογές μετρητών παραμόρφωσης. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση για μελλοντική εφαρμογή αφορά κυρίως την ναυτική βιομηχανία, αν και μπορεί εύκολα να γενικευθεί και σε άλλους προαναφερθέντες κλάδους. Είτε πρόκειται για ένα μικρό σκάφος σε μια λίμνη είτε για ένα αεροπλανοφόρο με χιλιάδες ναύτες, πρέπει να γίνονται δοκιμές τάσεων και παραμορφώσεων, όπως και στην άτρακτο υποβρυχίου - ειδικά αν αναλογιστεί κανείς τις πιέσεις στις οποίες υποβάλλεται σε αυξανόμενα βάθη, στα κύτη των σκαφών και πλοίων ώστε να διασφαλιστεί ότι μπορούν να αντέξουν τις πιέσεις της σύγκρουσης με τα κύματα και να παραμείνουν δομικά άρτια. Τα κύτη των πλοίων και οι φέρουσες κατασκευές πρέπει να ελέγχονται για

να διασφαλίζεται η κατάλληλη ακαμψία και η ικανότητα να αντιμετωπίζουν τις απαιτούμενες καταπονήσεις. Όμως πέραν από τα προαναφερθέντα σταθερά τμήματα πλοίων, πρέπει να ελέγχονται και τα κινούμενα μέρη τους! Πρέπει να δοκιμάζονται επίσης οι έλικες με μετρήσεις τάσεων, παραμορφώσεων και ροπών στους άξονες κίνησης και σε άλλα περιστρεφόμενα μέρη του συστήματος πρόωσης, που συμβάλλουν στην ασφαλή πλεύση.

Και πώς θα μπορούσε κανείς να μετρήσει τις παραμορφώσεις στον άξονα μετάδοσης κίνησης ενός πλοίου;



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση άξονα πλοίου με προσκολλημένους αισθητήρες παραμόρφωσης για τη μέτρηση ροπών [116]

Είναι δυνατό με κατάλληλη μελέτη σε ένα εργαστήριο μηχανικής να δοκιμαστεί ένας άξονας φτιαγμένος από κατάλληλο υλικό, έτσι ώστε να προσομοιάζεται άξονας πλοίου. Με την προσκόλληση αισθητήρων παραμόρφωσης, σαν αυτούς που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε διάφορες γωνίες μεταξύ τους θα μπορούσαν να μετρηθούν οι ροπές και γενικότερα οι καταπονήσεις που δέχεται ένας τέτοιος άξονας. Έτσι, αν ξέρουμε υπό ποιες προϋποθέσεις αστοχεί θεωρητικά, θα είμαστε σε θέση να προβλέψουμε την συμπεριφορά του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Φυσικά, οι μετρήσεις δε θα πρέπει να σταματήσουν εδώ, αλλά θα πρέπει εν συνεχεία να γίνουν και επιτόπου μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες πλοίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Julian W Gardner, Vijay K Varadan, and Osama O Awadelkarim. *Microsensors, MEMS, and smart devices*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] Evangelos Aslanidis. Nanoparticle sensor arrays on flexible substrates. 2021.
- [3] About Nanotechnology — National Nanotechnology Initiative — nano.gov. <https://www.nano.gov/about-nanotechnology>. [Accessed 07-07-2024].
- [4] CN Ramachandra Rao, Giridhar U Kulkarni, P John Thomas, and Peter P Edwards. Metal nanoparticles and their assemblies. *Chemical Society Reviews*, 29(1):27–35, 2000.
- [5] <https://sustainable-nano.com/2019/11/12/gold-nanoparticles-color/>. [Accessed 07-07-2024].
- [6] John Bardeen and Walter Hauser Brattain. The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74(2):230, 1948.
- [7] intel.com. <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/technology-briefs/bohr-14nm-idf-2014-brief.pdf>. [Accessed 07-07-2024].
- [8] Qing Xie, Xue Lin, Yanzhi Wang, Shuang Chen, Mohammad Javad Dousti, and Massoud Pedram. Performance comparisons between 7-nm finfet and conventional bulk cmos standard cell libraries. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 62(8):761–765, 2015.
- [9] Sujay B Desai, Surabhi R Madhvapathy, Angada B Sachid, Juan Pablo Llinas, Qingxiao Wang, Geun Ho Ahn, Gregory Pitner, Moon J Kim, Jeffrey Bokor, Chenming Hu, et al. Mos2 transistors with 1-nanometer gate lengths. *Science*, 354(6308):99–102, 2016.
- [10] Dmytro Apalkov, Bernard Dieny, and Jon M Slaughter. Magnetoresistive random access memory. *Proceedings of the IEEE*, 104(10):1796–1830, 2016.
- [11] Markus B Schubert and Jürgen H Werner. Flexible solar cells for clothing. *Materials today*, 9(6):42–50, 2006.

- [12] Inês Cunha, Sofia Henriques Ferreira, Jorge Martins, Elvira Fortunato, Diana Gaspar, Rodrigo Martins, and Luís Pereira. Foldable and recyclable iontronic cellulose nanopaper for low-power paper electronics. *Advanced Sustainable Systems*, 6(9):2200177, 2022.
- [13] RS Rawat. Dense plasma focus—from alternative fusion source to versatile high energy density plasma source for plasma nanotechnology. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 591, page 012021. IOP Publishing, 2015.
- [14] Waseem Khan, Rahul Sharma, and Parveen Saini. Carbon nanotube-based polymer composites: synthesis, properties and applications. *Carbon nanotubes-current progress of their polymer composites*, 1:1–45, 2016.
- [15] Riikka L Puurunen. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum/water process. *Journal of applied physics*, 97(12), 2005.
- [16] Steven M George, Byunghoon Yoon, and Arrelaine A Dameron. Surface chemistry for molecular layer deposition of organic and hybrid organic-inorganic polymers. *Accounts of Chemical Research*, 42(4):498–508, 2009.
- [17] Amy E Marquardt, Eric M Breitung, Terry Drayman-Weisser, Glenn Gates, and RJ Phaneuf. Protecting silver cultural heritage objects with atomic layer deposited corrosion barriers. *Heritage science*, 3:1–12, 2015.
- [18] Steven M George. Atomic layer deposition: an overview. *Chemical reviews*, 110(1):111–131, 2010.
- [19] Riikka Puurunen, Annelies Delabie, and Wilfried Vandervorst. Island growth in atomic layer deposition: a phenomenological model. 2004.
- [20] Mikko Ritala, Markku Leskelä, Erja Nykänen, Pekka Soininen, and Lauri Niinistö. Growth of titanium dioxide thin films by atomic layer epitaxy. *Thin Solid Films*, 225(1-2):288–295, 1993.
- [21] What is Sputtering? PVD Magnetron Sputtering Systems — semicore.com. <https://www.semicore.com/what-is-sputtering>. [Accessed 07-07-2024].
- [22] AI Ayeshe, S Thaker, N Qamhieh, and H Ghamlouche. Size-controlled pd nanocluster grown by plasma gas-condensation method. *Journal of Nanoparticle Research*, 13:1125–1131, 2011.
- [23] Electron Beam Source for Electron Beam Deposition — Science Basics — Products — JEOL Ltd. — jeol.com. <https://www.jeol.com/products/science/eb.php>. [Accessed 07-07-2024].

-
- [24] Ampere A Tseng, Kuan Chen, Chii D Chen, and Kung J Ma. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, 26(2):141–149, 2003.
- [25] Piezoelectricity - Wikipedia — en.wikipedia.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>. [Accessed 07-07-2024].
- [26] Piezoresistive effect - Wikipedia — en.wikipedia.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoresistive_effect. [Accessed 07-07-2024].
- [27] Kurt E Petersen. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5):420–457, 1982.
- [28] Strain Gauge — M Series — High Temperature — Resistance — hbm.com. https://www.hbm.com/en/4707/series-m-strain-gauges-at-an-extended-strain-level/?product_type_no=Strain%20Gauge. [Accessed 07-07-2024].
- [29] D Schumacher. New evidence for the validity of the fuchs-sondheimer theory. *Thin Solid Films*, 152(3):499–510, 1987.
- [30] AF Mayadas and M Shatzkes. Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces. *Physical review B*, 1(4):1382, 1970.
- [31] S Karim, W Ensinger, TW Cornelius, and R Neumann. Investigation of size effects in the electrical resistivity of single electrochemically fabricated gold nanowires. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 40(10):3173–3178, 2008.
- [32] C Durkan and ME Welland. Size effects in the electrical resistivity of polycrystalline nanowires. *Physical review B*, 61(20):14215, 2000.
- [33] Qiaojian Huang, Carmen M Lilley, Matthias Bode, and Ralu Divan. Surface and size effects on the electrical properties of cu nanowires. *Journal of Applied Physics*, 104(2), 2008.
- [34] Amir Zabet-Khosousi and Al-Amin Dhirani. Charge transport in nanoparticle assemblies. *Chemical reviews*, 108(10):4072–4124, 2008.
- [35] John G Simmons. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film. *Journal of applied physics*, 34(6):1793–1803, 1963.
- [36] Walter Kohn and Lu Jeu Sham. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical review*, 140(4A):A1133, 1965.
- [37] Peng Zhang. Scaling for quantum tunneling current in nano-and subnano-scale plasmonic junctions. *Scientific reports*, 5(1):9826, 2015.

- [38] Aidan J Quinn, Paul Beecher, Daniela Iacopino, Liam Floyd, Gianluca De Marzi, Elena V Shevchenko, Horst Weller, and Gareth Redmond. Manipulating the charging energy of nanocrystal arrays. *Small*, 1(6):613–618, 2005.
- [39] Aidan J Quinn and Gareth Redmond. Artificial atom solids based on metal nanocrystals: Formation and electrical properties. *Progress in solid state chemistry*, 33(2-4):263–277, 2005.
- [40] Ping Sheng and Joseph Klafter. Hopping conductivity in granular disordered systems. *Physical Review B*, 27(4):2583, 1983.
- [41] Benjamin Abeles, Ping Sheng, MD Coutts, and Y Arie. Structural and electrical properties of granular metal films. *Advances in Physics*, 24(3):407–461, 1975.
- [42] MA Rafiq, Yoshishige Tsuchiya, Hiroshi Mizuta, S Oda, Shigeyasu Uno, ZAK Durani, and WI Milne. Hopping conduction in size-controlled si nanocrystals. *Journal of applied physics*, 100(1), 2006.
- [43] NF Mott. Conduction in glasses containing transition metal ions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1(1):1–17, 1968.
- [44] Woo Seok Lee, Seung-Wook Lee, Hyungmok Joh, Mingi Seong, Haneun Kim, Min Su Kang, Ki-Hyun Cho, Yun-Mo Sung, and Soong Ju Oh. Designing metallic and insulating nanocrystal heterostructures to fabricate highly sensitive and solution processed strain gauges for wearable sensors. *Small*, 13(47):1702534, 2017.
- [45] Woo Seok Lee, Donggyu Kim, Byeonghak Park, Hyungmok Joh, Ho Kun Woo, Yun-Kun Hong, Tae-il Kim, Don-Hyung Ha, and Soong Ju Oh. Multiaxial and transparent strain sensors based on synergetically reinforced and orthogonally cracked hetero-nanocrystal solids. *Advanced Functional Materials*, 29(4):1806714, 2019.
- [46] Suoming Zhang, Le Cai, Wei Li, Jinshui Miao, Tongyu Wang, Junghoon Yeom, Nelson Sepúlveda, and Chuan Wang. Fully printed silver-nanoparticle-based strain gauges with record high sensitivity. *Advanced Electronic Materials*, 3(7):1700067, 2017.
- [47] J Herrmann, K-H Müller, T Reda, GR Baxter, B d Raguse, GJJ De Groot, R Chai, M Roberts, and L Wiczorek. Nanoparticle films as sensitive strain gauges. *Applied Physics Letters*, 91(18), 2007.
- [48] Paulo Roriz, Lídia Carvalho, Orlando Frazão, José Luís Santos, and José António Simões. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review. *Journal of biomechanics*, 47(6):1251–1261, 2014.
- [49] Meital Segev-Bar and Hossam Haick. Flexible sensors based on nanoparticles. *ACS nano*, 7(10):8366–8378, 2013.

-
- [50] Weiyi Zhang, Qiang Liu, and Peng Chen. Flexible strain sensor based on carbon black/silver nanoparticles composite for human motion detection. *Materials*, 11(10):1836, 2018.
- [51] Zhiwu Han, Linpeng Liu, Junqiu Zhang, Qigang Han, Kejun Wang, Honglie Song, Ze Wang, Zhibin Jiao, Shichao Niu, and Luquan Ren. High-performance flexible strain sensor with bio-inspired crack arrays. *Nanoscale*, 10(32):15178–15186, 2018.
- [52] Sang Shengbo, Liu Lihua, Jian Aoqun, Duan Qianqian, Ji Jianlong, Zhang Qiang, and Zhang Wendong. Highly sensitive wearable strain sensor based on silver nanowires and nanoparticles. *Nanotechnology*, 29(25):255202, 2018.
- [53] Mengyang Zheng, Wenyang Li, Mengjiao Xu, Ning Xu, Peng Chen, Min Han, and Bo Xie. Strain sensors based on chromium nanoparticle arrays. *Nanoscale*, 6(8):3930–3933, 2014.
- [54] JL Tanner, D Mousadacos, K Giannakopoulos, E Skotadis, and D Tsoukalas. High strain sensitivity controlled by the surface density of platinum nanoparticles. *Nanotechnology*, 23(28):285501, 2012.
- [55] Lampros Patsiouras, Evangelos Skotadis, Niovi Gialama, Charalampos Drivas, Stella Kennou, Konstantinos Giannakopoulos, and Dimitris Tsoukalas. Atomic layer deposited al₂o₃ thin films as humidity barrier coatings for nanoparticle-based strain sensors. *Nanotechnology*, 29(46):465706, 2018.
- [56] Kapton - Wikipedia — en.wikipedia.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kapton>. [Accessed 07-07-2024].
- [57] Kapton Polyimide Film — Kapton HPP-ST Film — Fralock — fralock.com. <https://www.fralock.com/solutions-with-engineered-materials/kapton-films/>. [Accessed 07-07-2024].
- [58] T Schallenberg, C Schumacher, S Gundel, and W Faschinger. Shadow mask technology. *Thin Solid Films*, 412(1-2):24–29, 2002.
- [59] Pengcheng Zhang, Yang Dai, Jekaterina Viktorova, Andreas Offenhäusser, and Dirk Mayer. Electronic responses to humidity in monolayer and multilayer aunp stripes fabricated by convective self-assembly. *physica status solidi (a)*, 215(15):1700950, 2018.
- [60] Bendix Ketelsen, Mazlum Yesilmen, Hendrik Schlicke, Heshmat Noei, Chun-Hao Su, Ying-Chih Liao, and Tobias Vossmeier. Fabrication of strain gauges via contact printing: a simple route to healthcare sensors based on cross-linked gold nanoparticles. *ACS applied materials & interfaces*, 10(43):37374–37385, 2018.

- [61] Lucas Digianantonio, Mélanie Gauvin, Thomas Alnasser, David Babonneau, Benoit Viallet, Jérémie Grisolia, Guillaume Viau, Alessandro Coati, Yves Garreau, and Laurence Ressler. Influence of the humidity on nanoparticle-based resistive strain gauges. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(10):5848–5854, 2016.
- [62] Shinya Kano, Kwangsoo Kim, and Minoru Fujii. Fast-response and flexible nanocrystal-based humidity sensor for monitoring human respiration and water evaporation on skin. *ACS sensors*, 2(6):828–833, 2017.
- [63] Evangelos Aslanidis, Evangelos Skotadis, Evangelos Moutoulas, and Dimitris Tsoukalas. Thin film protected flexible nanoparticle strain sensors: experiments and modeling. *Sensors*, 20(9):2584, 2020.
- [64] Daeshik Kang, Peter V Pikhitsa, Yong Whan Choi, Chanseok Lee, Sung Soo Shin, Linfeng Piao, Byeonghak Park, Kahp-Yang Suh, Tae-il Kim, and Mansoo Choi. Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system. *Nature*, 516(7530):222–226, 2014.
- [65] Zhiwu Han, Linpeng Liu, Junqiu Zhang, Qigang Han, Kejun Wang, Honglie Song, Ze Wang, Zhibin Jiao, Shichao Niu, and Luquan Ren. High-performance flexible strain sensor with bio-inspired crack arrays. *Nanoscale*, 10(32):15178–15186, 2018.
- [66] Kang-Hyun Kim, Soon Kyu Hong, Sung-Hun Ha, Luhe Li, Hyung Woo Lee, and Jong-Man Kim. Enhancement of linearity range of stretchable ultrasensitive metal crack strain sensor via superaligned carbon nanotube-based strain engineering. *Materials Horizons*, 7(10):2662–2672, 2020.
- [67] Byeonghak Park, Sori Lee, Hyesu Choi, Jong Uk Kim, Haeleen Hong, Chanho Jeong, Daeshik Kang, and Tae-il Kim. A semi-permanent and durable nanoscale-crack-based sensor by on-demand healing. *Nanoscale*, 10(9):4354–4360, 2018.
- [68] Qiang Zou, Jia Zheng, Qi Su, Wanli Wang, Wei Gao, and Zhuomin Ma. A wave-inspired ultrastretchable strain sensor with predictable cracks. *Sensors and Actuators A: Physical*, 300:111658, 2019.
- [69] Eunhan Lee, Taewi Kim, Heeseong Suh, Minho Kim, Peter V Pikhitsa, Seungyong Han, Je-sung Koh, and Daeshik Kang. Effect of metal thickness on the sensitivity of crack-based sensors. *Sensors*, 18(9):2872, 2018.
- [70] Yongmin Kwon, Chan Park, Jungmin Kim, Hyonguk Kim, Cheoljeong Park, Byeongjun Lee, Yeondo Jeong, and Seong J Cho. Effects of bending strain and crack direction on crack-based strain sensors. *Smart Materials and Structures*, 29(11):115007, 2020.

-
- [71] Jing Li, Rongrong Bao, Juan Tao, Ming Dong, Yufei Zhang, Sheng Fu, Dengfeng Peng, and Caofeng Pan. Visually aided tactile enhancement system based on ultrathin highly sensitive crack-based strain sensors. *Applied Physics Reviews*, 7(1), 2020.
- [72] Taemin Lee, Yong Whan Choi, Gunhee Lee, Sang Moon Kim, Daeshik Kang, and Mansoo Choi. Crack-based strain sensor with diverse metal films by inserting an inter-layer. *RSC advances*, 7(55):34810–34815, 2017.
- [73] Tingting Yang, Xinming Li, Xin Jiang, Shuyuan Lin, Junchao Lao, Jidong Shi, Zhen Zhen, Zhihong Li, and Hongwei Zhu. Structural engineering of gold thin films with channel cracks for ultrasensitive strain sensing. *Materials Horizons*, 3(3):248–255, 2016.
- [74] Yong Whan Choi, Daeshik Kang, Peter V Pikhitsa, Taemin Lee, Sang Moon Kim, Gunhee Lee, Dongha Tahk, and Mansoo Choi. Ultra-sensitive pressure sensor based on guided straight mechanical cracks. *Scientific reports*, 7(1):40116, 2017.
- [75] Silvan Schwebke, Steffen Winter, Marcus Koch, and Günter Schultes. Piezoresistive granular metal thin films of platinum–boron nitride and platinum–alumina at higher strain levels. *Journal of Applied Physics*, 124(23), 2018.
- [76] Rémi Rafael, Etienne Puyoo, and Christophe Malhaire. Piezo-tunneling strain sensors integrated on plastic by combining vacuum thin film coatings and 3d printing technologies. *Microsystem Technologies*, 26:3623–3628, 2020.
- [77] Evangelos Aslanidis, Evangelos Skotadis, and Dimitris Tsoukalas. Resistive crack-based nanoparticle strain sensors with extreme sensitivity and adjustable gauge factor, made on flexible substrates. *Nanoscale*, 13(5):3263–3274, 2021.
- [78] Series 2400 SourceMeter SMU Instruments — tek.com. <https://www.tek.com/en/datasheet/series-2400-sourcemeter-instruments>. [Accessed 07-07-2024].
- [79] David Quirion, Maria Manna, Salvador Hidalgo, and Giulio Pellegrini. Manufacturability and stress issues in 3d silicon detector technology at imb-cnm. *Micromachines*, 11(12):1126, 2020.
- [80] Huifeng Wu, Lei Liang, Hui Wang, Shu Dai, Qiwei Xu, and Rui Dong. Design and measurement of a dual fbg high-precision shape sensor for wing shape reconstruction. *Sensors*, 22(1):168, 2021.
- [81] Natalia Olichwer, Elisabeth W Leib, Annelie H Halfar, Alexey Petrov, and Tobias Vossmeier. Cross-linked gold nanoparticles on polyethylene: resistive responses to tensile strain and vapors. *ACS applied materials & interfaces*, 4(11):6151–6161, 2012.

- [82] Cheng-Wei Jiang, I-Chih Ni, Shien-Der Tzeng, and Watson Kuo. Nearly isotropic piezoresistive response due to charge detour conduction in nanoparticle thin films. *Scientific Reports*, 5(1):11939, 2015.
- [83] Bo Xie, Peng Mao, Minrui Chen, Zhaoguo Li, Chang Liu, Yuyuan Qin, Lun Yang, Maocai Wei, Meifeng Liu, Xiuzhang Wang, et al. A tunable palladium nanoparticle film-based strain sensor in a mott variable-range hopping regime. *Sensors and Actuators A: Physical*, 272:161–169, 2018.
- [84] Properties: Alumina - Aluminium Oxide - Al₂O₃ - A Refractory Ceramic Oxide — azom.com. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>. [Accessed 07-07-2024].
- [85] Eva Gregorová, Willi Pabst, Vojtěch Nečina, Tereza Uhlířová, and Petra Diblíková. Young's modulus evolution during heating, re-sintering and cooling of partially sintered alumina ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(5):1893–1899, 2019.
- [86] K Tapily, JE Jakes, DS Stone, P Shrestha, D Gu, H Baumgart, and AA Elmustafa. Nanoindentation investigation of hfo₂ and al₂o₃ films grown by atomic layer deposition. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(7):H545, 2008.
- [87] Marie K Tripp, Christoph Stampfer, David C Miller, Thomas Helbling, Cari F Herrmann, Christofer Hierold, Ken Gall, Steven M George, and Victor M Bright. The mechanical properties of atomic layer deposited alumina for use in micro-and nano-electromechanical systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 130:419–429, 2006.
- [88] André Luís Marin Vargas, Fabiana de Araújo Ribeiro, and Roberto Hübler. Changes in the young modulus of hafnium oxide thin films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 365:362–366, 2015.
- [89] Jebreel M Khoshman and Martin E Kordesch. Optical properties of a-hfo₂ thin films. *Surface and Coatings Technology*, 201(6):3530–3535, 2006.
- [90] P Barquinha, L Pereira, H Aguas, E Fortunato, and R Martins. Influence of the deposition conditions on the properties of titanium oxide produced by rf magnetron sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 7(4-6):243–247, 2004.
- [91] Young's modulus - Wikipedia — en.wikipedia.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus. [Accessed 07-07-2024].
- [92] William D Callister Jr and David G Rethwisch. *Callister's materials science and engineering*. John Wiley & Sons, 2020.

-
- [93] Hongfei Jiao, Xinbin Cheng, Jiangtao Lu, Ganghua Bao, Yongli Liu, Bin Ma, Pengfei He, and Zhanshan Wang. Effects of substrate temperatures on the structure and properties of hafnium dioxide films. *Applied Optics*, 50(9):C309–C315, 2011.
- [94] P Löbl, M Huppertz, and D Mergel. Nucleation and growth in tio2 films prepared by sputtering and evaporation. *Thin solid films*, 251(1):72–79, 1994.
- [95] Swati S Pradhan, Sambita Sahoo, and Siddhartha Kumar Pradhan. Influence of annealing temperature on the structural, mechanical and wetting property of tio2 films deposited by rf magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 518(23):6904–6908, 2010.
- [96] Masaru Kadoshima, Masahiko Hiratani, Yasuhiro Shimamoto, Kazuyoshi Torii, Hiroshi Miki, Shinichiro Kimura, and Toshihide Nabatame. Rutile-type tio2 thin film for high-k gate insulator. *Thin Solid Films*, 424(2):224–228, 2003.
- [97] ZW Zhao and BK Tay. Study of nanocrystal tio 2 thin films by thermal annealing. *Journal of electroceramics*, 16:489–493, 2006.
- [98] RAB Devine. Defect reactivation and structural relaxation in deposited amorphous sio2. *Journal of applied physics*, 70(7):3542–3550, 1991.
- [99] Andrzej Taube, Robert Mroczyński, Katarzyna Korwin-Mikke, Sylwia Gierałowska, Jan Szmidt, and Anna Piotrowska. Effect of the post-deposition annealing on electrical characteristics of mis structures with hfo2/sio2 gate dielectric stacks. *Materials Science and Engineering: B*, 177(15):1281–1285, 2012.
- [100] Yong Jai Cho, NV Nguyen, Curt A Richter, James R Ehrstein, Byoung Hun Lee, and Jack C Lee. Spectroscopic ellipsometry characterization of high-k dielectric hfo 2 thin films and the high-temperature annealing effects on their optical properties. *Applied physics letters*, 80(7):1249–1251, 2002.
- [101] Maria Berdova, Xuwen Liu, Claudia Wiemer, Alessio Lamperti, Grazia Tallarida, Elena Cianci, Marco Fanciulli, and Sami Franssila. Hardness, elastic modulus, and wear resistance of hafnium oxide-based films grown by atomic layer deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 34(5), 2016.
- [102] Silica - Silicon Dioxide (SiO₂) — azom.com. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1114>. [Accessed 07-07-2024].
- [103] Radim Kudělka, Lukáš Václavek, Jan Tomáščík, Sabina Malecová, and Radim Čtvrtilík. Laser-induced surface acoustic waves for thin film characterization. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 27:57–61, 2020.
- [104] <https://www.azom.comhttps://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1179/article.aspx?ArticleID=1114>. [Accessed 07-07-2024].

- [105] Xing Liu and Jia Fu. Electronic and elastic properties of the tetragonal anatase tio₂ structure from first principle calculation. *Optik*, 206:164342, 2020.
- [106] R Pietruszka, BS Witkowski, S Zimowski, T Stapinski, and M Godlewski. Tribological study of hafnium dioxide and aluminium oxide films grown by atomic layer deposition on glass substrate. *Thin Solid Films*, 709:138191, 2020.
- [107] Lukáš Václavek, Jan Tomašík, Libor Nožka, and Radim Čtvrtlík. Physical characterization of hafnium oxide thin films annealed in vacuum. *Key Engineering Materials*, 784:135–140, 2018.
- [108] I Neelakanta Reddy, V Rajagopal Reddy, N Sridhara, S Basavaraja, AK Sharma, and Arjun Dey. Optical and microstructural characterisations of pulsed rf magnetron sputtered alumina thin film. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(10):929–936, 2013.
- [109] TC Chou, TG Nieh, SD McAdams, and GM Pharr. Microstructures and mechanical properties of thin films of aluminium oxide. *Scripta Metallurgica;(United States)*, 25(10), 1991.
- [110] Rajesh Katamreddy, Ronald Inman, Gregory Jursich, Axel Soulet, Alan Nicholls, and Christos Takoudis. Post deposition annealing of aluminum oxide deposited by atomic layer deposition using tris (diethylamino) aluminum and water vapor on si (100). *Thin Solid Films*, 515(17):6931–6937, 2007.
- [111] Wei-Wun Jheng, Yu-Shun Su, Yun-Lien Hsieh, Yu-Jhan Lin, Shien-Der Tzeng, Chih-Wei Chang, Jenn-Ming Song, and Watson Kuo. Gold nanoparticle thin film-based strain sensors for monitoring human pulse. *ACS Applied Nano Materials*, 4(2):1712–1718, 2021.
- [112] Soo-Hong Min, Tae Hun Lee, Gil-Yong Lee, Daniel Zontar, Christian Brecher, and Sung-Hoon Ahn. Directly printed low-cost nanoparticle sensor for vibration measurement during milling process. *Materials*, 13(13):2920, 2020.
- [113] Soo-Hong Min, Ying-Jun Quan, Su-Young Park, Gil-Yong Lee, and Sung-Hoon Ahn. Interoperable nanoparticle sensor capable of strain and vibration measurement for rotor blade monitoring. *Sensors*, 21(11):3648, 2021.
- [114] Lizhi Yi, Weihong Jiao, Ke Wu, Lihua Qian, Xunxing Yu, Qi Xia, Kuanmin Mao, Songliu Yuan, Shuai Wang, and Yingtao Jiang. Nanoparticle monolayer-based flexible strain gauge with ultrafast dynamic response for acoustic vibration detection. *Nano Research*, 8:2978–2987, 2015.
- [115] Evangelos Aslanidis, Savvas Sarigiannidis, Evangelos Skotadis, and Dimitris Tsoukalas. Vibration sensors on flexible substrates based on nanoparticle films grown by physical vapor deposition. *Materials*, 17(7):1522, 2024.

-
- [116] Strain Gauge Applications — dewesoft.com. <https://dewesoft.com/blog/strain-gauge-applications>. [Accessed 07-07-2024].

