



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών  
Τομέας Φυσικής**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ**

**Πισσάνος Γεώργιος  
Υπεύθυνος Καθηγητής: Τσουκαλάς Δημήτριος  
Αθήνα 2021**

Copyright © 2021

Πισσάνος Γεώργιος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Τσουκαλά Δημήτριο για την την βοήθεια και το ενδιαφέρον που παρείχε καθ'όλη την διάρκεια της ενασχόλησης μου με την διπλωματική εργασία.

Τον μετα-Διδακτορικό Ερευνητή Σκοτάδη Ευάγγελο, η βοήθεια, η καθοδήγηση και γενικότερα οι συμβουλές του ήταν απαραίτητες για να πραγματοποιηθεί η ολοκλήρωση της εργασίας.ήταν πάντα παρών όποτε χρειαζόμουν κάποια συμβουλή ή υπήρχε κάποιο πρόβλημα με την συνέχιση την διαδικασίας.

Τον Διδακτορικό Ερευνητή Ασλανίδη Ευάγγελο για τις σημαντικές συμβουλές του και ιδέες για την συνέχιση της μελέτης και γενικότερη την

Όλη την ερευνητική ομάδα του κ.Τσουκαλά που βοήθησε εξ'αρχής στην προσαρμογή μου και έκανε πιο εύκολη την ενασχόληση μου με την διπλωματική εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με την στήριξή τους με βοήθησαν να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

## Περίληψη

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάμε και χαρακτηρίζουμε χημικούς αισθητήρες νανοσωματιδίων με ρωγμές σε στρώμα αλουμίνας.

Ποιά συγκεκριμένα μελετάμε την απόκριση των αισθητήρων:  $\Delta R/R_0$  (όπου  $\Delta R$  είναι η σχετική αλλαγή στην αντίσταση τους εννοώντας ότι η αντίσταση  $R_0$  του αισθητήρα υπό την παρουσία αζώτου μόνο έχει αφαιρεθεί από την αντίσταση του αισθητήρα όταν εκτίθεται σε διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υγρασίας). Οι παράμετροι που θέλουμε να μελετήσουμε πως επηρεάζουν την απόκριση των αισθητήρων είναι:

- Διαφορετική τιμή Συγκέντρωσης της Υγρασίας που τροφοδοτώ τους Αισθητήρες
- Διαφορετικό πάχος του στρώματος αλουμίνας
- Διαφορετική τιμή παραμόρφωσης που εφαρμόζω στον αισθητήρα

Οι μετρήσεις της αντίστασης των αισθητήρων λαμβάνονται (έχοντας υπόψη κάθε φορά τις δύο τελευταίες παραμέτρους που ανέφερα παραπάνω δηλαδή το πάχος του στρώματος αλουμίνας και την παραμόρφωση που εφαρμόζω) για διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης της υγρασίας που τροφοδοτώ τον αισθητήρα. Σημαντική θεωρείται η μελέτη της επιρροής του ανοίγματος των ρωγμών στην απόκριση του αισθητήρα.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό, και το πειραματικό.

Στο πρώτο μέρος (θεωρητικό) γίνεται μία περιγραφή των αισθητήρων δίνοντας περισσότερη προσοχή στους χημικούς αισθητήρες που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Επίσης γίνεται μια περιγραφή των χαρακτηριστικών των νανοσωματιδίων και των ιδιοτήτων τους καθώς και των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των πολυμερών.

Στο δεύτερο μέρος (πειραματικό) γίνεται πρώτα αναφορά των στόχων της εργασίας, καθώς και σε φαινόμενα που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενες μελέτες και αποτελούν βάση για τον σχεδιασμό των αισθητήρων.

Επίσης γίνεται και ανάλυση των διαδικασιών κατασκευής και χαρακτηρισμού των αισθητήρων.

Στην συνέχεια του πειραματικού μέρους αναφέρονται οι πειραματικές διατάξεις και οι πειραματικές μεθοδολογίες που πραγματοποιήθηκαν.

Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις και την επεξεργασία τους.

Εν κατακλείδι, προτείνονται κάποιες ιδέες για μελλοντικές εργασίες.

**Λέξεις κλειδιά:** Χημικός αισθητήρας, Νανοσωματίδια, Ρωγμές αλουμίνας, Ανίχνευση Υγρασίας, Πολυμερές.

## **Abstract**

In the present diploma thesis I study and characterize flexible chemical sensors with nanoparticles and with alumina cracks.

More specifically I study the response of the sensors:  $\Delta R/R_0$  (whereas  $\Delta R$  is the relative change in their resistance meaning that the resistance  $R_0$  of the sensors when exposed only to  $N_2$  has been subtracted from the resistance of the sensors then they are exposed to different humidity concentrations. The parameters that I want to see how they affect the response of the sensors are:

- Exposure to different concentrations of humidity
- Different thickness of the alumina film
- Different strain values that I apply on the sensors

The resistance of the sensors are measured (having in mind the two parameters that I mentioned above namely the thickness of the alumina film and the strain that I apply ) for different concentrations of humidity. It is considered important to see affect that the opening of the cracks has on the response of the sensors. The thesis consists of three parts, the theoretical, the constructional and the experimental.

In the first part (theoretical), a description of sensors in general takes place, with more emphasis on chemical sensors.

In the second part (constructional) I mention the target of the present thesis and some phenomena that were observed in previous works and are considered important for the design of the sensors.

Also a description of the construction procedures takes place.

In the third and final part (experimental), the experimental systems and procedures that took place are presented, and comments are being made on the results that arose from them.

In conclusion, some ideas for future works are presented.

**Key words:** Chemical sensor, Nanoparticles, Alumina crack, Detection of humidity, Polymer.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1. Θεωρητικό μέρος</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή στους Αισθητήρες	1
1.2 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων	3
1.2.1 Στατικά Χαρακτηριστικά	3
1.2.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά	8
1.2.3 Χαρακτηριστικά Ιδανικού Αισθητήρα	9
1.3 Ταξινόμηση Αισθητήρων	10
1.3.1 Χημικοί Αισθητήρες	11
1.3.2 Πολυμερικοί Αισθητήρες Τύπου Αντίστασης	14
1.4 Νανοτεχνολογία & Νανοσωματίδια	15
1.4.1 Εισαγωγή	15
1.4.2: Ιδιότητες Νανοϋλικών-Νανοσωματιδίων	17
1.4.3 Ταξινόμηση των Υλικών στην Νανοκλίμακα	18
1.5 Πολυμερή	20
1.5.1 Εισαγωγή Στα Πολυμερή	20
1.5.2 Τα Πολυμερή στους Χημικούς Αισθητήρες	22
<b>Κεφάλαιο 2. Πειραματικό μέρος</b>	<b>25</b>
2.1 Σχεδιασμός του Αισθητήρα Αερίων-Ανάλυση Φαινομένων σε Χημικούς Αισθητήρες και Αισθητήρες Παραμόρφωσης	25
2.2 Διαδικασίες Κατασκευής του Χημικού Αισθητήρα	28
2.2.1 Κατασκευή Ηλεκτροδίων	28
2.2.2 Παραγωγή/Εναπόθεση Νανοσωματιδίων	29
2.2.3 Κατασκευή/Εναπόθεση Πολυμερούς	30
2.2.4 Κατασκευή/Εναπόθεση φιλμ αλουμίνιας	31
2.2.5 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού	32
2.3 Πειραματικές Διατάξεις μετρήσεων απόκρισης αισθητήρων	34
2.4 Πειραματική Μεθοδολογία Μετρήσεων Απόκρισης Αισθητήρων	38
2.5 Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων	39
<b>Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b>	<b>48</b>

# Κεφάλαιο 1. Θεωρητικό μέρος

## 1.1 Εισαγωγή στους Αισθητήρες

Αρχικά, μπορούμε να διαχωρίσουμε τους αισθητήρες σε δυο κατηγορίες: στους φυσικούς αισθητήρες που έχουν οι ζωντανοί οργανισμοί(όπως π.χ τα μάτια και τα αυτιά) και στους τεχνητούς αισθητήρες στους οποίους θέλουμε να έχουμε την δυνατότητα ανάγνωσης και επεξεργασίας της πληροφορίας που λαμβάνεται με ηλεκτρονικό τρόπο. Οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθεί ή να ανιχνευτεί μια πληθώρα φυσικών, χημικών ή βιολογικών ποσοτήτων.Οι πρώτοι(τεχνητοί) αισθητήρες ήταν απλές συσκευές, που μέτραγαν μια ποσότητα που είχε κάποια μορφή,μηχανικού, ηλεκτρικού ή οπτικού ενδιαφέροντος και παράγουν κάποια μορφή μηχανικού,ηλεκτρικού ή οπτικού σήματος ως έξοδο.

Την τελευταία δεκαετία περίπου, ο προγραμματισμός,η διάχυτη επικοινωνία, η πρόσβαση στο διαδίκτυο και οι έξυπνες συσκευές έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη των δυνατοτήτων των αισθητήρων. Μερικοί λόγοι για την ενθάρρυνση της ενασχόλησης με τις εφαρμογές των αισθητήρων, είναι **[1]**:

**Υγεία:** Όπως αναφέρθηκε, μια πληθώρα, κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων έχουν μεγάλη επιρροή στην φυσιολογική πορεία του πλανήτη.Παθήσεις που σχετίζονται με τον τρόπο ζωής είναι σε άνοδο παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια. Συχνή παρακολούθηση παραγόντων όπως η πίεση, οι παλμοί της καρδιάς είναι σημαντική, σε αυτά μπορούν να συμβάλλουν οι αισθητήρες.

**Τεχνολογία:** Όσο αυξάνεται η τεχνολογία παράλληλα εξελίσσεται και η τεχνολογία των αισθητήρων. Νέοι “έξυπνοι” αισθητήρες ή νέα συστήματα αισθητήρων μέσω της ενσωμάτωσής τους σε τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών επιτρέπουν την συμμετοχή των αισθητήρων στην ευρύτερη τεχνολογική ανάπτυξη.

Οι αισθητήρες εκμεταλλεύονται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από απλές μετρήσεις θερμοκρασίας μέχρι την ανίχνευση ειδών βακτηρίων χρησιμοποιώντας προηγμένα οπτικά συστήματα.Δεν υπάρχουν ομοιογενής περιγραφές ορισμού για τους αισθητήρες, σε πολλές περιπτώσεις οι ορισμοί που δίνονται εξαρτώνται από την κλάδο εφαρμογής των αισθητήρων.

Ένας γενικός ορισμός μπορεί να θεωρηθεί ο παρακάτω:

**Μια συσκευή η οποία δέχεται ένα ερέθισμα και αποκρίνεται με ένα ηλεκτρικό σήμα.[2]**

Στην βιβλιογραφία αγγλικής γλώσσας συναντάται και ο όρος transducer.

Οι λέξεις αισθητήρας και μορφοτροπέας χρησιμοποιούνται συχνά σε περιεχόμενα μετρητικών συστημάτων. Η διαφορά τους μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Ο μορφοτροπέας μπορεί να διατυπωθεί ως ένα μετατροπέας οποιασδήποτε μορφής ενέργειας σε μια άλλη μορφή ενέργειας, σε αντίθεση με ένα αισθητήρα ο οποίος μετατρέπει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.



## 1.2 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Οι αισθητήρες παράγουν ένα εξαγόμενο σήμα σαν απόκριση σε ένα φυσικό,χημικό ή βιολογικό μετρητέο μέγεθος και απαιτούν ένα εισαγόμενο σήμα για να λειτουργήσουν.Ωστόσο, δεν υπάρχει μια πρότυπος περιγραφή για πολλά από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, καθώς η περιγραφή εξαρτάται από την χρήση και τον τομέα στον οποίο εφαρμόζονται κάθε φορά.Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε στατικά και δυναμικά.

### 1.2.1 Στατικά Χαρακτηριστικά

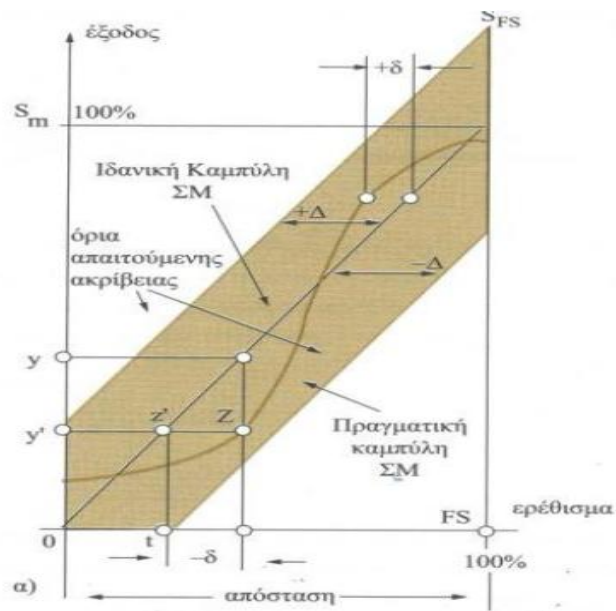
Τα στατικά χαρακτηριστικά, είναι τα χαρακτηριστικά τα οποία ισχύουν όταν το σύστημα του μετρούμενου μεγέθους και του αισθητήρα βρίσκονται σε ισορροπία. [3]

**Εύρος:** Το εύρος είναι ένα στατικό χαρακτηριστικό το οποίο περιγράφει την ελάχιστη και την μεγιστή τιμή μιάς ποσότητας ενός μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας.

**Συνάρτηση Μεταφοράς:** Η συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει την σχέση μεταξύ των μετρούμενων μεγεθών και των σημάτων εξόδου.Εαν η σχέση αυτή είναι ανεξάρτητη του χρόνου ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα.

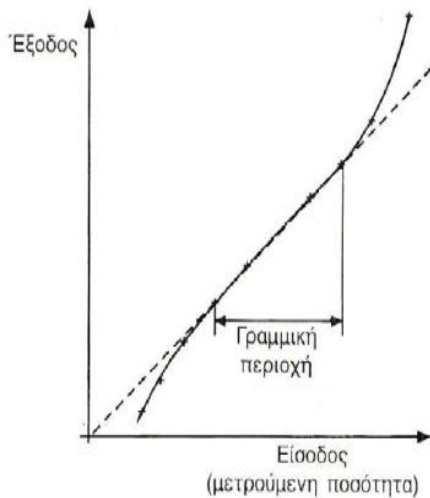
Μια μαθηματική σχέση η οποία περιγράφει την συνάρτηση μεταφοράς εκφράζεται συνήθως ως  $S=F(x)$ , όπου  $x$  είναι το μετρούμενο μέγεθος και  $S$  είναι το ηλεκτρικό σήμα το οποίο παράγεται από τον αισθητήρα.

Η πιο απλή συνάρτηση μεταφοράς είναι μια γραμμική συνάρτηση η οποία περιγράφεται από την μορφή:  $S= A + Bx$ , όπου  $A$  είναι η μετατόπιση(offset) του αισθητήρα και  $B$  είναι η κλίση του αισθητήρα. Η μετατόπιση(offset)  $A$  του αισθητήρα είναι η εξαγόμενη τιμή του αισθητήρα όταν δεν έχουμε κάποιο μετρούμενο μέγεθος.Η κλίση μιας γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς είναι ίση με την ευαισθησία του αισθητήρα.



**Εικόνα 1: Συνάρτηση Μεταφοράς για την επεξήγηση της έννοιας της ακρίβειας**

**Γραμμικότητα:** Η γραμμικότητα ενός αισθητήρα αποτελεί τον βαθμό στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μια περιοχή τιμών του σήματος εισόδου.

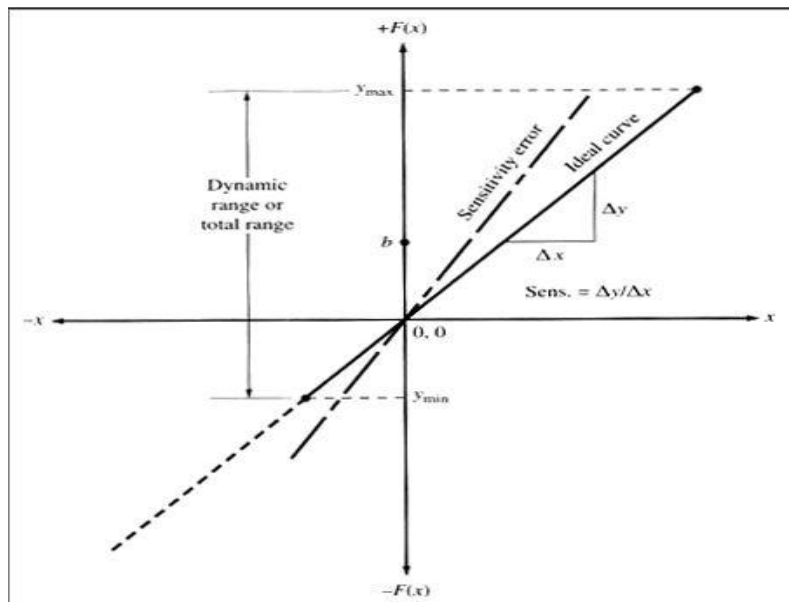


**Εικόνα 2: Αναπαράσταση Γραμμικότητας ενός αισθητήρα**

**Ευαισθησία:** Δείχνει την ανταπόκριση του αισθητήρα σε μια μεταβολή του σήματος εξόδου.

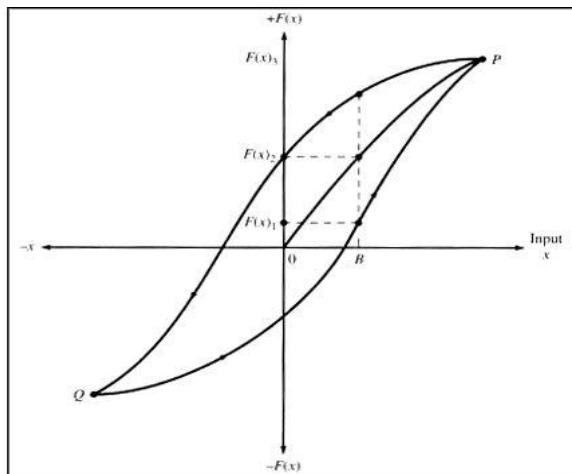
Δυο θέματα που σχετίζονται με την ευαισθησία είναι η νεκρή ζώνη και το κατώφλι.

Η νεκρή ζώνη είναι ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών εισόδου για το οποίο η τιμή του σήματος εξόδου δεν μεταβάλλεται.



**Εικόνα 3:** Αναπαράσταση Εύρους και ευαισθησίας ενός αισθητήρα

**Υστέρηση:** Η υστέρηση εκφράζει την απόκλιση της τιμής εξόδου για συγκεκριμένη τιμή του σήματος εισόδου, όταν αντιστραφεί η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου (δηλαδή εάν το σήμα εισόδου αυξάνεται ή μειώνεται για να καταλήξει στην συγκεκριμένη τιμή που μελετάμε στην έξοδο).



**Εικόνα 4:** Καμπύλη Υστέρησης

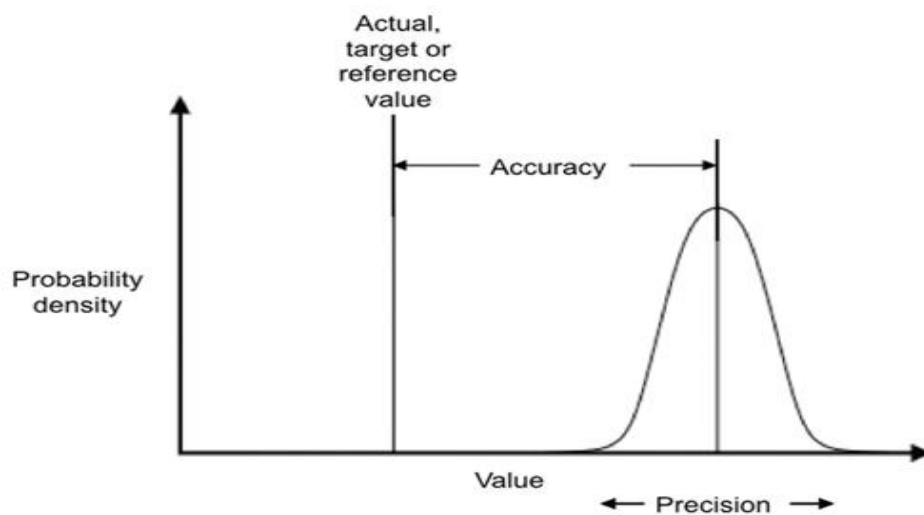
**Διακριτική Ικανότητα:** Ορίζεται ως η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου που απαιτείται για να μεταβληθεί το σήμα εξόδου στον αισθητήρα.

**Accuracy(Ακρίβεια):** Ως ακρίβεια ενός αισθητήρα εκφράζεται η δυνατότητα ενός αισθητήρα να παρέχει σήμα εξόδου κοντά στην πραγματική τιμή της μετρούμενης ποσότητας(σήμα εξόδου ιδανικού αισθητήρα).

Περιγράφει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα μεταξύ του σήματος εξόδου που λαμβάνουμε και του ιδεατού σφάλματος εξόδου.

Μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ως το ποσοστό σχετικού σφάλματος χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση :

$$\text{Ποσοστό σχετικού σφάλματος} = \frac{\text{Μετρούμενη Τιμή} - \text{Πραγματική Τιμή}}{\text{Πραγματική Τιμή} \times 100}$$



**Εικόνα 5:**Αναπαράσταση ακρίβειας αισθητήρα.

**Επαναληψιμότητα:** Περιγράφει την δυνατότητα του αισθητήρα να επαναλαμβάνει το σήμα εξόδου.

**Σφάλμα:** Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της πραγματικής τιμής μιας ποσότητας όπου η πραγματική τιμή αναφέρεται σε μια συμφωνημένη τιμή(τιμή που δίνει ένας ιδανικός αισθητήρας).

Υπάρχουν δυο μορφές σφάλματος: το συστηματικό σφάλμα και το τυχαίο σφάλμα. [4]

**Συστηματικό Σφάλμα:** Το συστηματικό σφάλμα σχετίζεται με επαναλαμβανόμενες ανακρίβειες που μπορούν να διορθωθούν με αντισταθμιστικές μεθόδους, τα σφάλματα αυτά είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων όπως αλλαγές στην χημική σύσταση ή στην εφαρμοζόμενη μηχανική τάση.

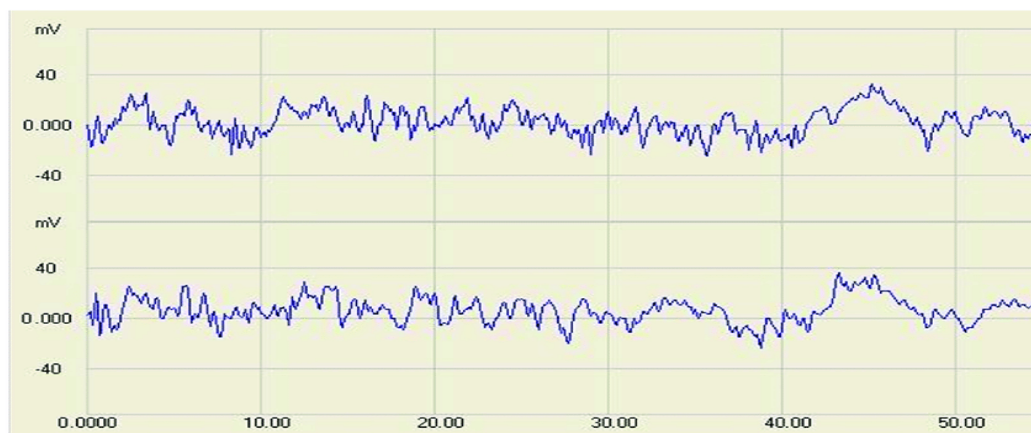
**Τυχαίο Σφάλμα(Θόρυβος):** Σήμα το οποίο δεν περιέχει πληροφορία.

Η ποιότητα ενός σήματος εκφράζεται ποσοτικά ως η αναλογία μεταξύ σήματος και θορύβου(αναλογία του εύρους του πραγματικού σήματος με την τυπική απόκλιση του θορύβου).

Ο θόρυβος μπορεί να μετρηθεί μετρώντας το σήμα εξόδου χωρίς να έχω κάποιο μετρούμενο μέγεθος.

Τα πραγματικά τυχαία σφάλματα(άσπρος θόρυβος) ακολουθούν μια γκαουσιανή κατανομή.

Πηγές της τυχαιότητας είναι : ο θόρυβος από το περιβάλλον, ο θόρυβος από το ίδιο το μετρούμενο μέγεθος κλπ.



**Εικόνα 6: Θόρυβος Σήματος Αισθητήρα**

**Διακριτική Ικανότητα(resolution):** Η διακριτική ικανότητα ορίζεται ως η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου που απαιτείται για να μεταβληθεί το σήμα εξόδου.

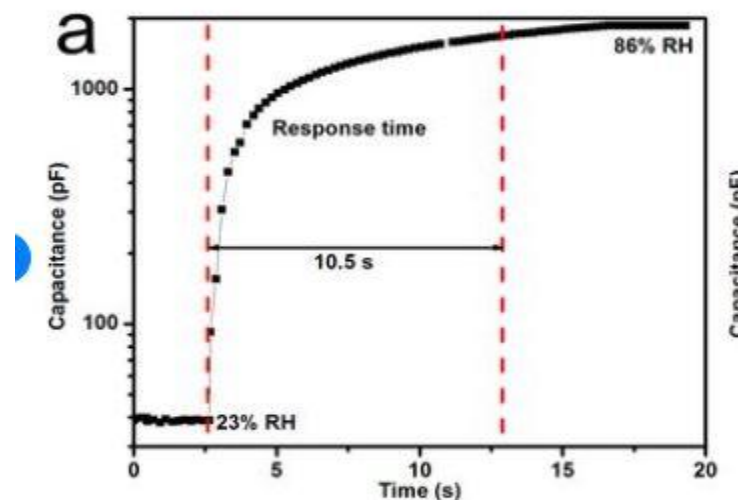
**Όριο Ανίχνευσης:** Σχετίζεται με την χαμηλότερη συγκέντρωση ενός αναλυτή που μπορεί να ανιχνευτεί.

## 1.2.2 Δυναμικά Χαρακτηριστικά

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά αποκτούν ισχύ όταν το σήμα εισόδου είναι μεταβλητό. Η απόκριση ενός αισθητήρα όταν το σήμα εισόδου είναι μεταβαλλόμενο είναι διαφορετική από όταν το σήμα εισόδου είναι σταθερό και δεν μπορεί να περιγραφεί από τα στατικά χαρακτηριστικά σε ικανοποιητικό βαθμό.

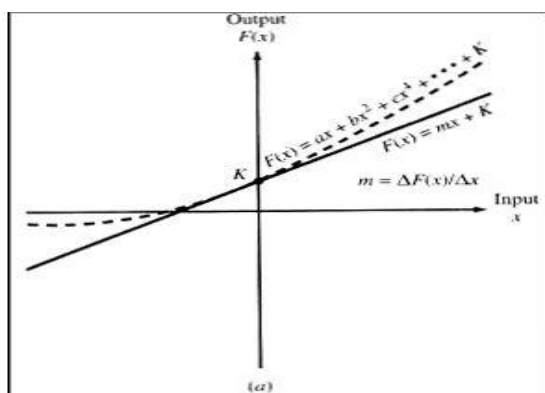
**Χρόνος Απόκρισης:** Οι αισθητήρες δεν αλλάζουν το σήμα εξόδου τους κατευθείαν με το που πραγματοποιούμε μια αλλαγή στο σήμα εισόδου τους.

Η χρονική περίοδος που χρειάζεται για τον αισθητήρα να αλλάξει το σήμα εξόδου του από την προηγούμενη κατάσταση στην νέα κατάσταση ονομάζεται χρόνος απόκρισης.



**Εικόνα 7:** Χρόνος Υστέρησης

**Δυναμική Γραμμικότητα:** Η δυναμική γραμμικότητα ενός αισθητήρα αποτελεί μια μέτρηση της ικανότητάς του να ακολουθεί ταχύες/απτόμενες αλλαγές της παραμέτρου που εισάγουμε στην είσοδο.



**Εικόνα 8:** Γραφικές Παραστάσεις σήματος εξόδου-εισόδου.

### 1.2.3 Χαρακτηριστικά Ιδανικού Αισθητήρα

Αν ένας αισθητήρας λειτουργούσε ιδανικά(με την βέλτιστη λειτουργία) τα χαρακτηριστικά του θα είχαν ιδανικές τιμές για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του : Ο χρόνος απόκρισης θα ήταν μηδέν,το εύρος συχνοτήτων θα ήταν άπειρο, η ευαισθησία θα ήταν υψηλή και σταθερή, και η διακριτική ικανότητα θα ήταν άπειρη Πρακτικά δεν μπορεί να κατασκευαστεί ένας ιδανικός αισθητήρας λόγω διαφόρων παραμέτρων που το καθιστούν αδύνατο. Συνεπώς, θεμιτή είναι η αναζήτηση τρόπων για την προσέγγιση ιδανικών τιμών για τα χαρακτηριστικά που είναι υπεύθυνα για την αλλοίωση του σήματος εξόδου και την απόκλιση από τις ιδανικές τιμές

Οι λόγοι που μας απομακρύνουν από έναν ιδανικό αισθητήρα είναι :

- Το περιορισμένο εύρος των μετρήσεων και η χαμηλή ευαισθησία.
- Θόρυβος που μεταφέρει λανθασμένη πληροφορία και περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου.
- Ολίσθηση της ευαισθησίας, που προκαλεί μεταβολές στην έξοδο με την πάροδο του χρόνου.
- Υστέρηση, η οποία προκαλεί απόκλιση των τιμών του σήματος εξόδου που με την σειρά της προκαλεί συστηματικό σφάλμα στην καμπύλη εισόδου-εξόδου.
- Παρεμβολές από εξωτερικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία.

Η αύξηση του ενδιαφέροντος και της εφαρμογής της νανοτεχνολογίας και των νανοϋλικών, μας βοηθάνε στην αναζήτηση και στην προσέγγιση των ιδανικών τιμών για τα χαρακτηριστικά ενός ιδανικού αισθητήρα.[5]

## 1.3 Ταξινόμηση Αισθητήρων

Υπάρχουν διαφορετικές ταξινομήσεις και διαφορετικά κριτήρια με βάση τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν οι αισθητήρες όπως η φυσική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους, η μορφή ενέργειας που φέρει το σήμα τους κ.α. [6]

**Διαχωρίζοντας** τους αισθητήρες με βάση την φυσική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους έχουμε:

**1) Παθητικοί Αισθητήρες:** Ονομάζονται οι αισθητήρες που μπορούν να μετατρέψουν την ενέργεια εισόδου ενός εξωτερικού ερεθίσματος σε σήμα εξόδου, συνεπώς δεν χρειάζονται κάποια επιπρόσθετη πηγή ενέργειας για να λειτουργήσουν.

Παραδείγματα αποτελούν οι φωτοδίοδοι, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες κ.α.

**2) Ενεργητικοί Αισθητήρες:** Οι ενεργητικοί αισθητήρες από την άλλη για να λειτουργήσουν χρειάζονται τροφοδοσία..

**Διαχωρίζοντας** τώρα τους αισθητήρες με βάση την μορφή ενέργειας που μεταφέρει το σήμα τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε :

**1) Μηχανικοί Αισθητήρες:** Οι μηχανικοί αισθητήρες βασίζονται στην αρχή ότι μπορούν να μετρούν αλλαγές σε ένα μηχανισμό ή μια συσκευή σαν αποτέλεσμα κάποιας μορφής σήματος εισόδου το οποίο προκαλεί μηχανική παραμόρφωση.

Σήματα εισόδου μπορούν να αποτελέσουν η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η εκτόπιση που έχουν αποτέλεσμα την μηχανική παραμόρφωση η οποία μπορεί να μετρηθεί.

**2) Οπτικοί Αισθητήρες:** Οι οπτικοί αισθητήρες δουλεύουν ανιχνεύοντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μετρώντας αλλαγές στην ένταση του φωτός που σχετίζεται με την εκπομπή ή την απορρόφηση φωτός από μια ποσότητα που μας ενδιαφέρει..

Παραδείγματα αποτελούν οι φωτοανιχνευτές, το παρεμβολόμετρο κ.α.

**3) Θερμικοί Αισθητήρες:** Οι θερμικοί αισθητήρες μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε μια αντίστοιχη ηλεκτρική ποσότητα η οποία μπορεί να επεξεργαστεί.

Αναλόγως με την μορφή εξόδου τους κατηγοριοποιούνται σε ηλεκτρικούς και μη ηλεκτρικούς.

Παραδείγματα ηλεκτρικών θερμικών αισθητήρων είναι τα θερμοζεύγη, τα θερμίστορς κ.α. Παραδείγματα μη-ηλεκτρικών θερμικών αισθητήρων είναι τα θερμόμετρα, οι θερμικοί αισθητήρες οπτικών ινών κ.α



**4)Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες:** Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες αναλόγως τον τρόπο λειτουργίας τους διαχωρίζονται σε αυτούς που μετρούν τάση(potentiometric), σε αυτούς που μετρούν ηλεκτρικό ρεύμα(ampereometric) και σε αυτούς που βασίζονται στην μέτρηση αγωγιμότητας(conductometric).

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είτε χρησιμοποιούνται ειδικά ηλεκτρόδια είτε λαμβάνει χώρα μια χημική αντίδραση είτε η μεταφορά φορτίου διαμορφώνεται απο την αντίδραση

Ένας βασικός κανόνας για κάθε ηλεκτροχημικό αισθητήρα είναι ότι πάντα απαιτείται ένα κλειστό κύκλωμα, έτσι ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα να μπορεί να το διαπερνά για να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση, συνεπώς απαιτούνται δυο ηλεκτρόδια.

Ο ηλεκτρολύτης που περιέχουν είναι ένα μέσο το οποίο έχει φορτία από τα ιόντα που περιλαμβάνει.Αυτό απευθείας περιορίζει τις αντιδράσεις που μπορούν να πάρουν μέρος και λειτουργεί σαν το πρώτο επίπεδο παροχής επιλεκτικότητας στον ηλεκτροχημικό αισθητήρα.

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες αποτελούνται από ηλεκτροχημικά κελιά δυο ηλεκτροδίων τα οποία έρχονται σε επαφή με ένα στερεό ή έναν υγρό ηλεκτρολύτη.

### 1.3.1 Χημικοί Αισθητήρες

Υπάρχουν δυο προφανείς λόγοι για την περαιτέρω ενασχόληση με τους χημικούς αισθητήρες σαν ανεξάρτητο πεδίο.Ένας λόγος είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας που διεγείρει την ζήτηση και την ανάγκη για παραπάνω μελέτη των αισθητήρων.Ο δεύτερος λόγος είναι η ανάπτυξη της αναλυτικής χημείας που έχει σαν συνέπεια την ανάπτυξη και στον χώρο των αισθητήρων.

**Χημικός αισθητήρας** είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να μετατρέπει μια χημική πληροφορία όπως η συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου μέρους ενός δείγματος ή η συνολική ανάλυση της συστασής του, σε ένα αναλυτικά χρήσιμο σήμα. [7]

Ένας άλλος **ορισμός** μπορεί να θεωρηθεί ο παρακάτω:

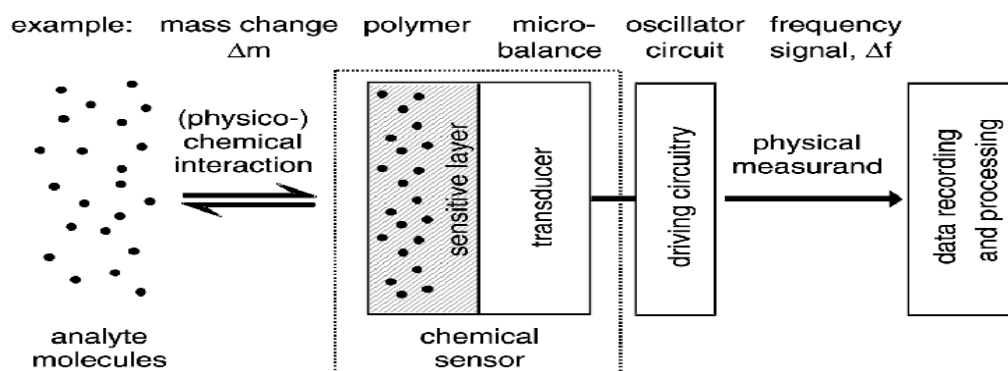
Τα σήματα του αισθητήρα δεν πρέπει να είναι στάσιμα αλλά να αποκρίνονται δυναμικά σε αλλαγές στην συγκέντρωση του δείγματος κατά την διάρκεια της μέτρησης.

Επίσης οι χημικοί αισθητήρες μπορούν να **ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες,**

- **Άμεσους(direct)** :Οι άμεσοι μπορούν να ανιχνεύσουν μια σειρά φαινομένων που επηρεάζουν άμεσα το ηλεκτρικό σήμα,
- **Έμμεσους:** οι Έμμεσοι χρειάζονται έναν μετατροπέα, δηλαδή μια συσκευή που θα μετατρέψει την μορφή ενέργειας που προκαλει το εξωτερικό ερέθισμα, σε ένα ηλεκτρικό σήμα.

Οι χημικοί αισθητήρες **ιδανικά θα πρέπει:**

- Να μετατρέπουν χημικές ποσότητες σε ηλεκτρικά σήματα
- Να έχουν ταχεία ανταπόκριση
- Να διατηρούν την λειτουργικότητα τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα
- Να είναι μικρού μεγέθους
- Να είναι φθηνοί
- Να ανταποκρίνονται αποκλειστικά σε μια αναλυτέα ουσία, ή τουλάχιστον να είναι επιλεκτικοί σε μια ομάδα αναλυτών.
- Να έχουν χαμηλό όριο ανίχνευσης(να μπορούν να ανιχνεύουν ουσίες οι οποίες έχουν χαμηλές τιμές συγκέντρωσης)
- Υψηλή ευαισθησία



**Εικόνα 9: Δομή Χημικού Αισθητήρα**

Οι **χημικοί αισθητήρες** συνήθως **αποτελούνται** από δυο βασικά μέρη τα οποία συνδέονται σε σειρά:

- **ένα χημικό σύστημα αναγνώρισης(υποδοχέας)**
- **ένα φυσικοχημικό μετατροπέα.**

Στην πλειονότητα των χημικών αισθητήρων, ο υποδοχέας αλληλεπιδρά με τα μόρια του αναλύτη με αποτέλεσμα οι φυσικές ιδιότητες του να αλλάζουν με τέτοιο τρόπο ώστε ο μετατροπέας να μπορεί να λάβει ηλεκτρικό σήμα. Σε μερικές περιπτώσεις το ίδιο το αντικείμενο λειτουργεί σαν υποδοχέας και σαν μετατροπέας.

**Υποδοχέας:** Τον ρόλο του υποδοχέα σε πολλές περιπτώσεις παίζει ένα λεπτό στρώμα το οποίο έχει την δυνατότητα να αντιδρά με μόρια της αναλυτέας ουσίας, να καταλύει μια αντίδραση επιλεκτικά, ή να συμμετέχει σε μια χημική εξίσωση μαζί με την αναλυτέα ουσία. Στρώματα αναλυτέας ουσίας μπορούν να αποκριθούν επιλεκτικά σε συγκεκριμένες ουσίες ή μια ομάδα ουσιών. Για το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται ο

όρος μοριακή αναγνώριση. Μεταξύ των διεργασιών αλληλεπίδρασης, πιο σημαντικές για τους χημικούς αισθητήρες θεωρούνται η απορρόφηση, η ανταλλαγή ιόντων κ.α . Πρωταρχικά τα φαινόμενα αυτά λαμβάνουν χώρα στην διεπαφή μεταξύ της αναλυτέας ουσίας και την επιφάνειας του υποδοχέα, όπου και τα δυο βρίσκονται σε μια κατάσταση ισορροπίας.

**Μετατροπέας:** Την σημερινή εποχή, τα σήματα επεξεργάζονται κατά κύριο λόγο με κάποιου είδους ηλεκτρικό όργανο.Επομένως κάθε αισθητήρας πρέπει να συμπεριλαμβάνει έναν μετατροπέα.

Για παράδειγμα η τιμή της συγκέντρωσης η οποία είναι μη ηλεκτρική ποσότητα πρέπει να μετατραπεί σε μια ηλεκτρική ποσότητα τάση,ρεύμα ή αντίσταση. [8]

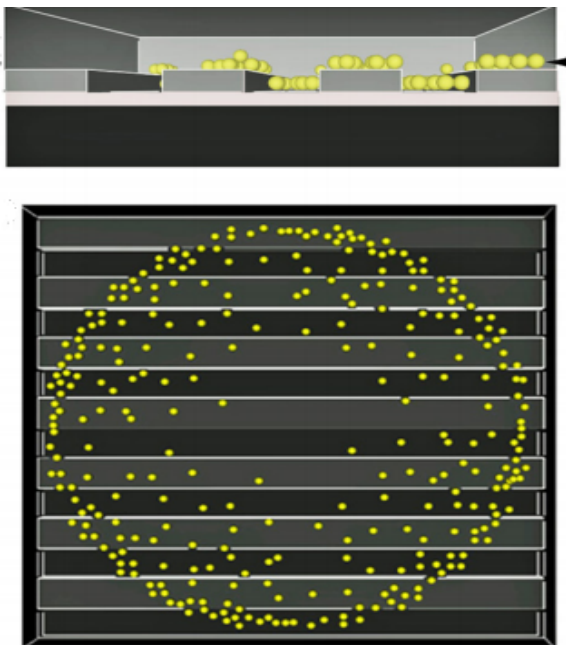
#### **Διαφορετικοί Τύποι Μετατροπέων είναι:**

- **Μετατροπείς Ενέργειας:** Η αρχή της μετατροπής ενέργειας σημαίνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τον αισθητήρα. Πολλοί από αυτούς τους τύπους αισθητήρων μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς εξωτερική παροχή τάσης. Το φωτοβολταϊκό κελί για παράδειγμα είναι ένα παράδειγμα μετατροπία μετατροπής ενέργειας καθώς μετατρέπει ενέργεια ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.  
Άλλο παράδειγμα μετατροπέα μετατροπής ενέργειας είναι το θερμοζεύγος όπου θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Μετατροπείς Περιορισμού Ρεύματος:** Οι πηγές τάσης μπορούν να φτάσουν σε μια οριακή κατάσταση αν περιοριστεί το κυκλωμά τους.  
Στην οριακή κατάσταση υπάρχει ένα μέγιστο ρεύμα το οποίο δεν μπορεί να αυξηθεί ακόμα και εαν προστεθεί επιπλέον τάση  
Παράδειγμα αποτελεί η φωτο-δίοδος.
- **Μετατροπέας Αντίστασης:** Σε πολλά ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά η αγωγιμότητα τους αλλάζει όταν αλλάζουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες.  
Σε συγκεκριμένα μέταλλα η αγωγιμότητα τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ στους ημιαγωγούς συνηθίζεται να αυξάνεται η αγωγιμότητα τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Και στις δυο περιπτώσεις, η αλλαγή στην αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσουμε την θερμοκρασία.

### 1.3.2 Πολυμερικοί Αισθητήρες Τύπου Αντίστασης

**Οι πολυμερικοί αισθητήρες τύπου αντίστασης** αποτελούν μια κατηγορία αισθητήρων οι οποίοι περιέχουν ένα φιλμ αγώγιμου πολυμερούς(το οποίο έχει εναποτεθεί σε ένα μονωτικό υπόστρωμα) και όταν εκτίθεται σε κάποιο αέριο αναλυτή,φουσκώνει με αποτέλεσμα να αλλάζει η μετρούμενη αντίσταση του αισθητήρα, που συνήθως εξαρτάται από την συγκέντρωση του αερίου. Η μέτρηση της αντίστασης πραγματοποιείται με τα ηλεκτρόδια της μετρητικής διάταξης.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του σχεδιασμού, των φυσικών και χημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, της αρχής λειτουργίας, του μηχανισμού που ευθύνεται για την αλλαγή της αγωγιμότητας των πολυμερικών αισθητήρων τύπου αντίστασης καθώς τέτοιοι είναι οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στις πειραματικές διαδικασίες της παρούσας εργασίας.



**Εικόνα 10:** Πολυμερικός Αισθητήρας Τύπου Αντίστασης

## 1.4 Νανοτεχνολογία & Νανοσωματίδια

### 1.4.1 Εισαγωγή

Η **Νανοτεχνολογία** θεωρείται η καινοτόμος τεχνολογία του 21ου αιώνα και τα νανο-υλικά έχουν απασχολήσει αρκετά τους ερευνητές.

Είναι ένας αναδυόμενος διεπιστημονικός κλάδος όπου τα υλικά διαχειρίζονται στην νανοκλίμακα. Η νανοτεχνολογία προσφέρει σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών, συνεπώς μπορεί να προσφέρει στην τεχνολογική και επιστημονική πρόοδο σε διάφορους τομείς όπως είναι η ηλεκτρονική, η βιολογία, η επιστήμη της πληροφορίας η επιστήμη της υγείας.

Η επιστήμη της νανοτεχνολογίας στην ουσία αφορά τον διαχειρισμό των υλικών συστημάτων κοντά στο ατομικό ή στο μοριακό επίπεδο. Γενικά μια από τις διαστάσεις των νανο-υλικών πρέπει να είναι στο εύρος 1 έως 100 νανομέτρων.

Αυτή η υποσχόμενη τεχνολογία συμπεριλαμβάνει την απεικόνιση, τον χειρισμό, την κατασκευή, τον μετασχηματισμό την μοντελοποίηση και την αναγωγή της ύλης στην νανοκλίμακα.

Ο **ορισμός** της νανοτεχνολογίας μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το ένα μέρος αφορά την κατασκευή υλικών σε διαστάσεις μεταξύ 1-100 nm, και το άλλο την αξιοποίησή τους σε καινοτόμες εφαρμογές. [9]

Το εύρος του μεγέθους (το οποίο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή) είναι χαρακτηριστικά από **1nm** έως **100nm**, και ο λόγος είναι ότι σε αυτό το εύρος τα υλικά έχουν θεμελιώδεις διακριτές ιδιότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα τους υλικά με μεγαλύτερο όγκο.

Τα νανοσωματίδια είναι σωματίδια με τουλάχιστον δυο διαστάσεις μεταξύ **1nm** και **100nm**.

Με την παραγωγή δομών στην νανο-κλίμακα, είναι δυνατό να ελέγξουμε τις βασικές ιδιότητες των υλικών, όπως το φορτίο τους, τις μαγνητικές ιδιότητες, τις θερμικές ιδιότητες, το χρώμα τους χωρίς να αλλάξουμε την χημική σύνθεση των δομών αυτών.

Τα νανοϋλικά έναντι των αντίστοιχων υλικών έχουν σημαντικά οφέλη.

Για παράδειγμα, έχουν μείωση του σημείου τήξης τους, βελτιστοποίηση στην διηλεκτρική τους σταθερά και στην μηχανική τους δύναμη.

Όταν είμαστε στα 1-100nm κβαντικά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες (για παράδειγμα χημικές, μαγνητικές, οπτικές, ηλεκτρικές, θερμικές των σωματιδίων).

Δομές στην νανοκλίμακα έχουν πολύ υψηλό λόγω επιφάνειας προς όγκο κάτι το οποίο τους κάνει ιδανικούς για την αξιοποίησή τους σε νανοσύνθετα πολυμερή.

Οι ξεχωριστές ιδιότητες, η εξαιρετική απόδοση των υλικών στην ναοκλίμακα έρχονται σαν αποτέλεσμα του μεγέθους τους, της δομής τους, της επιφάνειάς τους, των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων κ.α.

Ο ρόλος που έχει το μέγεθος των σωματιδίων είναι παρόμοιος για παράδειγμα με τον ρόλο της χημικής σύνθεσης των σωματιδίων προσθέτωντας ακόμα μια παράμετρο στην διαχείριση της συμπεριφοράς τους.

Οι θεμελιώδεις ιδιότητες της ύλης αλλάζουν στην ναοκλίμακα.

Τα ναοσωματίδια είναι αρκετά κοντά σε μέγεθος στα άτομα οπότε για να αιτιολογήσουμε την επίδοσή τους είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε θεωρία της κβαντομηχανικής. [10]

- **Επιδράσεις λόγω Κβαντικών Φαινομένων:**

Οι επιδράσεις αυτές σχετίζονται με την διαστατικότητα ενός συστήματος στην ναοκλίμακα. Οι επιδράσεις αυτές είναι αποτέλεσμα της κβαντομηχανικής και της διττής φύσης των σωματιδίων (σωματίδιο-κύμα)

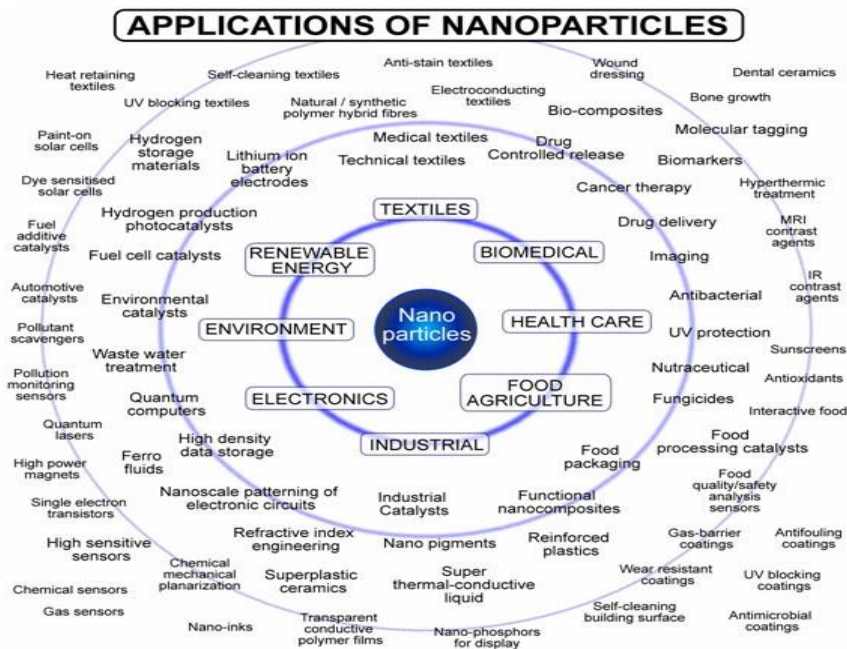
Οι επιδράσεις λόγω κβαντικών φαινομένων παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υλικών.

- **Επιδράσεις Επιφάνειας:**

Επιφανειακά άτομα έχουν λιγότερους γείτονες σε σχέση με τα άτομα στον κύριο όγκο ενός υλικού. Σαν αποτέλεσμα αυτού του μικρότερου συντονισμού και των μη-κατειλημμένων δεσμών, τα άτομα της επιφάνειας είναι λιγότερο σταθερά από τα άτομα του κυρίου όγκου.

Εάν το σωματίδιο είναι πολύ μικρό έχει μεγάλο ποσοστό ατόμων στην επιφάνεια και μεγάλη μέση ενέργεια δεσμού ανά άτομο.

Το ποσοστό επιφάνειας προς όγκο αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος και κατά συνέπεια υπάρχει μια πληθώρα ιδιοτήτων που συνάδουν με την μείωση του μεγέθους.



**Εικόνα 11: Εφαρμογές Των Νανοσωματιδίων**

### 1.4.2: Ιδιότητες Νανοϋλικών-Νανοσωματιδίων

- **Μηχανικές Ιδιότητες:**

Οι νανοδομές εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αντίστοιχα υλικά μεγάλου όγκου, για παράδειγμα υψηλότερη μηχανική σκληρότητα, υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, μεγαλύτερη αντοχή στην καταπόνηση, μεγαλύτερη αντοχή στην θραύση. Η παραπάνω ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των νανοϋλικών αποδίδεται στην δομική τελειότητα των υλικών.

Τα υλικά ελαχίστου μεγέθους δεν έχουν εσωτερικές δομικές ατέλειες. Υλικά με λιγότερες ατέλειες θα δώσουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες

- **Θερμικές Ιδιότητες:**

Η θερμοδυναμική ενός συστήματος στην νανο-κλίμακα διαφέρει από την θερμοδυναμική στα μακροσκοπικά συστήματα. Η θερμοκρασία τήξης και η θερμοκρασία αλλαγής φάσης αλλάζουν. Οι διαφορές αυτές προκύπτουν από την αύξηση της επιφανειακής ενέργειας, την αύξηση του πλάτους των ατομικών ταλαντώσεων καθώς και την αύξηση της θερμικής ενέργειας.

- **Οπτικές Ιδιότητες:**

Οι οπτικές ιδιότητες βασίζονται στην ηλεκτρονιακή.Οι διαφορές στα οπτικά χαρακτηριστικά των νανοϋλικών μπορεί να αποδοθεί στο μικρό μέγεθός τους´.

- **Μαγνητικές Ιδιότητες:**

Ο νανομαγνητισμός είναι ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα στον τομέα του μαγνητισμού στερεάς κατάστασης και της νανοτεχνολογίας.[11]

### 1.4.3 Ταξινόμηση των Υλικών στην Νανοκλίμακα

Υλικά στην νανοκλίμακα μπορούν να ταξινομηθούν : με βάση την προελευσή τους(φυσικά ή συνθετικά), την χημική τους σύνθεση,τις διαστάσεις που βρίσκονται στην νανοκλίμακα κ.α.

- **Βασιζόμενοι στην προελευσή τους τα νανο-υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο κατηγορίες:**

1) Φυσικά νανοϋλικά:

Νανουλικά τα οποία δεν δημιουργήθηκαν σκόπιμα από ανθρώπινες διαδικασίες αλλά φυσικά στο περιβάλλον

2) Συνθετικά(τεχνητά) νανοϋλικά:

Αυτά του είδους τα νανο-υλικά κατασκευάζονται από ανθρώπινη πρόθεση με κάποια κατασκευαστική διαδικασία.

- **Ταξινόμηση με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται**

1) Νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα

Παραδείγματα αποτελούν το φουλερένιο,οι νανοσωλήνες άνθρακα,οι νανοϊνες άνθρακα κ.α.

2) Νανοϋλικά βασιζόμενα σε ανόργανα υλικά

3) Νανοϋλικά βασιζόμενα σε οργανικά υλικά

4) Νανοϋλικά βασιζόμενα σε σύνθετα υλικά

- **Ταξινόμηση με βάση τις διαστάσεις που βρίσκονται στην νανοκλίμακα**

1) Μηδενικής Διάστασης(0-D): Όλες οι διαστάσεις των νανοϋλικών είναι στην νανοκλίμακα.

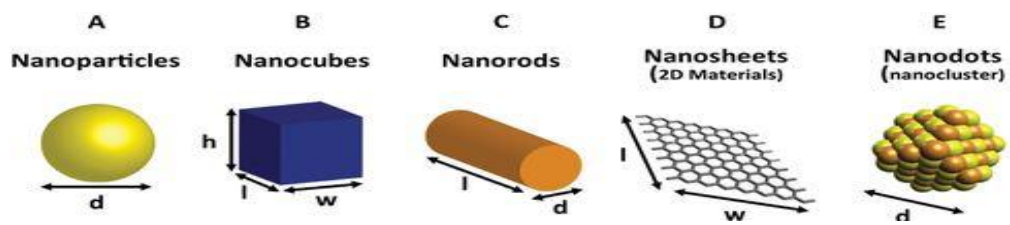
2) Μονοδιάστατα(1-D): Έχουν μια διάσταση που είναι εκτός της νανοκλίμακας

3) Δισδιάστατα(2-D): Έχουν δυο διαστάσεις που είναι εκτός της νανοκλίμακας

4) Τρισδιάστατα(3-D): Όλες οι διαστάσεις είναι εκτός τις νανοκλίμακας

[12].





**Εικόνα 12:** Νανοϋλικά διαφορετικών διαστάσεων

## 1.5 Πολυμερή

### 1.5.1 Εισαγωγή Στα Πολυμερή

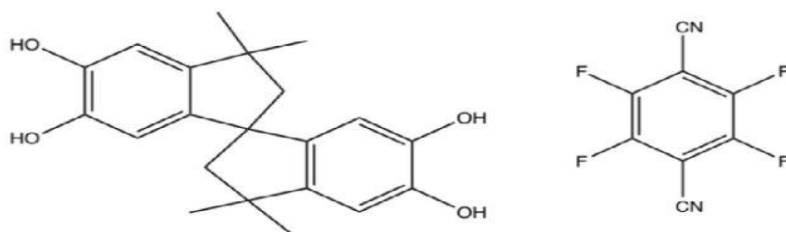
Η επιστήμη των συνθετικών πολυμερών είναι μια σχετικά νέα επιστήμη με ζωή μόλις γύρω στα 100 χρόνια.

Σύμφωνα με τον **ορισμό της IUPAC**, ο όρος πολυμερές αναφέρεται σε κάθε ουσία που τα μόρια της χαρακτηρίζονται από την επανάληψη ενός ή περισσότερων ειδών ατόμων ή ομάδων ατόμων, που αποκαλούνται δομικές μονάδες, ενωμένων μεταξύ τους με ομοιοπολικό δεσμό σε ένα ικανοποιητικό αριθμό, ώστε η ουσία να παρουσιάζει ένα σύνολο ιδιοτήτων, το οποίο δεν μεταβάλλεται πρακτικά με την προσθήκη ή αφαίρεση μιας ή περισσότερων τέτοιων δομικών μονάδων.

Οι απλές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των πολυμερών λέγονται **μονομερή**. Για να χρησιμοποιηθεί μια ένωση ως μονομερές, θα πρέπει να διαθέτει δύο ή περισσότερες θέσεις από τις οποίες μπορεί να αντιδράσει.

Ο αριθμός των δραστικών θέσεων ενός μονομερούς χαρακτηρίζει την δραστικότητά του. Η μικρότερη δομική μονάδα, με την επανάληψη της οποίας περιγράφεται η δομή ενός μακρομορίου, καλείται επαναλαμβανόμενη δομική μονάδα (ΕΔΜ).

[13].



**Εικόνα 13:Μονομερή**

Τα πολυμερή μπορούν να **διακριθούν**:

- σε πολυμερή προσθήκης (αυτά, δηλαδή που προέρχονται από αντιδράσεις προσθήκης σε διπλό δεσμό και όλα τα μονομερή από τα οποία προέρχονται έχουν τουλάχιστον έναν διπλό δεσμό στο μορίό τους)
- πολυμερή συμπύκνωσης (εκείνα που προέρχονται συνήθως από την αντίδραση δυο μονομερών και την παραγωγή ταυτόχρονα ενός μικρού μορίου).

Τα πολυμερή μπορούν επίσης να **ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το μηχανισμό της αντίδρασης παρασκευής τους**.

- πολυμερή αλυσιδωτού πολυμερισμού, όπου το πολυμερές παράγεται με μηχανισμό ελευθέρων ριζών, ανιοντικό, κατιοντικό ή συνδυαστικό
- πολυμερή σταδιακού πολυμερισμού.

Τα πολυμερή ανάλογα με τις αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά την σύνθεση τους μπορούν να εμφανίζουν **γραμμικές αλυσίδες, αλυσίδες με διακλαδώσεις ή διασταυρωμένες δομές**. Το ίδιο πολυμερές ανάλογα με το μηχανισμό και τις διεργασίες παραγωγής του μπορεί να είναι **γραμμικό ή διακλαδωμένο**.

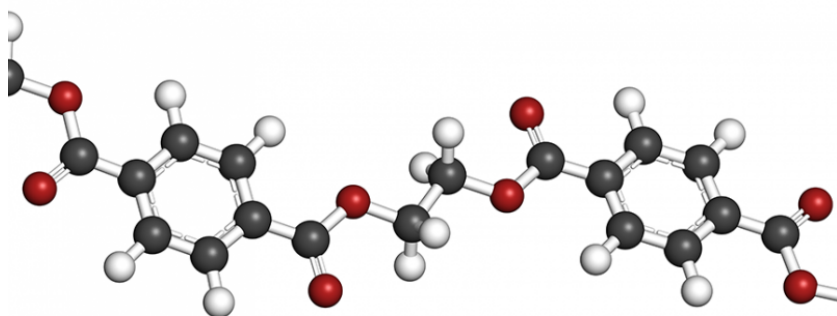
Δικτυωμένα πολυμερή μπορούν να δημιουργηθούν με χημικούς δεσμούς σε γραμμικά ή διακλαδωμένα μακρομόρια με σταυροδεσμούς.

**Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογών τους τα πολυμερή διακρίνονται σε**

- πλαστικά
- ελαστομερή και ίνες
- κόλλες και επιχρίσματα.

**Επίσης τα πολυμερή ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε**

- φυσικά,
- τροποποιημένα φυσικά
- συνθετικά.



[Εικόνα 14: Πολυμερές](#)

## 1.5.2 Τα Πολυμερή στους Χημικούς Αισθητήρες

Τα πολυμερή έχουν την δυνατότητα να εμφανίζουν αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει διότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορούν να εμφανίζουν ένα ποσοστό κρυσταλλικότητας με συνέπεια το πολυμερές να παρουσιάζει μια καθορισμένη διάταξη. Όταν οι κρύσταλλοι αυτοί έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό τότε οι φορείς αγωγιμότητας έχουν την δυνατότητα να μεταπηδούν από την μια πολυμερική αλυσίδα στην επόμενη. Συνεπώς έχει νόημα η αξιοποίηση των πολυμερών στην μικρό και νανο-ηλεκτρονική.

Η αξιοποίηση των πολυμερών στους αισθητήρες μπορεί να αιτιολογηθεί από την δυνατότητα που έχουν να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση όταν παρέλθει το προς ανίχνευση αέριο κάτι που τους καθιστά αναστρέψιμους και επαναλήψιμους, επίσης όταν απορροφούν έναν αναλυτή μεταβάλλεται ο όγκος τους, η αντίσταση τους κ.α, οι συγκεκριμένες μεταβολές είναι εύκολο να μετρηθούν και να μετατραπούν σε σήμα εξόδου.

Κατά την ρόφηση του αναλύτη από ένα πολυμερές πραγματοποιείται το φαινόμενο της διάχυσης. Η διάχυση των μορίων μιας ουσίας γίνεται από τα διακενά ανάμεσα στα μεγαλομόρια του πολυμερούς. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η διάχυση ενός μακρομορίου θεωρείται ως μια σειρά διαδοχικών τυχαίων μοριακών αλμάτων. Συγκεκριμένα, το ροφήμενο μόριο είναι εγκλωβισμένο σε μια θέση ανάμεσα στα τμήματα των πολυμερικών αλυσίδων. μέχρις ότου το τα τελευταία μετατεθούν (λόγω θερμικών κινήσεων), κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανοίξει μια οπή ικανού μεγέθους για να μεταπηδήσει το μακρομόριο σε αυτή. Το άλμα της διάχυσης ολοκληρώνεται με το κλείσιμο της οπής που δημιουργήθηκε κατά την μετακίνηση του μικρομορίου, έτσι ώστε αυτό να εγκλωβίζεται στη νέα θέση.

Για την περιγραφή του φαινομένου της διάχυσης σε ένα σύστημα χρειάζονται δυο βασικές παράμετροι:

**1) Ο συντελεστής διαλυτότητας S**, ο οποίος περιγράφει τον βαθμό ρόφησης του διαλύτη από το υπόστρωμα της διάχυσης στην κατάσταση ισορροπίας και ορίζεται ως εξής:  $S = \left(\frac{c}{a}\right)_{\text{ισορ.}}$

**2) Ο συντελεστής διάχυσης Dt**, ο οποίος είναι μια κινητική παράμετρος που δείχνει πόσο γρήγορα κινούνται τα μόρια στο υπόστρωμα της διάχυσης Εκφράζεται σε  $m^2/s$  και εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

**i) Συγκέντρωση**

**ii) Θερμοκρασία**

Η παρατηρούμενη αύξηση του D με την αύξηση της θερμοκρασίας περιγράφεται συνήθως με μια σχέση Arrhenius:  $D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right)$

όπου  $E_d$  η ενέργεια ενεργοποίησης της διάχυσης.

Σύμφωνα με το μηχανισμό διάχυσης οι πολυμερικές αλυσίδες που περιβάλλουν το εγκλωβισμένο μόριο του διαλύτη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανοίξει μια οπή στην οποία θα μεταπηδήσει το μακρομόριο. Η διάχυση πραγματοποιείται από τέτοια διαδοχικά ενεργοποιημένα άλματα.

**iii) Φύση του διαλύτη και του πολυμερούς**

Γενικά ο D αυξάνεται με την μείωση του μοριακού μεγέθους του διαλύτη. Η Εξάρτηση από το μέγεθος του διαχεόμενου μορίου είναι μεγαλύτερη για άκαμπτα πολυμερή από ότι για ελαστομερή. Για σχετικά μεγάλα μόρια, είναι σημαντικό και το σχήμα του μορίου. Όσον αφορά τη φυσική του πολυμερούς, ο D εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα της διάταξης των αλυσίδων και από την ευκαμψία τους.

## Νόμοι Διάχυσης

Σημαντικό να αναφερθούν είναι οι νόμοι του Fick, που μπορούν να περιγράψουν την συμπεριφορά των διαλυτών κατά την διάχυση μέσα σε ένα πολυμερές. Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Fick, η ροή του διαλύτη ανά μονάδα επιφάνειας μια διατομής είναι ανάλογη της βαθμίδας της συγκέντρωσης

που δίνεται από την σχέση:  $J = -D \cdot \frac{dC}{dx}$

Η σταθερά αναλογίας D ονομάζεται συντελεστής διάχυσης κατά Fick ή απλά συντελεστής διάχυσης και εκφράζεται σε  $m^2/s$ . Η αρχή διατήρησης της μάζας σε συνδυασμό με τον 1ο Νόμο του Fick δίνει την βασική διαφορική εξίσωση της διάχυσης, που ισχύει για την μεταβατική κατάσταση ροής όπου ο συντελεστής διάχυσης είναι χρονοεξαρτώμενος:

$$\frac{dC}{dt} = D(t) \cdot \frac{d^2C}{dx^2}, \quad D(t) \approx -D_0(A \exp(-at) + B \exp(-bt))$$

Ο 2ος νόμος του Fick μπορεί να περιγράψει το φαινόμενο της ρόφησης από το πολυμερές. Όταν το πολυμερές απορροφά ατμούς διογκώνεται και παρατηρείται το φαινόμενο της διάχυσης, οι συντελεστές A, B, a, b εξαρτώνται από τις ιδιότητες του κάθε πολυμερούς (βλ. 2ο νόμο του Fick) όπως το μοριακό βάρος, ιξώδες κ.α)

Η λύση της παραπάνω διαφορικής, έχει την μορφή :

$$\frac{C(t)}{C(0)} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_1^{\infty} \left\{ \frac{\sin^2(n\pi/2)}{n} \sin(n\pi x/l) \exp \left[ -(n\pi/l)^2 \frac{RT}{n} f(t) \right] \right\}$$

όπου l: το μήκος του υμενίου.

f(t) συνάρτηση της μορφής  $f(t) = S \cdot e^{-t}$ , όπου G σταθερά.

Αυτή η συνάρτηση μειώνεται με αποτέλεσμα η συγκέντρωση να τείνει σε μια σταθερή τιμή, καθώς το πολυμερές δεν θα απορροφά για πάντα. Η επιλεκτικότητα ενός πολυμερούς σε έναν αναλυτή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις αλληλεπιδράσεις που θα λάβουν χώρα μεταξύ τους (οι αλληλεπιδράσεις αυτές οφείλονται κυρίως σε δυνάμεις Van der Waals, τους δεσμούς υδρογόνου που μπορούν να σχηματιστούν κ.α).

### Μηχανισμοί Αίσθησης

Ένα νανοσύνθετο για να καταστεί αγωγίμο πρέπει να δημιουργηθεί σε αυτό ένα δίκτυο αποτελούμενο από αγωγιμα εγκλείσματα. Για συγκεντρώσεις του αγωγίμου εγκλείσματος πέραν μιας κρίσιμης τιμής (κατώφλι διαφυγής), τιμή που είναι ικανή για την δημιουργία αγωγίμων δρόμων, επιτρέπεται η διέλευση του ρεύματος. Ο τύπος του εγκλήματος και η συγκέντρωση του καθορίζουν την αγωγιμότητα του νανοσυνθετού.

Οι επιδράσεις που προκαλούνται στο αγωγίμο δίκτυο από τις μεταβολές που συμβαίνουν στην πολυμερική μήτρα κατά την ρόφηση μορίων του αναλυτή αποτελούν την βάση του μηχανισμού αίσθησης των αγωγίμων νανοσύνθετων πολυμερών.

Τα αγωγιμα νανοσύνθετα πολυμερή διογκώνονται όταν εκτίθενται σε κάποιο αέριο, καθώς πραγματοποιείται ρόφηση των μορίων του αναλυτή, με αποτέλεσμα την διακοπή κάποιων αγωγίμων δρόμων, και την απομάκρυνση των νανοσωματιδίων μεταξύ τους.

Τα παραπάνω οδηγούν σε αύξηση της μετρούμενης αντίστασης του νανοσυνθετού.

Το πολυμερές επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση και η μετρούμενη αντίσταση στην αρχική της τιμή καθώς απομακρύνεται ή σταματάει η παροχή του αερίου που χρησιμοποιούμε.

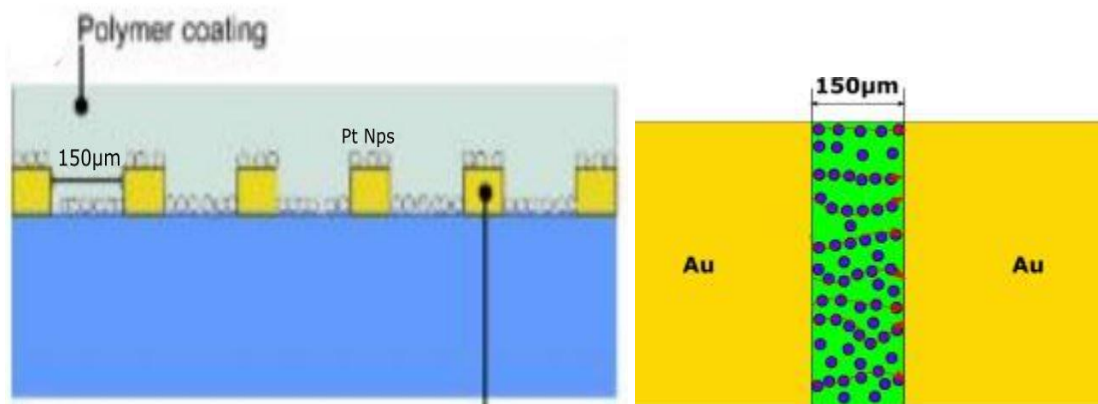
## Κεφάλαιο 2. Πειραματικό μέρος

### 2.1 Σχεδιασμός του Αισθητήρα Αερίων-Ανάλυση Φαινομένων σε Χημικούς Αισθητήρες και Αισθητήρες Παραμόρφωσης

Η παραπάνω διπλωματική εργασία στοχεύει στον χαρακτηρισμό και την μελέτη χημικών αισθητήρων νανοσωματιδίων που έπειτα από ορισμένους κύκλους παραμόρφωσης έχουν δημιουργηθεί στο στρώμα αλουμίνας που τους έχουμε εναποθέσει ρωγμές. Χρησιμοποιούνται επίσης δείγματα χωρίς στρώμα αλουμίνας ως δείγματα αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθεί η συμπεριφορά της απόκρισης τους (ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης τους  $\Delta R/R$ ,  $\Delta R$  είναι η σχετική αλλαγή της αντίστασής τους,  $R$  η αντίσταση υπό την παρουσία αζώτου μόνο) καθώς εκτίθενται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ατμών υγρασίας. Οι συγκρίσεις γίνονται σε δείγματα με διαφορετικά πάχη αλουμίνας και για διαφορετικές εφαρμόζουσες παραμορφώσεις.

Αρχικά οι αισθητήρες με στρώμα αλουμίνας υποβάλλονται σε 200 κύκλους παραμόρφωσης έτσι ώστε να δημιουργηθούν ρωγμές στην επιφάνεια της αλουμίνας (η οποία βρίσκεται κάτω από τα νανοσωματίδια και το πολυμερές και έχει εναποτεθεί με την τεχνική της εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD: Atomic Layer Deposition). Αντί για οξείδιο ως υπόστρωμα έχει επιλεγεί υπόστρωμα πολυιμιδίου (karton) που είναι εύκαμπτο πάχους 125  $\mu\text{m}$  καθώς θα υποβάλλουμε τους αισθητήρες σε παραμόρφωση κάτι που το πυρίτιο δεν θα άντεχε.

Ακόμα οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για αισθητήρες με διαφορετικές αρχικές αντιστάσεις (διαφορετικοί χρόνοι εναπόθεσης των νανοσωματιδίων). Ως πολυμερές χρησιμοποιείται το PIBMA (polyisobutyl methacrylate) το οποίο έχει στεγνώσει για χρονική διάρκεια ενός λεπτού, και το πάχος του είναι 500 nm. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 150  $\mu\text{m}$ , το πάχος τους 40 nm, το πλάτος τους 4 mm. Τιμές της σχετικής αλλαγής της αντίστασης ( $\Delta R$ ) και της ποσοστιαίας μεταβολής της αντίστασης ( $\Delta R/R$ ) καταγράφονται για συγκεντρώσεις ατμών υγρασίας στο εύρος από 300 ppm έως 15000 ppm.



**Εικόνα 15:** Σχηματικές Αναπαραστάσεις των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν

## Φαινόμενο αύξησης αντίστασης του χημικού αισθητήρα με την τροφοδοσία υψηλότερων τιμών συγκέντρωσης ατμών υγρασίας.

Από προηγούμενες μελέτες έχει προκύψει το συμπέρασμα πως η αντίσταση των πολυμερικών αισθητήρων νανοσωματιδίων τύπου αντίστασης αλλάζει με την αλλαγή της συγκέντρωσης των ατμών υγρασίας που τους τροφοδοτούμε.

Η απορρόφηση της υγρασίας θα προκαλέσει το φούσκωμα του πολυμερούς. Στην συνέχεια το φούσκωμα αυτό θα αλλάξει την διάταξη των νανοσωματιδίων που βρίσκονται κάτω από το πολυμερές. Οποιαδήποτε αγωγιμότητα που παρατηρείται στους αισθητήρες μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στο δίκτυο των νανοσωματιδίων. Η αγωγιμότητα αυτή μπορεί να κατανοηθεί ως μια διαδικασία φαινομένου μεταφοράς φορτίου μέσω φαινομένων κβαντικής σήραγγος η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\sigma = \exp(-2\delta\beta) \cdot \exp(-Ed/RT)$$

όπου  $\delta$ : είναι η απόσταση μεταξύ των πυρήνων.

$\beta$ :παράγοντας κβαντικού φαινομένου σήραγγος.

$Ed$ : Η ενέργεια ενεργοποίησης για άλματα φορτίων που ισούται με ,

&

$$Ed = \frac{0.5 \exp[2(r^{-1} - (r+\delta)^{-1})]}{4\pi\epsilon\epsilon_0}$$

όπου  $r$ :είναι η ακτίνα του πυρήνα των νανοσωματιδίων

$\epsilon_0$ :είναι η επιτρεπτικότητα του και κενού και

$\epsilon$ :η επιτρεπτικότητα του υλικού που υπάρχει ενδιάμεσα από τα νανοσωματιδια

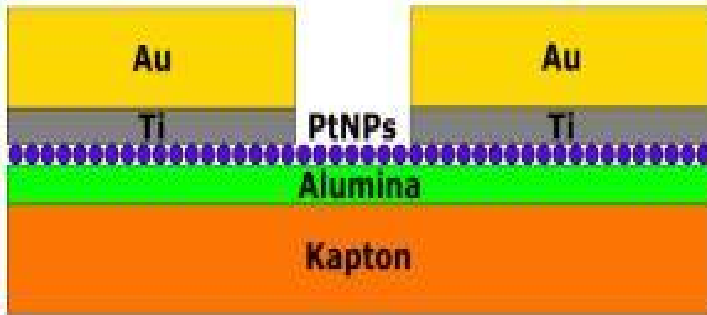
Η απορρόφηση υγρασίας και το επακόλουθο φούσκωμα του πολυμερούς θα αλλάξει την διάταξη των νανοσωματιδίων που βρίσκεται κάτω από το πολυμερές.

Εν συνέχεια, λόγω του φαινομένου αυτού θα αυξηθεί η ενδό απόσταση  $\delta$  μεταξύ των νανοσωματιδίων όπως φαίνεται στην παραπάνω σχέση και εν τέλει αυξάνεται η μετρούμενη αντίσταση.Επίσης η αύξηση της επιτρεπτικότητας του πολυμερούς λόγω της υγρασίας θα συμβάλλει στην αύξηση της αντίστασης όπως μπορεί να εξαχθεί από τις παραπάνω εξισώσεις.

Χρησιμοποιούνται νανοσωματιδια πλατίνας με μέση διάμετρο 4nm.

## Φαινόμενο αύξησης της αντίστασης με την αύξηση του strain σε αισθητήρες παραμόρφωσης.





**Εικόνα 16:** Σχήμα Διατομής του Αισθητήρα Παραμόρφωσης Νανοσωματιδίων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούμε έχουν παρόμοια διάταξη αλλά πάνω από τα νανοσωματίδια βρίσκεται το πολυμερές ανίχνευσης (PIBMA).

Η αντίσταση μιας συσκευής που η αγωγιμότητα της οφείλεται στην ύπαρξη των νανοσωματιδίων δίνεται από την σχέση:

$$R = R_0 \exp(\beta s) \exp\left(\frac{E_c}{k_b T}\right)$$

όπου  $\beta$ : σταθερά που σχετίζεται με κβαντικά φαινόμενα σήραγγας

$R_0$ : προεκθετική σταθερά

$k_b$ : Σταθερά Boltzmann

$T$ : Θερμοκρασία

$E_c$ : Ενέργεια Ενεργοποίησης

Από προηγούμενες μελέτες έχει προκύψει το συμπέρασμα πως η εφαρμογή παραμόρφωσης αυξάνει την απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων με αποτέλεσμα την αύξηση της μετρούμενης αντίστασης.

Η ευαισθησία  $g$  ενός αισθητήρα πίεσης δίνεται από την εξίσωση :

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

όπου  $\varepsilon$  η παραμόρφωση.

Η Παραμόρφωση εφαρμόζεται κάμπτοντας τους αισθητήρες.

Αν υπάρχουν ρωγμές στο στρώμα αλουμίνας, η κάμψη του αισθητήρα θα έχει σαν αποτέλεσμα το άνοιγμα των ρωγμών. Είναι εμφανές ότι το πάνω μέρος των ρωγμών θα εμφανίζει μεγαλύτερο άνοιγμα από το κάτω μέρος. Καθώς ανοίγουν οι ρωγμές η ενδό-απόσταση των νανοσωματιδίων θα είναι μεγαλύτερη από ότι εάν δεν υπήρχε αλουμίνη.

Το άνοιγμα των ρωγμών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

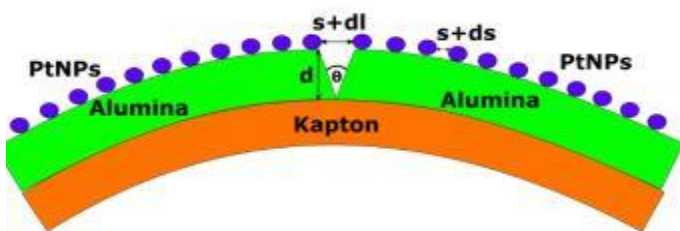
$$x = 2d \sin \frac{\theta}{2}$$

όπου  $d$ : το πάχος της αλουμίνας

$\theta$ : η γωνία στο κάτω μέρος της ρωγμής.



**Εικόνα 17:** Σχήμα Διατομής όταν ο αισθητήρας είναι χωρίς παραμόρφωση



**Εικόνα 18:** Σχήμα Διατομής όταν ο αισθητήρας είναι υπό κάμψη(με ανοιγμένη ρωγμή)

## 2.2 Διαδικασίες Κατασκευής του Χημικού Αισθητήρα

### 2.2.1 Κατασκευή Ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια(Au) κατασκευάστηκαν πάνω από τα νανοσωματίδια χρησιμοποιώντας την τεχνική της εξάχνωσης με δέσμη ηλεκτρονίων(e-gun evaporation).Πριν από την εναπόθεση του χρυσού, 4nm τιτανίου εναποτέθηκαν ως στρώμα πρόσφυσης.

Το υλικό που χρησιμοποιούμε συγκεκριμένα ο χρυσός ονομάζεται και στόχος καθώς βομβαρδίζεται από μια δέσμη ηλεκτρονίων(μέθοδος εξάχνωσης μετάλλου μέσω δέσμης ηλεκτρονίων- e-gun evaporation).Καθώς τα ηλεκτρόνια προσκρούουν στον στόχο η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας μικρής περιοχής του στόχου που αρχικά αναβραζει και τελικά εξατμίζεται.Έπειτα οι ατμοί που σχηματίζονται λόγω της εξάτμισης εναποτίθενται στην επιφάνεια του δείγματος που στερεοποιούνται και δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα.

Το περιττό μέταλλο αφαιρείται με την διαδικασία του Lift-Off.

[1]

## 2.2.2 Παραγωγή/Εναπόθεση Νανοσωματιδίων

Χρησιμοποιήθηκαν νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 4nm τα οποία εναποτέθηκαν πάνω από το στρώμα αλουμίνιας. Τα νανοσωματίδια παράγονται μέσω συστήματος dc magnetron sputtering .

Κατά την διαδικασία της Ιοντοβολής(sputtering) πραγματοποιείται βομβαρδισμός μιας επιφάνειας ενός στερεού με ενεργητικά σωματίδια(π.χ επιταχυνόμενα ιόντα), τα άτομα της επιφάνειας του στερεού οπισθοσκεδάζονται λόγω κρούσεων μεταξύ των προσπιπτόντων ιόντων και των επιφανειακών ατόμων του στερεού. Στην περίπτωση που το ενεργητικό ιόν εισχωρήσει μέσα στο στερεό τότε έχουμε την εμφύτευση του.

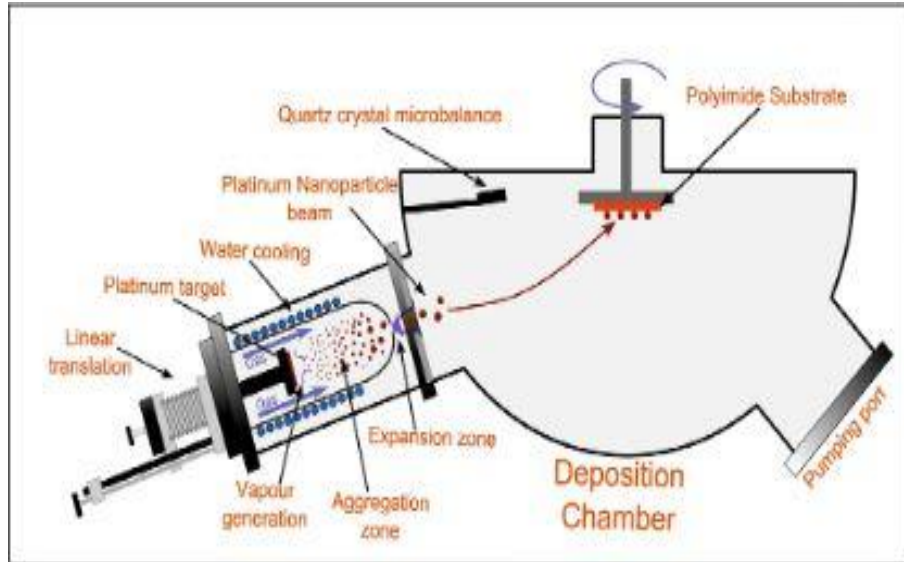
Καθώς ο στόχος βομβαρδίζεται με ιόντα, πραγματοποιούνται οι παρακάτω διαδικασίες:

- Απελευθέρωση Ουδετέρων Ατόμων
- Ουδετεροποίηση και Οπισθοσκέδαση των Προσπιπτόντων ιόντων(backscattered particles)
- Εκπομπή ακτίνων Χ(X-ray emission)
- Παραγωγή γένεση φωτονίων
- Εκπομπή Δευτερογενών Ηλεκτρονίων
- Διασκορπισμός των ατόμων του αερίου που βρίσκονται στην επιφάνεια του στόχου

Το υπόστρωμα τοποθετείται σε ένα ηλεκτρόδιο που αποτελεί την άνοδο του συστήματος, ενώ ο στόχος τοποθετείται σε ένα ηλεκτρόδιο που αποτελεί την κάθοδο του συστήματος. Τα υποστρώματα τοποθετούνται σε ένα θάλαμο με κενό της τάξης των  $10^{-5}$  mbar ενώ ο θάλαμος στο οποίο περιέχεται ο στόχος έχει κενό της τάξεως των  $10^{-3}$  mbar.

Εφαρμόζοντας αρνητική τάση στην άνοδο τα θετικά φορτισμένα ιόντα προσπίπτουν στον στόχο και αυτά με την σειρά τους αναγκάζουν άτομα από την επιφάνεια του στόχου να αποκολληθούν δημιουργώντας νανοσωματίδια τα οποία λόγω της διαφοράς πίεσης των θαλάμων που βρίσκονται ο στόχος και το δείγμα και με την βοήθεια της ροής ενός αδρανούς αερίου οδηγήθηκαν και εναποτέθηκαν στο υπόστρωμα. Η αποκόλληση των μορίων του στόχου οφείλεται στην δημιουργία πλάσματος αδρανούς αερίου μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων.

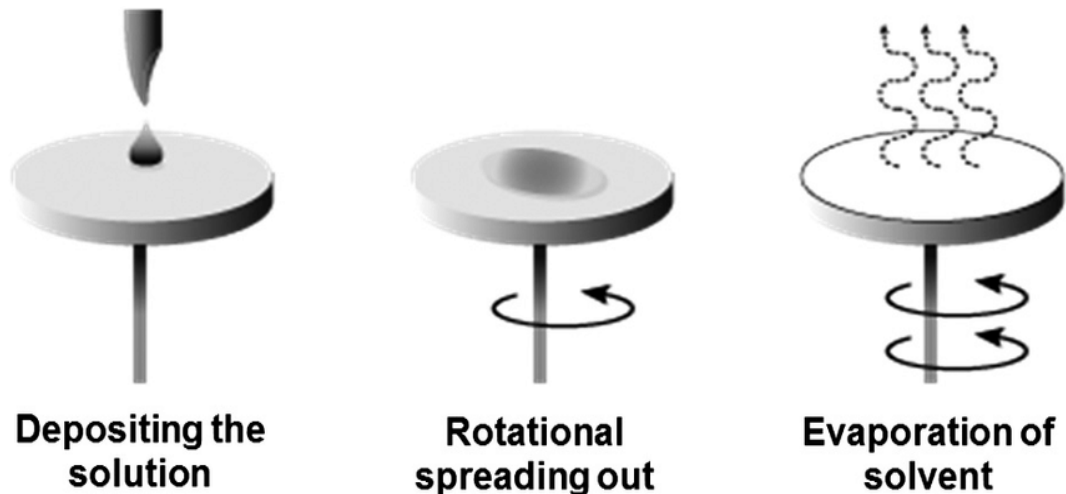
[2]



**Εικόνα 19:** Σχηματική Απεικόνιση της Διάταξης Μαγνητικής Ιοντοβολής

### 2.2.3 Κατασκευή/Εναπόθεση Πολυμερούς

Το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ως ανιχνευτικό μέσο είναι το PIBMA (poly isobutyl methacrylate). Το πολυμερές PIBMA εναποτέθηκε με την τεχνική του spin coating. Η τεχνική χρησιμοποιεί την στροφορμή για να εναποθέσει το υλικό πάνω σε ένα υπόστρωμα. Αποτελείται από μια κυλινδρική βάση η οποία μπορεί να περιστρέφεται γύρω από άξονα που περνάει από το κέντρο της με αρκετά μεγάλη ταχύτητα. Με αυτόν τον τρόπο, τοποθετώντας το υπόστρωμα στο κέντρο του κυλίνδρου και με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού που είναι συνδεδεμένη με την συσκευή για να συγκρατεί το υλικό σταθερά, μαζί με τον κύλινδρο που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του περιστρέφεται και το υπόστρωμα. Με τη βοήθεια μιας πιπέτας τοποθετείται μια ποσότητα υγρής ουσίας που και με κατάλληλες ρυθμίσεις των στροφών ανά λεπτό και του χρόνου περιστροφής δημιουργούνται υμένια αντίστοιχου πάχους. [3]



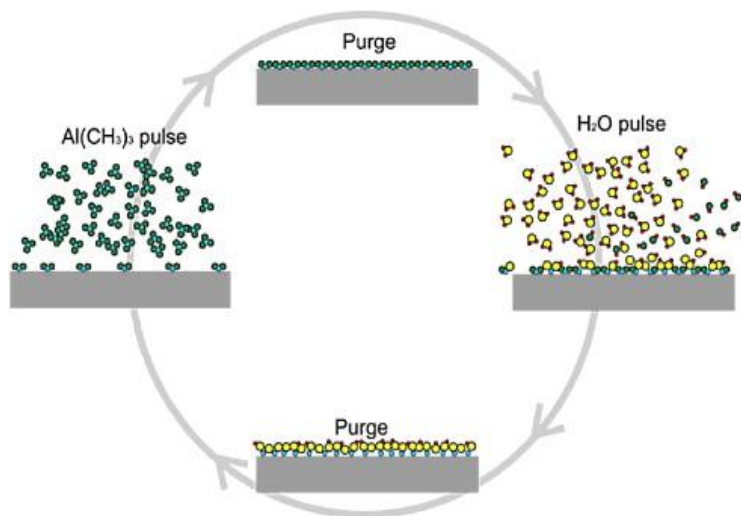
[Εικόνα 20:Τεχνική spin coating](#)

#### 2.2.4 Κατασκευή/Εναπόθεση φιλμ αλουμίνιας

Τα φιλμ αλουμίνιας εναποτέθηκαν χρησιμοποιώντας το σύστημα: RS-200 Picosun ALD system. Τα φιλμ κατασκευάστηκαν τροφοδοτώντας το σύστημα με συγκεκριμένες πρόδρομες ουσίες, συγκεκριμένα τετραμεθυλοαλουμίνιο (TMA) και απιονισμένο νερό (DI water).

Η τεχνική της εναπόθεσης ατομικού στρώματος είναι μια επιφανειακά ελεγχόμενη διαδικασία εναπόθεσης λεπτών υμενίων, ενός ατομικού στρώματος τη φορά. Τα στρώματα σχηματίζονται κατά τη διάρκεια των κύκλων αντίδρασης με εναλλαγή των πρόδρομων υλικών και των αντιδραστηρίων και καθαρισμό με αδρανές αέριο μεταξύ κάθε παλμού. Λόγω της δυνατότητας να παράγει συμπαγή και λεία υμένια με εξαιρετική ομοιομορφία πάχους. Μια γενική διαδικασία της ALD απεικονίζεται στην εικόνα 2.

Αποτελείται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από διαδοχικούς εναλλασσόμενους παλμούς αερίων πρόδρομων υλικών που αντιδρούν με το υποστρώμα. Αυτές οι μεμονωμένες αντιδράσεις αερίου-επιφάνειας ονομάζονται ημι-αντιδράσεις και αποτελούν μόνο ένα μέρος της σύνθεσης των υλικών. Κατά τη διάρκεια κάθε ημι-αντίδρασης, το πρόδρομο υλικό πάλλεται σε έναν θάλαμο κενού (<1 Torr) για καθορισμένο χρονικό διάστημα. Έτσι επιτρέπεται στο πρόδρομο υλικό να αντιδράσει πλήρως με την επιφάνεια του υποστρώματος, μέσω μιας αυτοπεριοριζόμενης διαδικασίας η οποία αφήνει όχι περισσότερες από μία μονοστιβάδες στην επιφάνεια. Αυτή η διαδικασία στη συνέχεια επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το κατάλληλο πάχος υμενίου.



**Εικόνα 21: Τεχνική ALD**

## 2.2.5 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού

### **SEM-Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης**

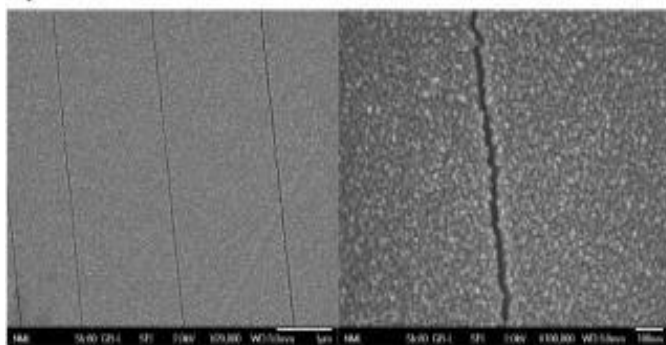
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope-SEM) λειτουργεί ως εξής: Ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται θερμικά από μία κάθοδο, επιταχύνονται με την βοήθεια υψηλού δυναμικού της τάξης των 10-100 keV. Η δέσμη των ηλεκτρονίων σχηματίζεται με την βοήθεια διάταξης ηλεκτρομαγνητικών συγκεντρωτικών φακών. Στη συνέχεια, αφού εισέλθει από τον αντικειμενικό φακό, προσκρούει στο υπό εξέταση δοκίμιο. Οι τύποι των σημάτων που συλλέγονται από το SEM περιλαμβάνουν :

- Δευτερεύοντα ηλεκτρόνια
- Ηλεκτρόνια από οπισθοσκέδαση
- Χαρακτηριστικές Ακτίνες X,
- Φως εκπομπής καθόδου
- Ηλεκτρόνια που διαπερνούν το δείγμα.

[4]

Όλοι οι παραπάνω τύποι σημάτων προέρχονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης των ηλεκτρονίων με τα άτομα κοντά ή πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Η δέσμη ηλεκτρονίων, αφού εστιάσει, σαρώνει το δείγμα, ενώ το ρεύμα του συλλέκτη ενισχύεται και χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τη δέσμη ηλεκτρονίων σε έναν καθοδικό σωλήνα, ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την δέσμη του μικροσκοπίου.

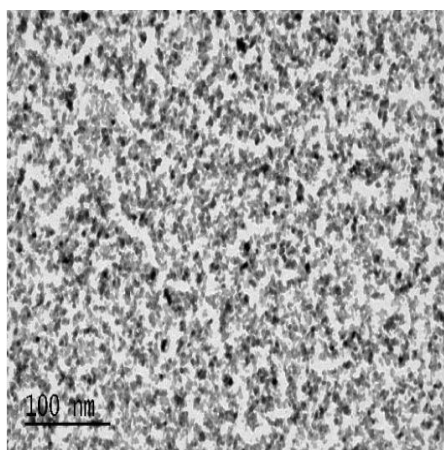


**Εικόνα 22:**Εικόνα SEM νανοσωματιδίων πλατίνας σε φιλμ αλουμίνιας με κρακ

### **TEM-Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης**

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης λειτουργεί ως εξής, μια δέσμη ηλεκτρονίων διέρχεται μέσα από ένα εξαιρετικά λεπτό δείγμα και αλληλεπιδρά με το υλικό του δείγματος κατά της διέλευση της. Το σύστημα παραγωγής της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων αποτελείται από ένα πυροβόλο ηλεκτρονίων (electron gun), στα οποία τα θερμοϊονικά παραγόμενα ηλεκτρόνια επιταχύνονται με την εφαρμογή μεγάλης διαφοράς δυναμικού και λαμβάνουν την μορφή δέσμης με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών φακών. Η εικόνα που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των διερχόμενων ηλεκτρονίων με τα άτομα του υλικού μεγεθύνεται και εστιάζεται σε μια διάταξη απεικόνισης που μπορεί να αποτελείται από μια οθόνη φθορισμού. [5]

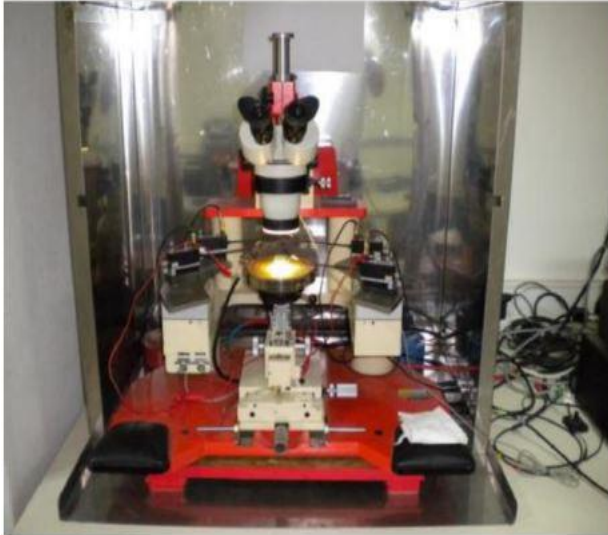
Το TEM λόγω του μικρότερου μήκους κύματος των ηλεκτρονίων που χρησιμοποιεί, έχει αυξημένη διακριτική ικανότητα, κάνοντας εφικτή την απεικόνιση μεμονωμένων ατόμων.



**Εικόνα 23:**Εικόνα TEM νανοσωματιδίων

## Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός

Κατά τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των αισθητήρων μετρούνται οι χαρακτηριστικές τους I-V. Για την λήψη των μετρήσεων, το δείγμα με τους αισθητήρες τοποθετείται σε μια μεταλλική βάση. Περιφερειακά της οποίας υπάρχουν μετακινούμενες ακίδες βολφραμίου, οι οποίες συνδέονται με τα όργανα μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο, οι ακίδες μπορούν να ακουμπήσουν στις επαφές των ηλεκτροδίων, ώστε να λαμβάνεται το σήμα. Η μεταλλική βάση, στην οποία είναι τοποθετημένο το δείγμα, συνδέεται επίσης στα όργανα μέτρησης και αποτελεί την επαφή του υποστρώματος.



**Εικόνα 24: Διάταξη Ηλεκτρικών Μετρήσεων**

## 2.3 Πειραματικές Διατάξεις μετρήσεων απόκρισης αισθητήρων

Χρησιμοποιήθηκαν δυο διατάξεις ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις της απόκρισης της ηλεκτρικής αντίστασης των αισθητήρων σε διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υγρασίας.

**ι) Διάταξη επιβολής παραμόρφωσης:** Αποτελείται από μια βάση που τοποθετούμε τους αισθητήρες, αφού πρώτα του τοποθετήσουμε σε ένα κομμάτι PCB (printed circuit board) ώστε να έχω περισσότερη ομοιόμορφη κάμψη του αισθητήρα. Ακριβώς από κάτω βρίσκεται ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα έμβολο του οποίου η κάθετη μετατόπιση ελέγχεται από ένα βερνιερό και ένα βηματικό κινητήρα που μας



δίνουν την δυνατότητα να ελέγχουμε την κάθετη μετατόπιση του εμβόλου, και συνεπώς την παραμόρφωση που εφαρμόζουμε στον αισθητήρα.

Πριν από την αρχή των μετρήσεων ελέγχουμε ότι εφαρμόζουμε στον αισθητήρα μηδενική παραμόρφωση με την βοήθεια ενός λείζερ.

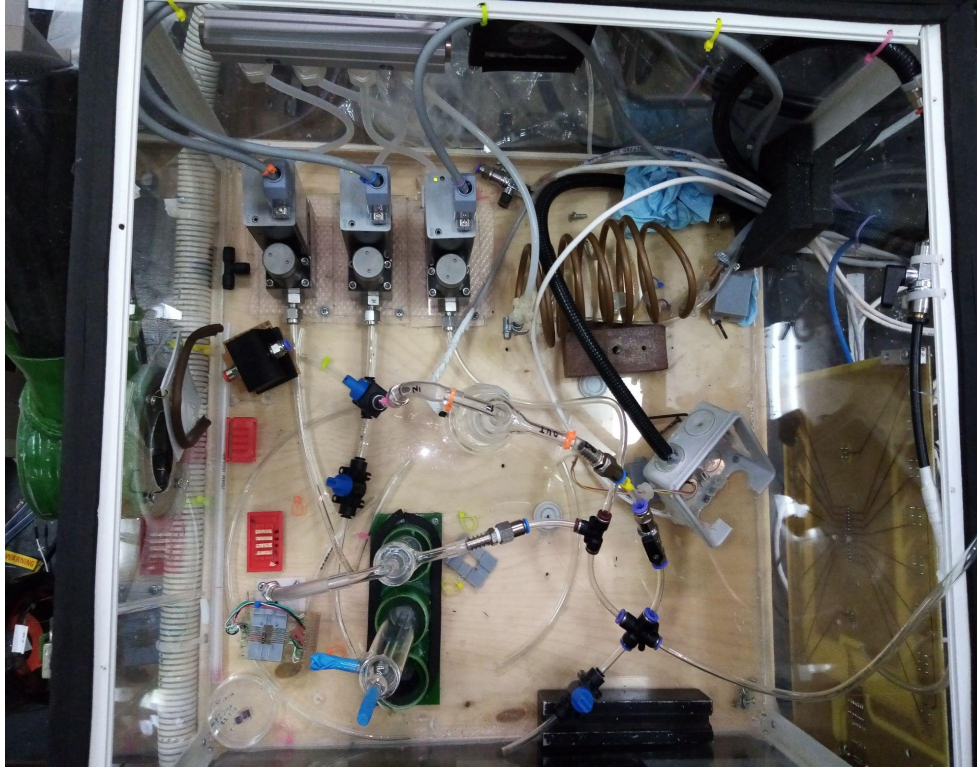
Η αντίσταση του αισθητήρα μετρείται με την βοήθεια δύο ακίδων η οποίες κάνουν επαφή με τον αισθητήρα και συνδέονται με ένα μετρητικό όργανο(Keithley 2400).

Το Keithley είναι συνδεδεμένο με υπολογιστή,όπου μέσω ειδικού λογισμικού(Transient Resistance Logger,sensorarray) γίνεται απεικόνιση των τιμών της αντίστασης.

Τέλος πάνω από τον αισθητήρα προσπαθώ να φέρω σε όσο κοντινότερη απόσταση μπορώ ένα σωληνάκι το οποίο είναι συνδεδεμένο με τους mass flow controllers και τροφοδοτεί τον αισθητήρα με άζωτο ή υγρασία.

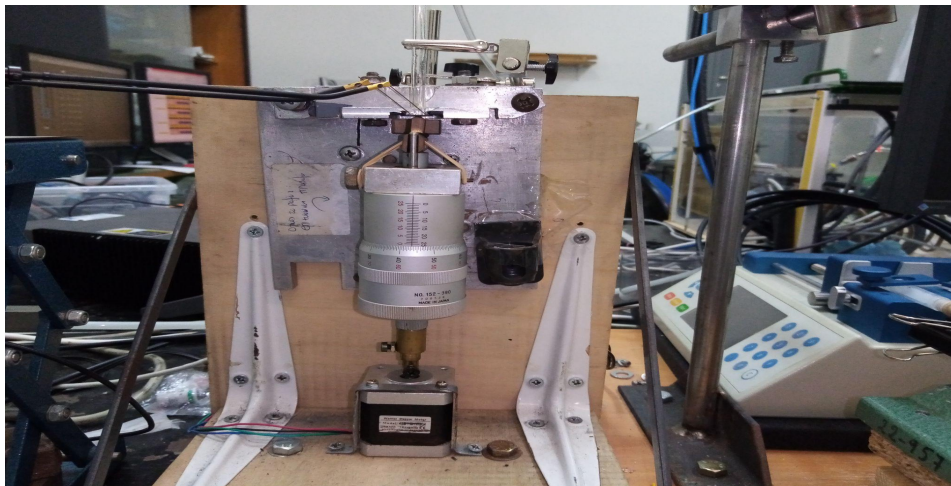
Μια φιάλη αζώτου τροφοδοτεί τρία συστήματα ελέγχου ροής μάζας(mass flow controller, MFC(1,2,3) , τα οποία συνδέονται με ένα δοχείο που περιέχει τον αναλυτή(bubbler), στην περίπτωση μας το νερό. Το άζωτο λειτουργεί ως φέρον αέριο το οποίο εισέρχεται στο στο δοχείο που περιέχει νερό και προκαλεί την ελεγχόμενη εξατμισή του.Τα συστήματα ελέγχου μάζας(MFC 2,3) ελέγχουν τον ρυθμό ροής του αζώτου που θα εισέρχεται στον bubbler.

Συγκεκριμένα ο MFC1 έχει καθοριστεί να ελέγχει την ροή του αζώτου να είναι πάντα καθορισμένη στα 1000 sccm (standard cubic centimeters per minute),έτσι ώστε να αρχικοποιούμε τον αισθητήρα(κατάσταση που χρησιμοποιούμε ως κατάσταση αναφοράς).Εάν χρειαστεί να τροφοδοτήσουμε τον αισθητήρα με ροη υγρασίας από 2 έως 100 sccm, ενώ ο MFC3 χρησιμοποιείται για τροφοδοσία με οποιασδήποτε άλλης τιμής ροής υγρασίας.



**Εικόνα 27:** Η Διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

Σε αυτή την διάταξη η παράμετρος που δεν μπορούσα να ελέγξω με ακρίβεια κάθε φορά ήταν η απόσταση που είχε το σωληνάκι (που τροφοδοτούσε τον αισθητήρα με άζωτο ή υγρασία) από τον αισθητήρα.

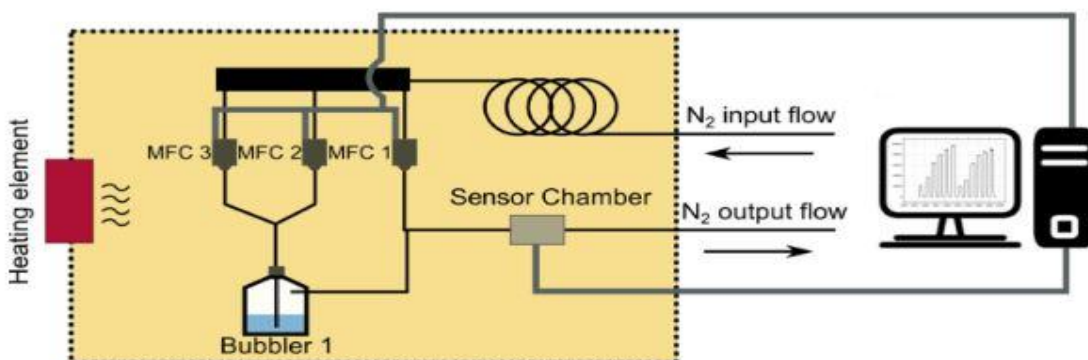


**Εικόνα 28:** Διάταξη επιβολής παραμόρφωσης (σε χημικούς αισθητήρες) που χρησιμοποιήθηκε

ii) **Διάταξης μέτρησης χημικών αισθητήρων(διάταξη που περιλάμβανε θάλαμο):** Αποτελείται από ένα θάλαμο(που έχει δημιουργηθεί με 3D printing) μέσα στον οποίο μπορούμε να τοποθετήσουμε 4 αισθητήρες ταυτόχρονα. Μέσω καλωδίων δημιουργείται επαφή με τους αισθητήρες. Τα καλώδια είναι συνδεδεμένα σε μια πλακέτα η οποία με την σειρά της συνδέεται με το Keithley που μετράει την αντίσταση κάθε αισθητήρα σειριακά. Το Keithley πάλι συνδέεται με έναν υπολογιστή και μέσω ειδικού λογισμικού γίνεται απεικόνιση των τιμών της αντίστασης που μετράει. Στον θάλαμο επίσης συνδέεται το σωληνάκι το οποίο είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία των αισθητήρων με άζωτο ή με υγρασία.



**Εικόνα 29:** Ο θάλαμος και η βάση για την τοποθέτηση των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν



**Εικόνα 30:** Αναπαράσταση της Διάταξη μέτρησης χημικών αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος τα αποτελέσματα των μετρήσεων και από τις δυο πειραματικές διατάξεις απεικονίζονται σε υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο ένα πρόγραμμα ελέγχου

των M.F.C( MFC controller) και ένα πρόγραμμα απεικόνισης των τιμών των αντιστάσεων που μετράει το Keithley(Transient resistance logger, reslogger).

Αποτελέσματα από την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιούνται μόνο για σύγκριση με τα αποτελέσματα της διάταξης με δυνατότητα επιβολής παραμόρφωση, στην περίπτωση που δεν εφαρμόζω παραμόρφωση για να ελεγχθεί αν τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο διατάξεων εμφανίζουν απόκλιση.

## 2.4 Πειραματική Μεθοδολογία Μετρήσεων Απόκρισης Αισθητήρων

Η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην πρώτη διάταξη είναι η εξής.

- 1) Τοποθέτηση του αισθητήρα στην Βάση.
- 2) Έλεγχος με λείζερ ότι ο αισθητήρας ακουμπάει στο έμβολο έτσι ώστε η παραμόρφωση που εφαρμόζω να είναι μηδενική.
- 3) Τροφοδοσία του αισθητήρα μόνο με άζωτο και καταγραφή της αντίστασης του.
- 4) Τροφοδοσία του αισθητήρα με υγρασία(συγκέντρωσης που έχω επιλέξει).
- 5) Επαναφορά του αισθητήρα στην κατάσταση αναφοράς(τροφοδοσία μόνο με άζωτο).
- 6) Επανάληψη των βημάτων για όσα δείγματα αισθητήρων και για όσες τιμές σχετικής υγρασίας επιλέγω.

Εάν θέλω να μελετήσω τον αισθητήρα υπό κάμψη, τον επαναφέρω στην κατάσταση αναφοράς και εφαρμόζω την κάθετη μετατόπιση που επιλέγω.

Η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθείται στην δεύτερη διάταξη είναι η εξής:

- 1) Τοποθέτηση τεσσάρων ταυτόχρονα αισθητήρων στην βάση που κλείνει με τον θάλαμο που αναφερθηκε προηγουμένως.
- 2) Τροφοδοσία του θαλάμου με άζωτο(κατάσταση αναφοράς) και καταγραφεί της τιμής της αντίστασης των αισθητήρων.
- 3) Τροφοδοσία του αισθητήρα με την συγκέντρωση της υγρασίας που καθορίζουμε, και καταγραφή της τιμής της αντίστασης του.
- 4) Επαναφορά του αισθητήρα στην κατάσταση αναφοράς με την τροφοδοσία μόνο αζώτου.

5) Τροφοδοσία των αισθητήρων με διαφορετική συγκέντρωση υγρασίας και καταγραφή της τιμής της αντίστασης του.

6) Επανάληψη των παραπάνω βημάτων για όσα δείγματα αισθητήρων, και για όσες τιμές συγκέντρωσης σχετικής υγρασίας επιλέγω.

## 2.5 Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Σε αυτό το μέρος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από συγκρίσεις που έγιναν στις αποκρίσεις των αισθητήρων. Ως απόκριση ( $\Delta R/R_0$ ) θεωρείται το ποσοστό της μεταβολής της αντίστασης των αισθητήρων καθώς τους τροφοδοτώ με διάφορες τιμές συγκέντρωσης υγρασίας, ως προς την αντίσταση που έχουν παρουσία αζώτου μόνο (συγκέντρωσης 1000ppm). Από την συγκέντρωση (ppm-parts per million), υπολογίζω το ποσοστό (R.H) της σχετικής υγρασίας. Οι συγκεκριμένες τιμές χρησιμοποιούνται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται

Επίσης παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα που απεικονίζουν τιμές της αντίστασης του αισθητήρα καθώς τους τροφοδοτώ με διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υγρασίας, ως προς τον χρόνο.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση το πάχος της αλουμίνιας που τους έχει εναποτεθεί:

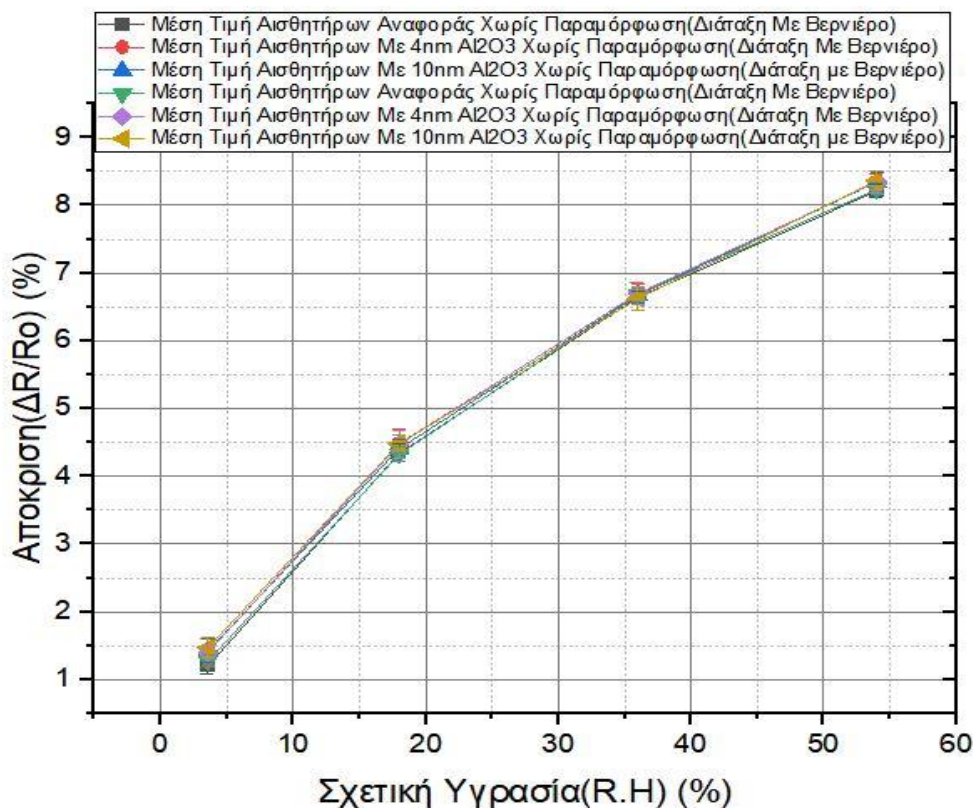
- **Αισθητήρες Αναφοράς (Χωρίς Στρώμα Αλουμίνιας)**
- **Αισθητήρες με 4nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**
- **Αισθητήρες με 10nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Για κάθε κατηγορία λήφθηκαν τιμές για από 10 δείγματα αισθητήρων με διαφορετικές αρχικές αντιστάσεις (παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την επιφανειακή πυκνότητα των νανοσωματιδίων) με εύρος τιμών από 700kΩ μέχρι 10mΩ, επομένως για τις τιμές των αποκρίσεων που θα απεικονιστούν χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι των αποκρίσεων που προκύπτουν από τα 10 δείγματα για κάθε κατηγορία.

Σαν σφάλμα χρησιμοποιούνται οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων που υπολογίζονται. Οι τιμές των σχετικών υγρασιών που χρησιμοποιούνται είναι 4, με εύρος από 1000ppm (3.6% R.H) έως 15000 (54.0% R.H). Η θερμοκρασία που λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις ήταν ίδια για όλες τις μετρήσεις.

**Τέλος, όπως αναφέρθηκε, οι μετρήσεις λήφθηκαν από δύο διαφορετικές διατάξεις και έτσι αρχικά γίνεται μια σύγκριση των αποκρίσεων για αυτές τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις.**

## 1η Σύγκριση : Μετρήσεις Από Διάταξη με Βερνιέρο-Μετρήσεις Από Διάταξη Με θάλαμο



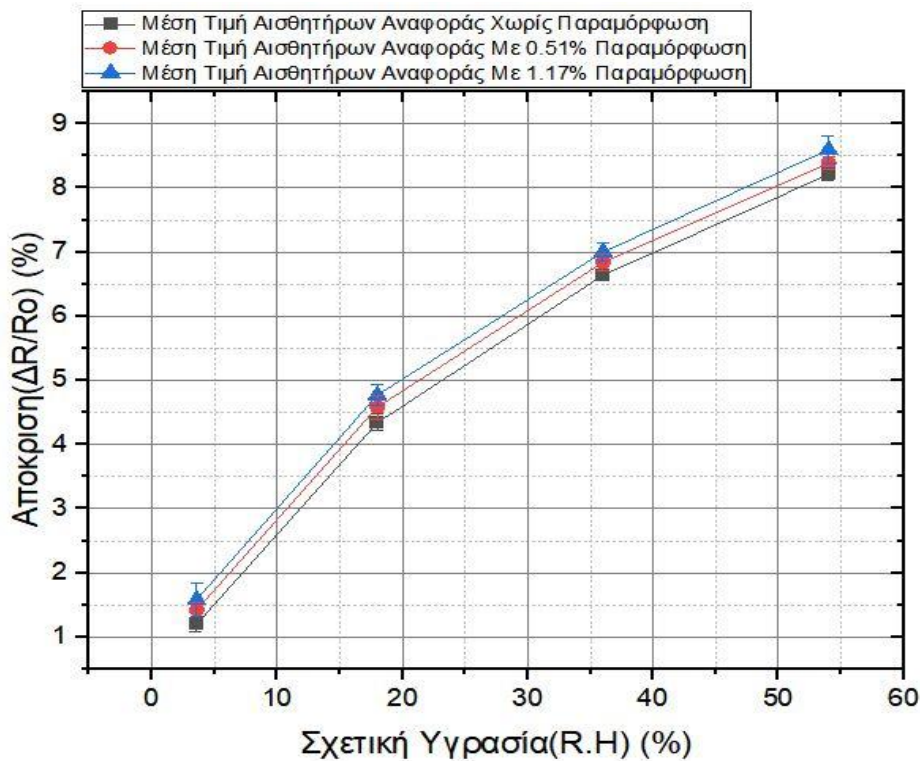
Εικόνα 31: Σύγκριση Μετρήσεων από δύο διαφορετικές διατάξεις.

Παρατηρώ πως οι μέσοι όροι των τιμών των αποκρίσεων για τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες δειγμάτων (0,4,10nm), για τις ίδιες τιμές συγκέντρωσης υγρασίας είναι κοντινές και δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους.

Στις επακόλουθες συγκρίσεις, χρησιμοποιούνται αποτελέσματα των αποκρίσεων μόνο από την διάταξη επιβολής παραμόρφωσης, καθώς υπήρχε αμφιβολία για της μετρήσεις που λήφθηκαν από την διάταξη με τον θάλαμο, όταν η βάση που χρησιμοποιήθηκε είχε κάποια εξογκώματα έτσι ώστε να θέτουμε τους αισθητήρες υπό κάμψη..

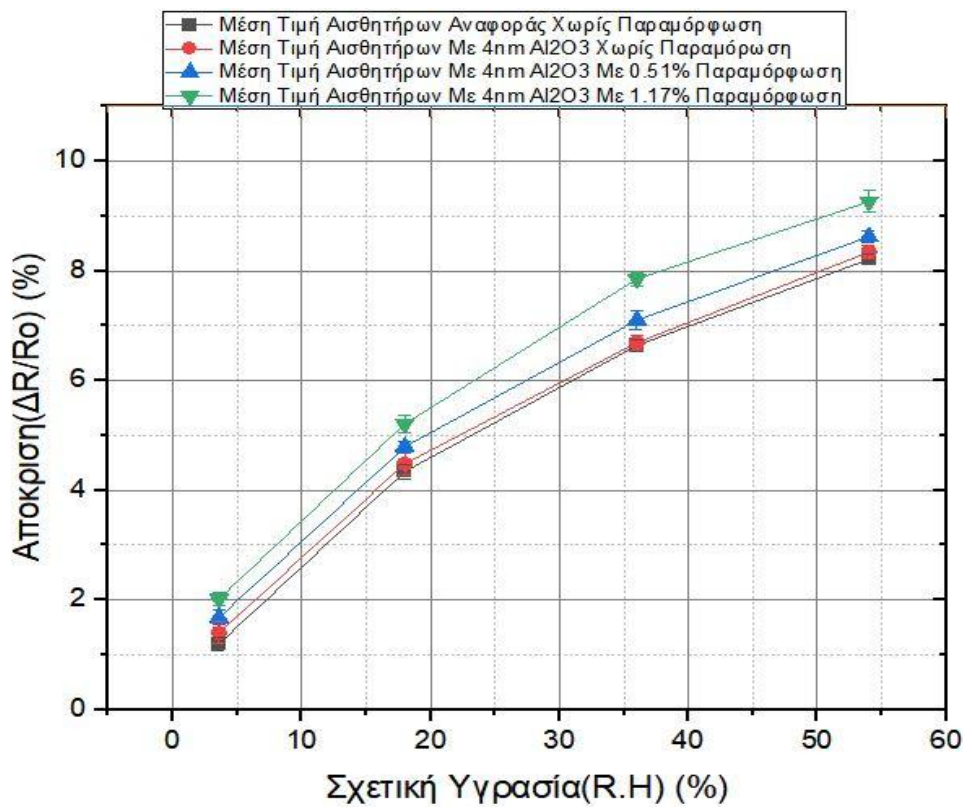
**2η Σύγκριση :** Συγκρίνουμε τις μέσες τιμές των αισθητήρων με ίδιο πάχος αλουμίνας αλλά εφαρμόζουμε διαφορετικές τιμές παραμόρφωσης(0 παραμόρφωση, 0.51% , 1.17% παραμόρφωση).

**i)Σύγκριση Μέσων Όρων Απόκρισεων Δειγμάτων Αναφοράς:**



**Εικόνα 32:Σύγκριση Δειγμάτων Αναφοράς για διαφορετικές παραμορφώσεις**

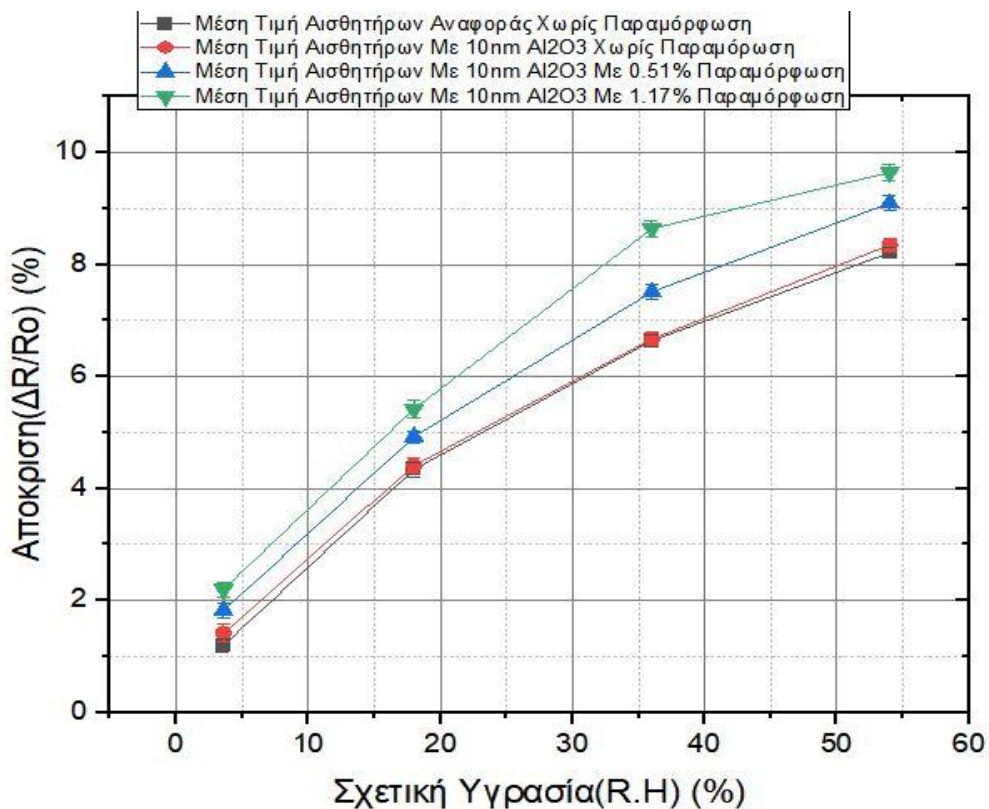
## ii) Σύγκριση Μέσων Όρων Αποκρίσεων Δειγμάτων με 4nm φιλμ αλουμίνας:



[Εικόνα 31: Σύγκριση Δειγμάτων με 4nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> για διαφορετικές παραμορφώσεις](#)

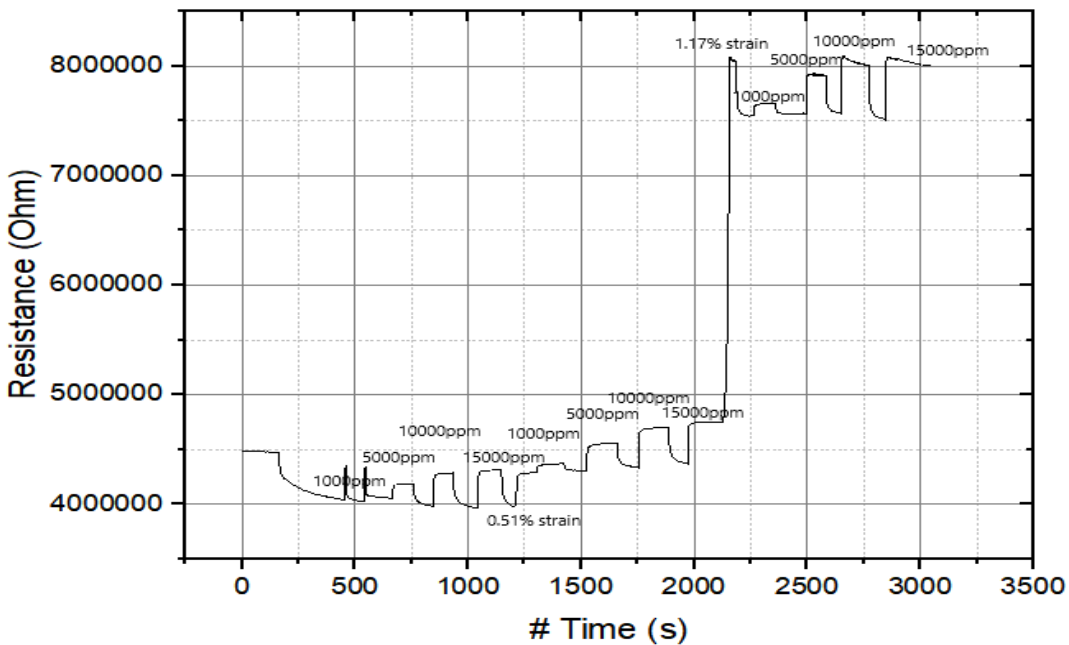
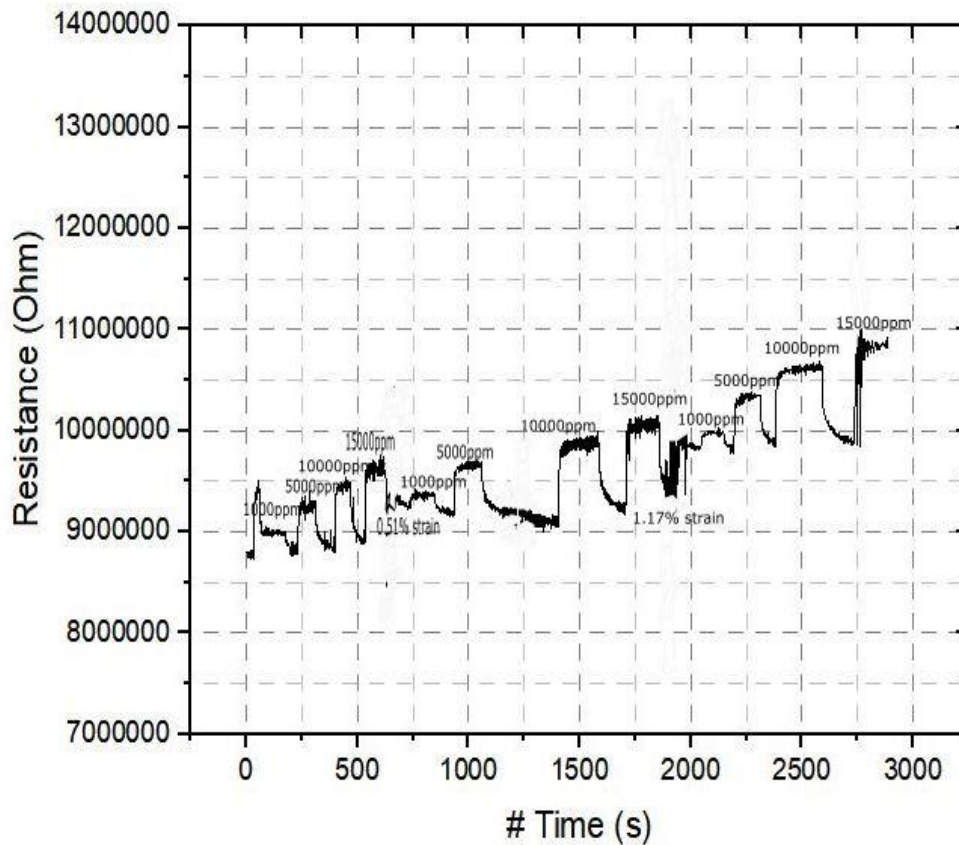


### iii) Σύγκριση Μέσων Όρων Αποκρίσεων Δειγμάτων με 10nm φιλμ αλουμίνας:



**Εικόνα 32: Σύγκριση Δειγμάτων με 10nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> για διαφορετικές παραμορφώσεις**

Ακόμα παρουσιάζονται μερικά ενδεικτικά διαγράμματα από δύο δείγματα της μετρούμενης αντίστασης τους, κατά την διάρκεια του χρόνου, καθώς τους τροφοδοτούμε με διαφορετική συγκέντρωση υγρασίας και εφαρμόζω διαφορετικές παραμορφώσεις. Οι απεικονίσεις αυτές γίνονται με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από το λογισμικό που λαμβάνω τις μετρήσεις της αντίστασης (Transient Resistance logger):

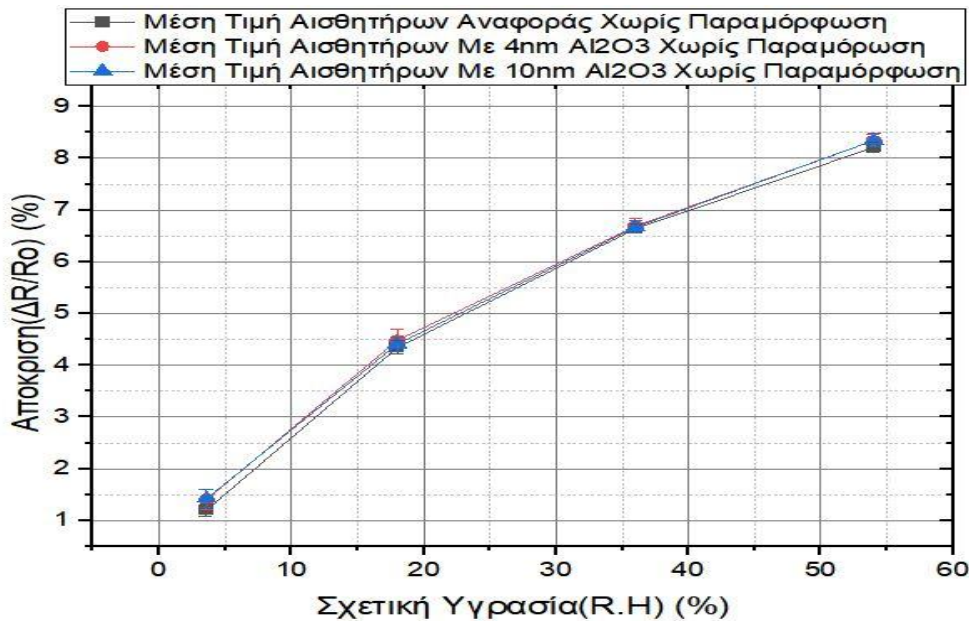


**Εικόνες 33,34: Δυναμικές απεικονίσεις της αντίστασης**

Από τις παραπάνω απεικονίσεις παρατηρώ αρχικά ότι οι αποκρίσεις των αισθητήρων αυξάνονται όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση της υγρασίας που τους τροφοδοτούμε για όλα τα δείγματα αισθητήρων. Ακόμα, παρατηρούμε πως και στις τρεις περιπτώσεις (0-4-10nm φιλμ αλουμίνας), οι αποκρίσεις των αισθητήρων για την τροφοδοσία με την ίδια συγκέντρωση υγρασίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμόρφωσης που τους εφαρμόζαμε.

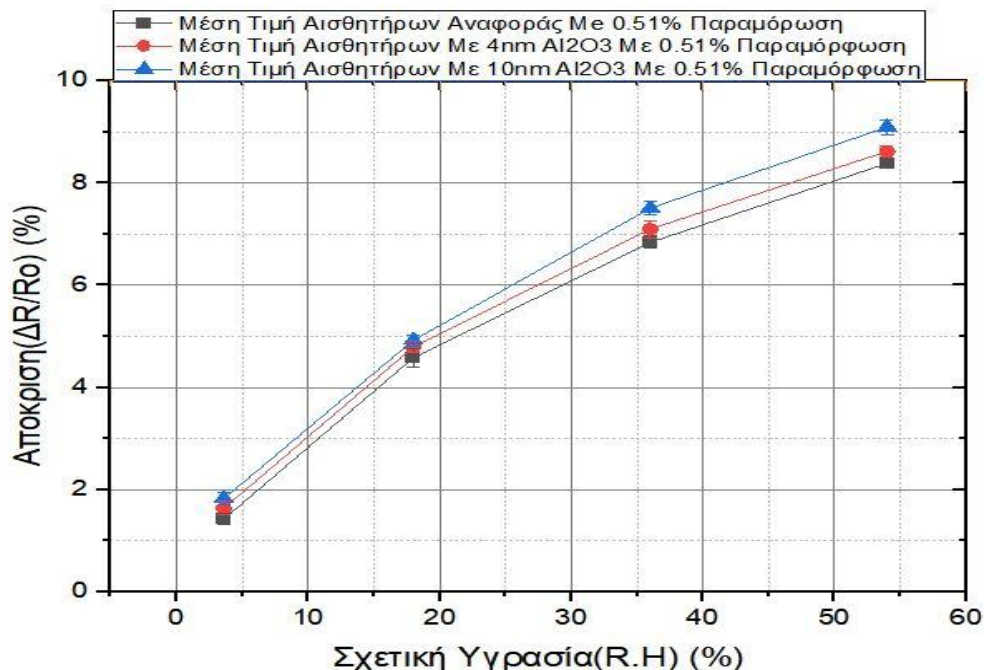
**3η Σύγκριση:** Συγκρίνουμε τις μέσες τιμές των αποκρίσεων αισθητήρων με διαφορετικό πάχος αλουμίνας αλλά για ίδια τιμή παραμόρφωσης.

**ι) Σύγκριση Μέσων Όρων Δειγμάτων Χωρίς Παραμόρφωση:**



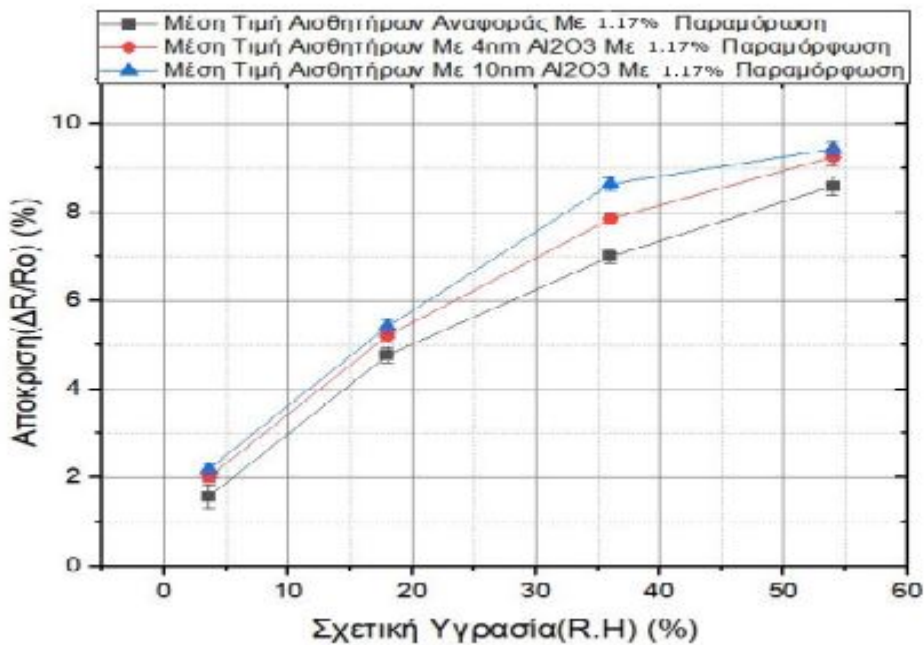
**Εικόνα 35:** Σύγκριση Δειγμάτων χωρίς παραμόρφωση για διαφορετικό πάχος

ii) Σύγκριση Μέσων Όρων Αποκρίσεων Δειγμάτων Με 0.51% Παραμόρφωση:



Εικόνα 36: Σύγκριση Δειγμάτων με 0.51% παραμόρφωση για διαφορετικό πάχος

iii) Σύγκριση Μέσων Όρων Αποκρίσεων Δειγμάτων Με 1.17% Παραμόρφωση:



Εικόνα 37: Σύγκριση Δειγμάτων με 1.17% παραμόρφωση για διαφορετικό πάχος

Παρατηρούμε πάλι πως οι αποκρίσεις των αισθητήρων αυξάνονταν καθώς τους τροφοδοτούσαμε με μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης υγρασίας. Επίσης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνω την παραμόρφωση οι αποκρίσεις των αισθητήρων με παχύτερα στρώματα αλουμίνας είναι υψηλότερες από τις αποκρίσεις των αισθητήρων αναφοράς. Το εύρος της αυξησής τους αυξάνεται επίσης καθώς αυξάνουμε την παραμόρφωση. Τα συμπεράσματα των μετρήσεων συζητούνται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

## Συμπεράσματα

Συνοπτικά κατασκευάστηκαν αισθητήρες που χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση το πάχος της αλουμίνας που τους έχει εναποτεθεί.Επειδή λήφθηκαν τιμές της απόκρισης από 10 δείγματα από κάθε κατηγορία(30 σύνολο),στις συγκρίσεις χρησιμοποιήθηκαν μέσοι όροι των αποκρίσεων από το σύνολο των αισθητήρων με το ίδιο πάχος αλουμίνας.Τα συμπεράσματα-παρατηρήσεις που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Αρχικά, από τις παραπάνω παρατηρήσεις συμπεραίνουμε πως οι αποκρίσεις των αισθητήρων αυξάνονται καθώς αυξάνω την συγκεντρωση της υγρασίας που τους τροφοδοτούμε.Το παραπάνω συμπέρασμα είναι αναμενόμενο, καθώς όταν ένα νανοσύνθετο πολυμερές εκτίθεται σε κάποιο αέριο(στην συγκεκριμένη περίπτωση ατμούς υγρασίας), παρουσιάζεται ρόφηση των μορίων του αναλύτη και το πολυμερές διογκώνεται, γεγονός που επηρεάζει την διάταξη των νανοσωματιδίων.Συνέπεια της διόγκωσης αυτής,είναι η απομάκρυνση των νανοσωματιδίων μεταξύ τους,η διακοπή κάποιων αγώγιμων δρόμων, ακόμα και η καταστροφή ολοκλήρου του δικτύου.[6]

Όλα τα παραπάνω προκαλούν αύξηση της μετρούμενης αντίστασης του νανোসυνθετου.

- Από την σύγκριση δειγμάτων ίδιου πάχους αλουμίνας και με την ίδια εφαρμοζόμενη παραμόρφωση αλλά μετρώντας την αποκρίσή τους σε διαφορετικές διατάξεις(διάταξη που περιλάμβανε βερνιέρο, και διάταξη που περιλάμβανε θάλαμο), παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα εμφανίζουν επαναληψιμότητα και οι αποκρίσεις δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους,κάτι το οποίο προσθέτει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα πειραματικά αποτελέσματα.
- Οι αισθητήρες είναι αναστρέψιμοι,δηλαδή η αντίσταση των αισθητήρων επανέρχεται στην ίδια τιμή,καθώς σταματάμε την τροφοδοσία υγρασίας και τους τροφοδοτούμε μόνο με άζωτο.[7]
- Η απόκριση των αισθητήρων είναι γραμμική.
- Όταν συγκρίνω τους μέσους όρους των αποκρίσεων των αισθητήρων για διαφορετική παραμόρφωση,παρατηρούμε πως και στις τρεις περιπτώσεις(αισθητήρες με 0,4,10nm πάχος στρώματος αλουμίνας), οι

αποκρίσεις των αισθητήρων αυξάνονται καθώς αυξάνουμε την τιμή της παραμόρφωσης που τους εφαρμόζουμε.

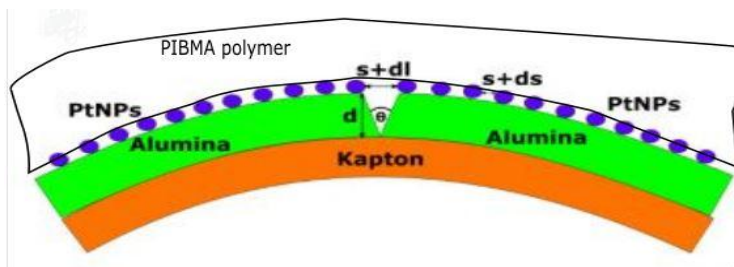
Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της απόκρισης των αισθητήρων αναφοράς οφείλεται αποκλειστικά στην κάμψη του αισθητήρα κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης των νανοσωματιδίων με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης του τελικά, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Στις άλλες δύο περιπτώσεις(αισθητήρες με 4nm και με 10nm φιλμ αλουμίνιας), η αύξηση της απόκρισης οφείλεται όχι μόνο στην κάμψη του αισθητήρα, αλλά καθώς και στο άνοιγμα των ρωγμών που υπάρχουν στο στρώμα αλουμίνιας. Το παραπάνω άνοιγμα έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της απόστασης των νανοσωματιδίων.

Επίσης καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση που εφαρμόζω τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκριση που λαμβάνω καθώς οι ρωγμές ανοίγουν όλο και περισσότερο και η απόσταση των νανοσωματιδίων αυξάνεται. [8]

- Όταν συγκρίνω τους μέσους όρους των αποκρίσεων για αισθητήρες με διαφορετικό πάχος αλουμίνιας(0-4-10nm  $Al_2O_3$ ) κάθε φορά για την ίδια τιμή παραμόρφωσης, παρατηρούμε ότι, όταν δεν εφαρμόζω καθόλου παραμόρφωση οι αισθητήρες έχουν παρόμοια απόδοση δηλαδή οι τιμές των αποκρίσεων τους δεν εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση. Όταν εφαρμόζουμε 0.51% παραμόρφωση οι αισθητήρες με 4 και 10nm στρώμα αλουμίνιας εμφανίζουν μεγαλύτερες αποκρίσεις από τους αισθητήρες αναφοράς. Επίσης οι αισθητήρες με 10nm στρώμα αλουμίνιας εμφανίζουν μεγαλύτερη απόκριση από τους αισθητήρες με 4nm στρώμα αλουμίνιας.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να αιτιολογηθούν καθώς, όταν δεν έχω παραμόρφωση οι ρωγμές δεν έχουν ανοίξει ακόμα, οπότε οι αποστάσεις μεταξύ των νανοσωματιδίων είναι παρόμοιες ανεξάρτητα από το αν έχω στρώμα αλουμίνιας ή όχι. Όταν εφαρμόζω παραμόρφωση(0.51% και 1.17%) οι ρωγμές αρχίζουν και ανοίγουν οπότε οι αποστάσεις των νανοσωματιδίων αυξάνονται στα δείγματα με αλουμίνια. Επιπλέον όσο παχύτερο είναι το στρώμα αλουμίνιας τόσο μεγαλύτερα είναι τα ανοίγματα των ρωγμών που δημιουργούνται, συνεπώς έχω μεγαλύτερες αποκρίσεις. [9]



**Εικόνα 38: Σχηματική Αναπαράσταση Χημικών Αισθητήρων Υπό Κάμψη**

## Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι παραπάνω διατάξεις μας δίνουν την δυνατότητα για περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς που εμφανίζουν οι αποκρίσεις των αισθητήρων.

Περισσότερη εμβάθυνση θα μπορούσε να δοθεί στην περαιτέρω μελέτη της επιρροής του πάχους της αλουμίνας στην βελτίωση της απόκρισης των αισθητήρων( για παράδειγμα εμφανίζεται μια βέλτιστη τιμή στην απόκριση για κάποια συγκεκριμένη τιμή του πάχους του στρώματος της αλουμίνας).

Ακόμα θα μπορούσε να δοθεί περισσότερη προσοχή στην επίδραση που έχει η αρχική αντίσταση των αισθητήρων,στην αποκρίσή τους. Περαιτέρω εμβάθυνση μπορεί να δοθεί επίσης στην κατασκευή των αισθητήρων, και πιο συγκεκριμένα στην επίδραση που έχει απόσταση των ηλεκτροδίων στην μεταβολή της αντίστασης τους.

Επιπλέον σε μια μελλοντική μελέτη,μπορούν να μελετηθούν διάφορα χαρακτηριστικά των αισθητήρων με ρωγμές αλουμίνας όπως το υψηλότερο/χαμηλότερο όριο ανίχνευσης και η διακριτική ικανότητα σε χαμηλές/υψηλές συγκεντρώσεις υγρασίας.[10]

Τέλος,ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η κατασκευή μιας διάταξης που θα έχουμε την δυνατότητα να ελέγχουμε καλύτερα την απόσταση που θα έχει το σημείο που τροφοδοτούμε τον αισθητήρα με κάποιο αέριο μέχρι το πολυμερές που το ανιχνεύει στον αισθητήρα, και να έχουμε επίσης παράλληλα την δυνατότητα να ασκήσουμε παραμόρφωση στον αισθητήρα και να τον θέσουμε υπό κάμψη.



## Βιβλιογραφία:

- [1] McGrath, Michael J. Sensor Technologies.
- [2] Fraden, J. Handbook of modern sensors(Vol.3). New York Springer.
- [3] Subhas Chandra,.Advancements in Modeling,Design Issues, Fabrication and Practical Applications.
- [4] Sinclair, I.(2000).Sensors and transducers.Newnes.
- [5] Μικροαισθητήρες-Εφαρμογές.Εκδόσεις Τζιόλα.
- [6] James, D.(2005).Chemical Sensors for electronic nose systems.Microchimica Acta, 149(1),1-17
- [7] D. Kohl, Function and applications of gas sensors, J. Phys. D, 34 (2001), 125–149.
- [8] Roduner E 2006 Size matters: why nanomaterials are different Chem. Soc. Rev. 35 583-592
- [9] M.E. Franke, T.J. Koplin, U. Simon, Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors: does the nanoscale matter?, Small, 2 (2006),36-50.
- [10] Chung-Chiun Liu, Electronics Design Center and Edison Sensor Technology Center, Case Western Reserve University
- [11] Rao C.N.R. GUK, P.J Thomas and P.P. Edwards. Metal nanoparticles and their assemblies. Chemical Society 2000,29 27-35.
- [12] Πίσσης, Π. (2011). Ηλεκτρικές ιδιότητες πολυμερών – αγωγή πολυμερή. Σημειώσεις για το μάθημα Πολυμερή και Νανοσύνθετα ΣΕΜΦΕ 8ο Εξάμηνο.
- [13] Yan, H., & Liu, C. C. (1994). A solid polymer electrolyte-based electrochemical carbon monoxide sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, 17(2), 165-168. [22] S.M. Sze, “Semiconductor Devices: Physics and Technology”, J. Wiley & Sons
- [14] Loffredo,P . Ink-jet printing technique in polymer/carbon black sensing device fabrication, Sens.Actuators B 143(2009) 421-429.

- [15] R.Igreja,C.J.Dias, Analytical evaluation of the interdigitated electrodes capacitance for a multi-layered structure, *Sens. Actuators A* 112 (2004) 291-301.
- [16] M.G. Ancona, A. W. Snon. Scaling properties of gold nanocluster chemiresistor sensors,*IEEE Sens. J.*6(2006) 1403-1414.
- [17] W.S Lee, *Small*, 2017,13,1703534.
- [18] Y.Joseph,B.Guse. Gold Nanoparticle organic networks as chemiresistor coating the effect of film morphology and vapor sensitivity.
- [19] R. Nohria, R.K. Khillan, Y. Su, R. Dikshit, Y. Lvov, K. Varahramyan, *Sens. Actuators B* 114 (2006) 218–222.
- [20] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten, *Phys. Rev. E* 62 (2000) 1.
- [21] T. Yang, X. Li, X. Jiang, S. Lin, J. Lao, J. Shi, Z. Zhen, Z. Li and H. Zhu, *Materials Horizons*, 2016, 3, 248-55.
- [22] R.E. Pelrine, R.D. Kornbluh, J.P. Joseph, *Sens. Actuators A* 64 (1) (1998) 77–85.
- [23] W. Zhang, Q. Liu and P. Chen, *Materials*, 2018, 11, 1836