



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Ι: ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓ. ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ & ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ



Ανάπτυξη αισθητήρων παραμόρφωσης με
χρήση γραφενίου και
πολυδιμεθυλοσιλοξάνης

Διπλωματική εργασία

Γιάννης Χαλκιάς

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Κωνσταντίνος Β. Κορδάτος

Αθήνα, 2020

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με τη συνεργασία της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών (ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ο κύριος αριθμός των πειραμάτων έλαβε τόπο στις εγκαταστάσεις του Δημόκριτου, με την άμεση επικοινωνία και συνεργασία του Εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κορδάτο για την ανάθεση του θέματος, καθώς και την κατανόηση και την συνεργασία του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους ερευνητές κ. Σ. Χατζανδρούλη και κ. Β. Τσούτη για την αμερόληπτη βοήθεια τους, την υποστήριξή τους και την καθοδήγηση κατά την υλοποίηση των πειραμάτων και επεξεργασία αποτελεσμάτων στο Κέντρο «Δημόκριτος».

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και του τμήματος Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για τη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Αισθητήρας θεωρείται οποιοδήποτε μέσο ανταλλαγής πληροφοριών σε ένα σύστημα, μέσω της ανίχνευσης ενός σήματος και τη μετατροπή του σε ένα μετρήσιμο μέγεθος. Από τα διάφορα είδη αισθητήρων, μία μεγάλη κατηγορία αποτελούν οι αισθητήρες παραμόρφωσης, οι οποίοι μετατρέπουν τις παραμορφώσεις που τους ασκούνται σε ηλεκτρικό σήμα. Εξελίξεις στους τομείς της νανοτεχνολογίας και βιοτεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, έχουν προκαλέσει αύξηση στην χρήση των αισθητήρων παραμόρφωσης σε εφαρμογές σχετικές με το ανθρώπινο σώμα όπως η καταγραφή κινήσεων των χεριών, της αναπνοής, των καρδιακών παλμών και άλλων.

Μεγάλη χρήση στους αισθητήρες παραμόρφωσης βρίσκουν οι αισθητήρες αντίστασης (δηλαδή αυτοί που η μετρούμενη αντίστασή τους μεταβάλλεται με την παραμόρφωση), λόγω της απλής και φθηνής κατασκευής τους και της υψηλής ευαισθησίας τους για μεγάλο εύρος ανίχνευσης.

Η συνήθης δομή ενός αισθητήρα παραμόρφωσης στηρίζεται σε δύο βασικά τμήματα, το αγώγιμο στρώμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου κατά τη μέτρηση και κατ' επέκταση, την ευαισθησία του αισθητήρα και το ελαστομερές υπόστρωμα που ακολουθεί τις παραμορφώσεις ενώ παράλληλα προστατεύει το αγώγιμο υλικό. Τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη ενός αισθητήρα παραμόρφωσης είναι η ευαισθησία, η ελαστικότητα, η γραμμικότητα, η υστέρηση, ο χρόνος απόκρισης και επαναφοράς του, και η ανθεκτικότητά του. Ανάλογα με τα υλικά ή τη μέθοδο υλοποίησης του αισθητήρα, τα αποτελέσματα ως προς αυτά τα μεγέθη μπορεί να διαφέρουν δραστικά. Τελευταία συνηθίζεται η χρήση ενός αγώγιμου στρώματος με βάση κάποια μορφή άνθρακα (π.χ. CNTs, GNPs, GO) και ενός πολυμερούς σαν ελαστομερές (π.χ. PVdf, PI, PDMS, Ecoflex).

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανάπτυξη ενός αισθητήρα αντίστασης από GNPs-PDMS (νανοπετάλια γραφενίου-πολυδιμεθυλοσιλοξάνης) ως προς διάφορες κατασκευαστικές παραμέτρους. Εξετάζεται κυρίως η αναλογία βάσης-αντιδραστηρίου σκλήρυνσης (curing agent) του PDMS που χρησιμοποιείται κατά την ανάπτυξη του αισθητήρα (30:1 και 10:1 αντίστοιχα), καθώς και η προσθήκη πάστας αργύρου (paste Ag) στις επαφές μεταξύ GNPs και ταινίας χαλκού, που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του αισθητήρα με όργανο μέτρησης και πως αυτά επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αισθητήρα. Παράλληλα πραγματοποιούνται συνοπτικά πειράματα σχετικά με άλλα στάδια υλοποίησης του αισθητήρα, όπως η επιλογή του κατάλληλου διαλύτη για την διασπορά των GNPs, ο τρόπος θέρμανσης των υλικών στα στάδια της εξάτμισης του διαλύτη, το curing του PDMS και η χρήση σύρματος χαλκού στις επαφές του αισθητήρα

με το όργανο μέτρησης. Οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν τέθηκαν σε μικρή παραμόρφωση (περίπου 0,2%) για τον χαρακτηρισμό τους, από το οποίο οι αισθητήρες με paste Ag έδειξαν καλύτερη συμπεριφορά από αυτούς στους οποίους δεν έγινε προσθήκη αργύρου στις επαφές. Συγκεκριμένα, παρουσίασαν ελάχιστο θόρυβο με χαμηλή αντίσταση (οι περισσότεροι κυμαίνονταν μεταξύ 1-50 kOhm) υστέρηση, GF 20-40, και ελάχιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ αισθητήρων του ίδιου είδους. Αντίθετα, οι αισθητήρες δίχως paste Ag έδειξαν υψηλή αντίσταση (τάξης MOhm) και θόρυβο, GF μεταξύ 100-400, αλλά και μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων ανά αισθητήρα. Σε τέτοια παραμόρφωση δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των αισθητήρων με διαφορετικές αναλογίες PDMS (βάσης-curing agent). Ακολούθησαν μετρήσεις αισθητήρων με paste Ag για διαφορετικές αναλογίες PDMS, κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε δυναμική παραμόρφωση των αισθητήρων για μικρή (0,2%) και μεγάλη (20%) έκταση αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι ο αισθητήρας με αναλογία 30:1 έδειξε μεγαλύτερη υστέρηση και χρόνο επαναφοράς από τον αντίστοιχο 10:1. Τέλος, πραγματοποιήθηκε θερμική κατεργασία των αισθητήρων για να μελετηθεί η εξάρτησή τους με τη θερμοκρασία. Παρατηρήθηκε ότι για θερμοκρασίες μικρότερες των 50-60°C, οι αισθητήρες έδειξαν σχεδόν γραμμική αύξηση της αντίστασης με τη θερμοκρασία. Για μεγαλύτερη θερμοκρασία (μετρήθηκε μέχρι 100°C), ο θόρυβος αυξήθηκε απότομα και η συμπεριφορά κάθε αισθητήρα έγινε απρόβλεπτη. Για θερμοκρασία κάτω των 50°C, οι αισθητήρες χωρίς paste Ag έδειξαν μεγαλύτερη εξάρτηση της αντίστασης με τη θερμοκρασία από ότι αυτοί με paste Ag.

Abstract

Any means of exchanging information in a system, by detecting a signal and converting it to a measurable size, is considered a sensor. Of the various types of sensors, a large category is strain sensors, which convert the deformations exerted on them into an electrical signal. Advances in the fields of nanotechnology and biotechnology through recent years have led to an increase in the use of strain sensors in wearable applications such as recording hand movements, breathing, heart rate and others.

A commonly used type of strain sensors are resistive-type sensors (i.e. those whose measured resistance changes with deformation), due to their simple and inexpensive manufacturing and their high sensitivity for a wide detection range.

The usual structure of a strain sensor consists of two main parts, the conductive layer, which is responsible for the electrical conductivity during measurement and, by extension, the sensitivity of the sensor, and the elastomeric matrix that protects the conductive layer while aiding in its stretching capabilities. The main performance metrics of a strain sensor are its sensitivity, elasticity, linearity, hysteresis, response and recovery times and its durability. Depending on the materials or fabrication process of the sensor, its performance may vary drastically. Lately, the use of carbonbased materials (e.g. CNTs, GNPs, GO) as a conductive layer along with a polymer (e.g. PVdf, PI, PDMS, Ecoflex) as an elastomeric matrix is increasingly more and more common.

In this project thesis, the fabrication process of a GNPs-PDMS (graphene nanoplatelets-polydimethylsiloxane) strain sensor is studied amongst several manufacturing parameters. One of the main parameters being tested is the base:curing agent ratios of PDMS during the implementation of the sensor (regarding 30:1 and 10:1 ratios, respectively), as well as the addition of silver paste between GNPs and the copper tape used in connecting a measuring device to the sensor, and how these affect the performance of the sensor. Summary experiments are also carried out regarding other stages of the fabrication process, such as the selection of the appropriate GNPs dispersion, the heating method of the materials during the evaporation of the solvent and curing of PDMS, and the use of copper wire in the sensor's contacts with the measuring instrument. The sensors were put in minimum strain (approximately 0.2%), from which the sensors with Ag paste showed better behavior than those without. In particular, they showed minimal noise effects with low resistance (most ranged between 1-50 kOhm) and hysteresis, GF between 20-40, and minimal deviation of the results between sensors of the same process. In contrast, the sensors without Ag paste showed high resistance (MOhm) and noise effects, GF varying between 100-400, but with a large deviation.

Different PDMS (base-curing agent) ratios showed no significant changes in this strain. Experiments were carried out regarding sensors with different PDMS ratios, during which, dynamic deformations were performed for small (0.2%) and large (20%) strains, respectively. The sensor with a 30:1 PDMS ratio showed greater hysteresis and recovery time than the corresponding 10:1. Finally, sensor's heating treatment was carried out to study their dependence on temperature. It was observed that for temperatures below 50-60°C, the sensors showed an almost linear increase in resistance with temperature. For higher temperatures (measured up to 100°C), the noise effects increased sharply and the behavior of each sensor became unpredictable. Below 50°C, the sensors without Ag paste showed a greater dependence of resistance with temperature than those with paste.

Σκοπός της εργασίας

Στον τομέα των αισθητήρων αντίστασης έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες τα τελευταία χρόνια ως προς την επιλογή των κατάλληλων υλικών, των μεθόδων κατασκευής των αισθητήρων και των διαφόρων εφαρμογών τους. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν κυρίως στις βασικές αρχές λειτουργίας και στα τμήματα ενός αισθητήρα αντίστασης, λαμβάνοντας πολλές μεταβλητές ως δεδομένες. Συγκεκριμένα, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αλλαγές στη χρήση του αγώγιμου δικτύου, η μελέτη των επαφών των αισθητήρων καθώς και ο τρόπος σύνδεσής τους με το δίκτυο αυτό, δεν αναφέρονται.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανάπτυξη ενός απλού αισθητήρα, ως προς την μέθοδο κατασκευής και την χρήση των υλικών, με σκοπό να μελετηθούν παράμετροι οι οποίες δεν αναφέρονται βιβλιογραφικά και των οποίων τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντικές έρευνες στην κατασκευή αισθητήρων. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιείται η κατασκευή αισθητήρων με τη χρήση νανοπεταλιών γραφενίου (GNPs) και πολυδιμεθυλοσιλοξάνης (PDMS), δύο πολύ συνηθισμένα υλικά στην κατασκευή αισθητήρων αντίστασης, με στάξιμο των υλικών σε μία επιφάνεια (drop casting), έχοντας έτσι μία απλή, γρήγορη και χαμηλή σε κόστος μέθοδο κατασκευής, με σκοπό την μελέτη διαφορετικών αλλαγών στην κατασκευή του αισθητήρα. Οι αλλαγές που εξετάζονται για τη βελτίωση του αισθητήρα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη χρήση πάστας αργύρου (Ag paste), για την καλύτερη σύνδεση των επαφών με τον αισθητήρα και τη χρήση διαφορετικής αναλογίας βάσης-αντιδραστηρίου σκλήρυνσης (base-curing agent) του PDMS, για την αύξηση της ελαστικότητας του πολυμερούς και κατά συνέπεια του αισθητήρα. Να σημειωθεί πως ενώ έχει πραγματοποιηθεί μελέτη για πολλές από τις παραμέτρους και αλλαγές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, ο συνδυασμός αυτών ή και η εφαρμογή τους σε πρακτικό επίπεδο για πολλές περιπτώσεις έχει παραμείνει μέχρι τώρα αντικείμενο προς εξέταση, για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε η μελέτη που ακολουθεί.

Περιεχόμενα

1. Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	11
1.1 Αισθητήρες παραμόρφωσης	11
1.2 Είδη αισθητήρων παραμόρφωσης	12
2. Βασικές αρχές λειτουργίας αισθητήρων αντίστασης (Μηχανισμοί αγωγιμότητας)....	18
2.1 Μηχανισμός Αποσύνδεσης (Disconnection Mechanism)	18
2.2 Φαινόμενο Σήραγγας (Tunnel effect)	19
2.3 Εμφάνιση Ρωγμών (Crack Propagation).....	20
3. Χαρακτηριστικά μεγέθη των αισθητήρων αντίστασης	21
3.1 Ευαισθησία αισθητήρα ή παράγοντας μέτρησης (Gauge Factor, GF).....	21
3.2 Ελαστικότητα Αισθητήρα.....	21
3.3 Γραμμικότητα.....	22
3.4 Υστέρηση.....	24
3.5 Συμπεριφορά Overshoot.....	25
3.6 Χρόνος απόκρισης και Χρόνος Επαναφοράς.....	26
3.7 Ανθεκτικότητα υπό δυναμικό φορτίο (Dynamic durability).....	26
4. Επιλογή υλικών κατασκευής.....	27
4.1 Ελαστομερές Υπόστρωμα	27
Πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (PDMS).....	28
4.2 Αγώγιμο Στρώμα	28
Νανοπετάλια Γραφενίου (GNPs)	32
5. Κατασκευή αισθητήρων – Μεθοδολογία.....	32
Πληροφορίες σχετικά με τους αισθητήρες	35
6. Χαρακτηρισμός αισθητήρων για μικρή παραμόρφωση.....	36
6.1 Πειραματική διαδικασία.....	36
6.2 Αποτελέσματα ανά αισθητήρα.....	38
test1:	38
b1s1:.....	44
b1s2:.....	47

<i>b1s3:</i>	49
<i>b1s4:</i>	50
<i>b1s5:</i>	52
<i>b1s6:</i>	53
<i>b1s7:</i>	54
<i>b1s8:</i>	57
<i>b2g1s1:</i>	57
<i>b2g1s2:</i>	59
<i>b2g1s3:</i>	60
<i>b2g2s1:</i>	61
<i>b2g2s2:</i>	62
<i>b2g2s3:</i>	62
<i>b2g3s1:</i>	63
<i>b2g3s2:</i>	63
<i>b2g3s3:</i>	65
<i>b3s1</i>	67
<i>b3s2</i>	68
<i>b3s3</i>	69
<i>b3s4</i>	70
<i>b3s5</i>	71
6.3 Συγκριτικά διαγράμματα	72
6.4 Αποτελέσματα τροποποιήσεων στην κατασκευή των αισθητήρων.....	75
6.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων κύκλων παραμόρφωσης	77
7. Κύκλοι για διαφορετικά είδη παραμορφώσεων	79
7.1 Πειραματική Διαδικασία.....	79
7.2 Αποτελέσματα για κάθε αισθητήρα.....	82
<i>b1s7:</i>	82
<i>b2g1s1:</i>	83
<i>b2g1s2:</i>	84

<i>b2g1s3</i> :.....	86
7.3 Συγκριτικός πίνακας.....	87
7.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	87
8. Εξάρτηση αντίστασης αισθητήρων με θερμοκρασία.....	88
8.1 Πειραματική διαδικασία.....	88
8.2 Αποτελέσματα ανά αισθητήρα.....	89
<i>test1</i> :	89
<i>b1s1</i> :.....	90
<i>b1s4</i> :.....	91
<i>b1s7</i> :.....	92
<i>b2g1s1</i> :.....	93
<i>b2g1s2</i> :.....	94
<i>b2g1s3</i> :.....	95
8.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα:	97
8.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	99
9. Συμπεράσματα.....	100
10. Βιβλιογραφία	103
Παράρτημα	111

1. Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Οι αισθητήρες, στη ευρεία τους σημασία, λειτουργούν σαν μέσα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του «ψηφιακού» και του «πραγματικού» περιβάλλοντος. Η χρήση τους επιτρέπει την άντληση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από σήματα τα οποία είναι άμεσα αισθητά από τον ανθρώπινο παράγοντα ή και για περιπτώσεις που το μετρούμενο μέγεθος δε θα γινόταν αντιληπτό διαφορετικά (Ripka et al., 2007).

Ως αισθητήρας (sensor) καλείται οποιαδήποτε διάταξη της οποίας οι λειτουργίες περιλαμβάνουν την ανίχνευση ενός σήματος και την μετατροπή τους σε ένα μετρήσιμο μέγεθος. Τα δύο βασικά τμήματα ενός αισθητήρα είναι ο μετατροπέας (transducer) που είναι υπεύθυνος για την αλλαγή ενός σήματος από μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη (για παράδειγμα από μηχανική σε ηλεκτρική) και το κύκλωμα ανάδρασης (driving circuit) που διαμορφώνει το σήμα του μετατροπέα σε μία αναγνωρίσιμη και τυποποιημένη στον άνθρωπο μορφή (π.χ. κείμενο) (Fraden, 2004).

Το κύριο τμήμα ενός αισθητήρα στο οποίο γίνονται οι περισσότερες μελέτες είναι ο μετατροπέας, του οποίου η ακριβής μετατροπή του αρχικού σήματος σε ηλεκτρικό μετρήσιμο σήμα αποτελεί προτεραιότητα. Συχνά με τον όρο αισθητήρα, γίνεται στην πραγματικότητα αναφορά στον μετατροπέα του. Η μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό, ανάλογα με το είδος του αισθητήρα, μπορεί να γίνει από μηχανική ή θερμική ενέργεια, ακτινοβολία, χημική αντίδραση κλπ.

Το κύκλωμα ανάδρασης λαμβάνει το σήμα του μετατροπέα, ενισχύοντας το και διατηρώντας το σε μία σταθερή μορφή. Ταυτόχρονα, τα κυκλώματα ανάδρασης διορθώνουν οποιεσδήποτε ανεπιθύμητες επιδράσεις στη διάταξη όπως μεταβολές στη θερμοκρασία ή στην τάση τροφοδοσίας, ενώ παράλληλα τροποποιούν το τελικό σήμα εξόδου εντός προκαθορισμένων παραμέτρων, ανάλογα με τις απαιτήσεις του θεμιτού συστήματος. Το τελικό αυτό ψηφιακό σήμα, μπορεί να αποθηκευτεί, αναμεταδοθεί και να διανεμηθεί ηλεκτρονικά μέσω συμβατικών δικτύων μεταφοράς πληροφοριών (Tsouti, 2009).

1.1 Αισθητήρες παραμόρφωσης

Ένας αισθητήρας παραμόρφωσης (strain sensor) μετατρέπει τις παραμορφώσεις που ασκούνται σε αυτόν σε ηλεκτρικά σήματα. Η εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο αισθητήρας καθορίζει το είδος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τις παραμέτρους κατασκευής του.

Με την τεχνολογική πρόοδο τα τελευταία χρόνια στους τομείς της νανοτεχνολογίας και της βιοηλεκτρονικής, έχουν παρατηρηθεί μεγάλες εξελίξεις σε εφαρμόσιμους στο

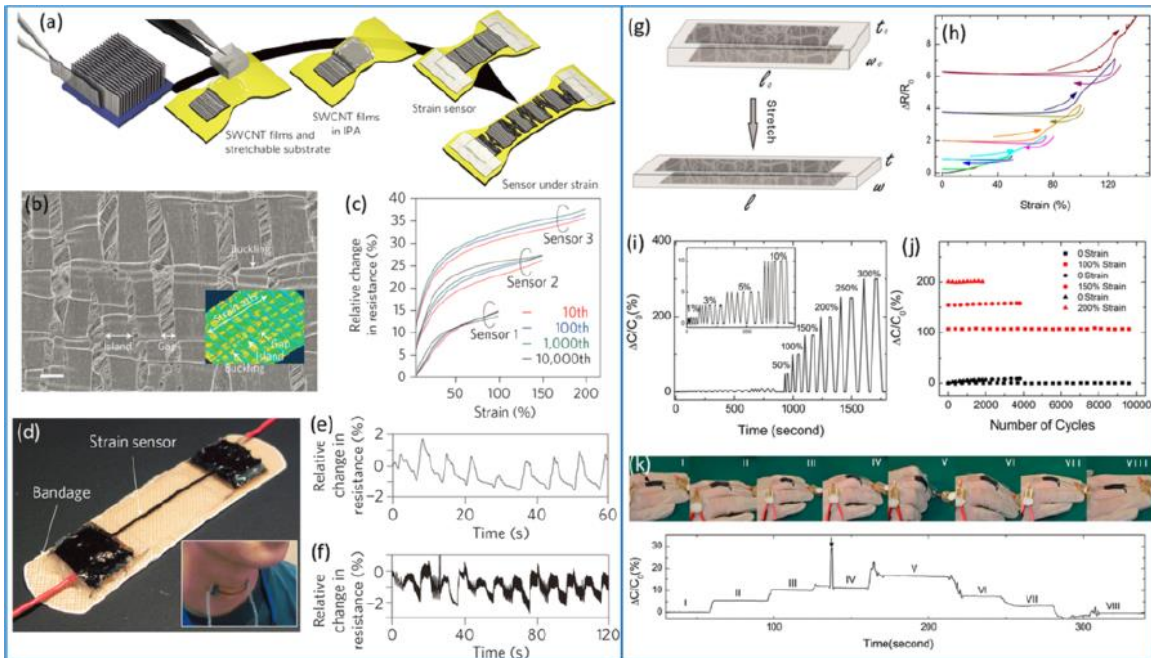
ανθρώπινο σώμα αισθητήρες παραμόρφωσης από πολυμερή και νανοσύνθετα υλικά. Οι αισθητήρες αυτοί αποκτούν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στην ιατρική περίθαλψη, διάγνωση, καθώς και στη ρομποτική, προσθετική, εικονική πραγματικότητα, ψυχαγωγία κλπ. (Rogers et al., 2010).

1.2 Είδη αισθητήρων παραμόρφωσης

Τα πιο γνωστά είδη αισθητήρων παραμόρφωσης είναι οι αισθητήρες *χωρητικότητας* (capacitive), *αντίστασης* (resistive), *υγρών μετάλλων* (liquid metals), *Fiber Bragg Grating* (FBG), *Raman Shift*, οι *τριβοηλεκτρικοί* και οι *πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες* (Barlian et al., 2009 ; Cai et al., 2013 ; Campanella et al., 2018 ; Cooper et al., 2017; Fassler et al., 2013 ; Gullapalli et al., 2010 ; Hu et al., 2010 ; Jin et al., 2017 ; Park et al., 2015 ; Qiu et al., 2010). Ανάλογα με το είδος, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην αρχή λειτουργίας τους και στη μέθοδο κατασκευής.

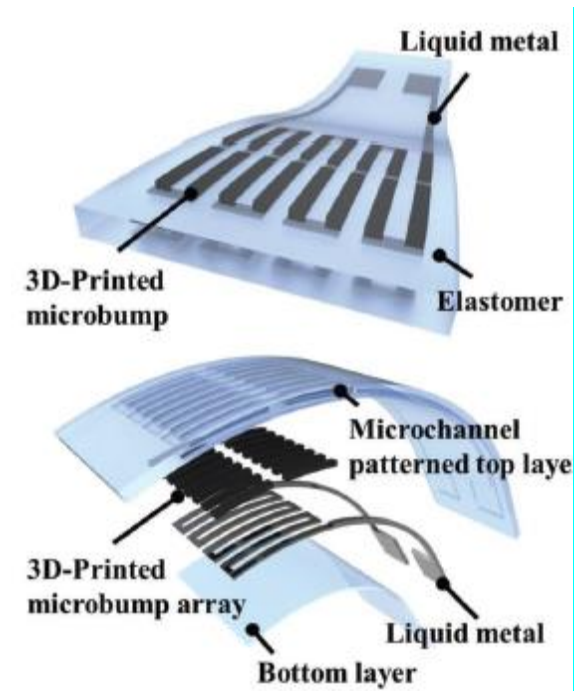
Οι *αισθητήρες χωρητικότητας* έχουν σαν κύρια αρχή λειτουργίας την μεταβολή της χωρητικότητας του αισθητήρα κατά την παραμόρφωσή του. Η γενική δομή ενός αισθητήρα τέτοιου είδους είναι 2 αγώγιμες πλάκες (λόγου χάριν CNTs) τοποθετημένες παράλληλα οι οποίες δρουν σαν ηλεκτρόδια, επικαλυπτόμενες από ένα ελαστομερές (π.χ. PDMS) σχηματίζοντας έτσι έναν πυκνωτή. Κατά το εφελκυσμό ή την άφεση (release) του αισθητήρα, οι αλλαγές στην καταπόνηση μεταφράζονται σαν μεταβολές στην χωρητικότητα. Οι μεταβολές αυτές γίνονται αντιληπτές σαν σήματα από το σύστημα που είναι συνδεδεμένο με τον αισθητήρα, καθιστώντας έτσι ένα σύστημα ανίχνευσης (Cai et al., 2013).

Οι *αισθητήρες αντίστασης* αξιοποιούν, όπως αναφέρεται και στο όνομά τους, τη μεταβολή της αντίστασης κατά την παραμόρφωση του αισθητήρα σαν μέσο ανίχνευσης. Με τη διέλευση ρεύματος σταθερής έντασης από τον αισθητήρα οι παραμορφώσεις που του επιβάλλονται λόγω άσκησης καταπόνησης δυσχεραίνουν τα «μονοπάτια» από τα οποία το ρεύμα διέρχεται, προκαλώντας μία αύξηση της αντίστασης. Ο λόγος της μεταβολής της αντίστασης προς την αρχική τιμή του αισθητήρα δίνει μία εικόνα για την ευαισθησία του προς την αντίστοιχη παραμόρφωση (Barlian et al., 2009; Hu et al., 2010).



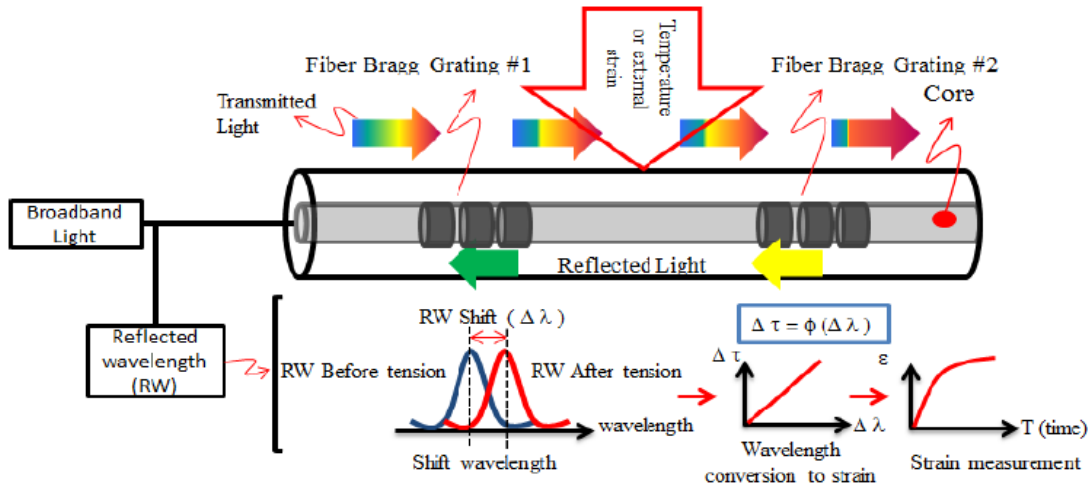
Εικόνα 1.1: Σύγκριση αισθητήρων, αντίστασης (a-f) και χωρητικότητας (g-k) αντίστοιχα που αποτελούνται από δίκτυα CNTs (Cait et al., 2015). a) Κατασκευαστική μέθοδος και μηχανισμός ανίχνευσης ενός αισθητήρα αντίστασης. b) In situ SEM απεικόνιση του δικτύου SWCNTs υπό 100% παραμόρφωση. c) Σχετική μεταβολή στην αντίσταση για μέχρι και 10.000 κύκλους για παραμορφώσεις 100,150 και 200%. d-f) Ένας αισθητήρας κολλημένος σε λαιμό που χρησιμοποιείται για την καταγραφή αναπνοής (e) και εκφώνησης (f). g) Μηχανισμός λειτουργίας ενός αισθητήρα χωρητικότητας χρήση SWCNTs film σαν ηλεκτρόδια. h) Σχετικές μεταβολές στην αντίσταση των ηλεκτροδίων για ολοένα αυξανόμενες παραμορφώσεις. j) Σχετικές μεταβολές στην χωρητικότητα για επαναλαμβανόμενους κύκλους παραμόρφωσης-χαλάρωσης με μέγιστες παραμορφώσεις 100, 150 και 200%. k) Επίδειξη χρήσης αισθητήρα για την καταγραφή της κίνησης των δαχτύλων ενός ανθρώπινου χεριού.

Η κύρια διάκριση των αισθητήρων υγρών μετάλλων από τα άλλα είδη αισθητήρων βρίσκεται στη χρήση των υλικών που χρησιμοποιούνται σαν μέσα ανίχνευσης. Τα υγρά μέταλλα όπως το ευθηκτικό γάλλιο-ίνδιο, αποτελούν ρευστά τα οποία ενσωματώνονται στο εσωτερικό ενός ελαστομερούς (συνήθως πολυμερούς σιλικόνης όπως PDMS ή Ecoflex) για την κατασκευή του αισθητήρα. Λόγω της υγρής φάσης τους, τα υγρά μέταλλα έχουν την ιδιότητα να προσαρμόζονται σε διάφορες εντάσεις παραμόρφωσης δίχως να χάνουν τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Παράλληλα, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής του αισθητήρα, οι αισθητήρες υγρών μετάλλων επιτυγχάνουν ανίχνευση κίνησης είτε σαν πυκνωτές όπως οι αισθητήρες χωρητικότητας, είτε σαν επαγωγικά πηνία. (Cooper et al., 2017; Fassler et al., 2013)



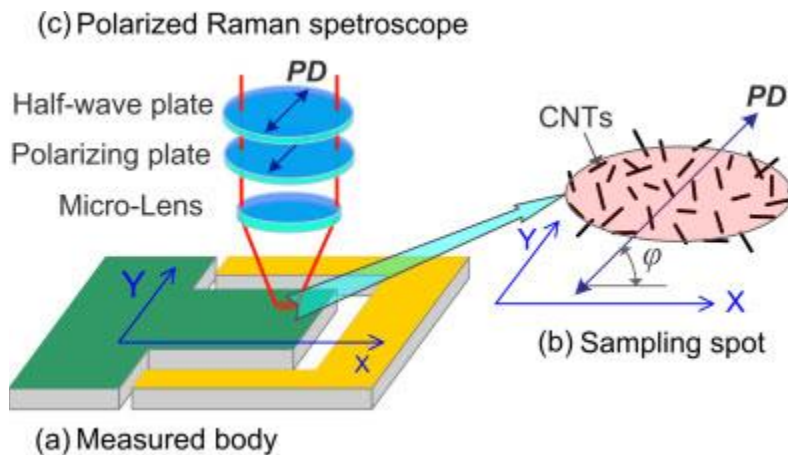
Εικόνα 1.2: Σχηματική απεικόνιση ενός 3D-printed αισθητήρα υγρών μετάλλων (Kim et al., 2019).

Οι *Fiber Bragg Grating* ή *FBG αισθητήρες* αναφέρονται σε μία υποκατηγορία αισθητήρων που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες σαν μέσο ανίχνευσης. Η καταπόνηση του αισθητήρα αντιστοιχεί σε μία μεταβολή του οπτικού σήματος που λαμβάνεται από αυτόν από την αρχική του τιμή, η οποία μεταβολή χρησιμοποιείται για υπολογισμό της μετρούμενης ιδιότητας που έχει επιλεχθεί. Συγκεκριμένα, η παραμόρφωση που εφαρμόζεται στην οπτική ίνα είναι ανάλογη της μεταβολής του μήκους κύματος προς την αρχική του τιμή που λειτουργεί σαν σημείο αναφοράς. Η ιδιαιτερότητα στον τρόπο ανίχνευσης αυτών των αισθητήρων έναντι των υπολοίπων που αναφέρθηκαν παραπάνω συνοδεύεται από υψηλή ευαισθησία και δυναμικό εύρος ανίχνευσης, ανεπηρέαστη απόδοση από την παρουσία ραδιοσυχνοτήτων ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και φορητής ανίχνευσης ανεξάρτητης από κάποια παροχή ρεύματος (Campanella et al., 2018).



Εικόνα 1.3: Μηχανισμός ανίχνευσης ενός αισθητήρα τύπου Fiber Bragg Grating (Malekzadeh et al., 2013).

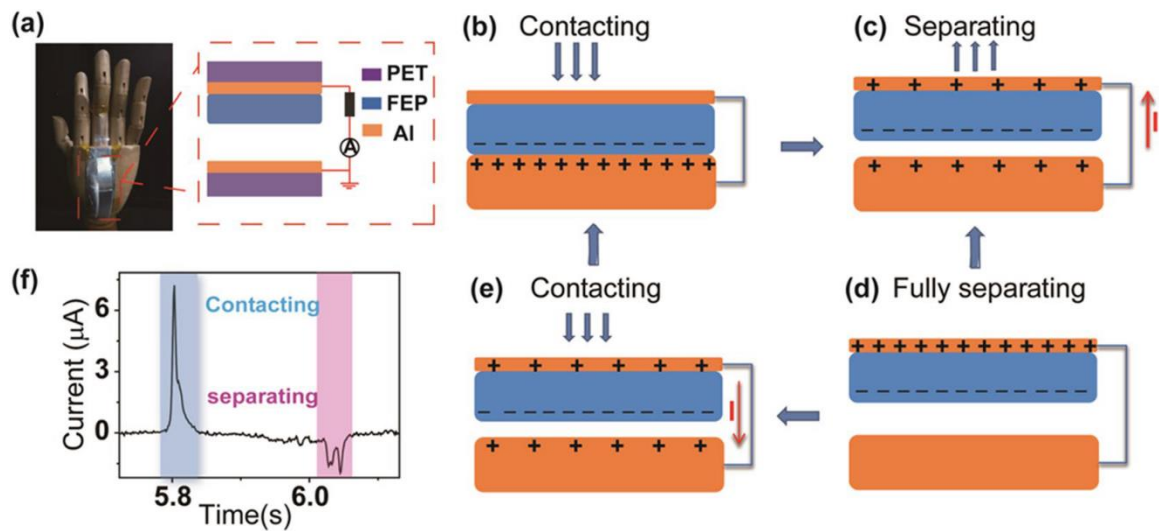
Οι *Raman Shift* αισθητήρες αξιοποιούν τη φασματοσκοπία Raman για την ανίχνευση καταπόνησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε σε μελέτες ότι οι μεταβολές σε συγκεκριμένες ζώνες του φάσματος ήταν γραμμικές με την άσκηση δυναμικού φορτίου στον αισθητήρα. Η συσχέτιση όμως μεταξύ των δύο έχει γίνει για συγκεκριμένα υλικά (κυρίως CNTs) και πραγματοποιούνται ακόμα μελέτες για την εύρεση μαθηματικών μοντέλων σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο για τη δημιουργία αξιόπιστων συστημάτων ανίχνευσης (Qiu et al., 2010).



Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας ενός συστήματος ανίχνευσης με χρήση φασματοσκοπίας Raman και CNTs (Qiu et al., 2010).

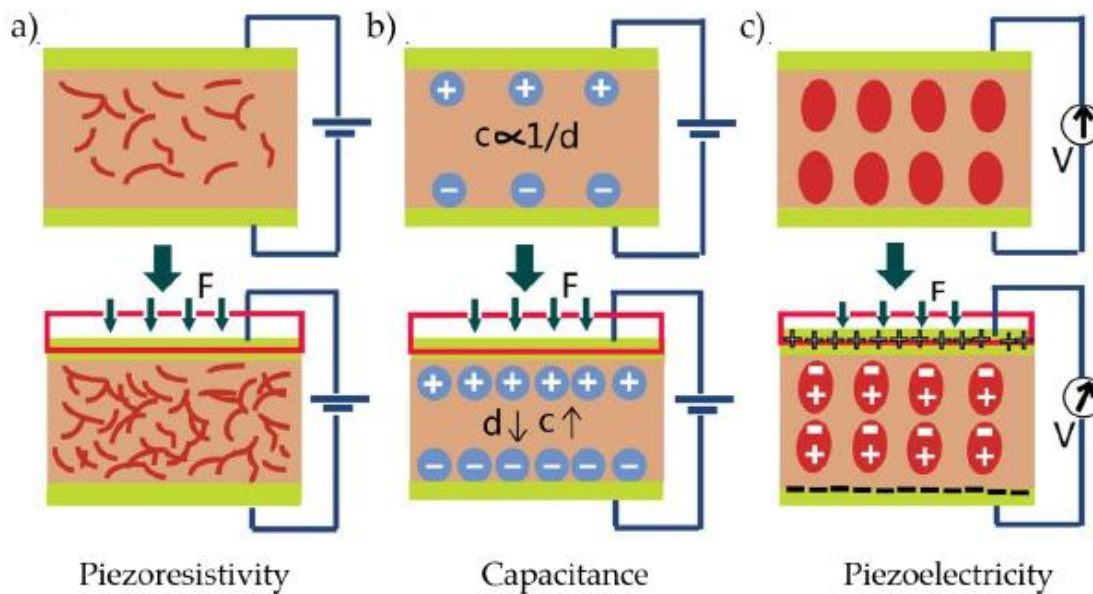
Τα τελευταία χρόνια, έχουν παρατηρηθεί εξελίξεις στον τομέα των αισθητήρων με αυτονομία τροφοδοσίας ρεύματος, με την τριβοηλεκτρική νανογεννήτρια (triboelectric

nanogenerator ή TENG) να αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό των τριβοηλεκτρικών αισθητήρων, ένα σχετικά καινούριο είδος των εφαρμόσιμων στο ανθρώπινο σώμα αισθητήρων παραμόρφωσης. Η αρχή λειτουργίας μίας τριβοηλεκτρικής νανογεννήτριας βασίζεται στην ηλεκτροστατική επαγωγή και του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, όπου όταν δύο διαφορετικά υλικά με αντίθετες πολικότητες (polarities) έρχονται σε επαφή, παράγουν ίσα και αντίθετα φορτία στην επιφάνεια επαφής. Η παραγωγή αυτού του φορτίου χρησιμοποιείται παράλληλα σαν μέσο ανίχνευσης του αισθητήρα και σαν μέσο παροχής ρεύματος για τη λειτουργία του, δημιουργώντας έτσι ένα ηλεκτρικά αυτόνομο σύστημα ανίχνευσης (Jin et al., 2017).



Εικόνα 1.4: Απεικόνιση βασικών φαινομένων κατά τη σύνδεση ενός TENG αισθητήρα με ένα χέρι για τέντωμα και σφίξιμο του χεριού. (Jin et al., 2017)

Κατά αντιστοιχία, στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, αξιοποιείται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια που τους ασκείται σε ηλεκτρική, η ένταση της οποίας χρησιμοποιείται σαν μέτρο ευαισθησίας του αισθητήρα. (Gullapalli et al., 2010)



Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση των τριών βασικών μηχανισμών αγωγιμότητας (transduction), a) αντίστασης, b) χωρητικότητας, c) πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (Xu et al., 2018).

Από τα παραπάνω είδη αισθητήρων, οι χωρητικότητας και αντίστασης είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι, καθώς οι υπόλοιποι αντιμετωπίζουν ακόμα σημαντικές δυσκολίες σε θέματα όπως εξειδικευμένο εξοπλισμό λήψης μετρήσεων, περίπλοκα συστήματα ανάλυσης και χαμηλές δυναμικές αποδόσεις. Αντίθετα, οι αισθητήρες αντίστασης και χωρητικότητας απαιτούν απλά συστήματα λειτουργίας, ενώ παρουσιάζουν υψηλή ελαστικότητα και ευκαμψία (Amjadi et al., 2014 ; Barlian et al., 2009 ; Cai et al., 2013 ; Campanella et al., 2018 ; Cooper et al., 2017; Fassler et al., 2013 ; Gullapalli et al., 2010 ; Hu et al., 2010 ; Jin et al., 2017 ; Park et al., 2015 ; Qiu et al., 2010).

Μεταξύ των αισθητήρων αντίστασης και χωρητικότητας, υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και για τα δύο είδη. Οι αισθητήρες αντίστασης παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία και εύρος ανίχνευσης, αλλά αντιμετωπίζουν δυσκολίες σε θέματα γραμμικότητας, υστέρησης και χρόνων απόκρισης και επαναφοράς, φαινόμενα που σχετίζονται με την απόδοση του αισθητήρα, η ανάλυση των οποίων αναγράφεται παρακάτω. Αντιθέτως, οι αισθητήρες χωρητικότητας δεν αντιμετωπίζουν σχετικά προβλήματα στις προαναφερθείς παραμέτρους απόδοσης, ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλή ελαστικότητα. Υστερούν όμως σε θέματα ευαισθησίας, το οποίο είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για τον σχεδιασμό ενός αισθητήρα παραμόρφωσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μικρών κινήσεων και καταπονήσεων όπως αυτές των ζωτικών λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος (π.χ. αναπνοή, καρδιακοί παλμοί κ.ά.) (Amjadi et al., 2016 ; Lu et al., 2019). Στην παρούσα εργασία πραγματοποιούνται μελέτες σε αισθητήρες αντίστασης, των οποίων η κατασκευή και η επιλογή υλικών αναφέρεται παρακάτω.

2. Βασικές αρχές λειτουργίας αισθητήρων αντίστασης (Μηχανισμοί αγωγιμότητας)

Ως αντίσταση (R) ενός ομογενούς υλικού θεωρείται η σχέση μεταξύ των διαστάσεών του με την ειδική αντίστασή του,

$$R = \frac{\rho l}{a}$$

όπου l το μήκος του, a η επιφάνεια διατομής και ρ η ειδική αντίσταση του υλικού. Η αλλαγή του μέτρου της αντίστασης λόγω παραμόρφωσης του υλικού είναι συναρτήσεως των μεταβολών στη γεωμετρία του και στην ειδική του αντίσταση.

Η μεταβολή στην αντίσταση οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά $(1 + 2\nu)\varepsilon$ και στην μεταβολή της ειδικής αντίστασης ρ του υλικού με την καταπόνηση,

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

όπου ν ο λόγος Poisson του υλικού, και $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ η ποσοστιαία μεταβολή στην ειδική αντίσταση.

Ο όρος που αντιστοιχεί στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αντιστοιχεί συνήθως μεταξύ 1,4 και 2,0 μονάδων. Για μεταλλικά υλικά, η μεταβολή $\Delta\rho/\rho$ είναι της τάξεως του 0,3. Για υλικά όμως όπως το γερμάνιο και πυρίτιο, η μεταβολή στην ειδική αντίσταση είναι 50-100 φορές μεγαλύτερη της μεταβολής των γεωμετρικών όρων. Οι αισθητήρες που κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου από αγώγιμα υλικά ή ημιαγωγούς παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία, αλλά δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές στο ανθρώπινο σώμα λόγω χαμηλής ελαστικότητας και ευκαμψίας. Για το λόγο αυτό γίνεται και η χρήση ενός ελαστομερούς υλικού. (Barlian et al., 2009)

2.1 Μηχανισμός Αποσύνδεσης (Disconnection Mechanism)

Τα αγώγιμα νανοϋλικά εντός του ελαστομερούς, δημιουργούν ένα κύκλωμα το οποίο παράγει ένα σήμα, (στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό το σήμα είναι η μετρούμενη αντίσταση) όταν ο αισθητήρας καταπονείται. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μονοπάτια διέλευσης ηλεκτρονίων, τα οποία διακόπτονται κατά την καταπόνηση του αισθητήρα, καθώς τα αγώγιμα υλικά τείνουν να έχουν μεγαλύτερη σταθερά Young και χαμηλότερο σημείο θραύσης από τα ελαστομερή που τα καλύπτουν. Όσο αυξάνεται η καταπόνηση του αισθητήρα, τόσο τα στρώματα του αγώγιμου υλικού χάνουν την επαφή τους, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η ροή ηλεκτρονίων μέσα από αυτό. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται μέχρι μία μέγιστη καταπόνηση, όπου η αντίσταση του αισθητήρα τείνει στο άπειρο. Η απόδοση του αισθητήρα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητα

αποσύνδεσης και επανασύνδεσης αυτών των τμημάτων με καλή επαναληψιμότητα. Μόνιμη αποσύνδεση στρωμάτων των νανοϋλικών προκαλεί μη επανορθώσιμη φθορά στην ικανότητα ανίχνευσης του αισθητήρα. (Lu et al., 2019)

2.2 Φαινόμενο Σήραγγας (Tunnel effect)

Για τυπικούς αισθητήρες που αποτελούνται από νανοσύνθετα και πολυμερή υλικά, ο μηχανισμός αποσύνδεσης είναι το κυρίαρχο φαινόμενο που παρατηρείται. Σε περιπτώσεις όμως που το κενό μεταξύ δύο αγώγιμων υλικών είναι αρκετά μικρό, είναι δυνατή η διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από αυτό, σχηματίζοντας ένα μονοπάτι. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται *φαινόμενο σήραγγας (tunnel effect)*. Η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης από αυτό το φαινόμενο είναι η εξής:

$$R_{tunnel} = \frac{V}{AJ} = \frac{h^2 d}{Ae^2 \sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi d}{h} \sqrt{2m\lambda}\right)$$

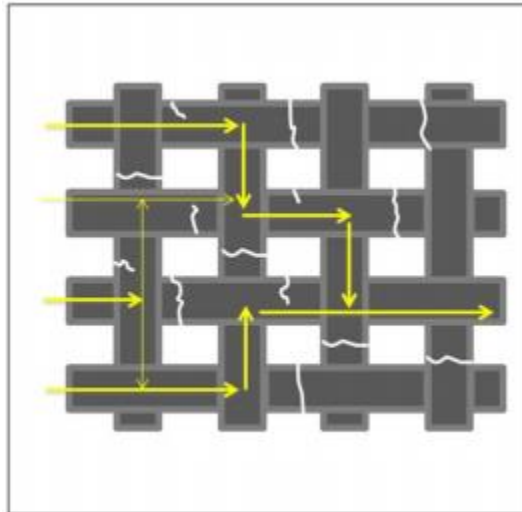
Όπου J η πυκνότητα ρεύματος σήραγγας, V το δυναμικό, e το φορτίο ηλεκτρονίων, m η μάζα ηλεκτρονίου, h η σταθερά Planck, d η απόσταση μεταξύ δύο αγώγιμων σωμάτων, λ το ύψος ενεργειακού φραγμού του ελαστομερούς, και A η επιφάνεια διατομής του αγωγού. (Simmons 1963). Όσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξάρτηση της αντίστασης από το φαινόμενο σήραγγας.

Οι Hu et al., σε δική τους μελέτη διαπίστωσαν με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και κατασκευή αισθητήρων από CNTs και πολυμερή, ότι η βελτίωση της ευαισθησίας του αισθητήρα είναι δυνατή είτε μέσω αύξησης της αντίστασης σήραγγας, π.χ. μέσω της αναλογίας αντίστασης σήραγγας προς τη συνολική αντίσταση του αισθητήρα. Άλλοι παράγοντες βελτίωσης της ευαισθησίας που παρατηρήθηκαν είναι η χαμηλή θερμοκρασία curing του πολυμερούς, συγκέντρωση CNTs κοντά στο κατώφλι διήθησης* (percolation threshold), υψηλή αναμιξιμότητα, μικρή διάμετρος του νανοϋλικού και υψηλό ενεργειακό φράγμα του ελαστομερούς. (Hu et al., 2010)

***Κατώφλι διήθησης:** Περιγράφει τη σύνδεση ενός συστήματος ως προς τη δυνατότητα ροής κάποιας ποσότητας μέσα από αυτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το κατώφλι διήθησης αναφέρεται στη ροή ηλεκτρικού φορτίου μέσα από τα CNTs. Υπάρχει μία συγκέντρωση των CNTs για την οποία η διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από αυτά θεωρείται ελάχιστη για την μέτρηση αντίστασης ενός αισθητήρα. Για αυτή τη (κρίσιμη) συγκέντρωση (P_c) ορίζεται το κατώφλι (Aoki et al., 1994).

2.3 Εμφάνιση Ρωγμών (Crack Propagation)

Η εμφάνιση ρωγμών είναι από τις πιο συνηθισμένες μορφές φθοράς της δομής ενός υλικού, κυρίως των πολυμερών. (Ramsteiner et al., 2001) Όταν ένα υλικό υπόκειται σε μεγάλη καταπόνηση, ρωγμές σχηματίζονται σε ελαττωματικά τμήματα του υλικού (π.χ. σημείο μικρότερου πάχους από το υπόλοιπο υλικό) ή στα σημεία που η καταπόνηση παρουσιάζεται πιο έντονη. Όσο αυξάνεται η ένταση της παραμόρφωσης, οι ρωγμές αυτές μεγαλώνουν σε μέγεθος μέχρι την θραύση του υλικού σε εκείνο το σημείο. Σε αισθητήρες αντίστασης με δισδιάστατα νανοϋλικά όπως το γραφένιο, εφόσον το μέτρο της παραμόρφωσης είναι μικρότερο του σημείου θραύσης του πολυμερούς που το επικαλύπτει, οι ρωγμές που σχηματίζονται μειώνουν τη διέλευση ηλεκτρονίων από αυτά, κατά συνέπεια και την αντίσταση. Όταν έπειτα η καταπόνηση ελαττώνεται, το υλικό επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, και η αντίσταση επανέρχεται στην αρχική της τιμή. (Lu et al., 2019) Στην πράξη όμως, είναι συνηθισμένο να φαινόμενο η επαναφορά του πολυμερούς υλικού να μην είναι απόλυτα ελαστική ή το αγωγίμο στρώμα εντός αυτού να μην λάβει τη δομή που είχε πριν την άσκηση της παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα η αντίσταση σε κατάσταση ηρεμίας του αισθητήρα να είναι μεγαλύτερη της αρχικής.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση διαδρόμων ηλεκτρονίων σε πλέγμα γραφενίου υπό την άσκηση παραμόρφωσης και εμφάνισης ρωγμών (Li et al., 2012)

3. Χαρακτηριστικά μεγέθη των αισθητήρων αντίστασης

3.1 Ευαισθησία αισθητήρα ή παράγοντας μέτρησης (Gauge Factor, GF)

Ο παράγοντας μέτρησης (Gauge Factor, GF) ενός αισθητήρα αντίστασης ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής μεταβολής της αντίστασης προς την σχετική μεταβολή της παραμόρφωσης,

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

όπου ε η παραμόρφωση (σχετική μεταβολή του μήκους) του υλικού και $\frac{\Delta R}{R}$ η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης για την αντίστοιχη καταπόνηση. (Barlian et al., 2009)

Τα κύρια φαινόμενα από τα οποία εξαρτάται η μεταβολή της αντίστασης σε έναν αισθητήρα παραμόρφωσης είναι οι αποσυνδέσεις των αγώγιμων στρωμάτων, οι ρωγμές στα λεπτά σημεία που μπορεί να εμφανιστούν κατά την καταπόνηση, και το φαινόμενο. Αλλαγές στη δομή ή στα υλικά κατασκευής του αισθητήρα μεταβάλλουν την αντίστασή του για την ίδια ένταση παραμόρφωσης, το οποίο κατά συνέπεια μεταβάλλει και το GF.

Παρακάτω παρατίθεται ένας Πίνακας με μερικά παραδείγματα αισθητήρων οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο και στα υλικά κατασκευής, μαζί με το αντίστοιχο GF τους. Παρατηρείται ότι για αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με τα ίδια αγώγιμα υλικά, όπως στις δύο μελέτες των Gong et al., η ευαισθησία τους παρουσιάζει σημαντική διαφορά. Ενώ και στους δύο χρησιμοποιήθηκαν νανοσύρματα χρυσού (AuNWs) η αλλαγή στο ελαστομερές που επιλέχθηκε σαν υλικό και στη δομή του οδήγησε σε αύξηση του GF. Ακόμα και σε περιπτώσεις που το αγώγιμο και ελαστικό στρώμα είναι ίδια από άποψη υλικών, η μορφή των υλικών και διαφορετικοί μέθοδοι κατασκευής του αισθητήρα παρουσιάζουν διαφορετικά GF, όπως στην περίπτωση των Lu et al., και Kong et al., όπου για αισθητήρες από CBs-PDMS και στις δύο μελέτες, τα GF είναι 29,1 και 1,8-5,5 αντίστοιχα.

3.2 Ελαστικότητα Αισθητήρα

Διατυπώθηκε προηγουμένως ότι σε συμβατικούς αισθητήρες παραμόρφωσης πολυμερών και νανοσύνθετων υλικών, ο κύριος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η ελαστικότητα είναι η δομή και το είδος του πολυμερούς υλικού καθώς και ο τρόπος

πρόσδεσης του αγώγιμου στρώματος σε αυτό. Τα περισσότερα νανοσύνθετα υλικά παρουσιάζουν χαμηλή ελαστικότητα, με μέγιστη ελαστική παραμόρφωση περίπου κατά 5% (Amjadi et al., 2014; Wujcik et al., 2013). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη χρήση μίας ελαστομερούς μήτρας (matrix), έτσι ώστε οποιαδήποτε τάση που ασκείται στον αισθητήρα λόγω της παραμόρφωσης να απορροφάται από το ελαστομερές.

Οι Lu et al., διακρίνουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τον τρόπο κατασκευή ενός ελαστικού αισθητήρα παραμόρφωσης. Ο πρώτος είναι η ανάμιξη των αγώγιμων υλικών και του ελαστομερούς. Ο δεύτερος είναι η κατασκευή ενός αγώγιμου στρώματος και η επικάλυψή του από το ελαστομερές. Η πρώτη μέθοδος είναι απλή και εφαρμόσιμη σε βιομηχανική κλίμακα, επιτυγχάνοντας ένα ομοιόμορφο σύστημα ανίχνευσης, δημιουργώντας όμως σημαντικά ζητήματα. Για τη γραμμικότητα του σήματος, μία παράμετρος απόδοσης που θα αναλυθεί παρακάτω, το μείγμα αυτό χρειάζεται να είναι ομογενές ως προς τη σύστασή του. Αντιθέτως, οι αισθητήρες που κατασκευάζονται με τη δεύτερη προσέγγιση χαρακτηρίζονται από υψηλή αγωγιμότητα, ειδικά σε μεγάλες καταπονήσεις σε σύγκριση με τη πρώτη. Οι δυσκολίες που εμφανίζονται στη δεύτερη μέθοδο είναι κυρίως: η περίπλοκη διεργασία κατασκευής, οι περιορισμένες κατευθύνσεις κάμψης και εφελκυσμού του αισθητήρα, και η πιθανή κακή προσκόλληση μεταξύ του αγώγιμου και του ελαστομερούς στρώματος, το οποίο επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του αισθητήρα (Lu et al., 2019). Στον πίνακα 3.1 αναφέρεται και η μέγιστη ελαστικότητα μερικών αισθητήρων. Όπως και στην ευαισθησία του αισθητήρα, παρατηρείται ότι η επιλογή των υλικών, ελαστομερών αλλά και αγώγιμων, η αρχική τους δομή αλλά και η μέθοδος κατασκευής μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικές διαφορές στο μέτρο της ελαστικότητας. Παρατηρείται ότι για το ίδιο πολυμερές, λόγω χάριν το PDMS, η ελαστικότητα κυμαίνεται από 2-280% λόγω του διαφορετικού αγώγιμου στρώματος το οποίο έχει διαφορετική συμβατότητα με το συγκεκριμένο ελαστομερές, αλλά και του διαφορετικού τρόπου κατασκευής.

3.3 Γραμμικότητα

Άλλη μία παράμετρος απόδοσης των αισθητήρων παραμόρφωσης είναι η γραμμικότητα. Η γραμμική μεταβολή της αντίστασης με τη μεταβολή της παραμόρφωσης που εφαρμόζεται σε αυτόν καθιστά εύκολη βαθμονόμηση του αισθητήρα. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή τη μη γραμμική εξάρτηση των δύο, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Η γραμμικότητα αποτελεί ένα από τα κύρια προβλήματα των αισθητήρων αντίστασης, έναντι για παράδειγμα των αισθητήρων χωρητικότητας, ειδικά σε μεγάλες καταπονήσεις. Παρακάτω, παρουσιάζεται μία

απεικόνιση γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός αισθητήρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το φαινόμενο που παρατηρείται είναι από μία «ομογενή» (homogeneous) κατάσταση σε μία ανομοιογενή, όπως π.χ. η εμφάνιση μικρορωγμών κατά ισχυρή καταπόνηση. (Amjadi et al., 2014 ; Tadakaluru et al., 2014). Γενικά, παρουσιάζεται ένα ζήτημα μεταξύ ευαισθησίας (GF) και γραμμικότητας-ελαστικότητας του αισθητήρα (Amjadi et al., 2016). Οι αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας παρουσιάζουν χαμηλά ποσοστά μέγιστης ελαστικότητας ως προς το μήκος τους και μη γραμμική εξάρτηση των μεταβολών αντίστασης-παραμόρφωσης. Οι αισθητήρες υψηλής ελαστικότητας παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά, δηλαδή υψηλότερη ελαστικότητα με γραμμική εξάρτηση, αλλά χαμηλό GF. Για το λόγο αυτό, η κατασκευή ενός αισθητήρα με υψηλή ευαισθησία και ελαστικότητα με γραμμική συμπεριφορά αποτελεί ακόμα μία πρόκληση για τον επιστημονικό κλάδο. Στον πίνακα 3.1 αναφέρεται αν παρατηρείται γραμμικότητα κατά τη λήψη μετρήσεων των αισθητήρων.

Υλικά	Μέγιστη Ελαστικότητα %	Ευαισθησία GF	Γραμμικότητα	Παραπομπή
AgNWs-PDMS	70	2-14	Γραμμικό μέχρι 40%	Amjadi et al., 2014
AgNWs-PEDOT:PSS/PU*	100	1,07-12,4	Μη Γραμμικό	Hwang et al., 2015
AuNWs-latex rubber	350	6,9-9,9	Γραμμικό	Gong et al., 2015a
AuNWs-PANI-rubber	150	20,4-61,4	Γραμμικό	Gong et al., 2015b
CBs-Ecoflex	400	3,8	Μη Γραμμικό	Muth et al., 2014
CBs-PDMS	30	29,1	Γραμμικό	Lu et al., 2012
CBs-PDMS	10	1,8-5,5	2 Γραμμικές περιοχές	Kong et al., 2014
CBs-TPE	80	20	Μη Γραμμικό	Mattmann et al., 2008
CNTs-Ecoflex	500	1-2,5	Γραμμικό	Amjadi et al., 2015
Aligned CNTs-PDMS	280	0,82	2 Γραμμικές περιοχές	Yamada et al., 2011

CNTs– PEDOT:PSS/PU*	100	8,7-62,3	Μη γραμμικό	Roh et al., 2015
Graphene foam- PDMS	70	15-29	Γραμμικό	Jeong et al., 2015
Graphene-rubber	800	10-35	Μη Γραμμικό	Boland et al., 2014
rGO-Graphene- PDMS	350	18,5-88.000	Μη Γραμμικό	Ma et al., 2019
Pt-PDMS	2	2.000	Μη Γραμμικό	Kang et al., 2014
ZnONWs– Polysterene	50	114	Γραμμικό	Xiao et al., 2011

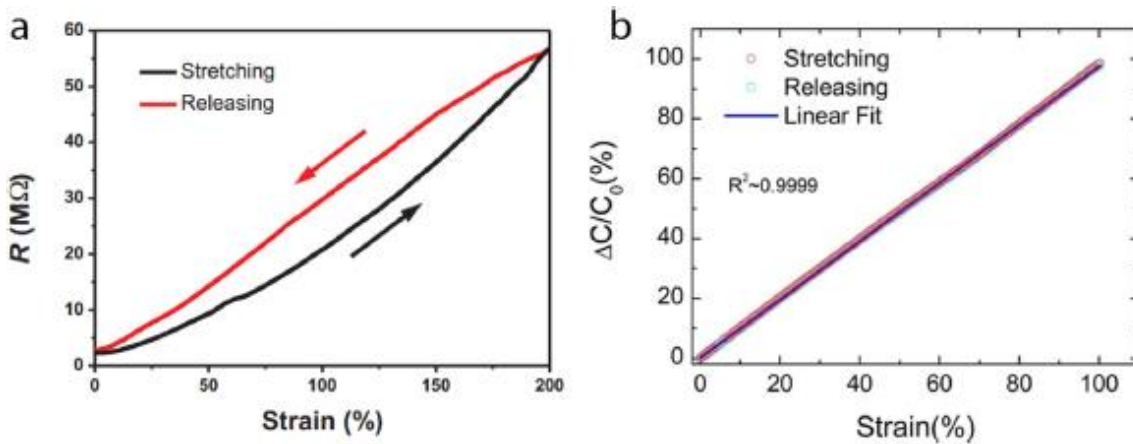
Πίνακας 3.1: Απόδοση αισθητήρων με βάση την ευαισθησία, ελαστικότητα και γραμμικότητά τους (Amjadi 2016)

*PEDOT:PSS/PU= πολυ(3,4-αιθυλενιοδιοξυθιοφένιο) πολυστυρενιοσουλφονικό/ πολυουρεθάνη

3.4 Υστέρηση

Για έναν αισθητήρα αντίστασης, η ικανότητα ανίχνευσης εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στο αγώγιμο δίκτυο εντός αυτού και τη δυνατότητα να επανέρθει στην αρχική του κατάσταση όταν η καταπόνηση μηδενίζεται. Σε αισθητήρες που έχουν να διαχειριστούν δυναμικά φορτία κατά τη λειτουργία τους, όπως οι εφαρμόσιμοι στο ανθρώπινο σώμα που περιλαμβάνουν την κίνηση ενός χεριού, τον παλμό της καρδιάς, εισπνοή και εκπνοή, και άλλων, η υστέρηση αποτελεί μία σημαντική παράμετρο αυτών των αισθητήρων. Υψηλά φαινόμενα υστέρησης μπορούν να οδηγήσουν σε μη αντιστρέψιμη μεταβολή της τιμής της αντίστασης των αισθητήρων αυτών υπό δυναμική καταπόνηση. (Hu et al., 2011 ; Liu et al., 2014) Όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην αντίσταση τη χρονική στιγμή που η καταπόνηση παύει και στην αρχική αντίσταση, το φαινόμενο της υστέρησης γίνεται πιο αντιληπτό. Κύριοι λόγοι για την εμφάνιση υστέρησης είναι η ιξωδοελαστική φύση των πολυμερών και η αλληλεπίδραση μεταξύ νανοσύνθετων υλικών και πολυμερούς. (Amjadi et al., 2014 ; Hu et al., 2011 ; Kong et al., 2014 ; Liu et al., 2014). Όταν η πρόσδεση αγώγιμου στρώματος και ελαστομερούς δεν είναι ισχυρή, τα νανοϋλικά είναι δυνατό να μετακινηθούν σε κενά που δημιουργήθηκαν προσωρινά εντός του ελαστομερούς λόγω υψηλής παραμόρφωσης, τα οποία όταν η καταπόνηση σταματήσει, θα δυσχεράνουν την επαναφορά του αισθητήρα στην αρχική του μορφή (Jeong et al., 2015). Με την αύξηση της συχνότητας της παραμόρφωσης, η καθυστερημένη επαναφορά του αισθητήρα επηρεάζει τις μετρήσεις ολοένα και παραπάνω, οδηγώντας σε αυξημένη υστέρηση. (Gong et al., 2015b)

Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου θα χρησιμοποιηθούν σα μέτρο σύγκρισης των αισθητήρων αντίστασης οι αισθητήρες χωρητικότητας, που το φαινόμενο υστέρησης είναι σε περιπτώσεις δυνατόν και να παραλειφθεί από τους υπολογισμούς. Επειδή οι αισθητήρες χωρητικότητας δεν εξαρτώνται από τις μεταβολές στην αγωγιμότητα του αισθητήρα, αλλά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διηλεκτρικών στρωμάτων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, δε παρουσιάζονται φαινόμενα υστέρησης κατά τη μέτρηση τη χωρητικότητας. (Amjadi et al., 2014 ; Gong et al., 2015b) Παρακάτω παρατίθεται μία διαγραμματική απεικόνιση ανίχνευσης από έναν αισθητήρα αντίστασης και έναν χωρητικότητας (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: a) Διάγραμμα αντίστασης-παραμόρφωσης όπου παρατηρείται υστέρηση κατά τη μεταβολή της αντίστασης. (Gong et al., 2015b) b) Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής χωρητικότητας-παραμόρφωσης όπου τα φαινόμενα υστέρησης θεωρούνται αμελητέα. (Cai et al., 2013)

3.5 Συμπεριφορά *Overshoot*

Η απότομη ελάττωση ή/και διακοπή της άσκησης παραμόρφωσης σε έναν αισθητήρα αντίστασης προκαλεί ένα φαινόμενο *υπέρβασης* (*overshoot*) σε αυτόν. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη χαλάρωση των πολυμερών από στρες, τα οποία τείνουν να απαλυνθούν από αυτό ακαριαία μέσω μηχανικών παραμορφώσεων. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι υπεύθυνες για αλλαγές στην εσωτερική δομή των πολυμερών, όπως την κίνηση μορίων ή τμημάτων αυτών. Μικρές παραμορφώσεις τέτοιου είδους είναι δυνατόν να αλλάξουν τις αποστάσεις μεταξύ τμημάτων των νανοϋλικών στο εσωτερικό του αισθητήρα, μεταβάλλοντας έτσι την αρχική αντίσταση του αισθητήρα παραμόρφωσης. Το φαινόμενο *υπέρβασης* υποστηρίζεται ότι εξαρτάται από την

ιξωδοελαστικότητα των πολυμερών, το GF του αισθητήρα παραμόρφωσης, και τον ρυθμό παραμόρφωσης στον οποίο υποβάλλεται (Amjadi et al., 2016).

3.6 Χρόνος απόκρισης και Χρόνος Επαναφοράς

Ο χρόνος απόκρισης ορίζει με τι ταχύτητα οι αισθητήρες καταλήγουν σε μία σταθερή κατάσταση. Η καθυστέρηση αυτής της ανταπόκρισης παρατηρείται σε όλους τους αισθητήρες που αποτελούνται από πολυμερή, λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης τους. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες αντίστασης AgNWs-PDMS και ZnONWs-Polysterene που αναφέρθηκαν και στον πίνακα 3.1 παραπάνω χαρακτηρίζονται από χρόνους απόκρισης της τάξης των 200 και 140 ms, αντίστοιχα. (Amjadi et al., 2014 ; Xiao et al., 2011) Ο αισθητήρας που αποτελείται από CNTs-Ecoflex, παρουσίασε χρόνο ανταπόκρισης 332 ms. Η μεγαλύτερη αυτή τιμή οφείλεται πιθανόν στην μαλακή μορφή του ελαστομερούς Ecoflex, η οποία δεν παρέχει δύναμη επαναφοράς τόσο μεγάλη όπως το PDMS ή το πολυστυρένιο για να επιδιορθώσει τα δίκτυα διήθησης των CNTs (Amjadi et al., 2015).

Ο χρόνος επαναφοράς είναι άλλη μία παράμετρος απόδοσης για ελαστικούς αισθητήρες που διαχειρίζονται δυναμικά φορτία, άμεσα σχετιζόμενος με τον χρόνο ανταπόκρισης και την υστέρηση. Η γρήγορη επαναφορά του αισθητήρα στην αρχική του μορφή είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων και σφαλμάτων κατά τη λήψη μετρήσεων σε υψηλή συχνότητα, και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τους υπολογισμούς σε περίπτωση που ο χρόνος είναι πολύ μεγάλος. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας από ευθυγραμμισμένα λεπτά φιλμς CNTs με PDMS έχει χρόνο επαναφοράς σημαντικά μικρότερο από έναν αισθητήρα CBS-TPE (τάξης δευτερολέπτων). Ο μεγαλύτερος αυτός χρόνος επαναφοράς είναι αποτέλεσμα της τριβής που δημιουργείται μεταξύ των αγώγιμων και ελαστικών στρωμάτων, η οποία δυσχεραίνει την επαναφορά του δικτύου διήθησης. (Mattman et al., 2008; Yamada et al., 2011)

3.7 Ανθεκτικότητα υπό δυναμικό φορτίο (Dynamic durability)

Η δυναμική ανθεκτικότητα είναι ουσιαστικά η αντοχή ενός αισθητήρα παραμόρφωσης μετά από ένα μακροπρόθεσμο χρονικό διάστημα που υπέστη αρκετούς κύκλους παραμόρφωσης/χαλάρωσης διατηρώντας σταθερή ηλεκτρική λειτουργία και μηχανικές ιδιότητες. Η ανθεκτικότητα είναι σημαντική για αισθητήρες που βρίσκουν εφαρμογή στο ανθρώπινο σώμα καθώς απαιτείται να προσαρμόζονται σε ισχυρές, περίπλοκες και δυναμικές καταπονήσεις. Οι M. Amjadi και H. Lee, σε διαφορετικές μελέτες,

διαπίστωσαν ότι οι κύριοι λόγοι για τη φθορά των αισθητήρων είναι η κόπωση και πλαστική παραμόρφωση των πολυμερών υποστρωμάτων υπό έντονη καταπόνηση και η θραύση και κύρτωση (buckling) των νανοϋλικών ανίχνευσης (Amjadi et al., 2014 ; Lee et al., 2015a).

4. Επιλογή υλικών κατασκευής

Ένας σημαντικός παράγοντας για τις ιδιότητες και κατ' επέκταση, χρήση του αισθητήρα αποτελεί η σωστή επιλογή των υλικών με τα οποία θα κατασκευαστεί. Σήμερα πολλά είδη εφαρμόσιμων στο ανθρώπινο σώμα αισθητήρων αξιοποιούν τον συνδυασμό νανοϋλικών με ελαστικά πολυμερή για την κατασκευή τους. Τα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ηλεκτρικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες, ενώ τα πολυμερή παρέχουν μία υποστήριξη σε αυτά, με κύριες παραμέτρους επιλογής τους την ελαστικότητα, ανθεκτικότητα και ασφάλεια προς το ανθρώπινο σώμα. Το αποτέλεσμα είναι ένας αισθητήρας που διακρίνεται σε 2 βασικά τμήματα, το αγώγιμο και το ελαστικό. Παρακάτω, πραγματοποιείται μία πιο λεπτομερής ανάλυση των κριτηρίων και μερικών υλικών που χρησιμοποιούνται συχνά κατά τη κατασκευή τους.

4.1 Ελαστομερές Υπόστρωμα

Τα ελαστικά στρώματα λειτουργούν σαν υλικά υποστήριξης των αισθητήρων παραμόρφωσης, παρέχοντάς τους μηχανική σταθερότητα και ευελιξία. Θεωρητικά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ελαστομερούς πρέπει να παρουσιάζουν ιδανικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, να είναι αδρανή σε μη θεμιτές χημικές αντιδράσεις, χαμηλού σχετικά κόστους, με εύκολη επεξεργασία και καλή προσκόλληση με τα υπόλοιπα υλικά κατασκευής. Τα πιο συνηθισμένα υλικά για χρήση σαν ελαστομερές περιλαμβάνουν πολυμερή, όπως η πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (PDMS), τα καουτσούκ, και ο αφρός πολυουρεθάνης (PU foam), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVdf), το πολυϊμίδιο (PI), το Ecoflex, το Dragon skin ή και μη πολυμερή υλικά όπως βαμβάκι, χαρτί και ίνες Κέβλαρ (Cai et al., 2013; Chen et al., 2017; Cheng et al., 2017; Frutiger et al., 2015; Hsu et al., 2017; Kaltenbrunner et al., 2013; Lee et al., 2015b; Li et al., 2016; Li et al., 2017; Lim et al., 2016; Park et al., 2016; Ryu et al., 2015; Wu et al., 2016; Zhang et al., 2017; Zhou et al., 2017).

Πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (PDMS)

Από τα υλικά που αναφέρθηκαν, πιο ευρεία χρήση έχει βρει το **PDMS**, λόγω της εύκολης ρύθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων του, της απλής επεξεργασίας του, χημικής αδράνειας, χαμηλού κόστους και της τάσης του να προσδένεται με τα υπόλοιπα λειτουργικά υλικά (Larmagnac et al., 2014). Το μέτρο ελαστικότητας Young (ο λόγος ασκούμενης δύναμης (stress) προς την παραμόρφωση του PDMS) είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό άλλων στρωμάτων (περίπου 0,4-3,5 MPa) (Amjadi et al., 2014; Fuard et al., 2008) όπως του PU (15,1-151,4 MPa για πυκνότητα αφρού από 0,16-0,32 g cm⁻³ αντίστοιχα) (Patel et al., 2008), του PI (84,1 GPa με σημείο θραύσης σε επιμήκυνση κατά 3,25% του αρχικού μήκους (Yang et al., 2018), και του PVdf (0,84 GPa με σημείο θραύσης σε επιμήκυνση κατά 0,86% του αρχικού μήκους) (Zhang et al., 2018). Το χαμηλό μέτρο της σταθεράς Young είναι ενδεικτικό στοιχείο ότι το PDMS προσφέρει καλύτερη ελαστικότητα, και ευελιξία στη χρήση, έναντι των άλλων πολυμερών. Οι Liu et al., (2009) σε μελέτη τους διαπίστωσαν ότι η σταθερά Young του PDMS στρώματος μεταβάλλεται με το πάχος του στρώματος. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μέτρο της σταθεράς Young αυξάνεται με την ελάττωση του πάχους της μεμβράνης. Η πιο λεπτή μεμβράνη (50 μm) παρουσίασε μέτρο Young της τάξης των 1400 kPa, με σημείο θραύσης σε επιμήκυνση κατά 125% του αρχικού μήκους, ενώ η μεγαλύτερη σε πάχος μεμβράνη (1,8mm) είχε μέτρο ελαστικότητας Young περίπου 600 kPa. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας όμως, το πολυμερές που επιλέχθηκε για την κατασκευή των αισθητήρων είναι το PDMS, λόγω του χαμηλού κόστους και εύκολης διαχείρισής του.

Πέραν του PDMS, άλλα πολυμερή με βάση τη σιλικόνη όπως το Ecoflex και το Dragon skin που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται ως ελαστομερή υποστρώματα καθώς παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες μηχανικές ιδιότητες, όπως χαμηλό χρόνο επαναφοράς και μέτρο σταθεράς Young (152 kPa,) (Amjadi et al., 2015; Cheng et al., 2017).

4.2 Αγωγήμο Στρώμα

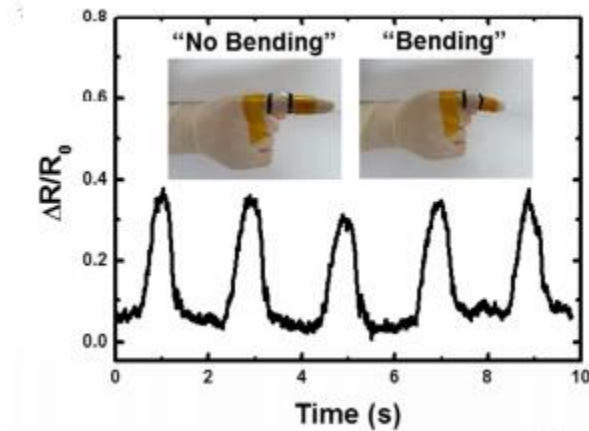
Νανοϋλικά με βάση διαφορετικές μορφές άνθρακα όπως τα Carbon-Blacks (CBs), οι νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotubes, CNTs), το γραφένιο (graphene) και το ανηγμένο οξειδίο του γραφενίου (rGO), παρουσιάζουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και εξαιρετική μηχανική αντοχή. Κατά τη χρήση τους σε αισθητήρες παραμόρφωσης, παρέχουν διαφορετικές ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες στον αισθητήρα ανάλογα με τη μορφή στο χώρο που έχουν λάβει (Lin et al., 2017; Park et al., 2015; Wu et al., 2016; Yang et al., 2017; Zhu et al., 2018).

Το *Carbon Black* ή αλλιώς αιθάλη (CB) αποτελεί παράγωγο της ημιτελούς καύσης πετρελαϊκών προϊόντων όπως λιθανθρακόπισσας ή πίσσας αιθυλενίου (Arnal et al., 2013), του οποίου η πολυκρυσταλλική και υπό στρώσεις δομή το καθιστούν ως ιδανικό υλικό σαν επιλογή αγωγίμου στρώματος με υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επιπρόσθετα, το CB χαρακτηρίζεται από χημική αδράνεια, χαμηλή πυκνότητα και κόστος, τα οποία του παρέχουν τη δυνατότητα για χρήση σαν υλικό στην κατασκευή του ελαστομερούς στρώματος ενός ελαστικού αισθητήρα παραμόρφωσης (Wu et al., 2016; Zhu et al., 2018). Με την προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας σωματιδίων CBs σε ένα πολυμερές (λόγου χάριν PDMS ή σιλικόνη), είναι δυνατή η παρασκευή ενός σύνθετου ελαστικού στρώματος ανθεκτικό σε μεταβολές στην πίεση (Shang et al., 2016).

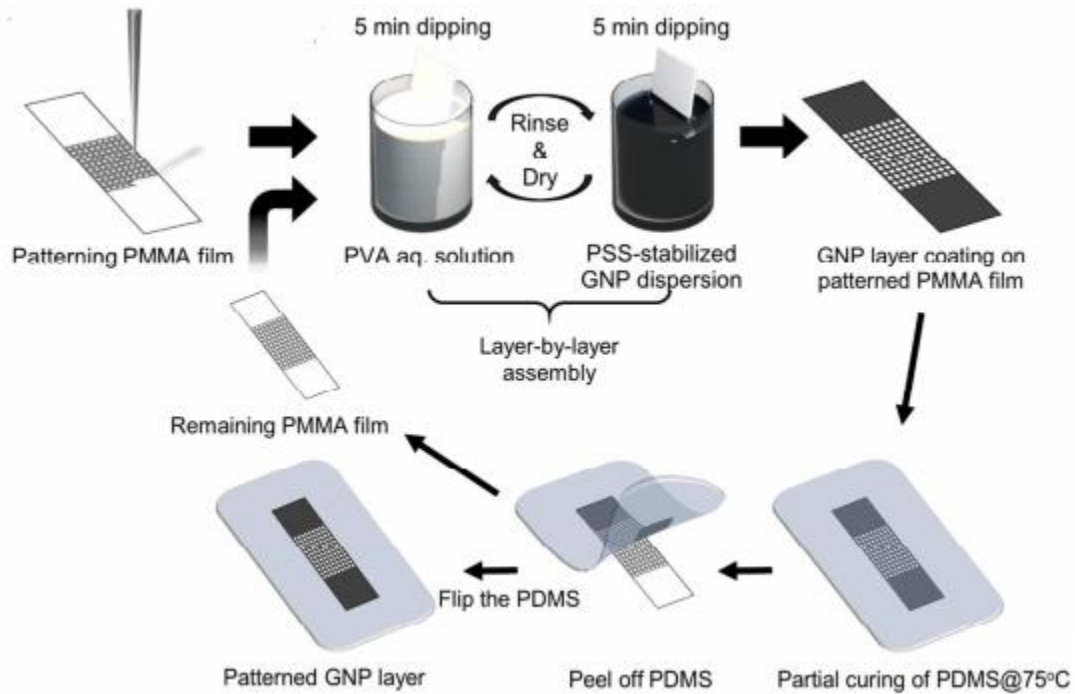
Οι *νανοσωλήνες άνθρακα* ή *CNTs* (Carbon nanotubes) είναι μονοδιάστατα sp^2 τροχιακών υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλό λόγο μήκους/διάμετρου και χαμηλή πυκνότητα. Η αντοχή τους σε ισχυρές τάσεις και η αξιοσημείωτα υψηλή τους αγωγιμότητα είναι ο λόγος για την επιλογή τους σαν κύριο αγωγίμο υλικό σε αισθητήρες παραμόρφωσης. Υβρίδια CNTs με πολυμερή παρουσίασαν επίσης μεγάλη απόδοση ανίχνευσης σε σύγκριση με τα μεμονωμένα υλικά λόγω των βελτιωμένων συνδυαστικών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες αυτών των νανοσύνθετων πολυμερών μπορούν να ρυθμιστούν διαφορετικά ανάλογα με το πάχος των νανοσωλήνων ή την αναλογία μήκους/διατομής, όπως και με την σύσταση των παράγωγων υλικών (Christ et al., 2017; Lin et al., 2017; Wujcik and Monty, 2013).

Το *γραφένιο* (*graphene*) είναι δισδιάστατο υλικό που προκύπτει από επεξεργασία γραφίτη, το οποίο βρίσκει ολοένα και περισσότερη χρήση στην κατασκευή αισθητήρων παραμόρφωσης λόγω των εξαιρετικών μηχανικών, ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων (Lu et al., 2019). Ανάλογα με τη μορφή του γραφενίου που χρησιμοποιείται, ο αισθητήρας παρουσιάζει διαφορετικές τιμές στην ευαισθησία του και στα όρια ανίχνευσης. Για παράδειγμα, οι Chun et al. (2017) σε δική τους έρευνα κατασκεύασαν αισθητήρες με βάση μονοστρωματικό γραφένιο (SingleLayer Graphene ή SLG) και «νιφάδες» (flakes) γραφενίου σε υπόστρωμα PDMS, το οποίο μπορεί να ανιχνεύσει πολύ μικρές καταπονήσεις (κοντά στο 0,1%) με μικρές αλλαγές στην αντίσταση. Οι Lee et al. (2017) δημιούργησαν αισθητήρες γραφενίου με δομή πλέγματος (grid pattern) με PDMS σαν ελαστομερές, με την ιδιαιτερότητα ότι η προσθήκη των υλικών έγινε ανά διαφορετικά στρώματα (layer by layer). Αυτή η μέθοδος προσέφερε ακριβή έλεγχο του πάχους των στρωμάτων σε μοριακό επίπεδο, το οποίο κατά συνέπεια διευκόλυνε τη ρύθμιση ενός αισθητήρα με ορισμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα και ευαισθησία. Οι Tao et al. (2017) προσέγγισαν την ανάγκη των αισθητήρων που έχουν εφαρμογή στο ανθρώπινο σώμα για μεγάλη ευαισθησία και ελαστικότητα με έναν διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, μέσω της τροποποίησης της δομής του αισθητήρα με laser (one step direct laser

patterning method) κατάφεραν να κατασκευάσουν έναν αισθητήρα από γραφένιο και Ecoflex με πολύ υψηλή ευαισθησία για μεγάλες καταπονήσεις, με GF 457 για 35% καταπόνηση και 268 για 100% αντίστοιχα, παρουσιάζοντας εξαιρετική επαναληψιμότητα.

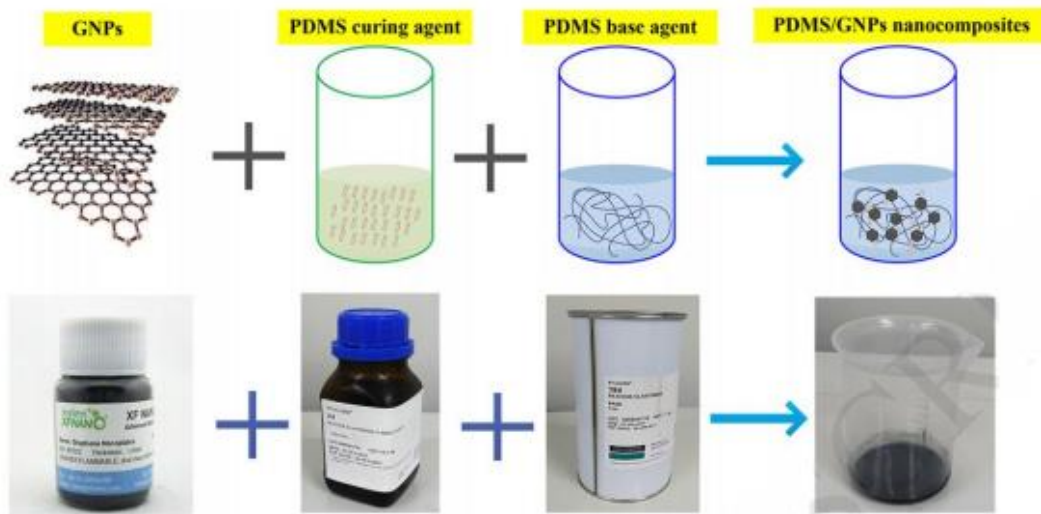


Εικόνα 4.1: Απεικόνιση SLG αισθητήρα για την καταγραφή κίνησης δαχτύλου και διάγραμμα σχετικής μεταβολής αντίστασης (Chun et al.,2017)



Εικόνα 4.2: Κατασκευαστική μέθοδος ενός στρώματος GNPs με δομή πλέγματος για χρήση σε αισθητήρα παραμόρφωσης (Lee et al., 2017)

Σημαντική είναι η διάκριση των *νανοπεταλίων γραφενίου* (*Graphene Nanoplatelets* ή **GNPs**), καθώς αυτή η απλή σε δομή μορφή του το καθιστά εύκολο στην επεξεργασία του κατά τη σύνθεση ενός αισθητήρα, σε σύγκριση π.χ. με τα φύλλα γραφενίου (Niu et al., 2018). Οι Niu et al. (2018) σε μελέτη τους κατασκευάζουν έναν αισθητήρα από νανοσύνθετο GNPs/PDMS ο οποίος είναι εύκολος στην κατασκευή, με εύκολη προσαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα και GF μέχρι 140, ανάλογα με τη συγκέντρωση των GNPs. Στην παρούσα εργασία γίνεται η χρήση εμπορικών GNPs για την κατασκευή του αγωγίμου στρώματος των αισθητήρων..



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής ανάμιξης GNPs και PDMS (Niu et al., 2018)

Εκτός του γραφενίου, το **οξείδιο του γραφενίου** (graphene oxide ή **GO**) και το **ανηγμένο οξείδιο του γραφενίου** (*reduced graphene oxide* ή **rGO**) έχουν γίνει η επιλογή πολλών ερευνητών ως τα κύρια υλικά κατασκευής της αγωγίμης μήτρας, είτε αυτούσια ή με τη προσθήκη κάποιου άλλου υλικού. Οι Ma et al. (2019) κατάφεραν μέσω 3D-printing να δημιουργήσουν ένα αγωγίμο σύνθετο πολυμερές υπό την μορφή πλεγμάτων (open-meshes) από PDMS και φύλλα rGO. Ο αισθητήρας που προέκυψε παρουσίασε υψηλό εύρος ευαισθησίας (GF από 18,5-88.443) για παραμόρφωση από 0-350% του αρχικού του μήκους, με ικανότητα παρακολούθησης πολλών διαφορετικών κινήσεων στο ανθρώπινο σώμα όπως αμυδρούς καρδιακούς παλμούς, αναπνοή και κίνηση χεριών. Ένα από τα πλεονεκτήματα του rGO που εκμεταλλεύονται ερευνητές είναι η βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του με την προσθήκη (decorating) διαφόρων μετάλλων, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τη δομή του αγωγίμου στρώματος. Οι Zhao et al. (2019) εξέτασαν τη διαφορά μεταξύ της παρουσίας και απουσίας νανοσωματιδίων αργύρου (Ag) σε έναν αισθητήρα από φύλλα rGO και PDMS υπό τη μορφή σπόγγων (sponges).

Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν μία αύξηση της ευαισθησίας σε πίεση κατά περίπου είκοσι δύο φορές (maximum pressure sensitivity w/o Ag=0,40 kPa⁻¹, with Ag=8,86 kPa⁻¹), με μείωση της αντίστασης επαφής, καλή επαναληψιμότητα και μη αξιοσημείωτα φαινόμενα υστέρησης κατά την παραμόρφωση και χαλάρωση του αισθητήρα.

Νανοπετάλια Γραφενίου (GNPs)

Από το 2004 που πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά η μηχανική αποφλοίωση του γραφίτη, και έγινε η παραλαβή ενός αέριου στρώματος γραφενίου (single layer sheet), έχει παρατηρηθεί σημαντική πρόοδος στην ανάλυση των ιδιοτήτων του και στις πιθανές χρήσεις του. Οι ιδιότητες αυτές οφείλονται κυρίως στο εξαγωνικό σαν κηρήθρα σχήμα των κρυσταλλικών δομών του και στα sp² τροχιακά στη δομή του. Ένας ακόμα παράγοντας που θεωρείται ότι ωφέλησε το ενδιαφέρον για τη μελέτη του γραφενίου είναι οι δυσκολίες που αντιμετώπιζαν άλλες μορφές άνθρακα όπως οι νανοσωλήνες (Carbon Nanotubes, CNTs) σε θέματα ρύθμισης και ελέγχου επιθυμητών ιδιοτήτων σε συνδυασμό με την κατασκευή τέτοιων συστημάτων. Τα νανοπετάλια γραφενίου (Graphene Nanoplatelets, GNPs) αποτελούνται από μικρές στοιβάδες από στρώματα (layers) γραφενίου, με πάχος που κυμαίνεται από ένα μέχρι εκατοντάδες νανόμετρα και μήκος από εκατοντάδες νανόμετρα μέχρι και μικρόμετρα. Αυτό τα καθιστά ικανά για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν συνδυασμό μικρο- και νανοεγκλεισμάτων (fillers) άνθρακα. Η δισδιάστατη δομή τους δίνει τη δυνατότητα να λάβουν δράση σαν νανοεγκλείσματα με υψηλό λόγο διατομής (high aspect ratio, ή ο λόγος μήκους), που εκτιμάται κοντά στα μικρόμετρα, προς πάχος της πλάκας, που δε ξεπερνά τα δεκάδες νανόμετρα). Παράλληλα, καθώς η επιφάνεια της πλάκας κυμαίνεται από δεκάδες μέχρι εκατοντάδες μικρόμετρα, τα GNPs έχουν δυνατότητα να πληρώσουν τα εγκλείσματα που είναι υπεύθυνα για την αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού (Aliofkhaazraei et al., 2016). Αποτελούν τέλος οικονομική επιλογή για διατάξεις χαμηλού κόστους, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

5. Κατασκευή αισθητήρων - Μεθοδολογία

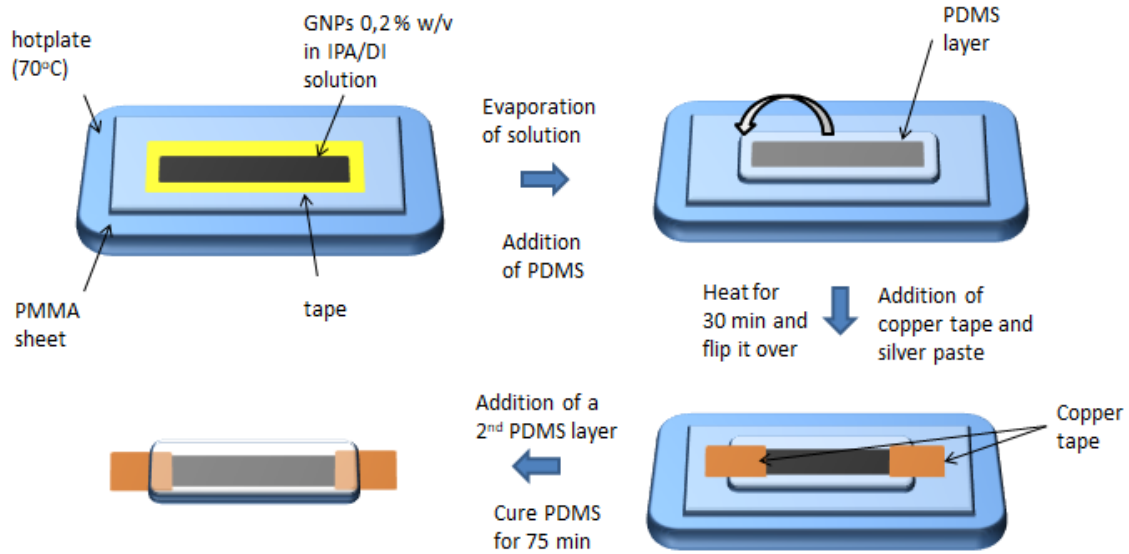
Η κατασκευαστική μέθοδος του αισθητήρα αντίστασης που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Η παρασκευή του **PDMS**, το οποίο θα λειτουργήσει σαν το **ελαστομερές υπόστρωμα** του αισθητήρα. Συγκεκριμένα:
 - a) Προσθήκη βάσης και curing agent σε μία φιάλη σε αναλογία 10:1.
 - b) Συνεχής ανάμειξη των δύο για 5 λεπτά.

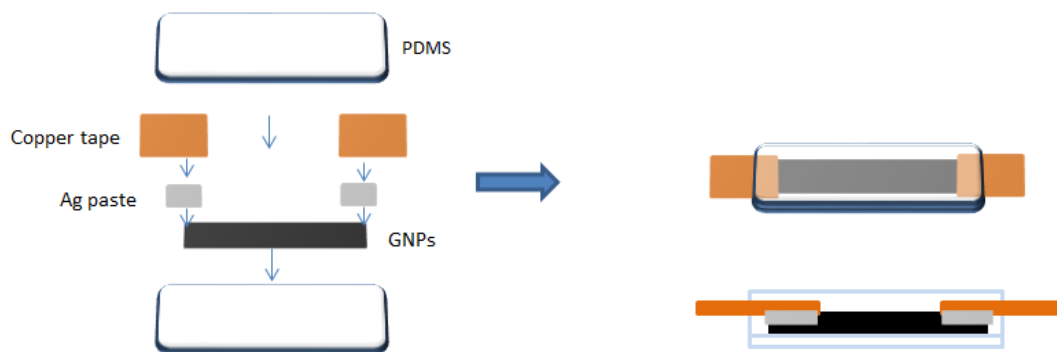
- c) Το μίγμα έπειτα τοποθετείται για απαέρωση (degassing) υπό κενό για περίπου μία ώρα (για ποσότητες μεγαλύτερες των 15 mL που υπάρχει πιθανότητα παρουσίας φυσαλίδων στο μίγμα μετά την απαέρωση, το μίγμα παραμένει υπό κενό για περισσότερο χρόνο).
- d) Το curing (σκλήρυνση) του PDMS πραγματοποιείται παράλληλα με τα υπόλοιπα βήματα κατασκευής του αισθητήρα.
2. Τα **GNPs**, τα οποία θα λειτουργήσουν σαν το **αγώγιμο στρώμα** του αισθητήρα τοποθετούνται σε διάλυμα 10 mL απεσταγμένου απαερωμένου (Berpete et al., 2016) νερού-ισοπροπανόλης (DI:IPA) αναλογίας 7:3 κατ' όγκο (0,2 %w/v GNPs).
 3. Το παραπάνω αιώρημα τίθεται σε υπέρηχους για μία ώρα για τη βελτίωση της κατανομής των GNPs σε αυτό.
 4. Σε μία πλάκα θέρμανσης τοποθετείται ένα φύλλο πολυμεθακρυλικού μεθυλίου (ή Plexiglas ή PMMA) πάχους 2mm, πάνω στο οποίο θα γίνει η υλοποίηση (ανάπτυξη) του αισθητήρα.
 5. Με ταινία karton (karton tape) οριοθετούνται πάνω στο φύλλο PMMA οι διαστάσεις του αισθητήρα που θα κατασκευαστεί. Το σχήμα που φτιάχνεται είναι ορθογώνιο, στα άκρα του οποίου θα γίνει η τοποθέτηση των επαφών του αισθητήρα για σύνδεση με κάποιο όργανο μέτρησης.
 6. Εντός του πλαισίου που κατασκευάστηκε στο προηγούμενο βήμα γίνεται στάξιμο (droppcasting) των GNPs.
 7. Η πλάκα ρυθμίζεται στους 70°C και παραμένει για το υπόλοιπο της διεργασίας.
 8. Παρατηρείται η κατανομή των GNPs στο πλαίσιο και συμπληρώνεται με παραπάνω ποσότητα όπου θεωρείται ότι υπάρχει κενό στη δομή του.
 9. Όταν παρατηρηθεί πλήρης εξάτμιση του διαλύτη (διάστημα περίπου 10 λεπτών), η ταινία που χρησιμοποιήθηκε στο φύλλο PMMA για την οριοθέτηση των GNPs αφαιρείται.
 10. Πάνω από τα GNPs γίνεται στάξιμο (droppcasting) του PDMS μέχρι πλήρους επικάλυψης των GNPs. Τα GNPs με το PDMS θερμαίνονται για διάστημα 30 λεπτών. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα έχει εκτιμηθεί πως το PDMS έχει γίνει cured αρκετά για να μπορεί να μετακινηθεί χωρίς να δημιουργηθεί κάποια βλάβη στη δομή του.
 11. Έπειτα ο αισθητήρας αποκολλάται από το φύλλο PMMA και τοποθετείται ανάποδα σε αυτό, δηλαδή με τη πλευρά των GNPs να μην είναι σε άμεση επαφή με το PMMA (επειδή στο φύλλο PMMA μετά την αποκόλληση παρατηρούνται υπολείμματα των GNPs που δεν αποκολλήθηκαν, ο αισθητήρας είτε τοποθετείται σε διαφορετικό φύλλο PMMA ή καθαρίζεται το PMMA με χρήση ισοπροπανόλης).
 12. Στα άκρα των GNPs γίνεται προσθήκη αργύρου υπό μορφή πάστας (silver paste ή Ag paste).
 13. Πάνω από το σημείο που έγινε η προσθήκη αργύρου τοποθετούνται δύο τμήματα ταινίας χαλκού, των οποίων τα άκρα εξέχουν από το PDMS. Το paste Ag που προστέθηκε στο προηγούμενο βήμα λειτουργεί σαν μέσο βελτίωσης της επαφής των GNPs και της ταινίας χαλκού.

14. Πάνω από τον αισθητήρα τοποθετείται άλλη μία στρώση PDMS, η οποία ουσιαστικά θα «σφραγίσει» τα GNPs εντός του αισθητήρα. Ο αισθητήρας έπειτα παραμένει υπό θέρμανση για άλλα 75 min. Αφήνεται έπειτα σε ηρεμία για μία μέρα.

Παρακάτω έχει γίνει μία σχηματική απεικόνιση της διεργασίας για την ευκολότερη κατανόησή της.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση κατασκευαστικής μεθόδου του αισθητήρα αντίστασης με GNPs-PDMS



Εικόνα 5.2: Cross-section του αισθητήρα αντίστασης GNPs-PDMS

Πληροφορίες σχετικά με τους αισθητήρες

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη της κατασκευαστικής μεθόδου ενός αισθητήρα αντίστασης με σκοπό την εύρεση και τη βελτίωση της τελικής διεργασίας. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν αισθητήρες οι οποίοι διέφεραν ως προς τα βήματα που αναφέρονται παραπάνω και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους.

Οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν διακρίνονται ως εξής:

- Ο **test1** ο οποίος αποτελεί μία πρώτη δοκιμή με τη μέθοδο κατασκευής για να γίνει έλεγχος τυχών προβλημάτων με αυτή ή με τη μέθοδο χαρακτηρισμού, η οποία αναλύεται παρακάτω.
- Το **batch 1** (b1) που αποτελείται από 8 διαφορετικούς αισθητήρες (samples) (b1s1,b1s2,...,b1s8) κατασκευασμένοι με PDMS με αναλογία βάσης-curing agent 30:1. Να σημειωθεί ότι στους περισσότερους αισθητήρες του batch 1 (b1s1-s6), αλλά και τον test1 δεν υπάρχει paste αργύρου στις επαφές τους, καθώς το βήμα αυτό εξετάστηκε πρώτη φορά σε αυτό το batch (b1s7, b1s8) και συνέχισε έπειτα στους υπόλοιπους αισθητήρες.
- Το **batch 2** (b2) που αποτελείται από 3 groups (b2g1,b2g2,b2g3) των 3 αισθητήρων αντίστοιχα (sample 1,2,3 άρα αντίστοιχα οι αισθητήρες ονομάζονται: b2g1s1,b2g1s2,...,b2g3s3), οι οποίοι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:
 - i. Τα samples 1 κατασκευάστηκαν με τα GNPs σε διάλυμα 10 mL απεσταγμένου νερού-ισοπροπανόλης, όπως αναφέρεται στη μεθοδολογία.
 - ii. Τα samples 2 κατασκευάστηκαν με τα GNPs σε διάλυμα 10mL αιθανόλης-ισοπροπανόλης αναλογίας 1:1.
 - iii. Τα samples 3 κατασκευάστηκαν με τα GNPs σε διάλυμα 10mL ισοπροπανόλης.
 - iv. Το group 1 και 3 ακολούθησε τη μέθοδο κατασκευής όπως αναγράφεται παραπάνω
 - v. Οι αισθητήρες του group 2 κατασκευάστηκαν με spin coating των GNPs και της μίας στρώσης του PDMS με σκοπό την καλύτερη κατανομή τους. Ο λόγος που δεν έγινε spin coating και της 2^{ης} πλευράς του PDMS ήταν η δυσκολία διαχείρισης του αισθητήρα χωρίς να φθαρθεί, καθώς το 1ο στρώμα που δέχθηκε spin coating ήταν πολύ λεπτό.
- Το **batch 3** (b3) που αποτελείται από 5 αισθητήρες (b3s1,...,b3s5), όπου εξετάστηκε η θέρμανση των αισθητήρων σε κλίβανο για πιο ομοιόμορφο curing του PDMS. Δύο από τους αισθητήρες κατασκευάστηκαν σε φύλλο PMMA πάχους 1mm.

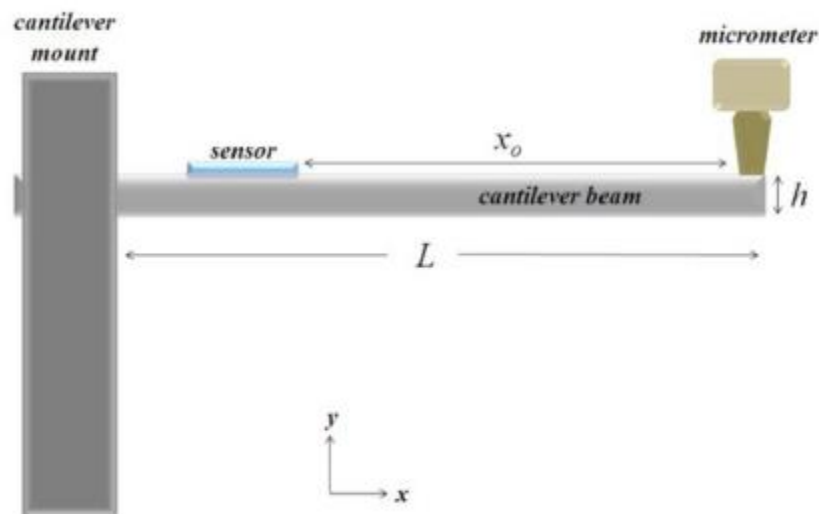
Ακολουθεί ο χαρακτηρισμός των αισθητήρων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

6. Χαρακτηρισμός αισθητήρων για μικρή παραμόρφωση

6.1 Πειραματική διαδικασία

Ο χαρακτηρισμός των αισθητήρων πραγματοποιείται σε μια διάταξη με δοκό (cantilever). Η διάταξη αυτή έχει ως εξής:

Μία επίπεδη ράβδος (δοκός) στηρίζεται με τη βοήθεια μίας βάσης παράλληλα στο έδαφος. Σε μία ορισμένη απόσταση από το σημείο στήριξης της ράβδου, υπάρχει ένα κυλινδρικό μικρόμετρο, το οποίο εκτελεί κίνηση κάθετη στην επίπεδη ράβδο, μετακινώντας της. Πάνω σε ένα σημείο μεταξύ του σημείου στήριξης της επίπεδης ράβδου και το σημείο καταπόνησης από το μικρόμετρο, τοποθετείται ο αισθητήρας. Το σημείο αυτό επιλέγεται να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σταθερό σημείο στήριξης όπου παρατηρείται η μέγιστη καταπόνηση της ράβδου. Όσο περισσότερο το κυλινδρικό μικρόμετρο πιέζει τη ράβδο, αυτή κατεβαίνει και η παραμόρφωσή της και κατά συνέπεια του αισθητήρα, αυξάνεται. Αντίθετα, κατά την επαναφορά της ο αισθητήρας επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Στο σημείο που δεν παρατηρείται επαφή της ράβδου με το μικρόμετρο, θεωρείται πως η παραμόρφωση είναι μηδενική. Ακολουθεί μία σχηματική απεικόνιση της διάταξης:



Εικόνα 6.1: Σχηματική απεικόνιση της δοκού «cantilever»
(Tsouti et al., 2016)

Η παραμόρφωση του αισθητήρα προκύπτει από τη σχέση:

$$\varepsilon(x) = \frac{3hx_0}{2L^3} y$$

όπου, h το πάχος της επίπεδης ράβδου, x_0 η απόσταση του αισθητήρα από το σημείο που κάμπτεται η ράβδος, L η απόσταση του σημείου στήριξης της ράβδου από το σημείο κάμψης της, και y η κάθετη μετατόπιση της κυλινδρικής ράβδου. (Tsouti et al., 2016)

Η ευαισθησία του αισθητήρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon(x)}$$

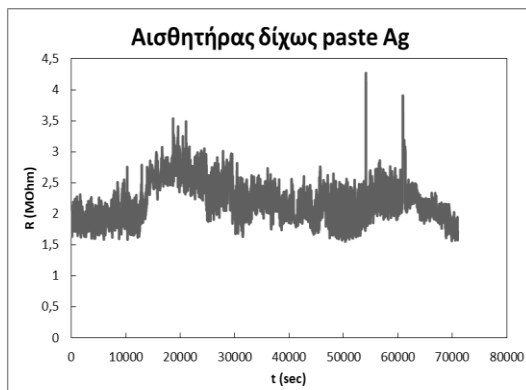
όπου $\varepsilon(x)$ η παραμόρφωσή του και $\frac{\Delta R}{R}$ η σχετική μεταβολή της αντίστασης για την αντίστοιχη παραμόρφωση.

Για κάθε αισθητήρα απεικονίζονται 3 βασικά διαγράμματα: αντίστασης – παραμόρφωσης (R-strain), σχετικής μεταβολής της αντίστασης παραμόρφωσης ($\frac{\Delta R}{R}$ -strain) και ευαισθησίας παραμόρφωσης (GF-strain) και σε μερικές περιπτώσεις ένα 4^ο διάγραμμα αντίστασης-χρόνου (R-t) του οποίου οι μετρήσεις καταγράφονται από υπολογιστή. Οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά 1mm κάθετης καταπόνησης, μέχρι ένα μέγιστο. Έπειτα, πραγματοποιείται χαλάρωση της παραμόρφωσης ανά 1mm κάθετης καταπόνησης, μέχρις ότου το μικρόμετρο να μην βρίσκεται σε επαφή με την δοκό, δημιουργώντας έτσι έναν «κύκλο» μετρήσεων (η καμπύλη όπου η παραμόρφωση **αυξάνεται** θα συμβολίζεται με «**A**», ενώ η καμπύλη όπου η παραμόρφωση **μειώνεται** με «**M**». Από τα διαγράμματα αυτά αντλούνται πληροφορίες σχετικά με διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη του αισθητήρα (π.χ. υστέρηση, γραμμικότητα) και κατά συνέπεια για την μέθοδο κατασκευής του.

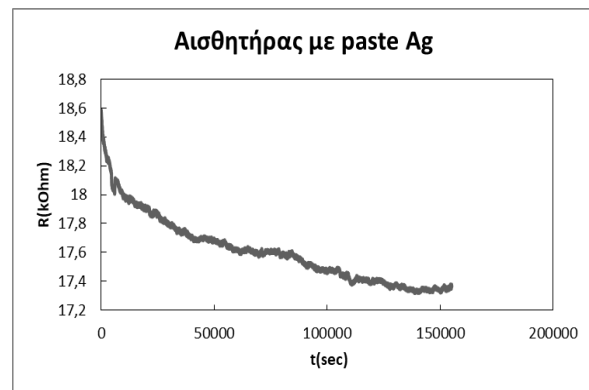
Σημείωση 1: Πριν τις μετρήσεις κάθε αισθητήρα πραγματοποιήθηκε εφελκυσμός τους κατά 20%, για δέκα φορές, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι αφού πραγματοποιηθούν τέτοιες δυναμικές παραμορφώσεις του, η κατανομή των GNPs εντός του αισθητήρα σταθεροποιείται.

Σημείωση 2: Στους συνοπτικούς πίνακες αποτελεσμάτων κατά τη σύγκριση των αισθητήρων που μετρήθηκαν στη διάταξη της δοκού, τα δεδομένα που αναγράφονται αφορούν παραμόρφωση **0,2%** του μήκους του αισθητήρα. Σε μερικές περιπτώσεις (κυρίως κατά τις μετρήσεις του batch 2) το παραπάνω δεν είναι ακριβές, καθώς χρησιμοποιήθηκε ράβδος πιο λεπτού πάχους από τις άλλες περιπτώσεις, με αποτέλεσμα η μέγιστη παραμόρφωση που έφτασαν οι αισθητήρες να είναι λίγο χαμηλότερη του 0,2% (μεταξύ 0,18-0,2%). Επειδή η διαφορά αυτή είναι αρκετά μικρή και παράλληλα για διευκόλυνση στην ανάλυση των δεδομένων, με το 0,2% από εδώ και στο εξής θα εννοείται παραμόρφωση 0,18-0,22%.

Σημείωση 3: Στους αισθητήρες με paste Ag παρατηρήθηκε μία σταθερή μείωση της αντίστασης με τον χρόνο (**drift**) σε ηρεμία του κάθε αισθητήρα, η οποία σε κάποιες περιπτώσεις επηρέαζε αρνητικά τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα, υπήρχαν περιπτώσεις που το $\Delta R/R_0$ και κατ' επέκταση το GF είχαν αρνητική τιμή, καθώς η αντίσταση κατά την χαλάρωση του αισθητήρα, προέκυπτε μικρότερη της αρχικής αντίστασης του αισθητήρα. Για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, στις μετρήσεις κατά την χαλάρωση των αισθητήρων με paste Ag θεωρήθηκε ως R_0 η τελική τιμή της αντίστασης του αισθητήρα, δηλαδή η τιμή κατά την επαναφορά του αισθητήρα σε μηδενική παραμόρφωση. Ακολουθούν τα διαγράμματα αντίστασης και χρόνου δύο αισθητήρων, ενός με paste Ag στις επαφές του και ενός χωρίς, για την απεικόνιση του προβλήματος:



Διάγραμμα 6.1a: R-t ενός αισθητήρα χωρίς paste αργύρου στις επαφές του (b1s1)



Διάγραμμα 6.1b: R-t ενός αισθητήρα με paste αργύρου στις επαφές του (b3g3s3)

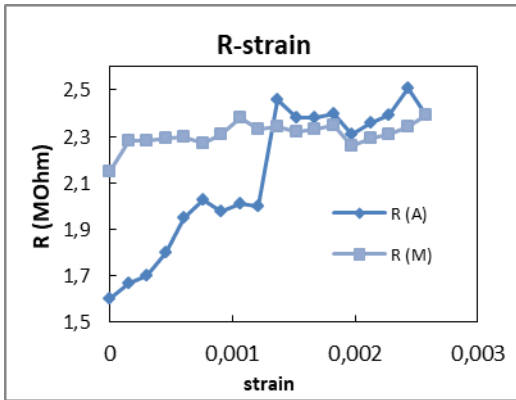
6.2 Αποτελέσματα ανά αισθητήρα

test1:

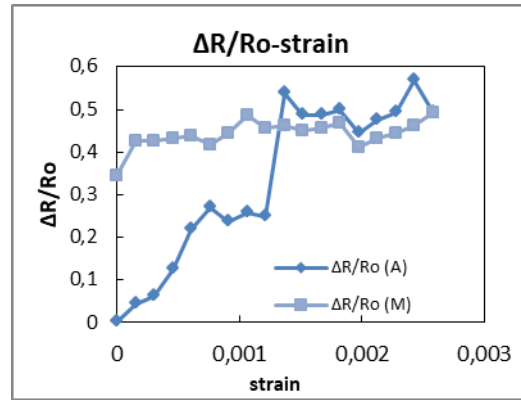
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό (IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,2 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu

Αποτελέσματα για διαφορετικούς κύκλους παραμόρφωσης:

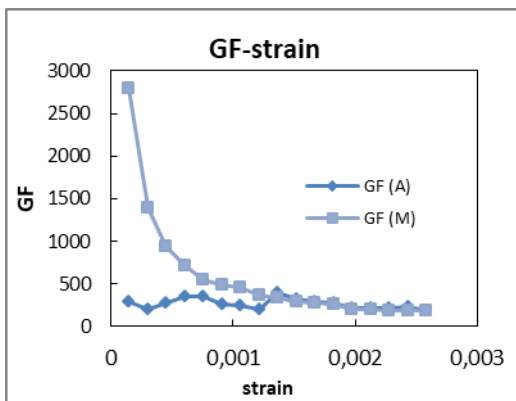
1^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



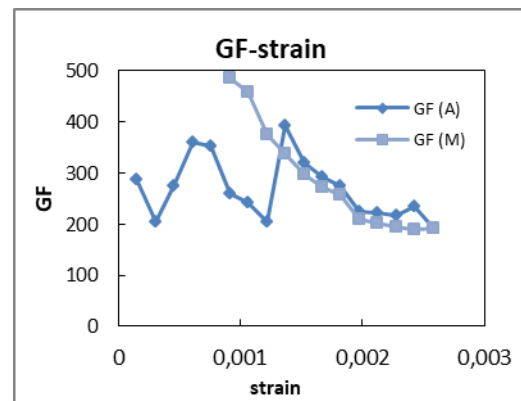
Διάγραμμα 6.2a: R-strain για τον test1 (1^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.2b: ΔR/Ro-strain για τον test1 (1^{ος} κύκλος)



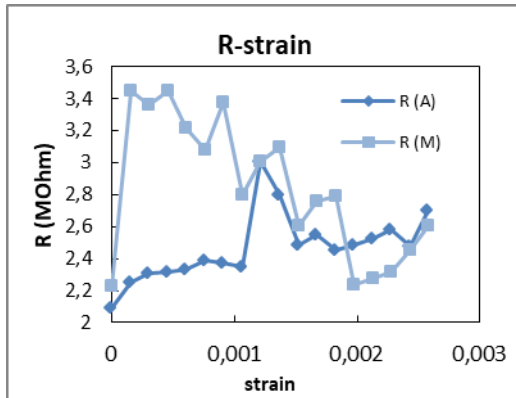
Διάγραμμα 6.2c: GF-strain για τον test1 (1^{ος} κύκλος)



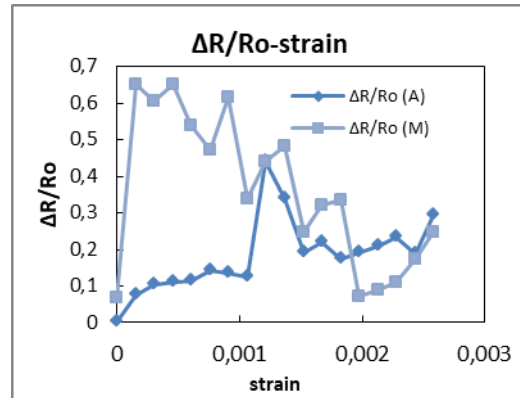
Διάγραμμα 6.2d: GF-strain για τον test1 (1^{ος} κύκλος)

Παρατήρηση πρώτου κύκλου: Η ράβδος στήριξης του αισθητήρα παρουσίασε αισθητή ταλάντωση για μικρά αλλά αντιληπτά χρονικά διαστήματα κατά την καταπόνηση. Λόγω αυτής της ταλάντωσης πιθανόν οφείλεται η κακή επαναφορά της αντίστασης στην αρχική της τιμή.

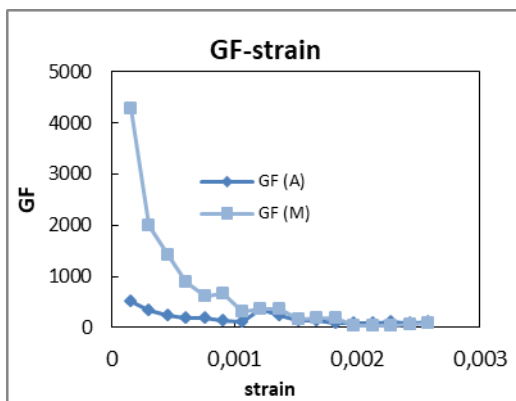
2^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



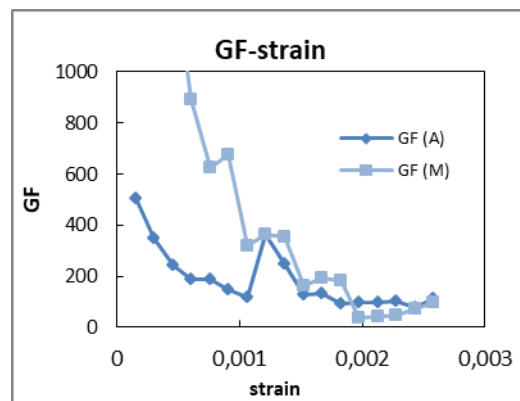
Διάγραμμα 6.3a: R-strain για τον test1 (2^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.3b: ΔR/Ro-strain για τον test1 (2^{ος} κύκλος)



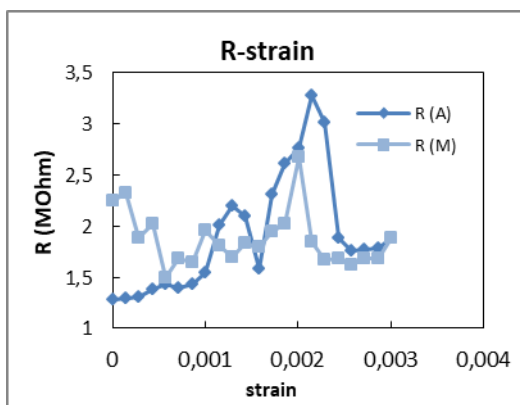
Διάγραμμα 6.3c: GF-strain για τον test1 (2^{ος} κύκλος)



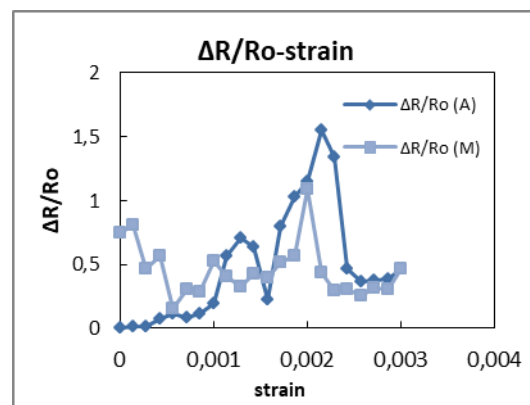
Διάγραμμα 6.3.d: GF-strain για τον test1 (2^{ος} κύκλος)

Παρατηρήσεις πρώτου και δεύτερου κύκλου: Ο δεύτερος κύκλος πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά το τέλος του πρώτου, υπό τις ίδιες συνθήκες για τη ράβδο στήριξης και την απόσταση του αισθητήρα από το σημείο καταπόνησης. Παρόλα αυτά, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά του, ειδικά ως προς τη μεταβολή της αντίστασης και του λόγου της. Η μεταβολή του GF ενώ δείχνει σε πρώτη όψη παρόμοια συμπεριφορά, έχει σημαντική απόκλιση ως προς το μέτρο της: 200 για τον πρώτο κύκλο και 100 για τον δεύτερο σε παραμόρφωση περίπου 0,2%. Για το μεγαλύτερο ποσοστό των σημείων που λήφθηκαν οι μετρήσεις, το GF είναι μεγαλύτερο στον πρώτο κύκλο για κάθε αντίστοιχη παραμόρφωση (κοντά στο 300 ο 1^{ος} και περίπου 150 ο δεύτερος). Για μικρές παραμορφώσεις κατά την επαναφορά του αισθητήρα παρατηρείται υστέρηση λόγω της οποίας παρατηρείται μεγάλη αύξηση στο GF. Το φαινόμενο αυτό που εμφανίζεται και σε επόμενα γραφήματα οφείλεται στην υστέρηση του αισθητήρα καθώς δεν επανέρχεται στην αρχική αντίσταση αλλά σε αρκετά μεγαλύτερη. Επομένως οι πιο αξιόπιστες τιμές για το GF είναι αυτές στην αρχή του κύκλου (όταν αυξάνεται η παραμόρφωση) που δεν επιδρά η υστέρηση.

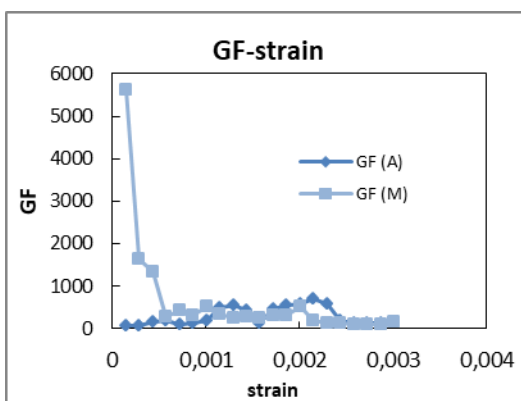
3^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



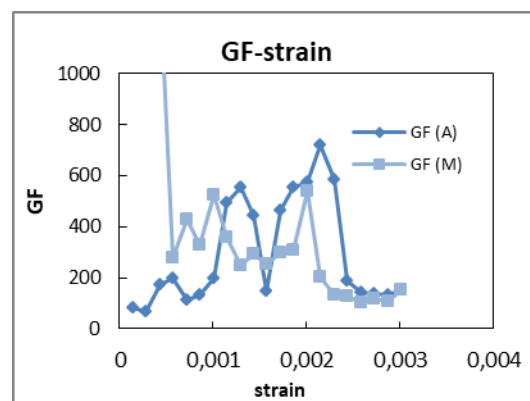
Διάγραμμα 6.4a: R-strain για τον test1 (3^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.4b: ΔR/Ro-strain για τον test1 (3^{ος} κύκλος)



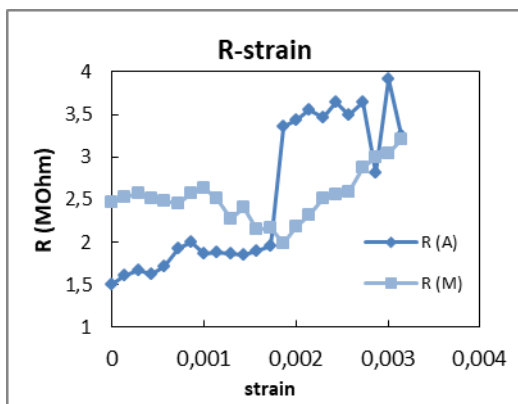
Διάγραμμα 6.4c: GF-strain για τον test1 (3^{ος} κύκλος)



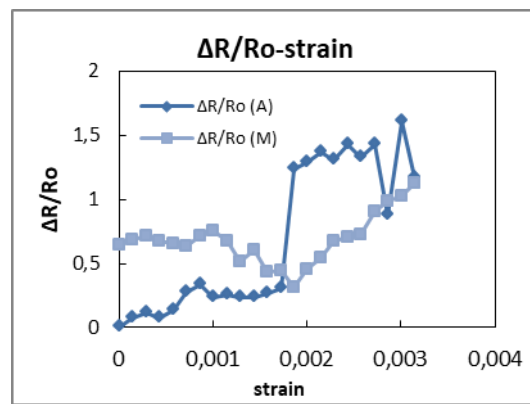
Διάγραμμα 6.4d: GF-strain για τον test1 (3^{ος} κύκλος)

Παρατήρηση τρίτου κύκλου: Μεγαλύτερη απόκλιση τελικής-αρχικής αντίστασης για μηδενική παραμόρφωση σε σύγκριση με τους προηγούμενους δύο κύκλους (0,965 MΩm στον 3^ο, 0,14 στον 2^ο, και 0,55 στον 1^ο αντίστοιχα), κατά συνέπεια και πιο μεγάλη διαφορά GF κοντά στο μηδέν.

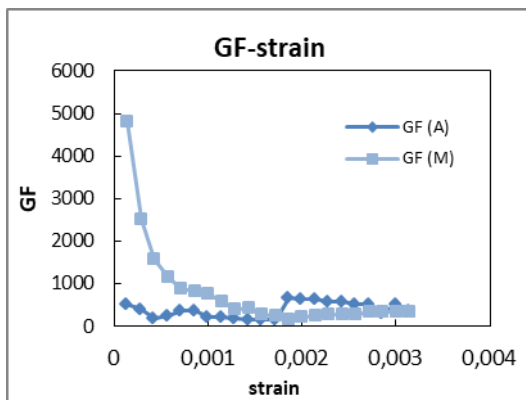
4^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



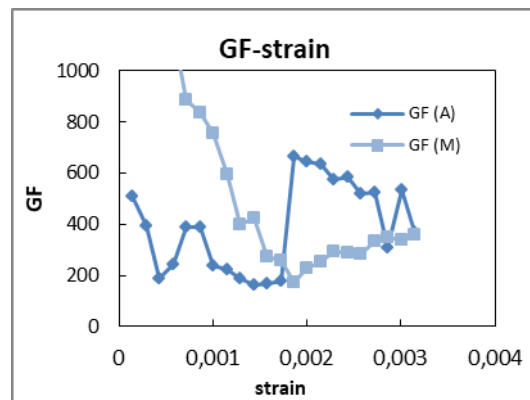
Διάγραμμα 6.5a: R-strain για τον test1 (4^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.5b: ΔR/Ro-strain για τον test1 (4^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.5c: GF-strain για τον test1 (4^{ος} κύκλος)



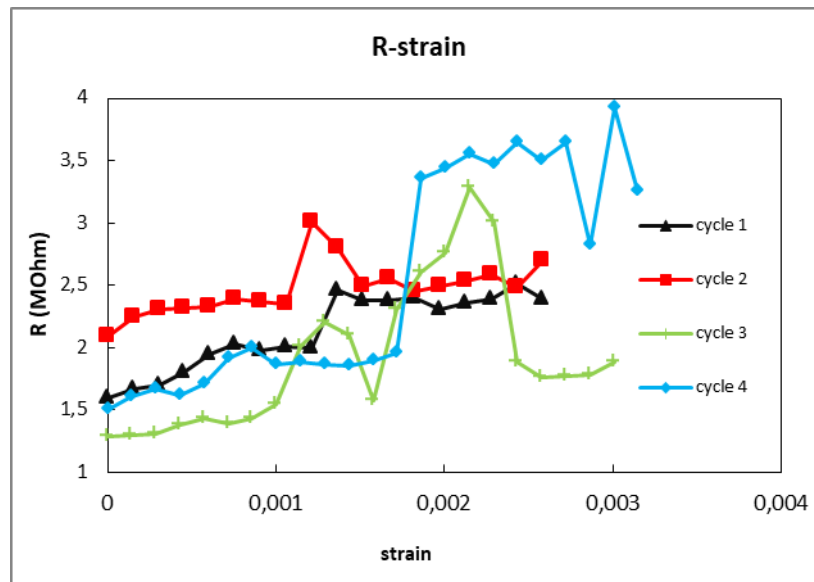
Διάγραμμα 6.5d: GF-strain για τον test1 (4^{ος} κύκλος)

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ακολούθησαν 4 δοκιμές σε διάστημα πολλών ημερών, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Παρά τις διάφορες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον αισθητήρα, δε παρατηρήθηκε σε καμία περίπτωση ιδανική συμπεριφορά, όπως ούτε κάποια επαναληψιμότητα, ακόμα

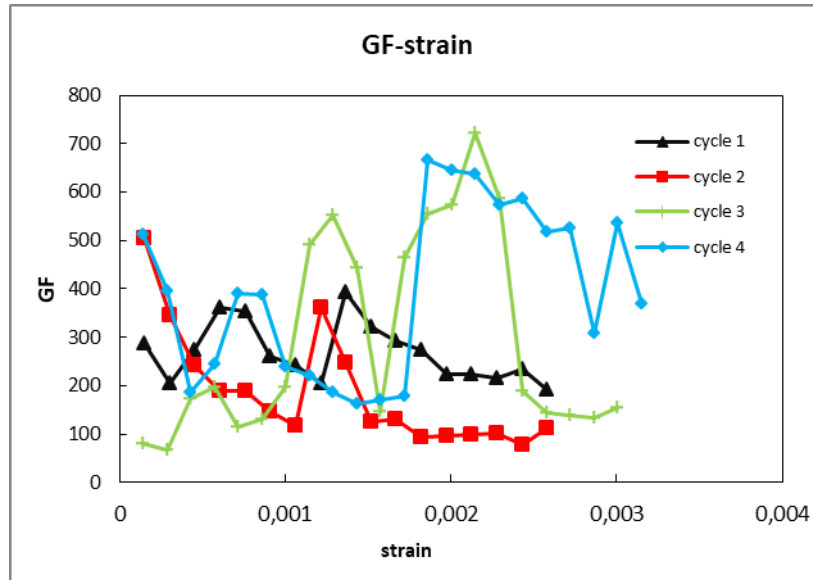
και σε περίπτωση εφαρμογής ίδιων ακριβώς συνθηκών λήψης μετρήσεων. Ο αισθητήρας παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις στην αντίστασή του ακόμα και σε ηρεμία, καθώς και κακή επαναφορά του στην αρχική του κατάσταση, το οποίο επαληθεύεται από την αρχική και την τελική του αντίσταση σε κάθε κύκλο.

Ακολουθούν συνοπτικά διαγράμματα για αυξανόμενη παραμόρφωση (R-strain & GF-strain) όπου φαίνεται η απόκριση του αισθητήρα χωρίς την επίδραση της υστέρησης.

Συγκριτικά αποτελέσματα:



Διάγραμμα 6.6: R-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των τεσσάρων κύκλων του test1.



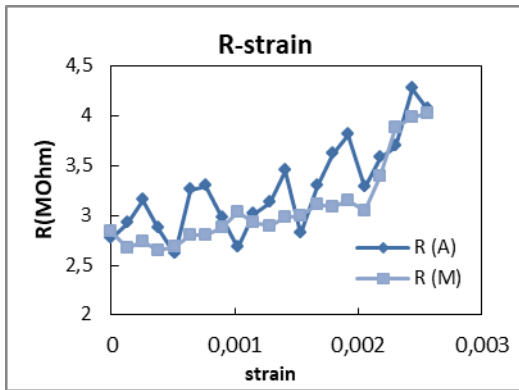
Διάγραμμα 6.7: GF-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των τεσσάρων κύκλων του tes1.

b1s1:

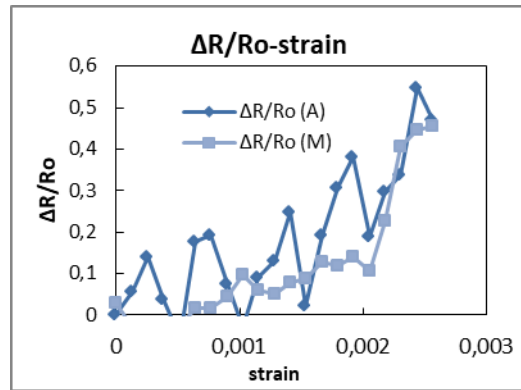
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

Αποτελέσματα για διαφορετικούς κύκλους παραμόρφωσης:

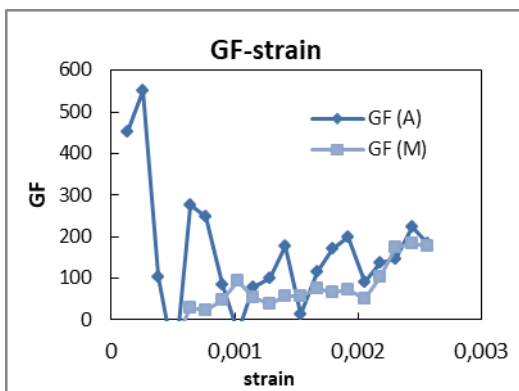
1^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



Διάγραμμα 6.8a: R-strain για τον b1s1 (1^{ος} κύκλος)

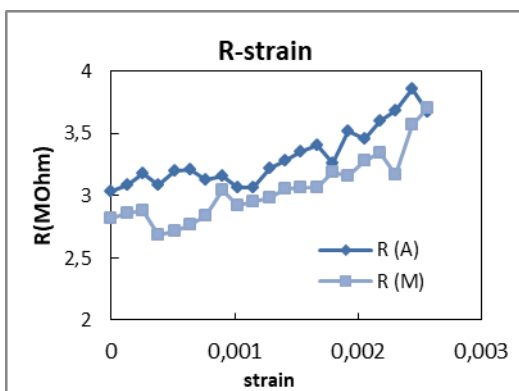


Διάγραμμα 6.8b: ΔR/Ro-strain για τον b1s1 (1^{ος} κύκλος)

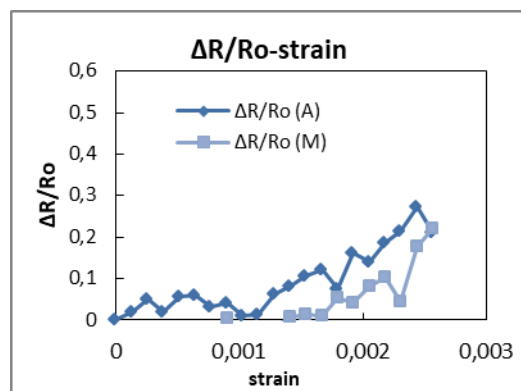


Διάγραμμα 6.8c: GF-strain για τον b1s1 (1^{ος} κύκλος)

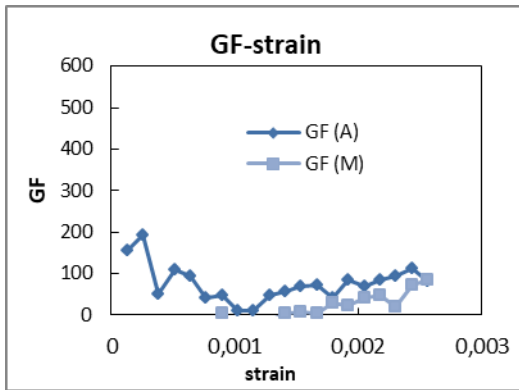
2^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



Διάγραμμα 6.9a: R-strain για τον b1s1 (2^{ος} κύκλος)

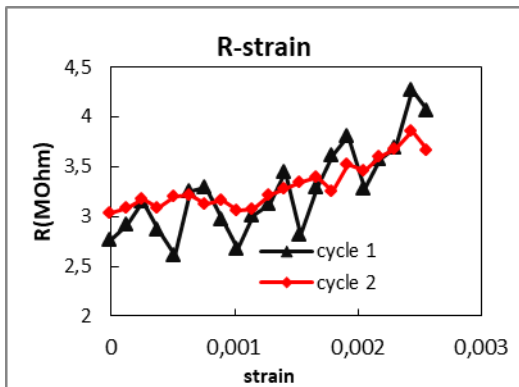


Διάγραμμα 6.9b: ΔR/Ro-strain για τον b1s1 (2^{ος} κύκλος)

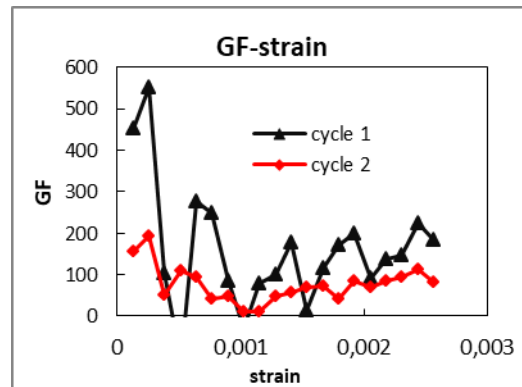


Διάγραμμα 6.9c: GF-strain για τον b1s1 (2^{ος} κύκλος)

Συγκριτικά αποτελέσματα:

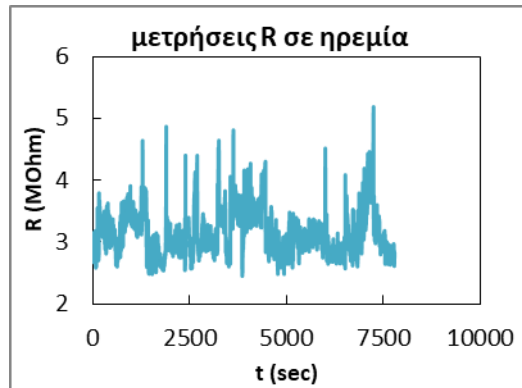


Διάγραμμα 6.10a: R-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s1



Διάγραμμα 6.10b: GF-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s1

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο 2^{ος} κύκλος παραμόρφωσης πραγματοποιήθηκε λίγα λεπτά μετά το πέρας του πρώτου. Ενώ παρατηρήθηκε μία αισθητή μείωση του θορύβου, η συμπεριφορά του αισθητήρα δεν ήταν ούτε στη δεύτερη περίπτωση ιδανική, αλλά δεν παρουσιάστηκε έντονη υστέρηση. Ωστόσο, ενδέχεται να υπήρξαν μεταβολές ανεξάρτητες της παραμόρφωσης (για παράδειγμα κακή επαναφορά του αισθητήρα ή μετατόπιση του στη ράβδο στήριξης) που επηρέασαν τις μετρήσεις που λήφθηκαν, θέτοντας σε περιπτώσεις την αντίσταση του παραμορφωμένου αισθητήρα χαμηλότερη σε σύγκριση με την αντίστασή του σε ηρεμία. Παρακάτω καταγράφεται ένα διάγραμμα μετρήσεων της αντίστασης του αισθητήρα σε ηρεμία για την καλύτερη απεικόνιση του θορύβου του αισθητήρα.



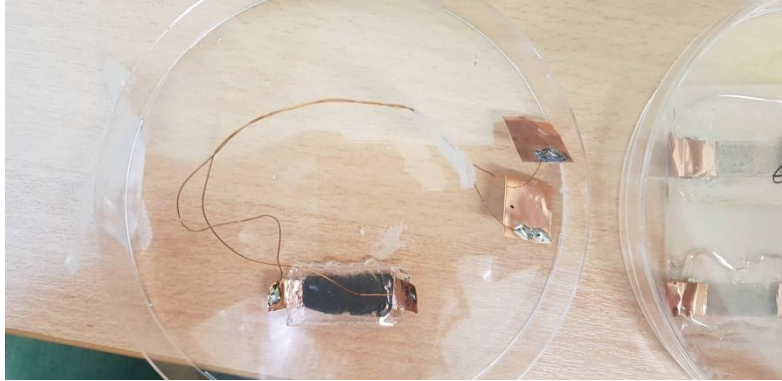
Διάγραμμα 6.11: Απεικόνιση «θορύβου» για τον αισθητήρα b1s1.

Παρατηρείται ότι η μεταβολή της αντίστασης λόγω παραμόρφωσης είναι σε κάποιες περιπτώσεις μικρότερη από τον θόρυβο που παρουσίασε ο αισθητήρας σε ηρεμία. Το GF προκύπτει περίπου 100 για 0,2% παραμόρφωση.

b1s2:

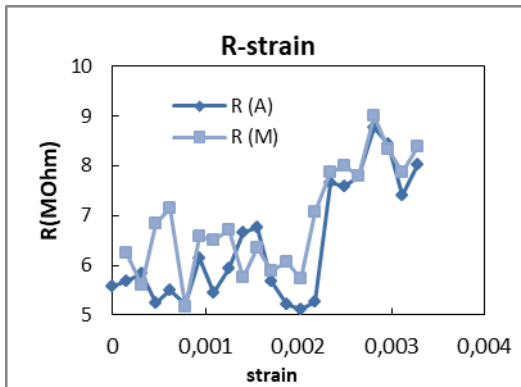
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,3 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu και κόλληση καλωδίων.

Σχετικά με την κατασκευή του αισθητήρα: Για τη σύνδεση του αισθητήρα με το πολύμετρο, στα άκρα του αισθητήρα που βρίσκονται τα τμήματα χαλκοταινίας προσκολλήθηκαν καλώδια χαλκού με χρήση κολλητηριού και κασσίτερου σαν μέσο προσκόλλησης. Έτσι, η επαφή αισθητήρα/συσσκευής καταγραφής δεν λαμβάνει τόπο πάνω στη δοκό (cantilever), κάτι που πιθανόν να επηρέαζε τις μετρήσεις.

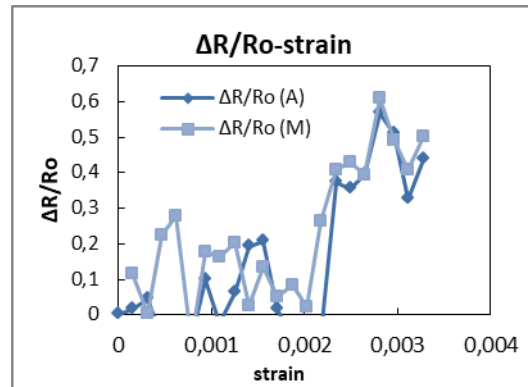


Εικόνα 6.2: Αισθητήρας b1s2. Στα άκρα του αισθητήρα είναι προσκολλημένα καλώδια χαλκού με πρόσθετα τμήματα χαλκοταινίας, ώστε να εξετασθεί η δυνατότητα λήψης μετρήσεων από μεγαλύτερη απόσταση.

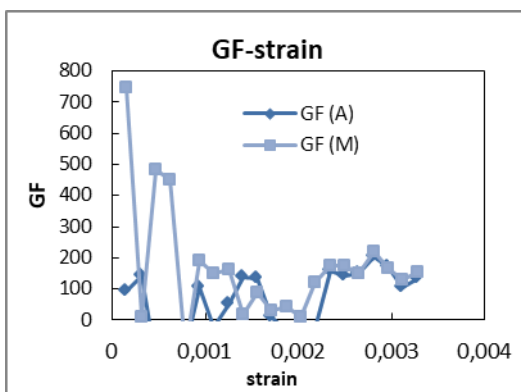
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



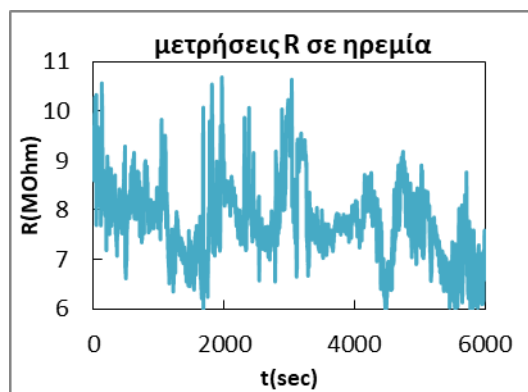
Διάγραμμα 6.12a: R-strain για τον b1s2



Διάγραμμα 6.12b: $\Delta R/R_o$ -strain για τον b1s2



Διάγραμμα 6.12c: GF-strain για τον b1s2



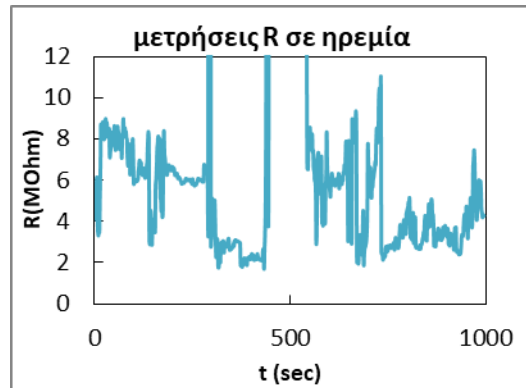
Διάγραμμα 6.12d: Συμπεριφορά αισθητήρα b1s2 σε κατάσταση ηρεμίας.

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, παρατηρούνται υψηλές διακυμάνσεις στην αντίσταση, οι οποίες επαληθεύονται και από τις μετρήσεις που λήφθηκαν μέσω υπολογιστή σε φάση ηρεμίας του αισθητήρα. Η συμπεριφορά δε θεωρείται καλή. Επίσης, η αντίσταση λαμβάνει τιμές υπό παραμόρφωση μικρότερες της αρχικής. Για το λόγο αυτό, παραλείπονται από τους άξονες του $\Delta R/R_0$ και του GF οι αρνητικές τιμές που δε θα έβγαζαν φυσικό νόημα, αλλά παραμένουν σαν τιμές στην καμπύλη. Το GF παρουσιάζει επίσης μεγάλες διακυμάνσεις χωρίς νόημα π.χ. κυμαίνεται μεταξύ 11-170 για παραμόρφωση κοντά στο 0,2% του μήκους του.

b1s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό (IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,7cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας παρουσίασε πολύ υψηλές διακυμάνσεις στην αντίστασή του σε κατάσταση ηρεμίας, σε σημείο που η αντίστασή του «απειριζόταν», δηλαδή δεν πραγματοποιούταν διέλευση ηλεκτρικού φορτίου μέσα από αυτόν. Για το λόγο αυτό δε πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη διάταξη με τη δοκό «Cantilever», καθώς οι μεταβολές στην αντίστασή του δε γινόντουσαν διακριτές λόγω του θορύβου, και ο αισθητήρας θεωρήθηκε μη αξιοποιήσιμος. Παρακάτω απεικονίζεται ένα διάγραμμα μετρήσεων από υπολογιστή για τη συμπεριφορά του αισθητήρα σε ηρεμία σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.



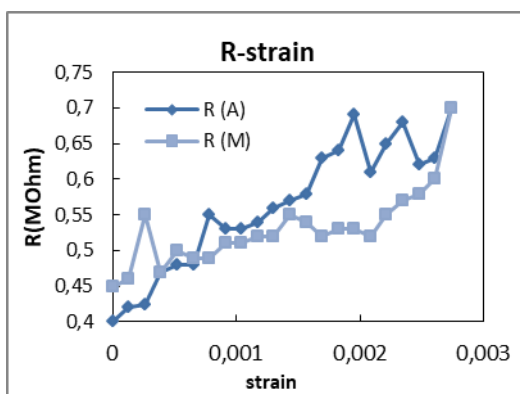
Διάγραμμα 6.13: Συμπεριφορά αισθητήρα b1s3 σε κατάσταση ηρεμίας.

b1s4:

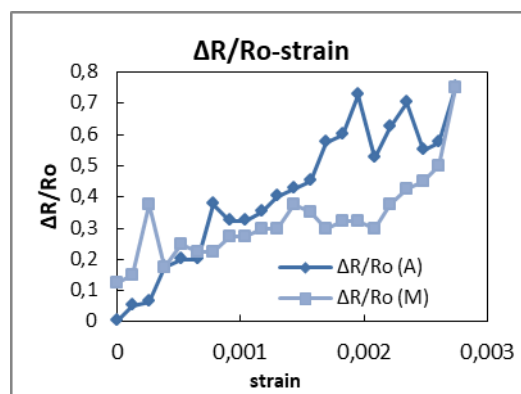
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,5 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

Αποτελέσματα για διαφορετικούς κύκλους παραμόρφωσης:

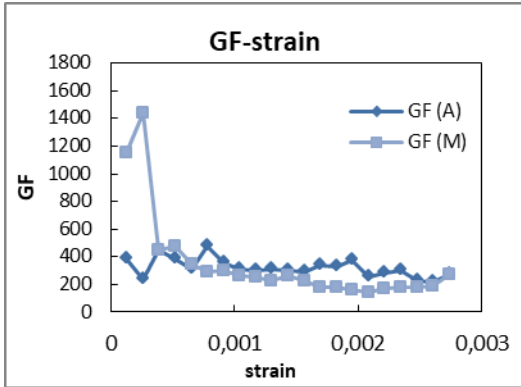
1^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



Διάγραμμα 6.14a: R-strain για τον b1s4 (1^{ος} κύκλος)

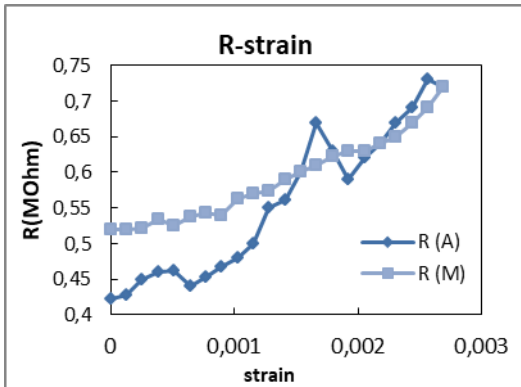


Διάγραμμα 6.14b: ΔR/Ro-strain για τον b1s4 (1^{ος} κύκλος)

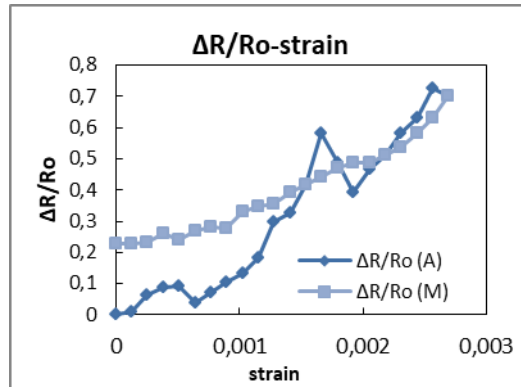


Διάγραμμα 6.14c: GF-strain για τον b1s4 (1^{ος} κύκλος)

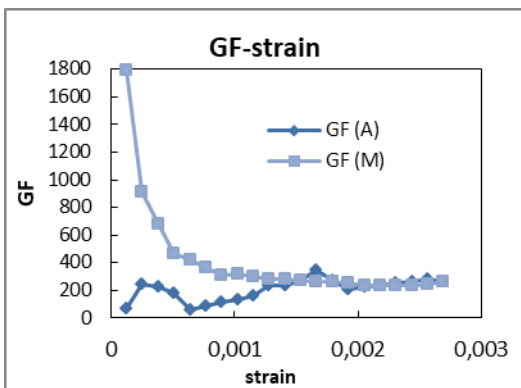
2^{ος} κύκλος παραμόρφωσης:



Διάγραμμα 6.15a: R-strain για τον b1s4 (2^{ος} κύκλος)

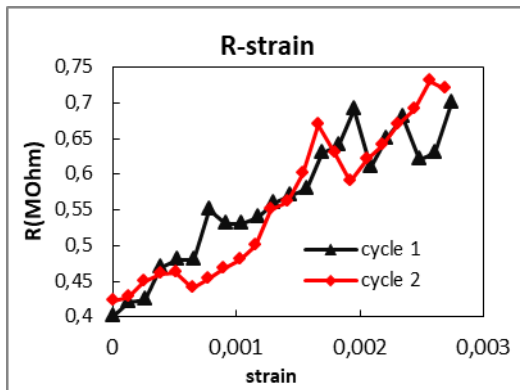


Διάγραμμα 6.15b: ΔR/Ro-strain για τον b1s4 (2^{ος} κύκλος)

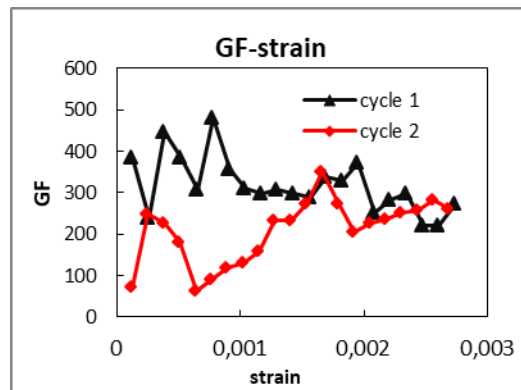


Διάγραμμα 6.15c: GF-strain για τον b1s4 (2^{ος} κύκλος)

Συγκριτικά αποτελέσματα:



Διάγραμμα 6.16a: R-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s1



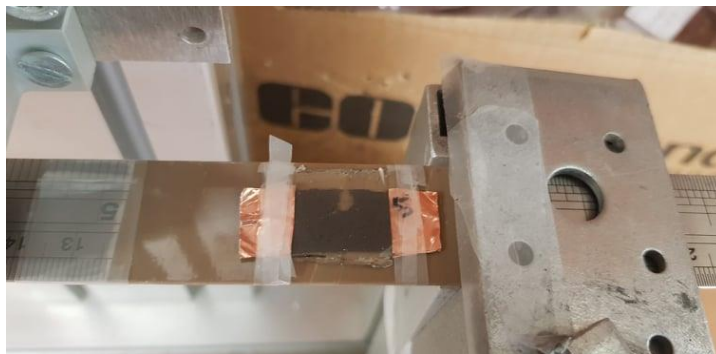
Διάγραμμα 6.16b: GF-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s1

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με την ίδια μέθοδο και αναλογίες υλικών, ο αισθητήρας παρουσίασε χαμηλή αντίσταση σε όλους τις μετρήσεις του. Παρουσίασε σχετικά καλή επαναληψιμότητα, χωρίς θόρυβο ή τυχαίες μεταβολές και μικρή υστέρηση οι οποίες θα επηρέαζαν τις μετρήσεις αρνητικά σε σημαντικό βαθμό. Για παραμόρφωση 0,2%, το GF κυμαίνεται μεταξύ 200-300.

b1s5:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** -
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Κατά την κατασκευή του αισθητήρα παρουσιάστηκε μία τρύπα στην περιοχή των GNPs, η οποία δημιουργήθηκε λογικά κατά την εξάτμιση του διαλύτη λόγω κακής κατανομής των GNPs στο οριζόμενο πλαίσιο. Ο αισθητήρας παρουσίασε θόρυβο ο οποίος εμπόδιζε τη διάκριση μεταξύ αυτού και οποιασδήποτε εσκεμμένης μεταβολής από παραμόρφωση του αισθητήρα. Για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήθηκαν κύκλοι μετρήσεων για τον συγκεκριμένο αισθητήρα.

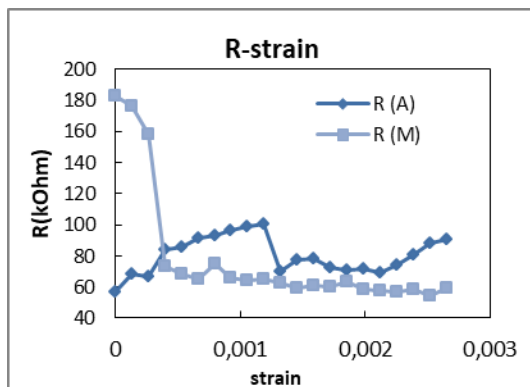


Εικόνα 6.3: Αισθητήρας b1s5

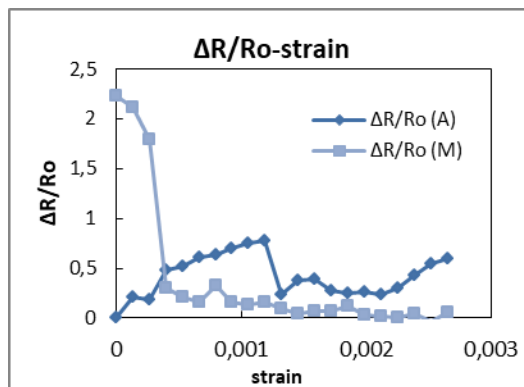
b1s6:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,7 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

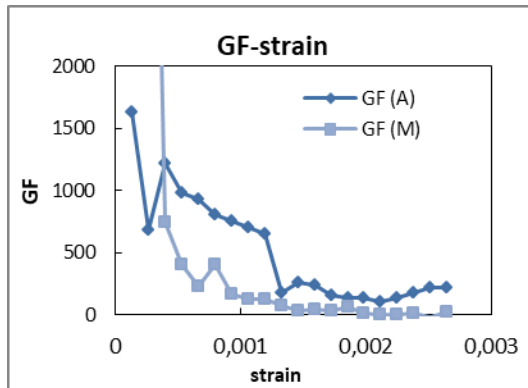
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



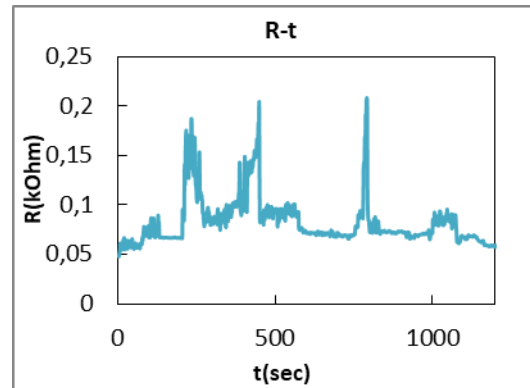
Διάγραμμα 6.17a: R-strain για τον b1s6



Διάγραμμα 6.17b: ΔR/Ro-strain για τον b1s6



Διάγραμμα 6.17c: GF-strain για τον b1s6



Διάγραμμα 6.17d: R-t για τον b1s6

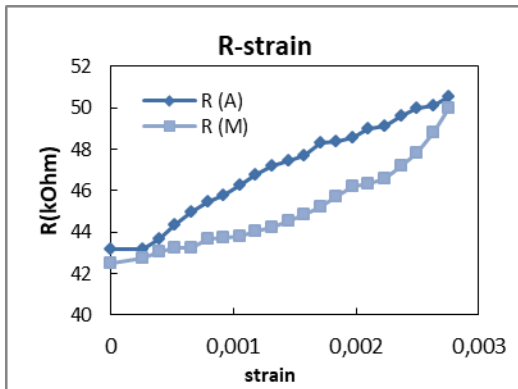
Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Το Διάγραμμα 6.17d απεικονίζει τον κύκλο παραμόρφωσης όπως καταγράφηκε από υπολογιστή, η διάρκεια του οποίου ήταν από 80-1200 sec. Είναι ξεκάθαρο πως μέσα σε αυτό τον κύκλο παρατηρούνται μεταβολές ανεξάρτητες της καταπόνησης του αισθητήρα είτε λόγω θορύβου εξαιτίας κακών επαφών, είτε λόγω φαινομένων τα οποία λόγω της πολύ μικρής παραμόρφωσης που μετράται επηρεάζουν τις μετρήσεις. Ο αισθητήρας παρουσίασε κακή συμπεριφορά, χωρίς να παρατηρείται αύξηση της αντίστασης με την παραμόρφωσή του ή αντίστοιχα ελάττωση της αντίστασης με την χαλάρωσή του.

b1s7:

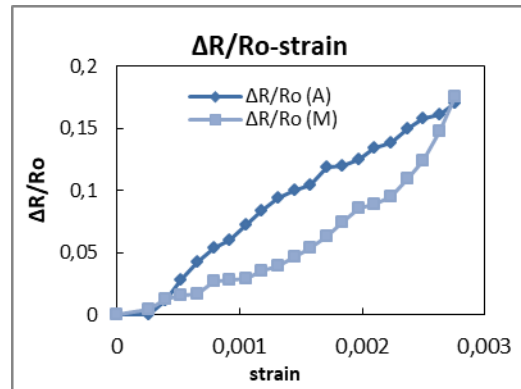
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,5 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

Αποτελέσματα για διαφορετικούς κύκλους παραμόρφωσης:

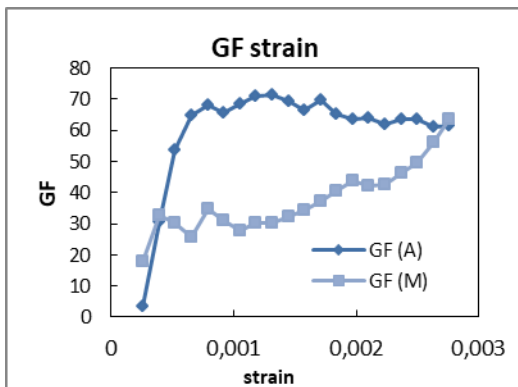
1^{ος} κύκλος παραμόρφωσης



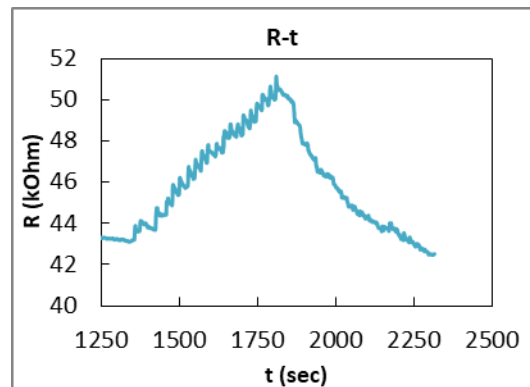
Διάγραμμα 6.18a: R-strain για τον b1s7 (1^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.18b: ΔR/Ro-strain για τον b1s7 (1^{ος} κύκλος)

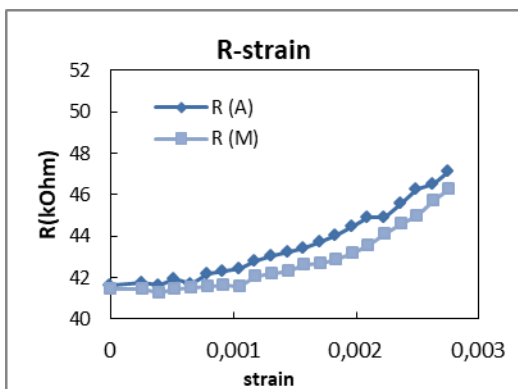


Διάγραμμα 6.18c: GF-strain για τον b1s7 (1^{ος} κύκλος)

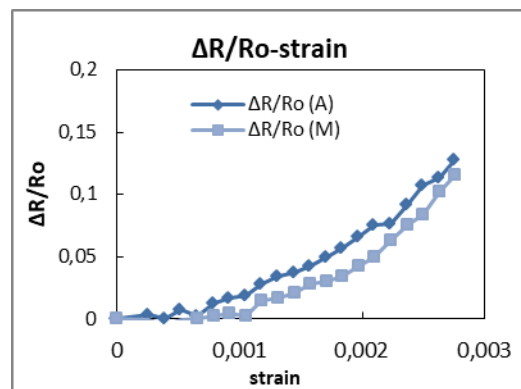


Διάγραμμα 6.18d: R-t για τον b1s7 (1^{ος} κύκλος)

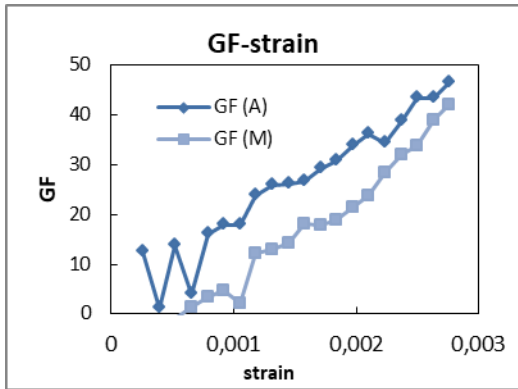
2^{ος} κύκλος παραμόρφωσης



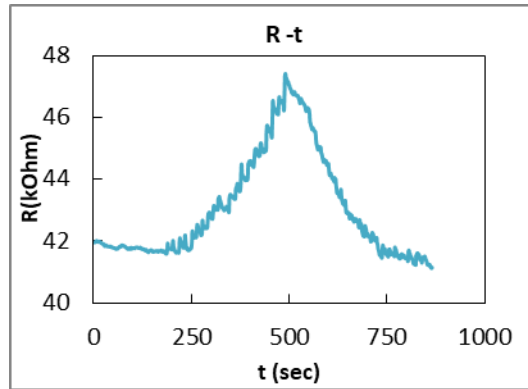
Διάγραμμα 6.19a: R-strain για τον b1s7 (2^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.19b: ΔR/Ro-strain για τον b1s7 (2^{ος} κύκλος)

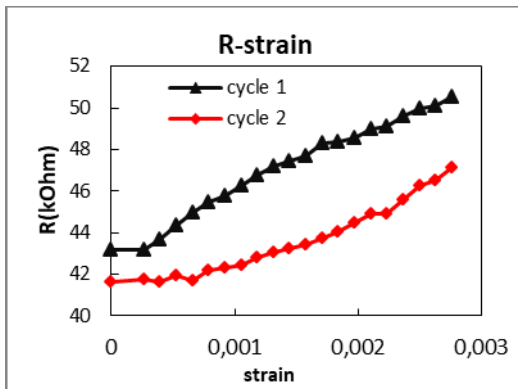


Διάγραμμα 6.19c: GF-strain για τον b1s7 (2^{ος} κύκλος)

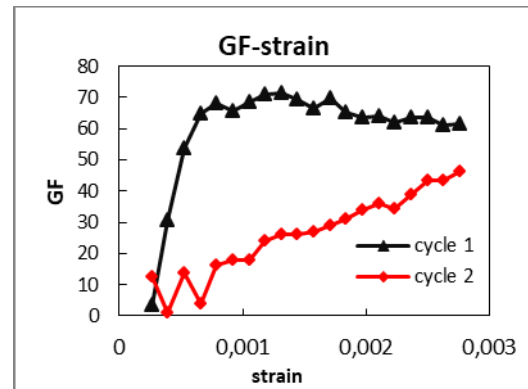


Διάγραμμα 6.19d: R-t για τον b1s7 (2^{ος} κύκλος)

Συγκριτικά αποτελέσματα:



Διάγραμμα 6.20a: R-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s7



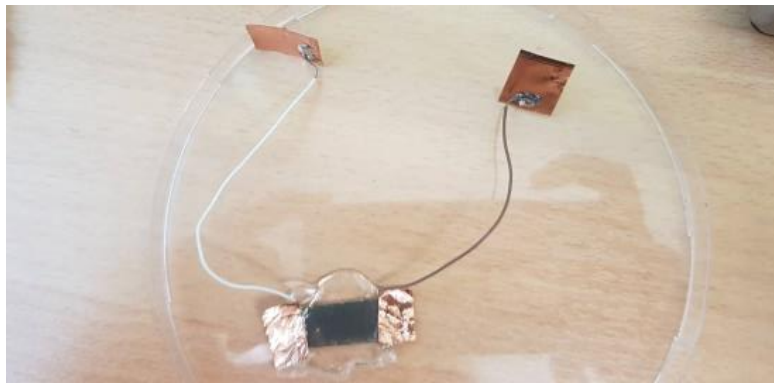
Διάγραμμα 6.20b: GF-strain για αύξηση της παραμόρφωσης των δύο κύκλων του b1s7

Παρατηρήσεις αισθητήρα: Η αντίσταση του αισθητήρα παρουσίασε μία σταθερή μείωση με το χρόνο. Για το λόγο αυτό, λήφθηκαν οι απαραίτητες προσαρμογές (όπως αναφέρονται στην πειραματική διαδικασία) ώστε να μη δημιουργήσει θέματα όπως αρνητικές τιμές του $\Delta R/R_0$ και του GF κατά την χαλάρωση του αισθητήρα, όπου η μείωση αυτή θα λειτουργούσε αθροιστικά με την μείωση της αντίστασης του αισθητήρα λόγω ελάττωσης της παραμόρφωσής του. Πέραν αυτού, ο αισθητήρας έδειξε καλή συμπεριφορά και επαναληψιμότητα ως προς την μεταβολή της αντίστασής του, με μικρά φαινόμενα υστέρησης, τα οποία από τη μεταβολή του $\Delta R/R_0$ φαίνεται να βελτιώθηκαν κατά τον δεύτερο κύκλο παραμόρφωσης. Το GF δεν έδειξε σταθερή συμπεριφορά, αλλά και στις 2 περιπτώσεις είναι σημαντικά χαμηλότερο από τους υπόλοιπους αισθητήρες μέχρι τώρα που δεν είχαν paste αργύρου στις επαφές τους (64 και 36 για παραμόρφωση 0,2% του μήκους στον 1^ο και 2^ο κύκλο αντίστοιχα).

b1s8:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** -
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας, κόλληση καλωδίων.

Σχετικά με την κατασκευή του αισθητήρα: Ομοίως με τον b1s2, στα άκρα του αισθητήρα που βρίσκονται τα τμήματα χαλκοταινίας για τη σύνδεση του αισθητήρα με το πολύμετρο, προσκολλήθηκαν καλώδια χαλκού με χρήση κασσίτερου σαν μέσο προσκόλλησης, ώστε η επαφή αισθητήρα/συσσκευής καταγραφής να μη λαμβάνει τόπο πάνω στο όργανο cantilever, που πιθανόν να επηρεάζει τις μετρήσεις. Λόγω όμως πιθανής κακής προσκόλλησης των υλικών, ο αισθητήρας δε κατάφερε να μετρήσει αντίσταση, γι' αυτό απορρίφθηκε.



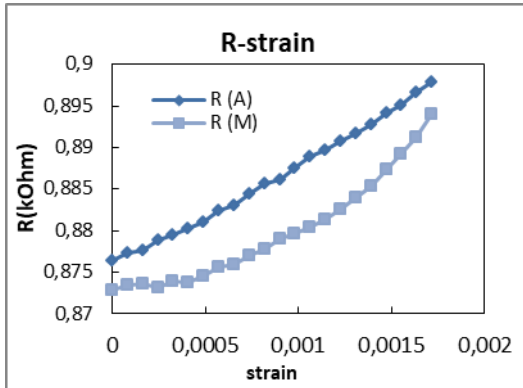
Εικόνα 6.4: Αισθητήρας b1s8

b2g1s1:

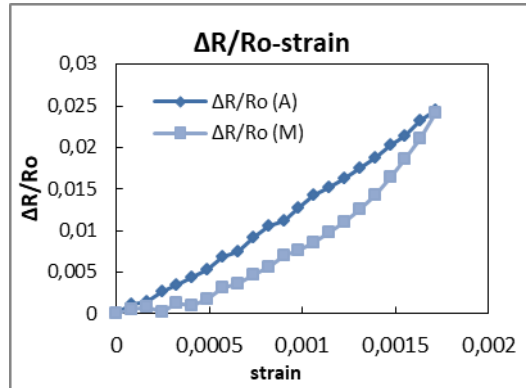
- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.

- **Μήκος αισθητήρα:** 2,9 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

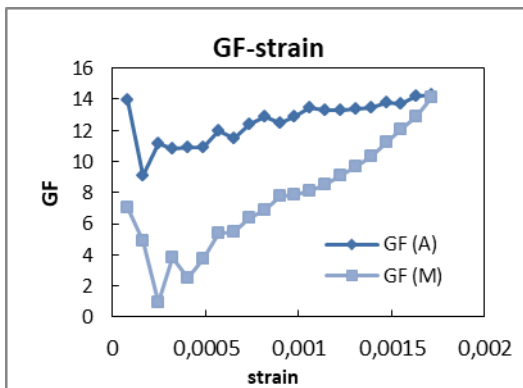
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



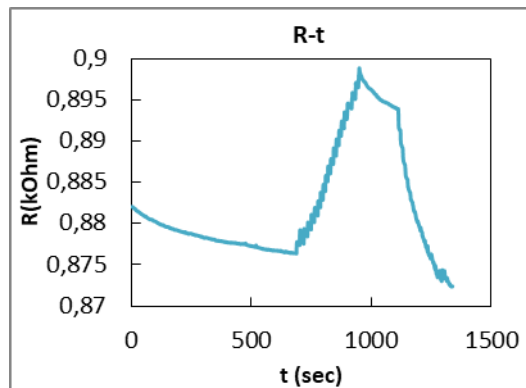
Διάγραμμα 6.21a: R-strain για τον b2g1s1



Διάγραμμα 6.21b: ΔR/Ro-strain για τον b2g1s1



Διάγραμμα 6.21c: GF-strain για τον b2g1s1



Διάγραμμα 6.21d: R-t για τον b2g1s1

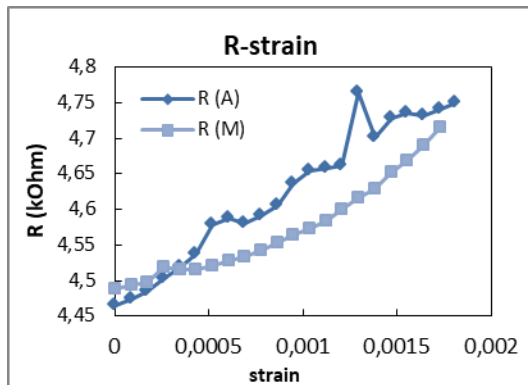
Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας παρουσίασε καλή συμπεριφορά, με χαμηλή αντίσταση (χαμηλότερη από όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες), γραμμική αύξηση της αντίστασης με την καταπόνηση, αλλά και υστέρηση, με χαμηλό GF (14 για παραμόρφωση κοντά στο 0,2% του μήκους). Στο διάγραμμα 6.21d οι μετρήσεις αναπαριστώνται και οι μετρήσεις του αισθητήρα σε ηρεμία ώστε να απεικονιστεί καλύτερα η σταθερή μείωση της αντίστασης που εμφανίζεται στους αισθητήρες με paste αργύρου στις επαφές. (Υποσημείωση: Η μεταβολή της αντίστασης για το χρονικό διάστημα 1000 sec στο διάγραμμα 6.21d είναι αποκλειστικά λόγω του «drift» που

παρουσίαζε ο αισθητήρας, καθώς εκείνη τη χρονική περίοδο εξεταζόταν η ορθότητα της διάταξης και έγινε μία προσωρινή παύση της αλλαγής της παραμόρφωσης.)

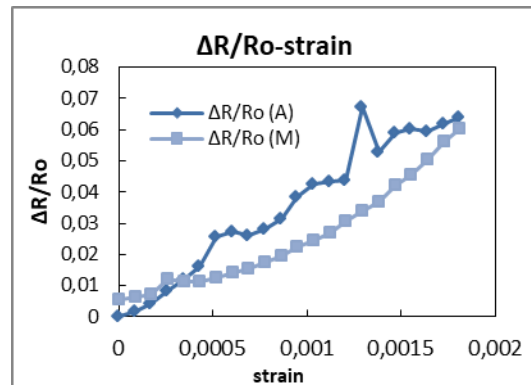
b2g1s2:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/αιθανόλη (IPA:EtOH) αναλογίας 1:1.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,9 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

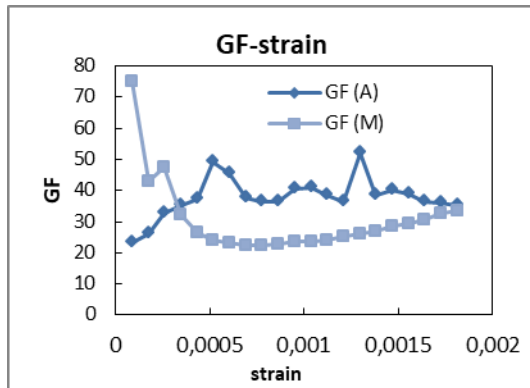
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



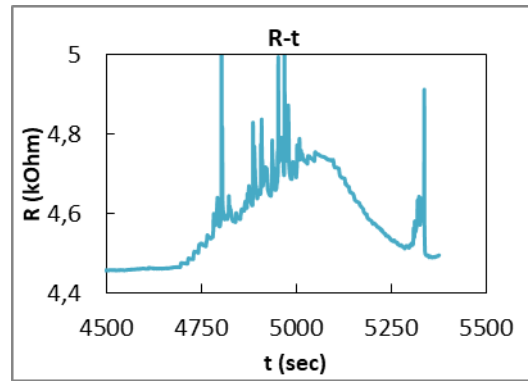
Διάγραμμα 6.22a: R-strain για τον b2g1s2 (1^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.22b: ΔR/Ro-strain για τον b2g1s2 (1^{ος} κύκλος)



Διάγραμμα 6.22c: GF-strain για τον b2g1s2 (1^{ος} κύκλος)



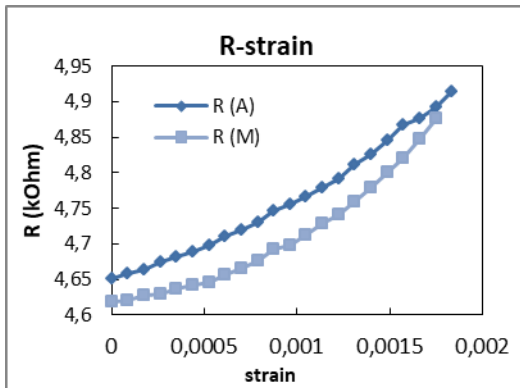
Διάγραμμα 6.22d: R-t για τον b2g1s2 (1^{ος} κύκλος)

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Η αντίσταση του αισθητήρα είναι αξιοσημείωτα χαμηλότερη από τους αισθητήρες όπου δε χρησιμοποιήθηκε paste αργύρου στις επαφές. Στον συγκεκριμένο δεν παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη μείωση της αντίστασης με τον χρόνο (drift), ενώ και η υστέρηση είναι μικρή. Από το διάγραμμα R-t διακρίνεται θόρυβος σε συγκεκριμένα σημεία λήψης των μετρήσεων, ο οποίος δεν επηρέασε σημαντικά τη λήψη τους. Το GF είναι σχετικά σταθερό και κοντά στο 40 για το εύρος παραμόρφωσης που μελετήσαμε.

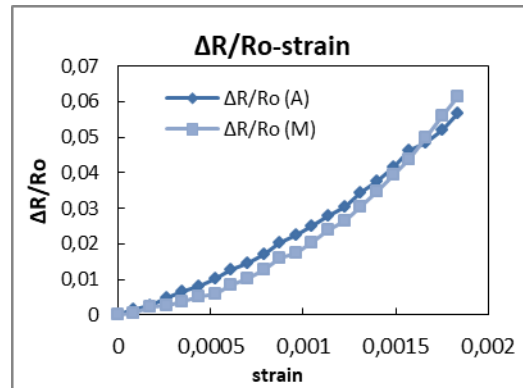
b2g1s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλης.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,65 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

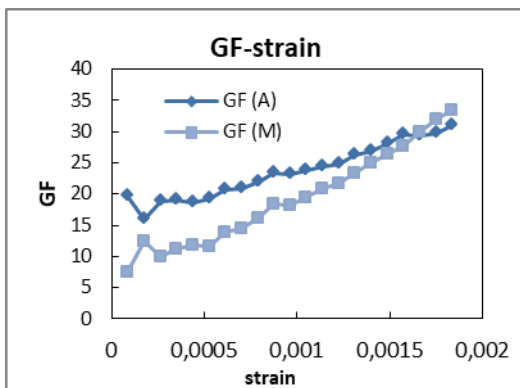
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



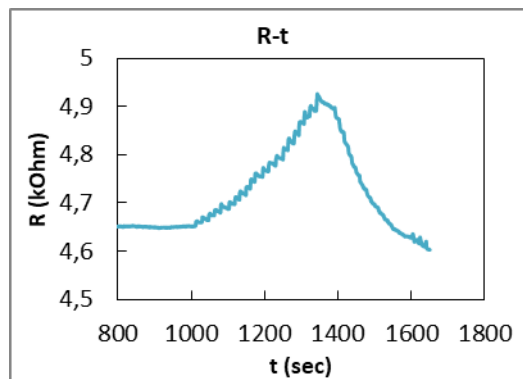
Διάγραμμα 6.23a: R-strain για τον b2g1s3



Διάγραμμα 6.23b: $\Delta R/R_o$ -strain για τον b2g1s3



Διάγραμμα 6.23c: GF-strain για τον b2g1s3



Διάγραμμα 6.23d: R-t για τον b2g1s3

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας παρουσίασε καλή απόκριση, μία σταθερή μείωση της αντίστασης με τον χρόνο όμως είναι αισθητή, γι' αυτό έγινε η προσαρμογή της αρχικής αντίστασης κατά την επαναφορά σε μηδενική παραμόρφωση. Αγνοώντας αυτό το «drift» ο αισθητήρας έδειξε πολύ μικρή υστέρηση με GF κοντά στο 35 για παραμόρφωση κοντά στο 0,2%.

b2g2s1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

b2g2s2:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/αιθανόλη (IPA:EtOH) αναλογίας 1:1.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

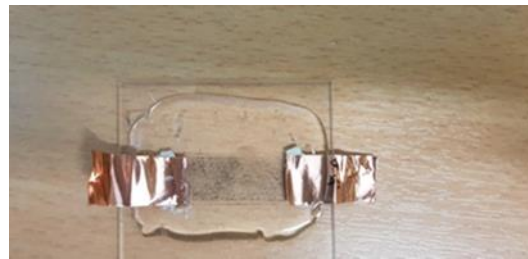
b2g2s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλης.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

Παρατηρήσεις για την κατασκευή του group 2 (αισθητήρες **b2g2s1, **b2g2s2**, **b2g2s3**):** Και στους τρεις αισθητήρες πραγματοποιήθηκε sputtering των GNPs και της μίας πλευράς PDMS κατά την κατασκευή τους για να εξετασθεί η δυνατότητα της πιο ομοιόμορφης εξάπλωσης των υλικών στην επιφάνεια. Και στα δύο υλικά προηγήθηκε dropcasting τους σε πλάκα θέρμανσης για σύντομο χρονικό διάστημα στους 70°C, ώστε να εξατμιστεί ο διαλύτης των GNPs και να γίνει σε ένα βαθμό cured το PDMS ώστε να μπορεί να μεταφερθεί. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκε sputtering μόνο της μίας πλευράς του PDMS και όχι των δύο είναι λόγω της μεγάλης ποσότητας που απαιτήθηκε για το sputtering της μίας, η οποία κατέληξε πολύ πιο λεπτή σε πάχος από την συνηθισμένη και δημιούργησε προβλήματα στη χρήση του αισθητήρα (το PDMS σκίζοταν κατά την μεταφορά του από το sputterer στην πλάκα θέρμανσης). Θεωρήθηκε πως υπήρξαν μεγάλες απώλειες των υλικών κατά τη διαδικασία του sputtering. Και οι τρεις αισθητήρες δεν έδωσαν κάποια μέτρηση μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους.



Εικόνα 6.5: Αισθητήρας **b2g2s1**



Εικόνα 6.6: Αισθητήρας **b2g2s2**



Εικόνα 6.7: Αισθητήρας b2g2s3

b2g3s1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό (IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** -
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

Παρατηρήσεις για την κατασκευή του αισθητήρα: Ο αισθητήρας δεν έχει άνω στρώμα PDMS, καθώς χρησιμοποιήθηκε παραπάνω ποσότητα PDMS από ότι αρχικά προοριζόταν για την κατασκευή των αισθητήρων του group 2 (g2) του ίδιου batch (batch 2 ή b2) που προηγήθηκε. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η ποσότητα του PDMS που παρέμεινε να μην αρκεί για την ολοκληρωμένη υλοποίηση όλων των αισθητήρων του group 3 (g3). Θεωρήθηκε πως ο χρόνος για την παρασκευή νέας ποσότητας PDMS για την κατασκευή ενός μοναδικού αισθητήρα θα απαιτούσε χρόνο και υλικά που θα μπορούσαν εν μέρει να διοχετευθούν στην δημιουργία ενός καινούριου batch αισθητήρων, γι' αυτό ο αισθητήρας δεν εξετάστηκε περαιτέρω.

b2g3s2:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/αιθανόλη (IPA:EtOH) αναλογίας 1:1.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.

- **Μήκος αισθητήρα:** 1,95 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

Παρατηρήσεις για την κατασκευή του αισθητήρα: Η άνω πλευρά του αισθητήρα δεν είναι πλήρως επικαλυμμένη με PDMS καθώς κατά το dropcasting του παρατηρήθηκε ότι η ποσότητα δεν είναι αρκετή λόγω υπερβολικής χρήσης του για την κατασκευή του group 2 (b2g2s1-3). Ο αισθητήρας καταστράφηκε κατά τη διάρκεια της ελεγχόμενης παραμόρφωσής κατά 20% του μήκους του, το οποίο θεωρήθηκε πως οφείλεται στην έλλειψη PDMS για την προστασία της δομής του. Οι μετρήσεις που καταγράφονται παρακάτω αναφέρονται σε έναν κύκλο που πραγματοποιήθηκε πριν την ελεγχόμενη παραμόρφωση, ο οποίος είχε πραγματοποιηθεί για πιθανή σύγκριση του πριν και μετά της ελεγχόμενης παραμόρφωσης.

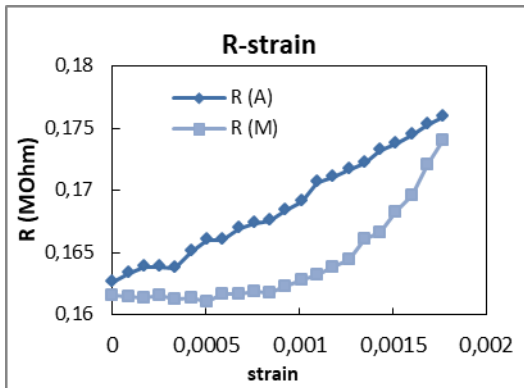


Εικόνα 6.8: Αισθητήρας b2g3s2

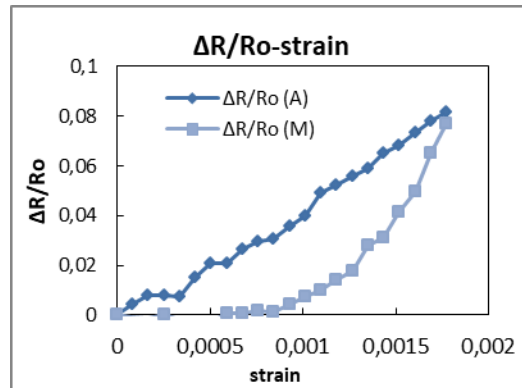


Εικόνα 6.9: Αισθητήρας b2g3s2 μετά το stretching 20%

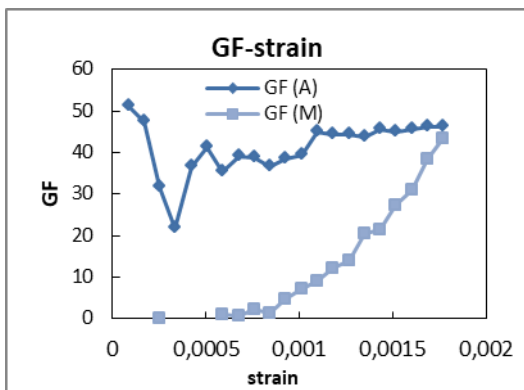
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



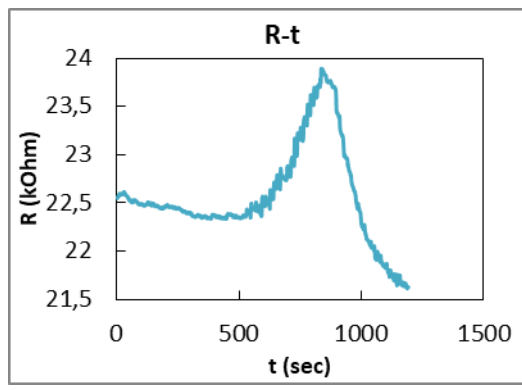
Διάγραμμα 6.24a: R-strain για τον b2g3s2



Διάγραμμα 6.24b: $\Delta R/R_o$ -strain για τον b2g3s2



Διάγραμμα 6.24c: GF-strain για τον b2g3s2



Διάγραμμα 6.24d: R-t για τον b2g3s2

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας έδειξε την μεγαλύτερη αντίσταση μέχρι τώρα από όλους τους αισθητήρες που έχουν paste αργύρου μεταξύ των επαφών GNPs και ταινίας χαλκού. Η σταθερή μείωση της αντίστασης με τον χρόνο που παρατηρήθηκε σε προηγούμενους αισθητήρες είναι αισθητή και εδώ, η οποία έδειξε πιο απότομη με την άσκηση καταπόνησης στον αισθητήρα. Θεωρείται πως κύριο αίτιο για την ύπαρξη αυτών των χαρακτηριστικών είναι η ελαττωματική δομή του αισθητήρα λόγω ελλιπούς ποσότητας PDMS κατά την κατασκευή του.

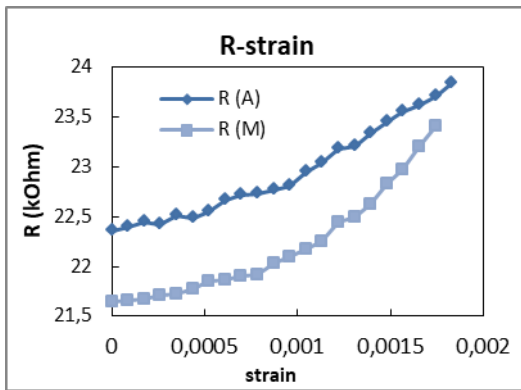
b2g3s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλης.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,5 cm.

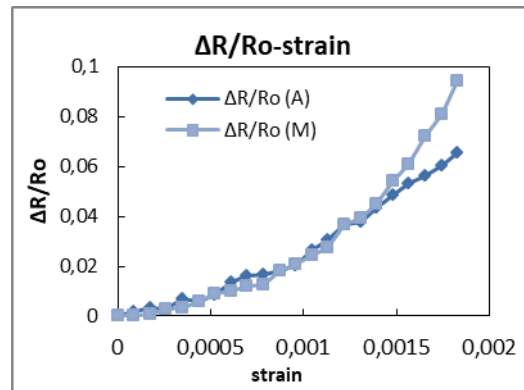
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

Παρατήρηση για την κατασκευή του αισθητήρα: Λεπτή σε πάχος η μία πλευρά PDMS του αισθητήρα λόγω ελλιπούς ποσότητας.

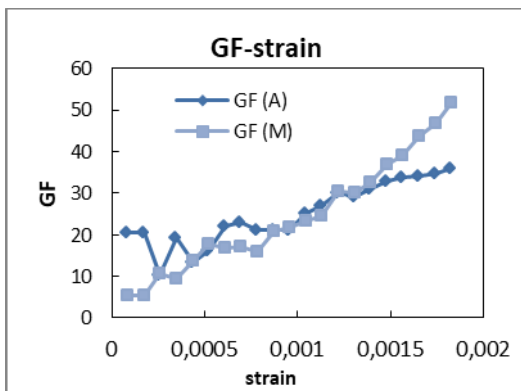
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



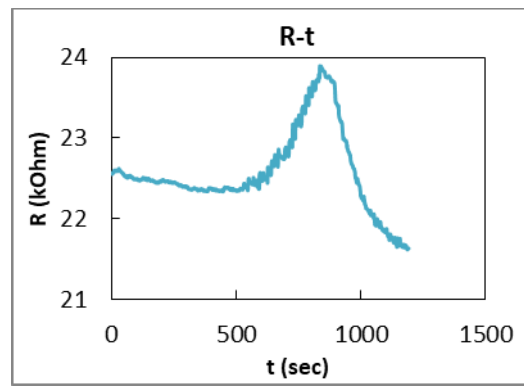
Διάγραμμα 6.25a: R-strain για τον b2g3s3



Διάγραμμα 6.25b: ΔR/Ro-strain για τον b2g3s3



Διάγραμμα 6.25c: GF-strain για τον b2g3s3



Διάγραμμα 6.25d: R-t για τον b2g3s3

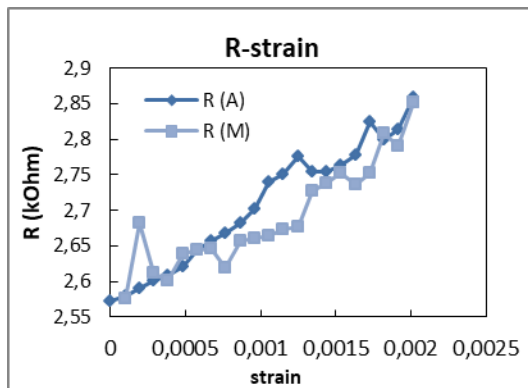
Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Η αντίσταση του αισθητήρα έδειξε απότομη μείωση με τον χρόνο σε ηρεμία του (drift). Γι' αυτό, στον υπολογισμό του $\Delta R/R_0$ και του GF λήφθηκε στον μειούμενο κύκλο σαν R_0 η τελική τιμή του, ώστε να μην παρουσιαστεί GF μικρότερο του 0. Με αυτή την προσαρμογή στην επεξεργασία των μετρήσεων, το GF έδειξε χαμηλό, με πολύ καλή συμπεριφορά και ως προς το $\Delta R/R_0$. Το μέτρο της

αντίστασης, όπως και σε προηγούμενους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με paste αργύρου, είναι χαμηλό, και ο θόρυβος πολύ μικρότερος της μεταβολής που προέκυψε απ την παραμόρφωση. Το GF είναι κοντά στο 40 για παραμόρφωση που πλησιάζει το 0,2% του μήκους του.

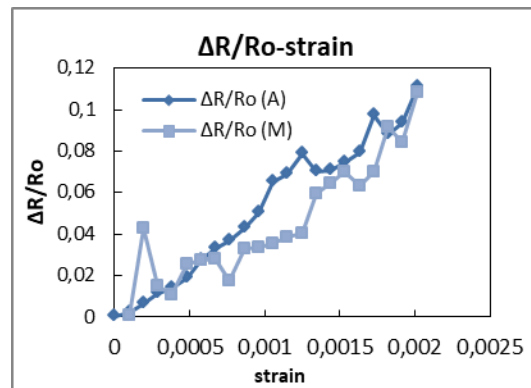
b3s1

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,35 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

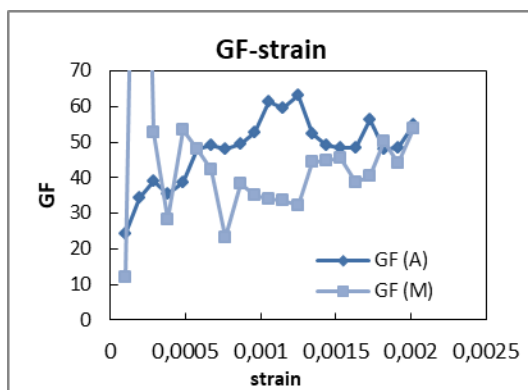
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



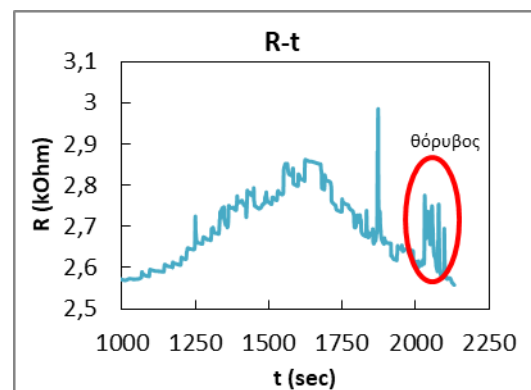
Διάγραμμα 6.26a: R-strain για τον b3s1



Διάγραμμα 6.26b: ΔR/Ro-strain για τον b3s1



Διάγραμμα 6.26c: GF-strain για τον b3s1



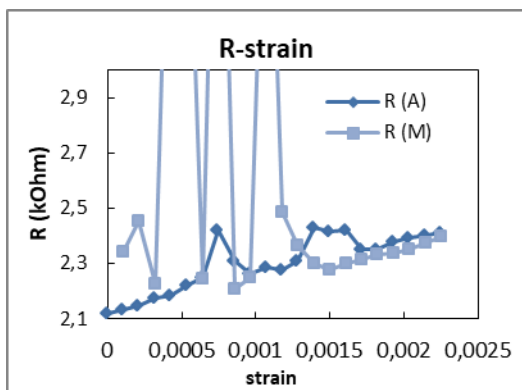
Διάγραμμα 6.26d: R-t για τον b3s1

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας έδειξε χαμηλή αντίσταση, όπως και οι προηγούμενες περιπτώσεις αισθητήρων με paste αργύρου στα άκρα τους. Η μεταβολή της αντίστασης είναι σε λογικά πλαίσια όπως και το GF, με εξαίρεση μία τιμή, η οποία από το διάγραμμα R-t φαίνεται ότι οφείλεται σε θόρυβο ανεξάρτητο της καταπόνησης του αισθητήρα, πιθανόν λόγω κάποιου προβλήματος με τη διάταξη ή τις επαφές κατά την επαναφορά. Παρόλα αυτά, ο αισθητήρας παρουσίασε θόρυβο καθόλη τη διάρκεια του κύκλου παραμόρφωσης, όχι αρκετά μεγάλο για να εμποδίσει τη λήψη των μετρήσεων ή να επηρεάσει την επεξεργασία τους. Από το διάγραμμα του GF παραλήφθηκε μία τιμή από την απεικόνιση καθώς θεωρήθηκε πως η τιμή της οφείλεται σε κάποιο σφάλμα κατά τη λήψη της μέτρησης (έχει κυκλωθεί το σημείο που θεωρείται ότι παρατηρήθηκε το σφάλμα στο διάγραμμα αντίστασης-χρόνου). Το GF είναι 53 για παραμόρφωση 0,2% ως προς το μήκος.

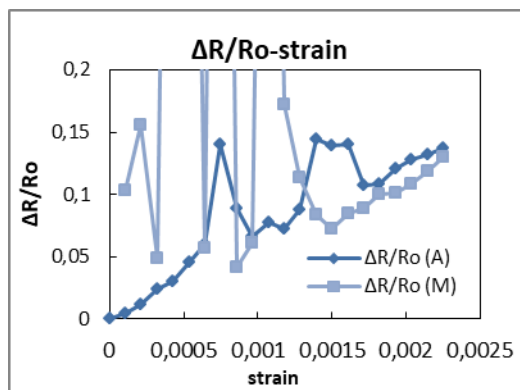
b3s2

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,1 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

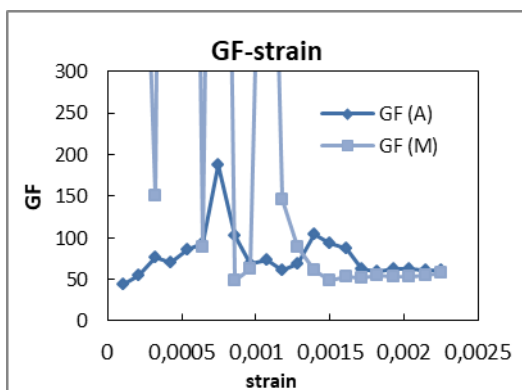
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



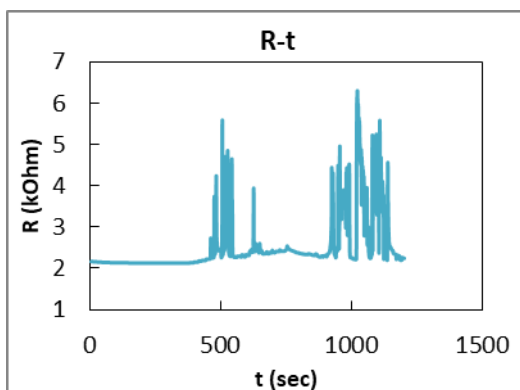
Διάγραμμα 6.27a: R-strain για τον b3s2



Διάγραμμα 6.27b: ΔR/Ro-strain για τον b3s2



Διάγραμμα 6.27c: GF-strain για τον b3s2



Διάγραμμα 6.27d: R-t για τον b3s2

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ενώ ο αισθητήρας έδειξε κανονική συμπεριφορά και ελάχιστο θόρυβο σε ηρεμία, με την πρώτη άσκηση παραμόρφωσης σε αυτόν (μετά τις 10 φορές παραμόρφωση κατά 20%) η συμπεριφορά του έγινε απρόβλεπτη, με τυχαίες αυξομειώσεις της αντίστασης, ανεξάρτητες της καταπόνησης που του ασκούνταν ως προς τη μεταβολή του. Λόγω αυτού, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά τη λήψη των μετρήσεων, τα οποία εν συνεχεία στην επεξεργασία τους παρουσίασαν GF με πολύ μεγάλες διακυμάνσεις. Για το λόγο αυτό, οι τιμές που θεωρήθηκαν πολύ μεγάλες δεν απεικονίζονται στο διάγραμμα.

b3s3

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.

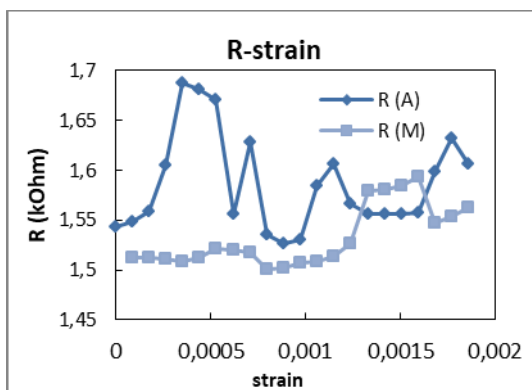
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,2 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Ο αισθητήρας παρουσίασε υψηλές διακυμάνσεις στην αντίσταση του από το στάδιο ηρεμίας πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε παραμόρφωση σε αυτόν. Σε πρόχειρες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εκτός της διάταξης, διαπιστώθηκε ότι η παραμόρφωση δε μπορούσε να διακριθεί από τον θόρυβο του αισθητήρα, το οποίο οδήγησε στην απόφαση να μην καταγραφεί κύκλος για τον αισθητήρα.

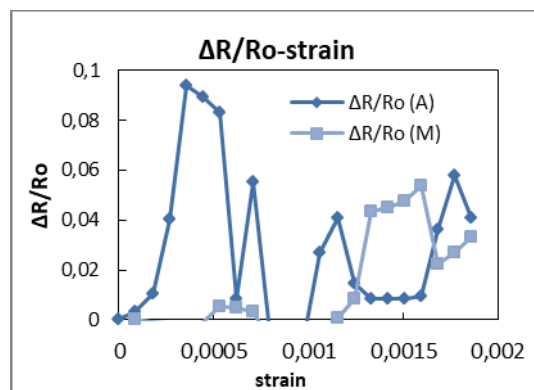
b3s4

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,1 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

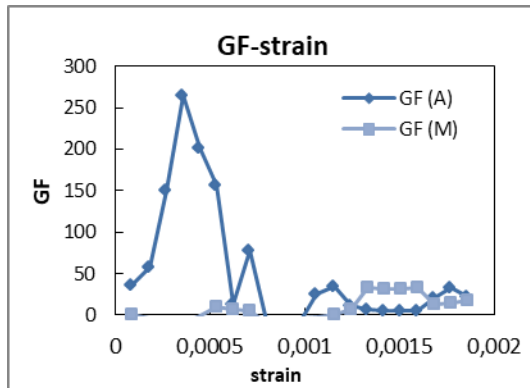
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



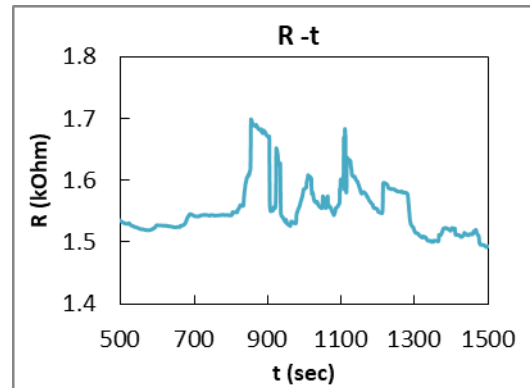
Διάγραμμα 6.28a: R-strain για τον b3s4



Διάγραμμα 6.28b: ΔR/Ro-strain για τον b3s4



Διάγραμμα 6.28c: GF-strain για τον b3s4



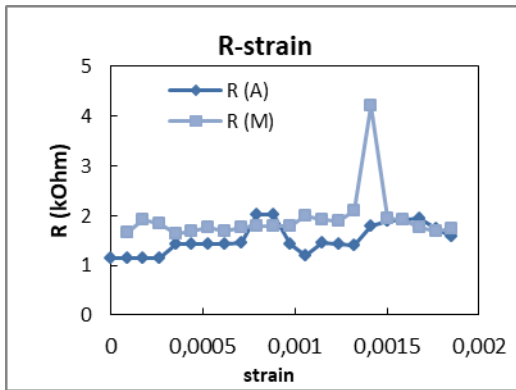
Διάγραμμα 6.28d: R-t για τον b3s4

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Παρόμοια σε έναν βαθμό με τον αισθητήρα b3s2, ο b3s4 έδειξε κανονική συμπεριφορά σε ηρεμία, σε παραμόρφωση όμως παρατηρήθηκαν τυχαίες αυξομειώσεις της αντίστασης, με αποτέλεσμα να μη απεικονίζεται σωστά η μεταβολή της αντίστασης με την παραμόρφωση.

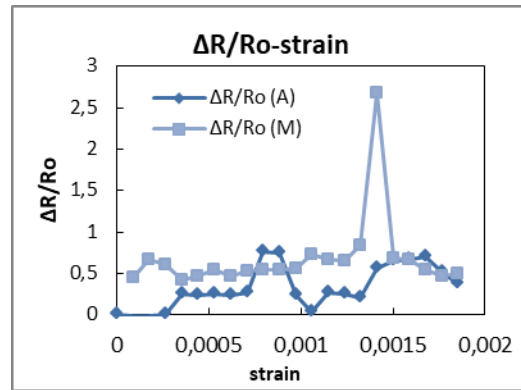
b3s5

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,25 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

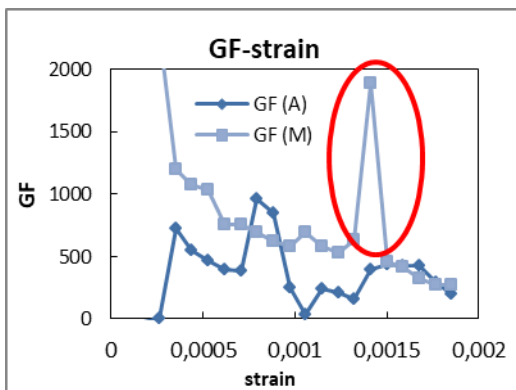
Αποτελέσματα κύκλου παραμόρφωσης:



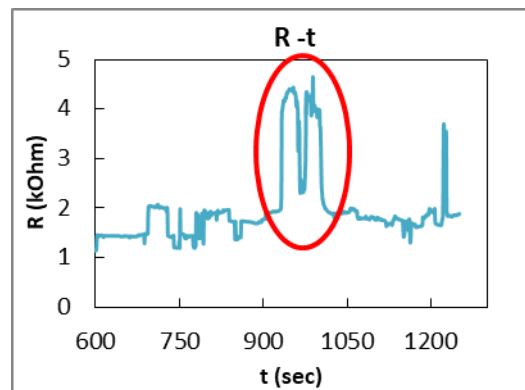
Διάγραμμα 6.29a: R-strain για τον b3s5



Διάγραμμα 6.29b: ΔR/Ro-strain για τον b3s5



Διάγραμμα 6.29c: GF-strain για τον b3s5

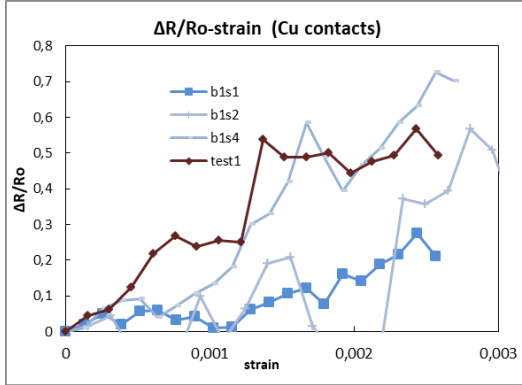


Διάγραμμα 6.29d: R-t για τον b3s5

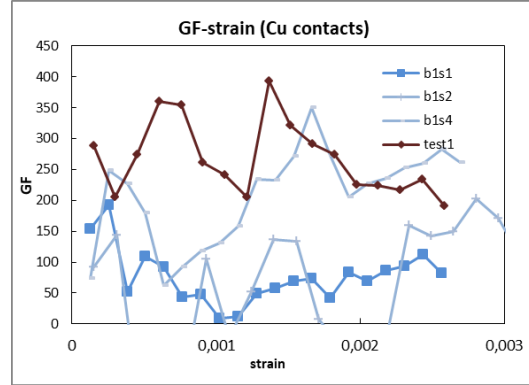
Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Η συμπεριφορά του συγκεκριμένου αισθητήρα, αν και ιδιαίτερη, δεν παρουσίασε καλά αποτελέσματα. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του κύκλου, η αντίσταση έδειξε ανεπηρέαστη από την μεταβολή της παραμόρφωσης, διατηρώντας σχετικά σταθερή τιμή, με εξαίρεση λίγα σημεία όπου παρουσιάστηκαν ξαφνικές κορυφές, χωρίς κάποια πιθανή παρεμβολή στην διάταξη ή τον αισθητήρα από εξωτερικό παράγοντα. Η ευαισθησία του προφανώς δεν είναι ιδανική, όσο για τα φαινόμενα υστέρησης δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα καθώς η μεταβολή της αντίστασης με την παραμόρφωση στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι αντιληπτή.

6.3 Συγκριτικά διαγράμματα

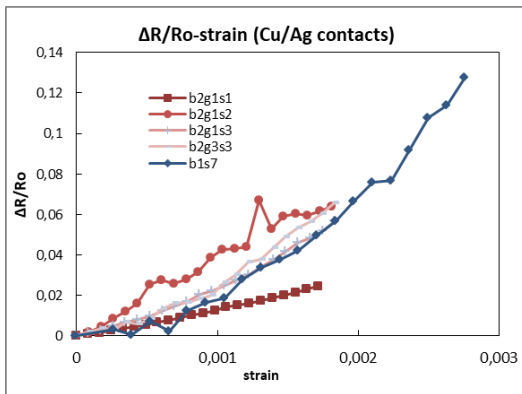
Στα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα οι αισθητήρες με αναλογία base:curing agent 10:1 απεικονίζονται με αποχρώσεις του κόκκινου ενώ αυτοί με αναλογία 30:1 με αποχρώσεις του μπλε.



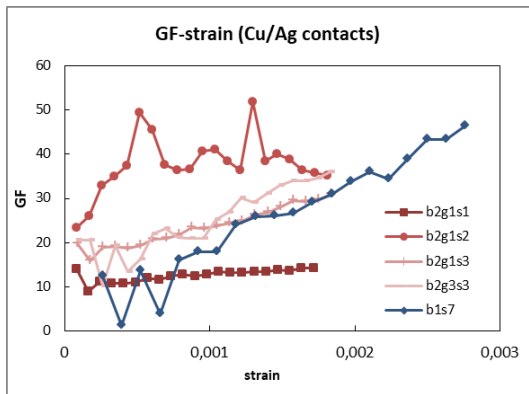
Διάγραμμα 6.30a: $\Delta R/R_o$ αισθητήρων χωρίς paste Ag στις επαφές τους.



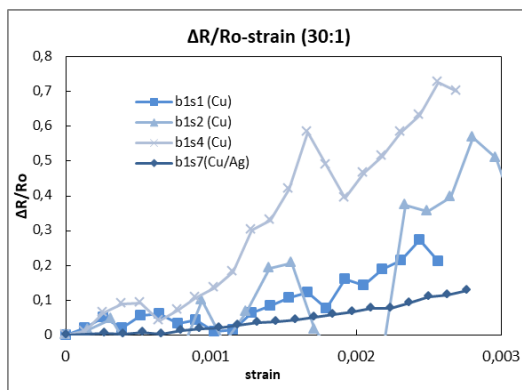
Διάγραμμα 6.30b: GF αισθητήρων χωρίς paste Ag στις επαφές τους.



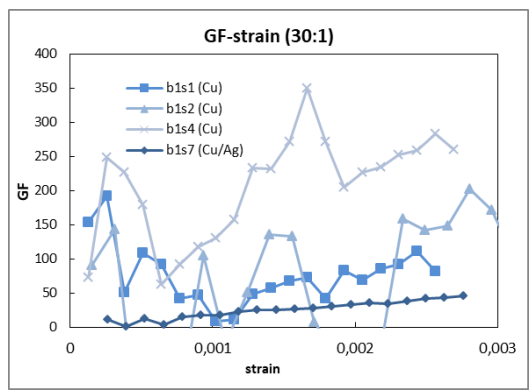
Διάγραμμα 6.31a: $\Delta R/R_o$ αισθητήρων με paste Ag στις επαφές τους.



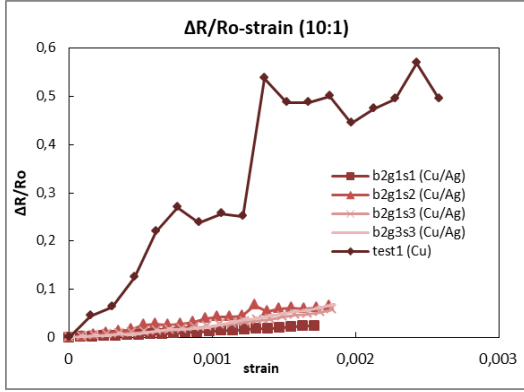
Διάγραμμα 6.31b: GF αισθητήρων με paste Ag στις επαφές τους.



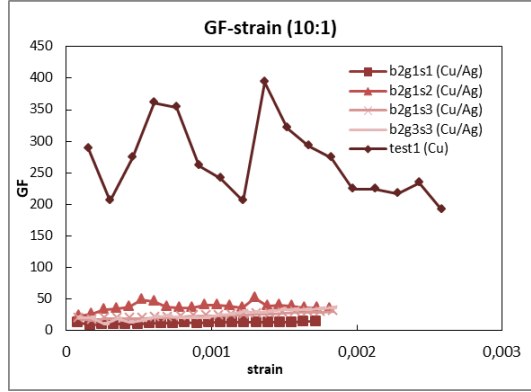
Διάγραμμα 6.32a: $\Delta R/R_o$ αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 30:1.



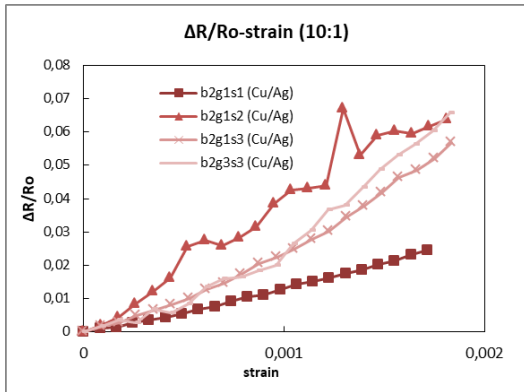
Διάγραμμα 6.32b: GF αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 30:1.



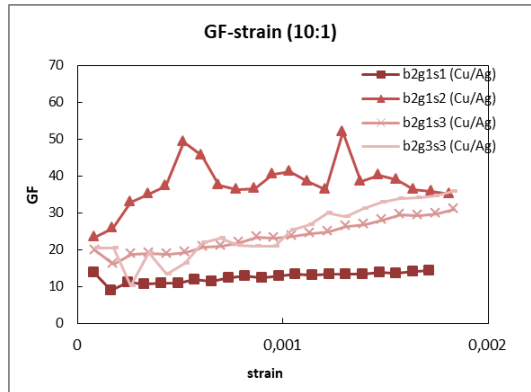
Διάγραμμα 6.33a: ΔR/Ro αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 10:1.



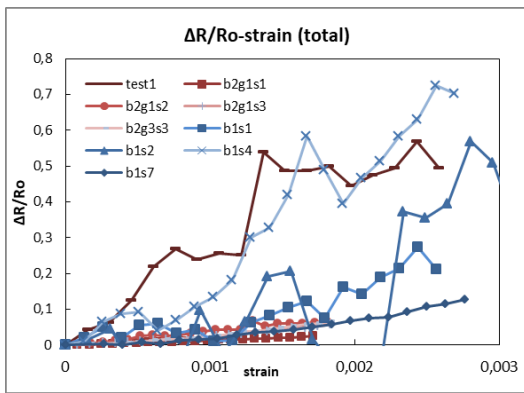
Διάγραμμα 6.33b: GF αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 10:1.



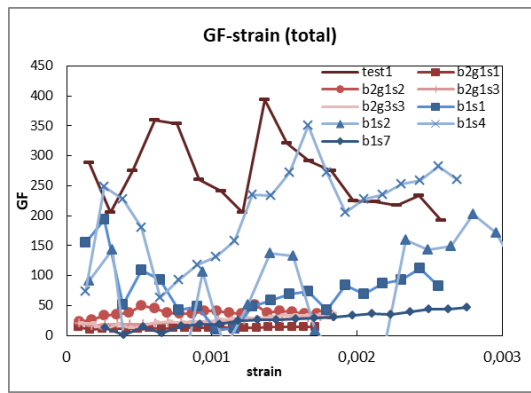
Διάγραμμα 6.33c: ΔR/Ro αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 10:1, χωρίς τον test1.



Διάγραμμα 6.33d: GF αισθητήρων με αναλογία PDMS (base-curing agent) 10:1, χωρίς τον test1.



Διάγραμμα 6.34a: ΔR/Ro όλων των αισθητήρων.



Διάγραμμα 6.34b: GF όλων των αισθητήρων.

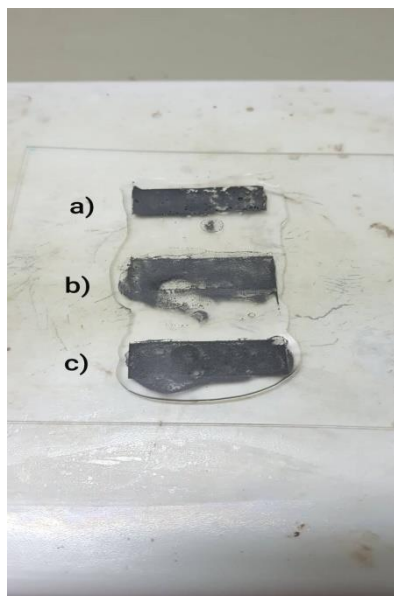
6.4 Αποτελέσματα τροποποιήσεων στην κατασκευή των αισθητήρων

Ως προς τη **μέθοδο κατασκευής** των αισθητήρων, παρατηρήθηκαν τα εξής:

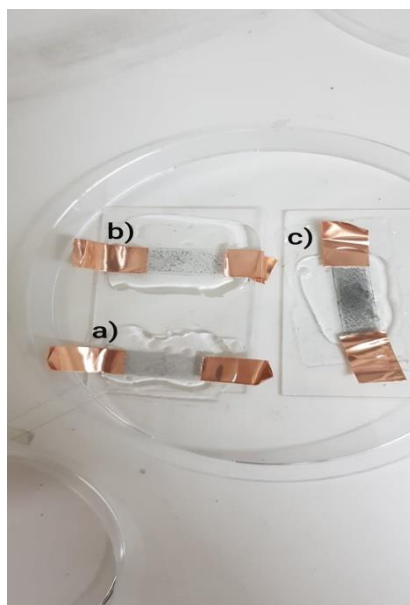
Οι αισθητήρες που αποτελούνται από PDMS με **αναλογία βάσης-curing agent 30:1** (batch 1) δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές με τους 10:1 στο cantilever. Η τοποθέτηση και αφαίρεση των 30:1 στο και από το όργανο ήταν λίγο πιο δύσκολη λόγω της πιο κολλώδους υφής του πολυμερούς σε αυτή την αναλογία, δεν επηρέασε όμως τη διαδικασία τόσο ώστε να απορριφθεί αισθητήρας λόγω αυτού.

Στους αισθητήρες που δεν έχει γίνει προσθήκη paste αργύρου στις **επαφές** μεταξύ GNPs και ταινίας χαλκού (b1s1-6 και ο test1) παρουσιάστηκε θόρυβος και υψηλό μέτρο αντίστασης, σε μερικές περιπτώσεις σε επίπεδο που δεν ήταν εφικτή η σωστή μέτρηση των αισθητήρων (b1s3, b1s5). Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σύρματα χαλκού προσκολλημένα με κασσίτερο στα τμήματα χαλκοταινίας του αισθητήρα (b1s2, b1s8), οι αισθητήρες έδειξαν απρόβλεπτη συμπεριφορά, με αυξομειώσεις της αντίστασης στη μία (b1s2) ανεξάρτητες της παραμόρφωσης που ασκούταν στον αισθητήρα και απόρριψης του άλλου (b1s8) λόγω ανικανότητας του να μετρήσει αντίσταση.

Σχετικά με τους **διαλύτες** των GNPs που χρησιμοποιήθηκαν, στην περίπτωση του batch 2, οι αισθητήρες δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις τους. Κατά το στάδιο της παρασκευής τους όμως τα GNPs απλώθηκαν διαφορετικά στις επιφάνειες ανάλογα με το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε. Στο διάλυμα ισοπροπανόλης-απεσταγμένου απαερωμένου νερού (IPA:DI), τα GNPs κατά την εξάτμιση είχαν την τάση να συσσωρεύονται σε ένα σημείο, συνήθως στο ένα άκρο του πλαισίου που είχαν τοποθετηθεί, τουλάχιστον μέχρις ότου προστεθεί αρκετή ποσότητα ώστε να πληρωθεί το υπόλοιπο της οριοθετημένης επιφάνειας. Το διάλυμα ισοπροπανόλης-αιθανόλης (IPA-EtOH) ήταν πιο δύσκολο, καθώς η κατανομή των GNPs σε αυτό ήταν πιο ανομοιόμορφη και αραιά, με αποτέλεσμα να χρειαστεί παραπάνω ποσότητα του διαλύματος για να υπάρξει ένα σχετικά ομοιόμορφο στρώμα GNPs. Παράλληλα παρατηρήθηκε διάχυση του διαλύματος έξω από τα όρια ταινίας που είχαν τοποθετηθεί, δυσκολεύοντας τη διαδικασία κατασκευής ενός αισθητήρα με σαφείς διαστάσεις. Το τελευταίο πρόβλημα παρουσιάστηκε και στο διάλυμα σκέτης ισοπροπανόλης, με τη διαφορά ότι η κατανομή των GNPs στο διάλυμα ήταν καλύτερη.



Εικόνα 6.10: GNPs που έγιναν dropcasted με διαλύματα a)DI:IPA, b)EtOH:IPA, c)IPA



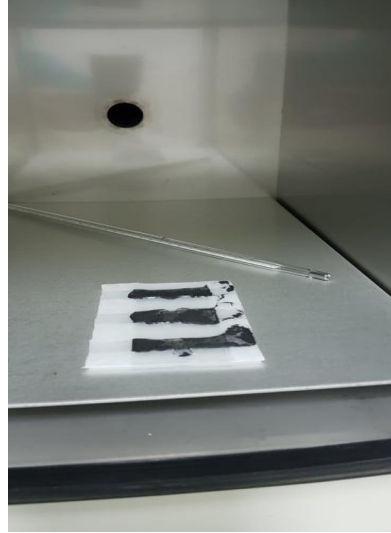
Εικόνα 6.11: αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με τη χρήση διαλυμάτων a)DI:IPA, b)EtOH:IPA, c)IPA

Για τους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με **spincoating** των GNPs και της μίας πλευράς PDMS (batch 2 group 2) παρουσιάστηκαν θέματα κατά το χειρισμό τους αλλά και τη λήψη μετρήσεων. Το λεπτό στρώμα PDMS ήταν ευάλωτο σε φθορές (π.χ. σκίσιμο), ενώ τα GNPs που παρέμειναν μετά το spincoating πιθανόν να μην αρκούσαν για τη δημιουργία ενός δικτύου διέλευσης ρεύματος εντός του αισθητήρα για να μετρηθεί αντίσταση. Για χρήση μεγαλύτερων ποσοτήτων GNPs και PDMS τα παραπάνω λογικά δε θα αποτελούσαν πρόβλημα, αλλά λόγω περιορισμένων ποσοτήτων υλικών αποφεύχθηκε η χρήση τους στους υπόλοιπους αισθητήρες.

Τέλος, κατασκευάστηκαν οι αισθητήρες με τη χρήση κλίβανου για τη βέλτιστη δυνατή θέρμανση των υλικών στα στάδια εξάτμισης του διαλύτη και στο curing του PDMS (batch 3). Ενώ θεωρητικά η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστους αισθητήρες, στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσίασε αρκετά προβλήματα. Κατά την μεταφορά των υλικών-αισθητήρων από και προς τον φούρνο (καθώς το drop-casting των υλικών δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί εκεί) υπήρξαν απώλειες και διάχυση των υλικών, με αποτέλεσμα την καταστροφή της δομής των αισθητήρων που είχε σχεδιαστεί αρχικά. Στις 2 περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε πιο λεπτό φύλλο PMMA σαν βάση (1mm αντί των 2mm που χρησιμοποιήθηκε στους υπόλοιπους αισθητήρες), παρατηρήθηκε κύρτωση του φύλλου λόγω θέρμανσής του, το οποίο χειρότερεψε περαιτέρω τη κατανομή των GNPs στην οριζόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 6.12a: Διάχυση των GNPs εντός του κλίβανου κατά τη μεταφορά τους



Εικόνα 6.12b: Διάχυση των GNPs εντός του κλίβανου κατά τη μεταφορά τους

6.5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων κύκλων παραμόρφωσης

Ακολουθεί ένας συνοπτικός πίνακας με τις βασικές μετρήσεις των αισθητήρων που κατάφεραν να δώσουν λογικά αποτελέσματα.

Όνομα αισθητήρα	Αναλογία PDMS	Paste Ag στις επαφές	Μέση αντίσταση (kOhm)	GF (για 0,2% strain)
b1s1	30:1	-	3170	110
b1s2	30:1	-	6650	59
b1s4	30:1	-	560	215
b1s6	30:1	-	79	78
b1s7	30:1	+	45	41
test1	10:1	-	2320	319
b2g1s1	10:1	+	0,9	13

b2g1s2	10:1	+	4,6	34
b2g1s3	10:1	+	4,7	30
b2g3s3	10:1	+	44	23

Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων κύκλων cantilever

Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που δε χρησιμοποιήθηκε paste αργύρου στις επαφές μεταξύ GNPs και ταινίας χαλκού, η αντίσταση των αισθητήρων είναι μεγαλύτερη (τάξης MOhm για τους περισσότερους αισθητήρες χωρίς paste Ag, kOhm για τους αισθητήρες με paste). Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες με paste Ag παρουσιάζουν ελάχιστο θόρυβο, όπου η μεταβολή της αντίστασης με την παραμόρφωση επισκιάζεται από αυτόν μονάχα σε περιπτώσεις που θεωρήθηκε πως υπήρξε κάποιο σφάλμα κατά την κατασκευή τους. Παρουσίασαν όμως μία σταθερή μείωση της αντίστασης τους με τον χρόνο (drift) η οποία πιθανόν να οφείλεται στη θέρμανση της πάστας κατά τη διάρκεια της μέτρησης ή στη μετρητική διάταξη. Η υστέρηση των αισθητήρων με paste αργύρου είναι χαμηλή, τμήμα της οποίας οφείλεται στο drift που αναφέρθηκε παραπάνω, σε αντίθεση με τους αισθητήρες χωρίς paste, όπου τα φαινόμενα υστέρησης δεν είναι καν διακριτά από τις καμπύλες $\Delta R/R_0$ λόγω του θορύβου και του αργού χρόνου επαναφοράς που παρατηρείται σε αυτούς. Το GF είναι μεγαλύτερο στους αισθητήρες χωρίς paste αργύρου στις επαφές (μέσο GF για 0,2% strain σε Cu:156, σε Cu/Ag: 28), του οποίου η τιμή όμως αλλάζει ραγδαία με την μεταβολή της παραμόρφωσης. Η υψηλή τιμή του GF όταν δεν υπάρχει ο άργυρος πιθανόν να οφείλεται σε μεταβολές της αντίστασης των επαφών λόγω της παραμόρφωσης.

Από την αναλογία βάσης-curing agent του PDMS δε μπορεί να προκύψει κάποιο συμπέρασμα ως προς το R και το GF, καθώς είναι μικρός ο αριθμός των αισθητήρων με πάστα αργύρου και αναλογία 30:1 για να ολοκληρωθεί η μελέτη, ενώ τα υπάρχοντα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους (b1s7 με batch 2 και test1 με τους υπόλοιπους του batch 1).

7. Κύκλοι για διαφορετικά είδη παραμορφώσεων

Από το προηγούμενο κεφάλαιο, έχει προκύψει το γενικό συμπέρασμα πως οι αισθητήρες με paste αργύρου στις επαφές μεταξύ GNPs και ταινίας χαλκού παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά, με χαμηλή αντίσταση, υστέρηση, μεγαλύτερη επαναληψιμότητα και πιο γρήγορη επαναφορά από τους αισθητήρες δίχως paste αργύρου. Επειδή όμως, εκτός από τη διαφορά στις επαφές, υπάρχει και η διαφορά στην αναλογία βάσης και curing agent του PDMS των αισθητήρων, το οποίο σαν ελαστομερές επηρεάζει και αυτό την υστέρηση και τον χρόνο επαναφοράς του, χρειάζονται παραπάνω μετρήσεις για την εξακρίβωση της πιο κατάλληλης μεθόδου κατασκευής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω μετρήσεις για τους αισθητήρες b1s7, b2g1s1, b2g1s2 και b2g1s3 όπου η κύρια διαφορά των αισθητήρων είναι η αναλογία βάσης-curing agent του PDMS (30:1 ο b1s7 και 10:1 οι υπόλοιποι).

Οι πρόσθετες αυτές μετρήσεις χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Η 1^η αφορά την δυναμική παραμόρφωση των αισθητήρων μέσω επιμήκυνσής του για υψηλή παραμόρφωση (από 0 σε 20% του μήκους τους). Η 2^η πραγματοποιείται για μικρή μέγιστη παραμόρφωση του αισθητήρα, όπως στην περίπτωση του χαρακτηρισμού τους που αναφέρεται σε παραπάνω κεφάλαιο (0,2% παραμόρφωση ως προς το μήκος), με τη σημαντική διαφορά ότι η αύξηση και μείωση της αντίστασης γίνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα (30 δευτερόλεπτα με 1 λεπτό έναντι των 10-15 λεπτών που διαρκούσε ο χαρακτηρισμός τους). Στόχος αυτών των μετρήσεων πέρα της σύγκρισης των διαφορετικών μεθόδων κατασκευής, είναι και η μελέτη τους ως προς την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε ταχείς και διαφορετικές σε μέγεθος αλλαγές στη δομή τους.

7.1 Πειραματική Διαδικασία

Για τη δυναμική παραμόρφωση των αισθητήρων κατά 20% του μήκους τους χρησιμοποιήθηκε η συσκευή «Tension». Η συσκευή αυτή δίνει τη δυνατότητα για την ακριβή παραμόρφωση ενός δείγματος και τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του, μέσω επιμήκυνσής του με σταθερή ταχύτητα και άμεση εναλλαγή μεταξύ επιμήκυνσης και χαλάρωσής του. Αποτελείται από δύο σημεία στήριξης για το δείγμα κάθετα στο έδαφος, έναν μηχανισμό που επιτρέπει την κίνηση του κάτω σημείου στήριξης πάνω ή κάτω, ανάλογα με την επιθυμητή παραμόρφωση με το πάνω σημείο στήριξης να παραμένει σταθερό, μία ένδειξη για το μήκος του δείγματος το οποίο υπολογίζεται από την απόσταση των 2 σημείων στήριξης μεταξύ τους (για μηδενική απόσταση των 2 σημείων στήριξης, τα δύο είναι σε επαφή) και ένα σύστημα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω του οποίου γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων και η ρύθμιση των παραμέτρων της συσκευής (π.χ. ταχύτητα δυναμοκυψέλης). Το

«Tensilon» καταγράφει τη δύναμη με την οποία επιμηκύνεται το δείγμα, καθώς και το μήκος του δείγματος κατά την αντίστοιχη καταπόνηση. Μέσω αυτών σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του δείγματος (αρχικό μήκος, πάχος, πλάτος), υπολογίζεται το μέτρο Young του δείγματος για την αντίστοιχη παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, η σχέση είναι:

$$Y = \frac{F}{(h * w)}$$

όπου Y το μέτρο Young, F η δύναμη που ασκείται στο δείγμα, h και w το πάχος και πλάτος του αισθητήρα αντίστοιχα.

Η παραμόρφωση του δείγματος προκύπτει από τη σχέση $\frac{L-L_0}{L_0}$, όπου L_0 το αρχικό μήκος του δείγματος και L το μήκος του δείγματος κατά την παραμόρφωση.

Σημείωση: Η συσκευή «Tensilon» χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μέτρου Young του PDMS για διαφορετικές αναλογίες βάσης-curing agent (30:1 και 10:1). Το μέσο μέτρο Young που προέκυψε για κάθε περίπτωση είναι 1640 ± 90 kPA για δείγματα PDMS 10:1 και 130 ± 20 kPA για δείγματα PDMS 30:1. Οι μετρήσεις των δειγμάτων αναγράφονται στο Παράρτημα.

Για τη μέτρηση της αντίστασης ενός αισθητήρα χρησιμοποιείται πολύμετρο με ταυτόχρονη καταγραφή των τιμών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το πολύμετρο είναι παράλληλα συνδεδεμένο με τη συσκευή «Tensilon» με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η ταυτόχρονη μέτρηση της αντίστασης και της παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στη εικόνα 7.1. Η ταχύτητα παραμόρφωσης τέθηκε στα 20mm/min και για κάθε αισθητήρα πραγματοποιήθηκαν διαδοχικοί κύκλοι μέγιστης και ελάχιστης παραμόρφωσης για να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και της συμπεριφοράς του αισθητήρα. Στα διαγράμματα αντίστασης-χρόνου που ακολουθούν σημειώνονται τα μέγιστα και ελάχιστα σημεία παραμόρφωσης του κάθε αισθητήρα (20 και 0% αντίστοιχα).



Εικόνα 7.1: Συσκευή «Tensilon»

Για την γρήγορη παραμόρφωση των αισθητήρων κατά 0,2% χρησιμοποιείται το όργανο «cantilever» που χρησιμοποιήθηκε και για τον αρχικό χαρακτηρισμό τους, η περιγραφή του οποίου αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.1.

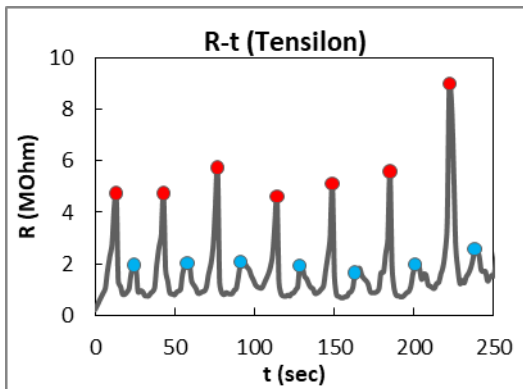
Για τον υπολογισμό του GF και για τα δύο είδη παραμορφώσεων λαμβάνεται υπόψιν μόνο η μέγιστη παραμόρφωση στην κάθε περίπτωση, και ο υπολογισμός γίνεται αντίστοιχα με προηγούμενα κεφάλαια. Να σημειωθεί ότι το αρχικό μήκος του αισθητήρα στο «Tensilon» μπορεί να διαφέρει ελάχιστα από το μήκος του αισθητήρα που μετρήθηκε στο cantilever, καθώς στο «Tensilon» η παραμόρφωση γίνεται μέσω επιμήκυνσης του αισθητήρα και όχι κάμψης του, όπου το αρχικό μήκος μετράται από το όργανο με ακρίβεια 0,01mm.

7.2 Αποτελέσματα για κάθε αισθητήρα

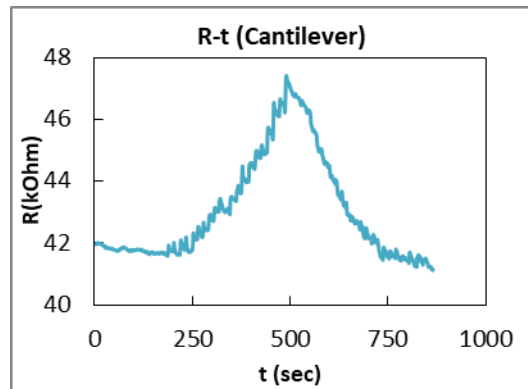
b1s7:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα στη συσκευή Tensilon:** 1,885cm .
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία paste αργύρου μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

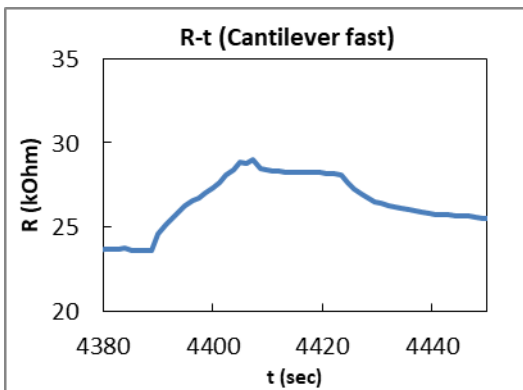
Αποτελέσματα διαφορετικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 7.1a: R-t για τον b1s7 για διαδοχικούς κύκλους στη συσκευή «Tensilon».



Διάγραμμα 7.1b: R-t για τον b1s7 για «αργό» κύκλο σε «Cantilever».



Διάγραμμα 7.1c: R-t για τον b1s7 για «γρήγορο» κύκλο σε «Cantilever».

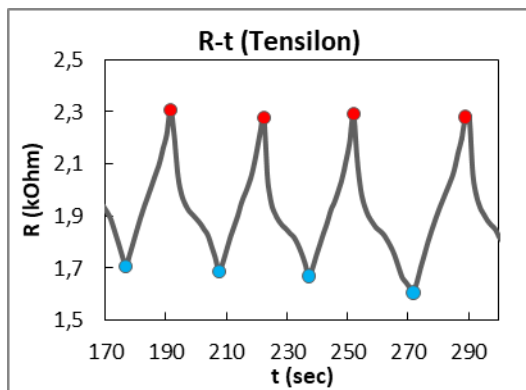
Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Από το διάγραμμα «Tensilon» παρατηρείται ότι για μηδενική παραμόρφωση του αισθητήρα η αντίσταση δεν είναι η ελάχιστη δυνατή, αλλά παρουσιάζει μία αύξηση λίγο πριν φτάσει σε χαλάρωση. Αυτό θεωρείται ότι οφείλεται

σε κακή επαναφορά του αισθητήρα και επαληθεύεται από τον γρήγορο κύκλο στο cantilever που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 7.1c. Αντίστοιχα και άλλοι αισθητήρες με την ίδια αναλογία βάσης-curing agent PDMS κατά τις μετρήσεις τους στο cantilever έδειξαν υστέρηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του γρήγορου κύκλου στη δοκό δεν καταμετρήθηκε μέγιστη παραμόρφωση όπως στους επόμενους αισθητήρες (0,2% του μήκους τους), γι' αυτό το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι για την υστέρηση και τον χρόνο επαναφοράς του αισθητήρα.

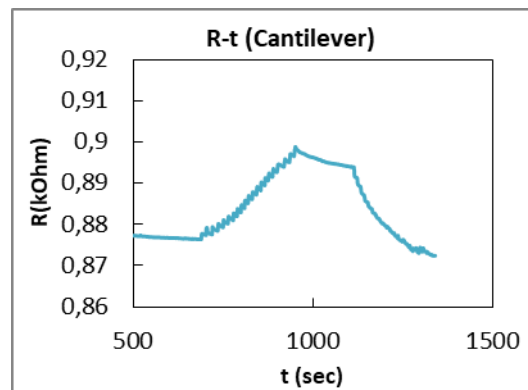
b2g1s1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα στη συσκευή Tensilon:** 2,947 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου μεταξύ GNPs** και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

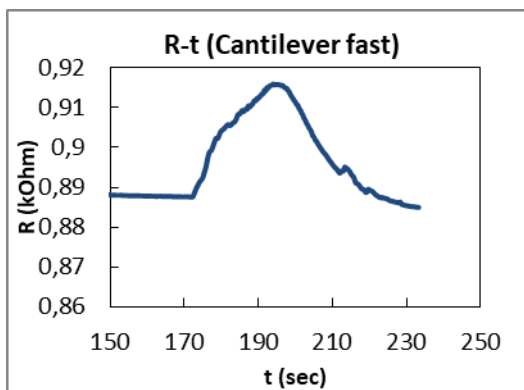
Αποτελέσματα διαφορετικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 7.2a: R-t για τον b2g1s1 για διαδοχικούς κύκλους στη συσκευή «Tensilon».



Διάγραμμα 7.2b: R-t για τον b2g1s1 για «αργό» κύκλο σε «Cantilever».



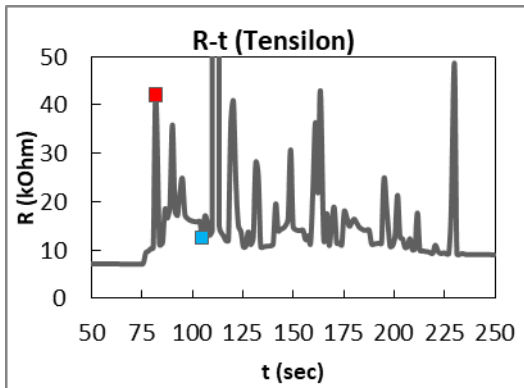
Διάγραμμα 7.2c: R-t για τον b2g1s1 για «γρήγορο» κύκλο σε «Cantilever».

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Και στις 3 μετρήσεις ο αισθητήρας έδειξε πολύ καλή συμπεριφορά, με μικρή υστέρηση, λογικές μεταβολές της αντίστασης με την παραμόρφωση (τα μέγιστα και τα ελάχιστα σημεία αντίστασης στα διαγράμματα ταυτίζονται με τα μέγιστα και ελάχιστα σημεία παραμόρφωσης στα όργανα) και γρήγορους χρόνους επαναφοράς. Στην περίπτωση του tensilon παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα ως προς τους κύκλους του, ενώ στα διαγράμματα από το cantilever οι καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά (αγνοώντας το drift και το σημείο στον αργό κύκλο που ο αισθητήρας έμεινε για ένα χρονικό διάστημα σε μέγιστη παραμόρφωση, όπως αναφέρεται σε παραπάνω κεφάλαιο με τις μετρήσεις cantilever κάθε αισθητήρα).

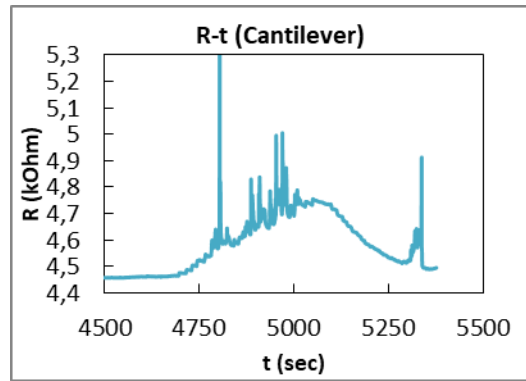
b2g1s2:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/αιθανόλη (IPA:EtOH) αναλογίας 1:1.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα στη συσκευή Tensilon:** 2,97 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου μεταξύ GNPs** και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

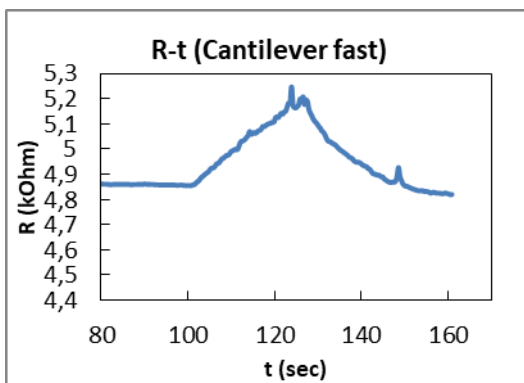
Αποτελέσματα διαφορετικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 7.3a: R-t για τον b2g1s2 για διαδοχικούς κύκλους στη συσκευή «Tensilon».



Διάγραμμα 7.3b: R-t για τον b2g1s2 για «αργό» κύκλο σε «Cantilever».



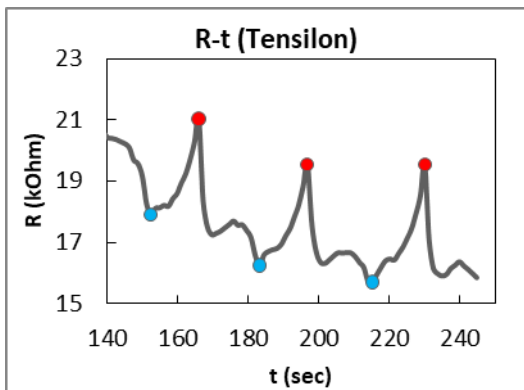
Διάγραμμα 7.3c: R-t για τον b2g1s2 για «γρήγορο» κύκλο σε «Cantilever».

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: Κατά τις μετρήσεις στο tensilon ο αισθητήρας παρουσίασε έντονο θόρυβο, ο οποίος έθεσε τη ταύτιση μέγιστης και ελάχιστης παραμόρφωσης με τις αντίστοιχες τιμές της αντίστασης στο διάγραμμα αδύνατη (Έχουν σημειωθεί δύο τιμές για τις οποίες εκτιμήθηκε η αντίσταση αρκετά κοντά με τη μέγιστη και την ελάχιστη παραμόρφωση αντίστοιχα). Για το λόγο αυτό, δεν υπολογίστηκε κάποια τιμή του GF, καθώς θεωρήθηκε πως το αποτέλεσμα δε θα ήταν αντιπροσωπευτικό των μεταβολών. Στις μετρήσεις στο cantilever ο αισθητήρας έδειξε καλύτερη συμπεριφορά, πιθανόν λόγω της χαμηλότερης μέγιστης παραμόρφωσης που του ασκούσαν (0,2% max strain στο cantilever, 20% στο tensilon), με χαμηλή υστέρηση, αλλά με μερικές παρεμβολές θορύβου σε αυτόν.

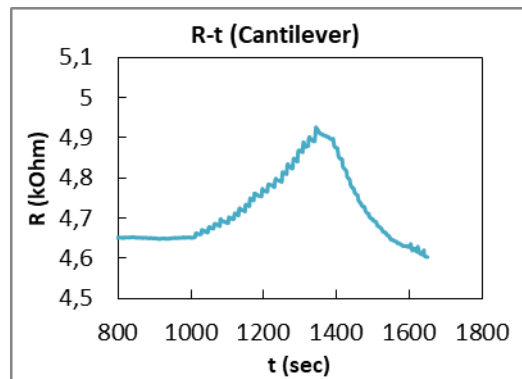
b2g1s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλης.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα στη συσκευή tensilon:** 2,72 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου μεταξύ GNPs** και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

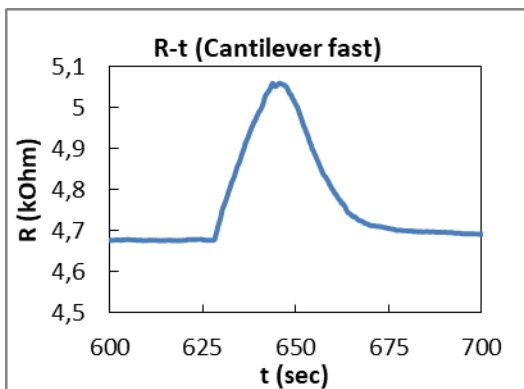
Αποτελέσματα διαφορετικών μετρήσεων:



Διάγραμμα 7.4a: R-t για τον b2g1s3 για διαδοχικούς κύκλους στη συσκευή «Tensilon».



Διάγραμμα 7.4b: R-t για τον b2g1s3 για «αργό» κύκλο σε «Cantilever».



Διάγραμμα 7.4c: R-t για τον b2g1s3 για «γρήγορο» κύκλο σε «Cantilever».

Παρατηρήσεις για τον αισθητήρα: ο αισθητήρας έδειξε καλή συμπεριφορά, με διακριτά μέγιστα και ελάχιστα στο tensilon για τις αντίστοιχες παραμορφώσεις, σχετικά χαμηλή υστέρηση, και ελάχιστη έως μηδαμινή παρουσία θορύβου. Το «drift» είναι πολύ πιο έντονο στην περίπτωση του tensilon σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες αλλά και με τα αποτελέσματα του cantilever, το οποίο είναι εμφανές από τη μείωση της αντίστασης σε μηδενική παραμόρφωση.

7.3 Συγκριτικός πίνακας

Αισθητήρας (αναλογία PDMS)	Αντίσταση cantilever, slow, 0,2% strain (kOhm)	Αντίσταση cantilever fast, 0,2% strain (kOhm)	Αντίσταση tensilon, 20% strain (kOhm)	GF cantilever slow, 0,2%	GF cantilever fast, 0,2%	GF tensilon , 20%
b1s7 (30:1)	50,50	-	5.000,0	52,0	-	7,1
b2g1s1 (10:1)	0,88	0,92	2,3	13,0	18,6	1,7
b2g1s2 (10:1)	4,6	5,25	540	34,3	44,5	-
b2g1s3 (10:1)	4,74	5,06	28,0	30,1	39,0	1,0

Πίνακας 7.1: Μέτρα αντίστασης και ευαισθησίας αισθητήρων για διαφορετικούς τρόπους λήψης μετρήσεων

7.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Ο αισθητήρας με PDMS με αναλογία βάσης-curing agent 30:1 (b1s7) έδειξε μεγαλύτερη υστέρηση, μεγάλη αύξηση της αντίστασης (5 MOhm από 50 kOhm αρχική αντίσταση) και χειρότερη επαναφορά από τους 10:1 σε διαδοχικές καταπονήσεις (παραμόρφωση κατά 20% του μήκους του), καθώς και υψηλότερη υστέρηση σε μικρότερες (0,2% του μήκους του). Παράλληλα, στην περίπτωση του 30:1 παρατηρήθηκε πιθανή υπερβατική συμπεριφορά της αντίστασης κατά την επαναφορά (overshoot) στο tensilon, καθώς η αντίσταση αισθητήρα παρουσιάζει μία ξαφνική αύξηση κατά τη μείωση της

παραμόρφωσης. Από τους 3 αισθητήρες με την ίδια αναλογία PDMS, ο αισθητήρας του οποίου τα GNPs βρισκόντουσαν σε διάλυμα νερού-ισοπροπανόλης (b2g1s1) έδειξε σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά ως προς το θόρυβο, την υστέρηση, την επαναφορά και το drift σε σύγκριση με τους αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με τα GNPs σε διαλύματα αιθανόλης-ισοπροπανόλης και σκέτης ισοπροπανόλης (b2g1s2 και b2g1s3 αντίστοιχα). Αυτό πιθανόν οφείλεται στη διαφορετική κατανομή των GNPs κατά τη κατασκευή των αισθητήρων για κάθε διάλυμα (βλ. κεφάλαιο «Αποτελέσματα στην κατασκευή αισθητήρων»). Παρόλα αυτά, και οι 3 αισθητήρες έδειξαν κοντινά GF και αντιστάσεις στις μετρήσεις του, με εξαίρεση να αποτελεί ο b2g1s2 στις μετρήσεις του στο tensilon, όπου η μεταβολή της αντίστασης λόγω θορύβου δυσκόλεψε τον υπολογισμό του GF. Παρατηρείται ακόμη ότι το GF των αισθητήρων είναι μικρότερο για παραμόρφωση 20% από ότι για 0,2%, το οποίο έχει ξαναπαρατηρηθεί..

8. Εξάρτηση αντίστασης αισθητήρων με θερμοκρασία

8.1 Πειραματική διαδικασία

Στους αισθητήρες που θεωρήθηκε η συμπεριφορά τους επαναλήψιμη και τα αποτελέσματα της ευαισθησίας ήταν εντός λογικών πλαισίων, εξετάσθηκε η μεταβολή στην αντίσταση τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο κάθε αισθητήρας τοποθετήθηκε σε μία πλάκα θέρμανσης, συνδεδεμένος παράλληλα με ένα πολύμετρο και ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των μετρήσεων. Εκτός από την ένδειξη της πλάκας για τη θερμοκρασία, γινόταν παράλληλη καταγραφή με θερμοστοιχείο για την επιβεβαίωση της θερμοκρασίας με την οποία θερμαίνεται ο αισθητήρας (η πλάκα παρουσίαζε διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα, όλοι οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο κέντρο της πλάκας, όπου σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις οι ενδείξεις της πλάκας και του θερμοστοιχείου για τη θερμοκρασία ταυτίζονταν). Πάνω από κάθε αισθητήρα τοποθετήθηκε ένα φύλλο PMMA ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε κίνηση του αισθητήρα κατά τη θέρμανση του αισθητήρα (παρουσιάστηκε τέτοιο θέμα σε αρχικές μετρήσεις, οι οποίες απορρίφθηκαν).



Εικόνα 8.1: Θέρμανση αισθητήρα σε πλάκα.

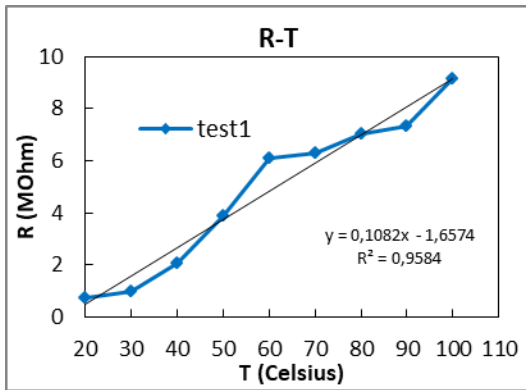
Ξεκινώντας από θερμοκρασία δωματίου και ανεβαίνοντας 10°C ανά μέτρηση μέχρι τους 100°C , οι αισθητήρες έμεναν για ένα μικρό χρονικό διάστημα σε αυτή τη θερμοκρασία (περίπου 10 δευτερόλεπτα από τη στιγμή που το θερμοστοιχείο έδειχνε τη θερμοκρασία που τέθηκε στην πλάκα) και έπειτα λαμβανόταν η μέτρηση από το πολύμετρο. Από το λόγο της αντίστασης προς την αντίστοιχη θερμοκρασία (R/T) και το $\Delta R/(R_0 * T)$, οι τιμές των οποίων αναγράφονται στα διαγράμματα που ακολουθούν, εξετάστηκαν οι διαφορετικοί κατασκευαστικοί παράμετροι κάθε αισθητήρα (επαφές, αναλογία base-curing agent PDMS).

8.2 Αποτελέσματα ανά αισθητήρα

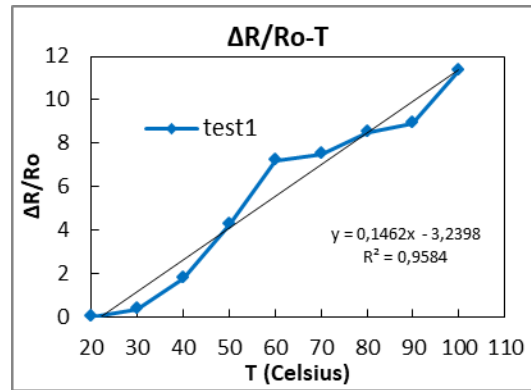
test1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό (IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,2 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu

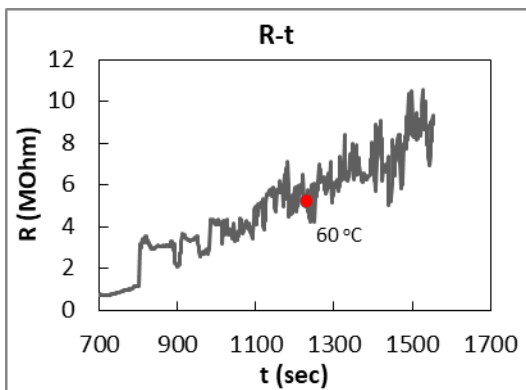
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



Διάγραμμα 8.1a: R-T για τον test1.



Διάγραμμα 8.1b: ΔR/Ro-T για τον test1.

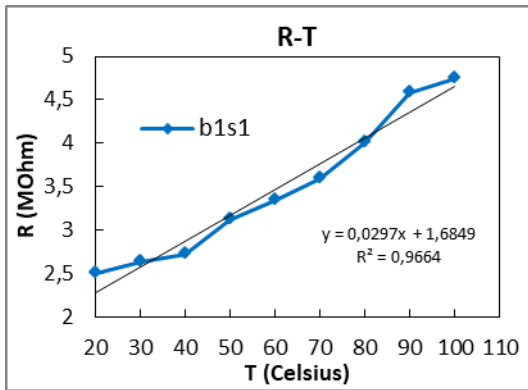


Διάγραμμα 8.1c: R-t για τον test1 κατά τη διάρκεια θέρμανσης.

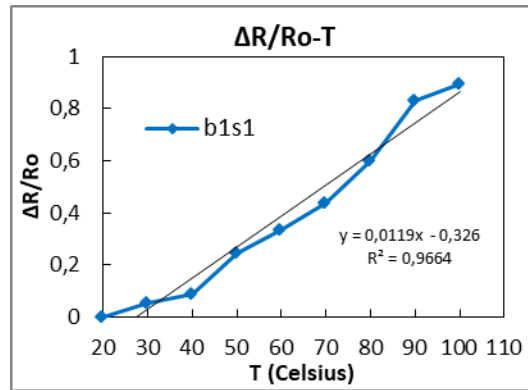
b1s1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

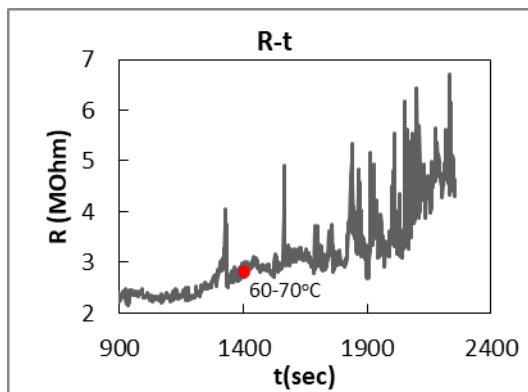
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



Διάγραμμα 8.2a: R-T για τον b1s1.



Διάγραμμα 8.2b: ΔR/Ro-T για τον b1s1.

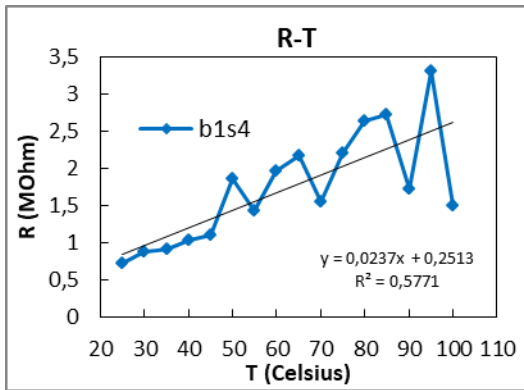


Διάγραμμα 8.2c: R-t για τον b1s1 κατά τη διάρκεια θέρμανσης.

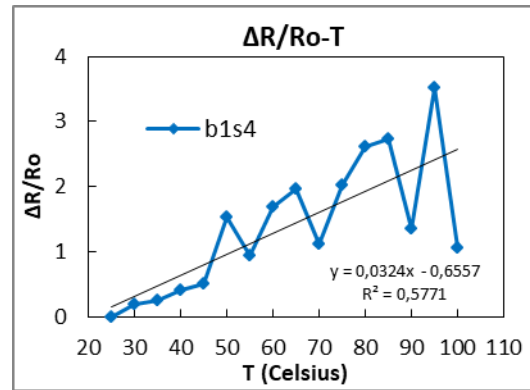
b1s4:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,5 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu.

Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



Διάγραμμα 8.3a: R-T για τον b1s4.



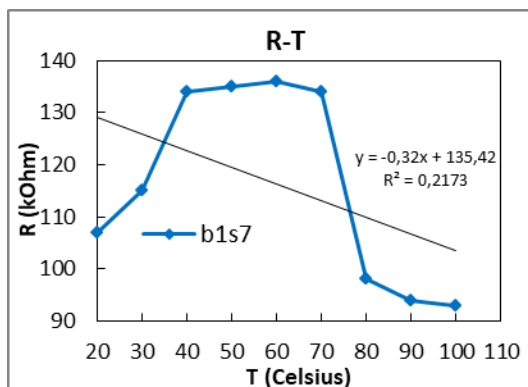
Διάγραμμα 8.3b: ΔR/Ro-T για τον b1s4.

Υποσημείωση: Κατά τις μετρήσεις του αισθητήρα δεν υπήρχε διαθέσιμος υπολογιστής για να καταγραφεί και με αυτόν τον τρόπο η μεταβολή της αντίστασης. Η καταγραφή της θερμοκρασίας έγινε ανά 5°C σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες (10°C).

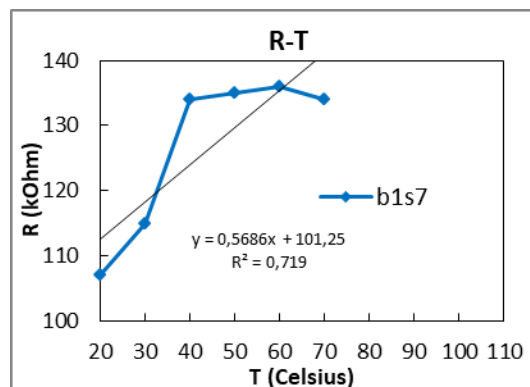
b1s7:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό (IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 30:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 1,5 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας.

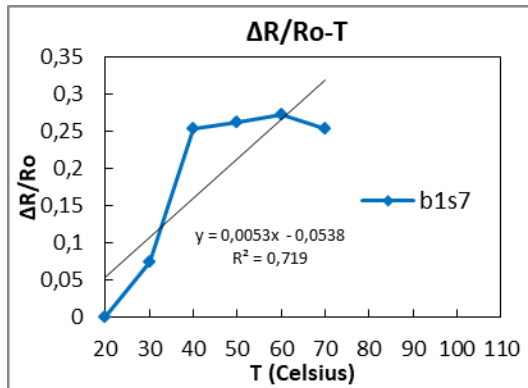
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



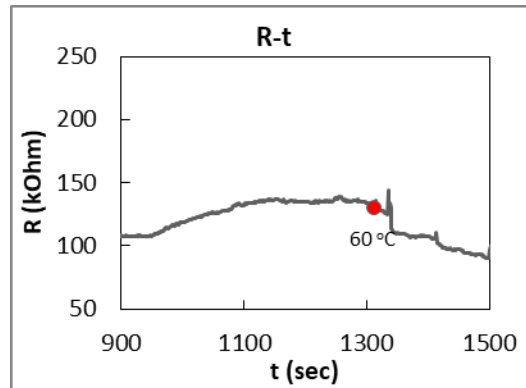
Διάγραμμα 8.4a: R-T για τον b1s7.



Διάγραμμα 8.4b: R-T για τον b1s7.



Διάγραμμα 8.4c: ΔR/Ro-T για τον b1s7.



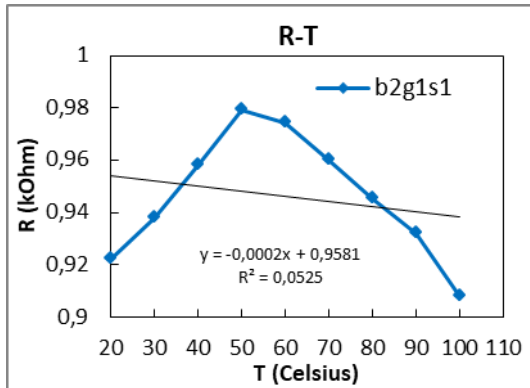
Διάγραμμα 8.4d: R-t για τον b1s7.

Υποσημείωση: Επειδή ο αισθητήρας έδειξε μείωση της αντίστασης μετά από μία θερμοκρασία, για τον υπολογισμό των συντελεστών R/T και ΔR/Ro/T χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία όπου η καμπύλη παρουσιάζει αύξηση της αντίστασης με την θερμοκρασία.

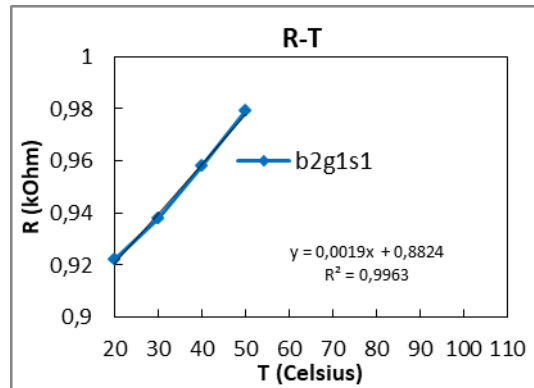
b2g1s1:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα ισοπροπανόλη/ απεσταγμένο απαερωμένο (degassed) νερό(IPA:DI) αναλογίας 3:7.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,9 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

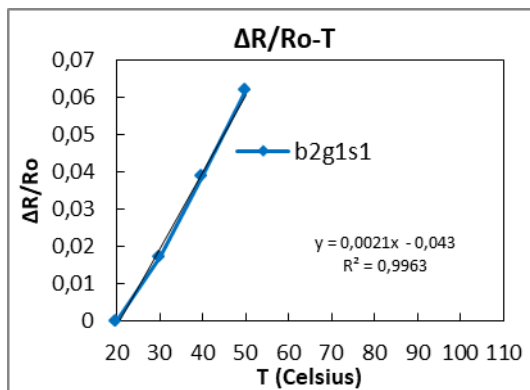
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



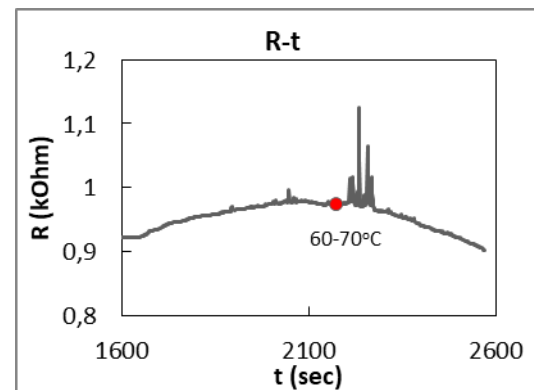
Διάγραμμα 8.5a: R-T για τον b2g1s1.



Διάγραμμα 8.5b: R-T για τον b2g1s1.



Διάγραμμα 8.5c: ΔR/Ro-T για τον b2g1s1.



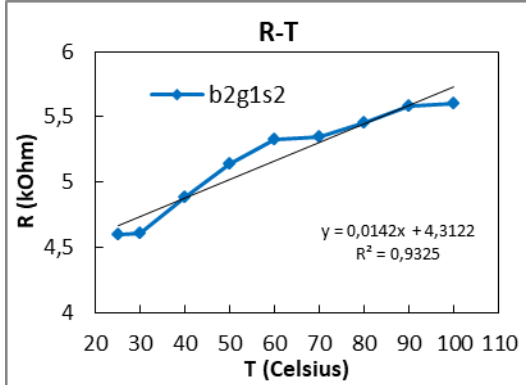
Διάγραμμα 8.5d: R-t για τον b2g1s1.

Υποσημείωση: Επειδή ο αισθητήρας έδειξε μείωση της αντίστασης μετά από μία θερμοκρασία, για τον υπολογισμό των συντελεστών R/T και ΔR/Ro/T χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία όπου η καμπύλη παρουσιάζει αύξηση της αντίστασης με την θερμοκρασία.

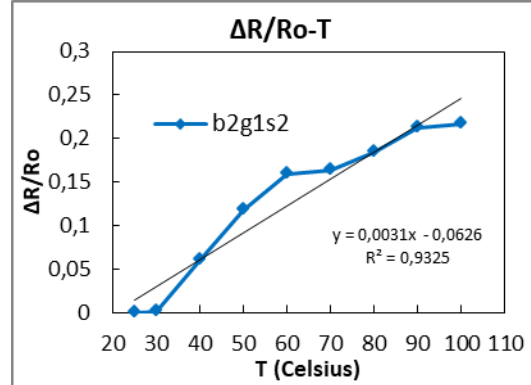
b2g1s2:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα 10ml ισοπροπανόλης/αιθανόλης (IPA:EtOH) αναλογίας 5:5.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,9 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

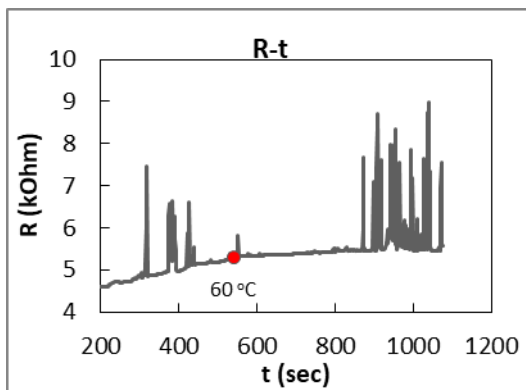
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



Διάγραμμα 8.6a: R-T για τον b2g1s2.



Διάγραμμα 8.6b: ΔR/Ro-T για τον b2g1s2.

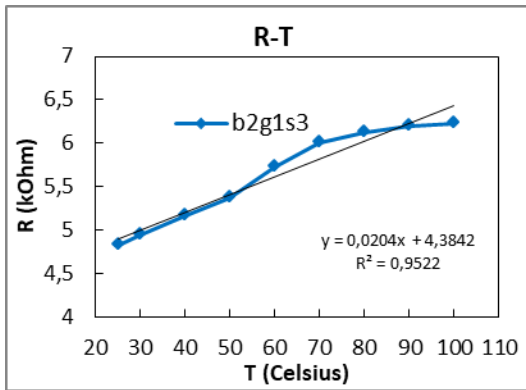


Διάγραμμα 8.7c: R-t για τον b2g1s2 κατά τη διάρκεια θέρμανσης.

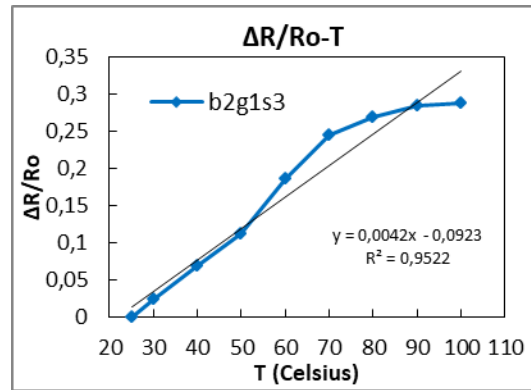
b2g1s3:

- **Αγώγιμο στρώμα:** GNPs 0,2% w/v σε διάλυμα 10ml ισοπροπανόλης.
- **Ελαστικό στρώμα:** PDMS σε αναλογία βάσης/curing agent 10:1.
- **Μήκος αισθητήρα:** 2,65 cm.
- **Επαφές:** Ταινία Cu, παρουσία **paste αργύρου** μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας (στο paste αργύρου προστέθηκε PGMA λόγω εξάτμισης της προϋπάρχουσας ποσότητας).

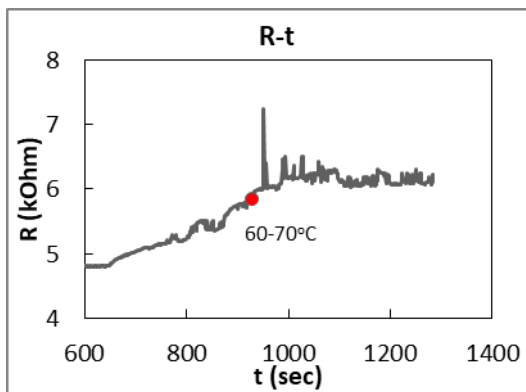
Αποτελέσματα θέρμανσης αισθητήρα:



Διάγραμμα 8.8a: R-T για τον b2g1s3.

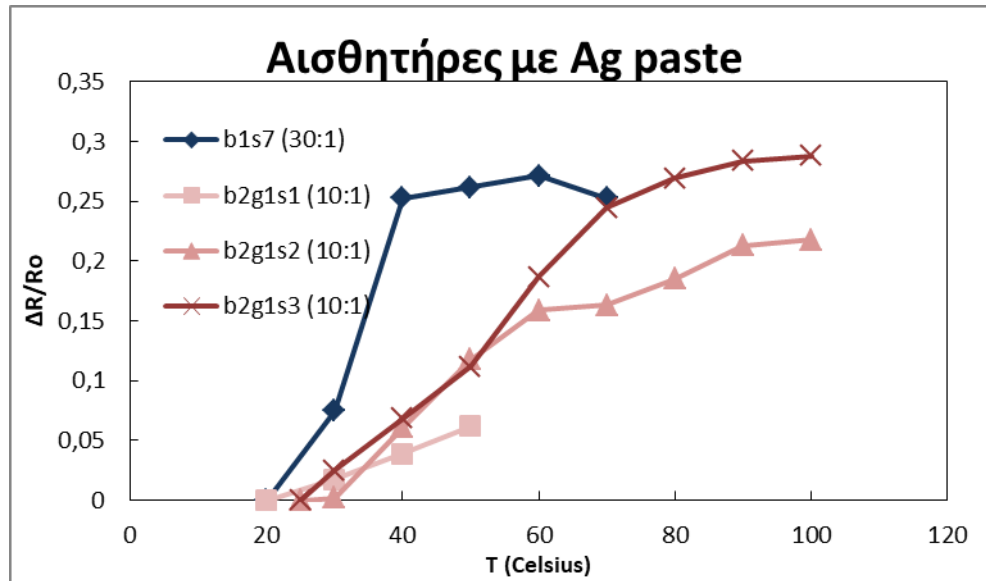


Διάγραμμα 8.8b: ΔR/Ro-T για τον b2g1s3.

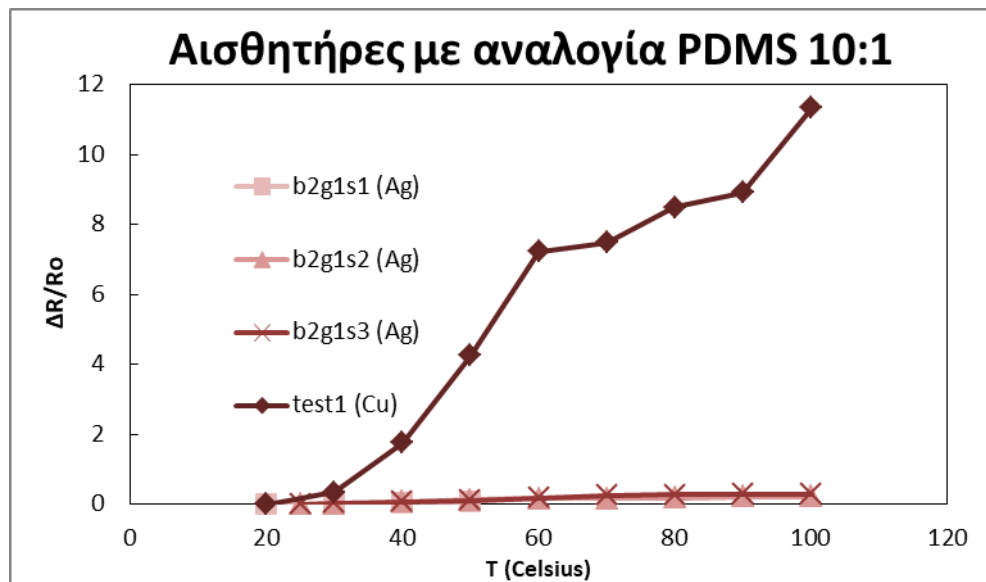


Διάγραμμα 8.8c: R-t για τον b2g1s3 κατά τη διάρκεια θέρμανσης.

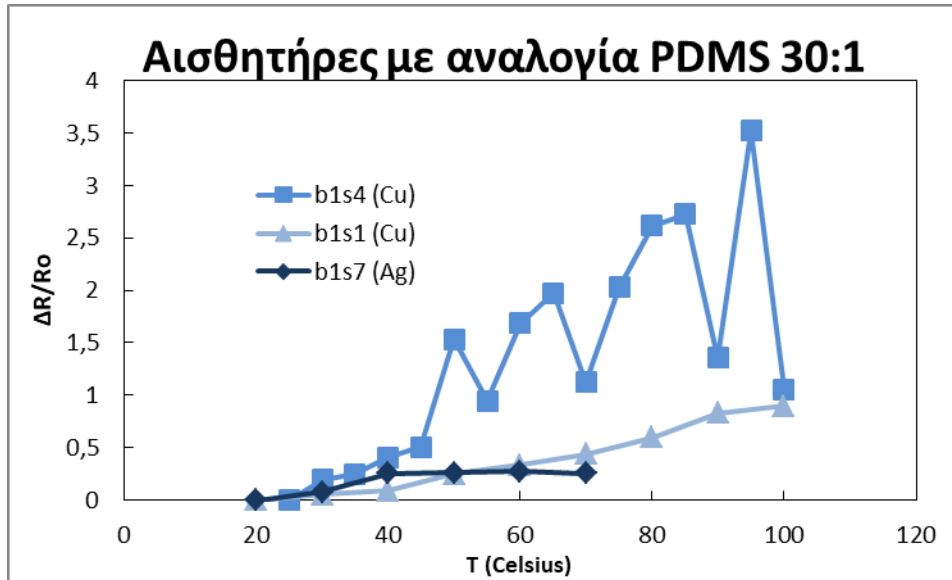
8.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα:



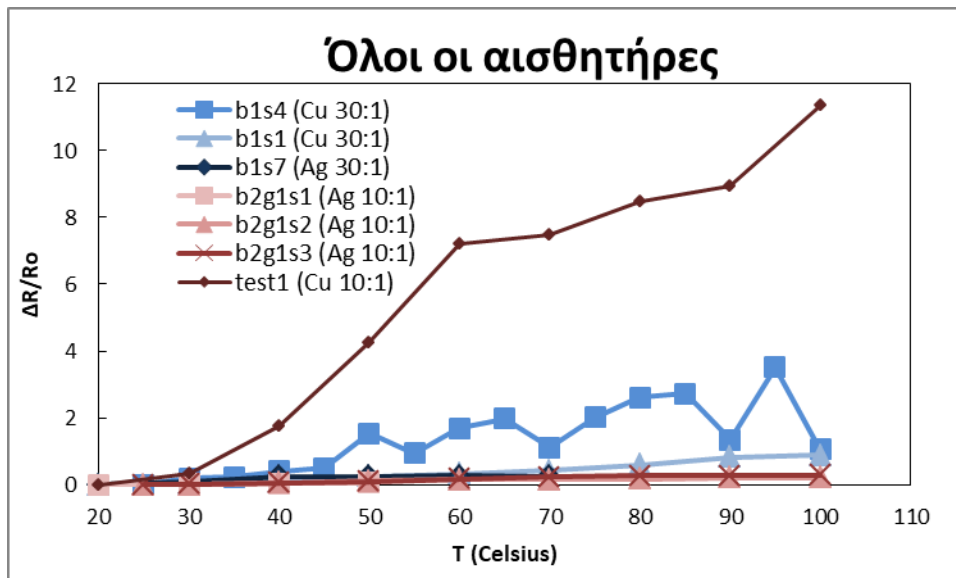
Διάγραμμα 8.9: : Εξάρτηση αντίστασης από θερμοκρασία για αισθητήρες με paste αργύρου στις επαφές ταινίας χαλκού και GNPs.



Διάγραμμα 8.10: Εξάρτηση αντίστασης από θερμοκρασία για αισθητήρες με αναλογία βάσης και curing agent του PDMS 10:1.



Διάγραμμα 8.11: : Εξάρτηση αντίστασης από θερμοκρασία για αισθητήρες με αναλογία βάσης και curing agent του PDMS 30:1.



Διάγραμμα 8.12: Εξάρτηση αντίστασης από θερμοκρασία για όλους τους αισθητήρες.

Όνομα αισθητήρα	Αναλογία PDMS	Paste Ag στις επαφές	Αντίσταση σε ηρεμία (kOhm)	R/T (kOhm/°C)	$\Delta R/R_0 T$ (1/°C)
test1	10:1	-	2320	108,2	0,1462
b1s1	30:1	-	3170	29,7	0,012
b1s4	30:1	-	560	23,7	0,032
b1s7	30:1	+	45	0,569	0,005
b2g1s1	10:1	+	0,9	0,002	0,002
b2g1s2	10:1	+	4,6	0,014	0,003
b2g1s3	10:1	+	4,7	0,020	0,004

Πίνακας 8.1: Αποτελέσματα αισθητήρων από ανάλυση αντοχής για αύξηση θερμοκρασίας

8.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σχεδόν σε όλους τους αισθητήρες που μετρήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50-60 °C, η συμπεριφορά τους αλλάζει σημαντικά και δε μπορεί να πραγματοποιηθεί μία αξιόπιστη εκτίμηση για την εξάρτησή τους με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται ακόμη ότι οι αισθητήρες δίχως paste αργύρου στις επαφές τους παρουσιάζουν μεγαλύτερες μεταβολές στην αντίστασή τους με την αύξηση της θερμοκρασίας, και από άποψη μονάδων (μεταβολές τάξης MOhm) και σαν σχετικές μεταβολές ($\Delta R/R_0$). Για την αναλογία βάσης-curing agent του PDMS δε μπορεί να προκύψει κάποιο αξιόπιστο συμπέρασμα, καθώς στην περίπτωση των αισθητήρων χωρίς paste Ag, ο 10:1 (test1) παρουσίασε χειρότερη αντοχή σε θερμοκρασιακές μεταβολές από τους 30:1 (b1s1, b1s4). Αντίθετα, στην περίπτωση αισθητήρων με paste Ag, οι 10:1 (b2g1s1-3) έδειξαν καλύτερη συμπεριφορά από τον 30:1 (b1s7). Ιδανικά, ένας μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων θα οδηγούσε σε μία πιο ξεκάθαρη εικόνα για την συγκεκριμένη παράμετρο. Να σημειωθεί όμως ότι οι αισθητήρες δίχως paste Ag, όπως έδειξαν σε προηγούμενα κεφάλαια, έχουν πιο απρόβλεπτη συμπεριφορά και χειρότερη επαναληψιμότητα από τους αισθητήρες με paste Ag, και από αυτούς επιλέχθηκαν για τα πειράματα όσοι παρουσίασαν λογική συμπεριφορά. Αντίθετα, οι αισθητήρες με paste Ag, έδειξαν καλή συμπεριφορά και στην εξάρτησή τους με τη θερμοκρασία, με αποτελέσματα αρκετά παραπλήσια.

Ως προς τις επαφές τους, οι αισθητήρες με paste Ag παρουσιάζουν πολύ μικρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία σε σχέση με αυτούς που χρησιμοποιήθηκε μόνο ταινία χαλκού. Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία, όπως προκύπτει και από τις τιμές του Πίνακα 8.1, είναι πολύ μικρή για να επηρεάζει την μέτρηση ενός αισθητήρα σε πραγματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, για αύξηση της θερμοκρασίας κατά μια μονάδα η σχετική μεταβολή της αντίστασης είναι τουλάχιστον 4 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη μεταβολή για αύξηση της παραμόρφωσης κατά μια μονάδα. Έτσι, για την εφαρμογή των αισθητήρων π.χ. πάνω στο ανθρώπινο σώμα, οι μεταβολές της θερμοκρασίας του σώματος δεν αναμένεται να επηρεάζουν το σήμα των αισθητήρων.

9. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε μία μέθοδος ανάπτυξης αισθητήρων αντίστασης παραμόρφωσης (resistive-type strain sensors) ως προς διάφορες παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν το είδος των υλικών κατασκευής που χρησιμοποιούνται, τις επαφές του αισθητήρα και τις συνθήκες για την υλοποίησή του. Συγκεκριμένα, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έχουν ως εξής:

Αρχικά εξετάσθηκε η κατασκευή ενός απλού (ως προς τη μέθοδο κατασκευής) αισθητήρα, με χαρακτηριστικά που αντλήθηκαν από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές, για την υλοποίηση ενός αισθητήρα αντίστασης (Amjadi et al., 2016; Liu et al., 2019). Παρατηρήθηκε ότι οι αισθητήρες με PDMS αναλογίας βάσης-curing agent 30:1, αν και λίγο πιο δύσχρηστοι λόγω της κολλώδους φύσης του PDMS σε αυτή την αναλογία, δεν έδειξαν άλλη σημαντική διαφορά ως προς τη διαχείρισή τους. Αντίθετα οι αισθητήρες με paste Ag στις επαφές μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας, έδειξαν πολύ καλύτερη συμπεριφορά από αυτούς που δεν είχε γίνει η προσθήκη. Συγκεκριμένα, η αντίσταση που μετρήθηκε σε ηρεμία στους αισθητήρες δίχως paste Ag ήταν της τάξης των MOhm, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους των οποίων η αντίσταση κυμαινόταν στα kOhm. Παράλληλα, οι αισθητήρες με paste Ag έδειξαν καλύτερη επαναληψιμότητα ως προς την κατασκευή τους.

Οι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν με GNPs σε διαφορετικούς διαλύτες (EtOH:IPA, IPA) δεν έδειξαν διαφορά ως προς το μέτρο της αντίστασης, αλλά παρουσίασαν διαφορετικές κατανομές στην επιφάνεια του PMMA κατά την υλοποίηση του αισθητήρα. Για τους αισθητήρες του batch 3, των οποίων τα στάδια της θέρμανσης πραγματοποιήθηκαν σε κλίβανο, ενώ θεωρητικά τα αναμενόμενα αποτελέσματα θα έπρεπε να είναι αντίστοιχα ή και καλύτερα των προηγούμενων περιπτώσεων λόγω

ομοιόμορφης θέρμανσης των υλικών, οι αισθητήρες παρουσίασαν θέματα στη γεωμετρία τους (ανομοιόμορφα στρώματα) και υψηλό θόρυβο, καθώς κατά τη μεταφορά των δειγμάτων από και προς τον κλίβανο υπήρξε διάχυση των υλικών εκτός από τα οριζόμενα πλαίσια, καταστρέφοντας τη δομή τους.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διάταξη που ασκεί παραμόρφωση μέσω κάμψης της ράβδου στήριξης του αισθητήρα (cantilever) για τον χαρακτηρισμό τους σε μικρές παραμορφώσεις (κοντά στο 0,2% του μήκους τους). Παρατηρήθηκε ότι οι αισθητήρες με paste Ag παρουσίασαν συνολικά καλύτερη συμπεριφορά από αυτούς χωρίς paste στις επαφές. Με χαμηλότερη αντίσταση (kOhm αντί για MOhm), καλύτερη επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου, μικρότερα φαινόμενα υστέρησης, πιο γραμμική συμπεριφορά και λιγότερο θόρυβο, οι αισθητήρες με paste Ag έδειξαν πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την ευαισθησία τους. Για παραμόρφωση κατά περίπου 0,2% του μήκους τους, οι αισθητήρες με paste Ag παρουσίασαν μέσο GF $28,2 \pm 9,6$, ενώ οι αισθητήρες χωρίς paste Ag έδειξαν μέσο GF $156,2 \pm 93,5$. Για την αναλογία PDMS δε προέκυψε κάποιο αξιόπιστο συμπέρασμα, καθώς τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις ίδιων επαφών είναι πολύ κοντά.

Από τους αισθητήρες που χαρακτηρίστηκαν παραπάνω, ο ένας αισθητήρας με αναλογία PDMS (βάση:curing agent) 30:1 που έδωσε αποτελέσματα (b1s7), και οι 3 αισθητήρες με αναλογία 10:1 (b2g1s1-3) τοποθετήθηκαν σε διάταξη που ασκεί δυναμική παραμόρφωση (tension), μεγαλύτερη συγκριτικά από τις προηγούμενες (παραμόρφωση που ασκήθηκε στο tension 20%, έναντι του 0,2-0,3% από το cantilever). Παράλληλα με αυτές τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πάλι κύκλοι για μικρή παραμόρφωση (cantilever, 0,2%) για τους αισθητήρες που μόλις αναφέρθηκαν, διαφέροντας από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τον χαρακτηρισμό τους ως προς την ταχύτητα λήψης μετρήσεων (διάρκεια κύκλου μετρήσεων πριν: 10-15min, διάρκεια γρήγορου κύκλου 30-50sec, διάρκεια ενός κύκλου στο tension περίπου 40 sec). Σκοπός των δύο ειδών μετρήσεων είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των αισθητήρων σε δυναμική παραμόρφωση, για διαφορετικές εντάσεις, καθώς και η σύγκριση των ιδιοτήτων αισθητήρων με διαφορετικές αναλογίες PDMS, όπως η υστέρηση και ο χρόνος επαναφοράς, καθώς για μικρές παραμορφώσεις με αργή λήψη μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε παραπάνω, η σύγκριση των δύο αναλογιών δεν ήταν ξεκάθαρη. Από τα πειράματα αυτά, ο 30:1 έδειξε χειρότερη συμπεριφορά από τους 10:1, με μεγαλύτερη υστέρηση και χρόνο επαναφοράς όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αντίστασης-χρόνου. Οι 10:1, οι οποίοι διέφεραν μόνο ως προς το διαλύτη των GNPs κατά την κατασκευή τους, δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές ως προς τη συμπεριφορά του ή τις μετρήσεις τους για μικρές παραμορφώσεις (απόκλιση $GF < 20$, $R < 5$ kOhm). Για μεγάλες παραμορφώσεις όμως, την καλύτερη συμπεριφορά έδειξε ο αισθητήρας του οποίου τα

GNPs ήταν διαλυμένα σε απεσταγμένο και απαερωμένο νερό με ισοπροπανόλη, όπως απεικονίζεται και από τα διαγράμματα R-t.

Τέλος πραγματοποιήθηκε θέρμανση μερικών αισθητήρων για την εξέταση της συμπεριφοράς τους σε ολόένα αυξανόμενη θερμοκρασία. Παρατηρήθηκε ότι για θερμοκρασίες μικρότερες των 50°C οι αισθητήρες έδειξαν σχετικά γραμμική αύξηση της αντίστασης με τη θερμοκρασία, ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η συμπεριφορά τους έγινε απρόβλεπτη, διαφέροντας ανά αισθητήρα, αλλά με γενικά μία αύξηση του θορύβου. Παρατηρήθηκε ότι για διαφορετικές αναλογίες PDMS (βάσης-curing agent) τα αποτελέσματα δεν είχαν σημαντικές διαφορές, με λόγους R/T και $\Delta R/(R_0T)$ αρκετά κοντά μεταξύ των αισθητήρων. Οι αισθητήρες με paste Ag όμως παρουσίασαν μικρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία σε σύγκριση με τους αισθητήρες που δεν υπήρχε παρουσία paste στις επαφές μεταξύ GNPs και χαλκοταινίας. Συγκεκριμένα, ο μέσος λόγος $\Delta R/(R_0T)$ για αισθητήρες δίχως paste Ag ήταν 0,06/°C με απόκλιση 0,06/°C, ενώ για αισθητήρες με paste Ag στις επαφές ο μέσος λόγος ήταν 0,0035/°C με απόκλιση 0,0011/°C. Για περιπτώσεις χρήσης αισθητήρα με paste Ag στο ανθρώπινο σώμα, οι μεταβολές στη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να επηρεάσουν το σήμα του αισθητήρα.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα για την κατασκευή αισθητήρων αντίστασης. Η αλλαγή της αναλογίας βάσης-curing agent του PDMS από το συνηθισμένο 10:1 σε 30:1 οδηγεί σε πιο «κολλώδεις» και ευλύγιστους αισθητήρες, οι οποίοι παρουσιάζουν μικρές έως ασήμαντες διαφορές στις ιδιότητες του αισθητήρα για μικρές παραμορφώσεις, αλλά υστερεί σε μεγαλύτερες ως προς την επαναφορά του και την ευαισθησία του. Το paste Ag στις επαφές των GNPs αποδείχθηκε χρήσιμο στην κατασκευή των αισθητήρων, ελαττώνοντας σημαντικά την αντίσταση, την υστέρηση και τον θόρυβο, και βελτιώνοντας της επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου. Πειραματισμοί με άλλες παραμέτρους της διαδικασίας όπως η εφαρμογή καλωδίων στις επαφές, η χρήση κλίβανου για τα στάδια θέρμανσης ή η αλλαγή του διαλύτη του αγωγίμου υλικού, δεν οδήγησαν σε καλύτερα αποτελέσματα, χωρίς όμως να αποκλείεται η χρήση τους από μελλοντική έρευνα. Η δοκιμή τους στα παρόντα πειράματα ήταν κυρίως ποιοτική και χρειάζεται περαιτέρω μελέτη για την εξακρίβωση ενός αξιόπιστου συμπεράσματος. Ως προς τη θερμοκρασιακή αντοχή των αισθητήρων, προέκυψε ότι η χρήση τους είναι κατάλληλη για συνθήκες περιβάλλοντος ή ανθρώπινου σώματος και η εξάρτηση από τη θερμοκρασία είναι μικρή.. Καθώς ο αριθμός δειγμάτων για κάθε είδος αισθητήρα ήταν περιορισμένος (κυρίως στο αριθμό λειτουργικών αισθητήρων με paste Ag και PDMS 30:1), υπάρχει η δυνατότητα η παρούσα έρευνα να συνεχιστεί για την άντληση πρόσθετων πληροφοριών ως προς τις ιδιότητες που μελετήθηκαν παραπάνω.

10. Βιβλιογραφία

- Aliofkhazraei, M., Ali, N., Milne, W. I., Ozkan, C. S., Mitura, S., and Gervasoni, J. L. (Eds.). (2016). *Graphene Science Handbook: Electrical and Optical Properties*. CRC Press.
- Amjadi, M., Kyung, K.-U., Park, I., and Sitti, M. (2016). "Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review." *Advanced Functional Materials*, 26(11), 1678–1698.
- Amjadi, M., Pichitpajongkit, A., Lee, S., Ryu, S., and Park, I. (2014). "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire–Elastomer Nanocomposite." *ACS Nano*, 8(5), 5154–5163.
- Amjadi, M., Yoon, Y. J., and Park, I. (2015). "Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes–Ecoflex nanocomposites." *Nanotechnology*, IOP Publishing, 26(37), 375501.
- Aoki, K., and Kawase, M. (1994). "Introduction of a percolation threshold potential at polyaniline-coated electrodes." *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Elsevier Science, 377(1–2), 125–129.
- Arnal, C., Alfè, M., Gargiulo, V., Ciajolo, A., Alzueta, M. U., Millera, Á., and Bilbao, R. (2013). "Characterization of Soot." *Cleaner Combustion: Developing Detailed Chemical Kinetic Models*, Green Energy and Technology, F. Battin-Leclerc, J. M. Simmie, and E. Blurock, eds., Springer, London, 333–362.
- Barlian, A. A., Park, W.-T., Mallon, J. R., Rastegar, A. J., and Pruitt, B. L. (2009). "Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems." *Proceedings of the IEEE*, 97(3), 513–552.
- Bepete, G., Anglaret, E., Ortolani, L., Morandi, V., Huang, K., Pénicaud, A., and Drummond, C. (2016). "Surfactant-free single-layer graphene in water." *Nature Chemistry*, 9(4), 347–352.
- Boland, C. S., Khan, U., Backes, C., O’Neill, A., McCauley, J., Duane, S., Shanker, R., Liu, Y., Jurewicz, I., and Dalton, A. B. (2014). "Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene–rubber composites." *ACS nano*, ACS Publications, 8(9), 8819–8830.
- Cai, L., Song, L., Luan, P., Zhang, Q., Zhang, N., Gao, Q., Zhao, D., Zhang, X., Tu, M., Yang, F., Zhou, W., Fan, Q., Luo, J., Zhou, W., Ajayan, P. M., and Xie, S. (2013). "Super-

- stretchable, Transparent Carbon Nanotube-Based Capacitive Strain Sensors for Human Motion Detection.” *Scientific Reports*, 3(1), 3048.
- Cai, L., and Wang, C. (2015). “Carbon Nanotube Flexible and Stretchable Electronics.” *Nanoscale Research Letters*, 10(1), 320.
- Campanella, C. E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., and Passaro, V. M. N. (2018). “Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications.” *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18(9), 3115.
- Chen, H., Su, Z., Song, Y., Cheng, X., Chen, X., Meng, B., Song, Z., Chen, D., and Zhang, H. (2017). “Omnidirectional Bending and Pressure Sensor Based on Stretchable CNT-PU Sponge.” *Advanced Functional Materials*, 27(3), 1604434.
- Cheng, Y., Wang, R., Zhai, H., and Sun, J. (2017). “Stretchable electronic skin based on silver nanowire composite fiber electrodes for sensing pressure, proximity, and multidirectional strain.” *Nanoscale*, Royal Society of Chemistry, 9(11), 3834–3842.
- Christ, J. F., Aliheidari, N., Ameli, A., and Pötschke, P. (2017). “3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites.” *Materials & Design*, 131, 394–401.
- Chun, S., Choi, Y., and Park, W. (2017). “All-graphene strain sensor on soft substrate.” *Carbon*, 116, 753–759.
- Cooper, C. B., Arutselvan, K., Liu, Y., Armstrong, D., Lin, Y., Khan, M. R., Genzer, J., and Dickey, M. D. (2017). “Stretchable Capacitive Sensors of Torsion, Strain, and Touch Using Double Helix Liquid Metal Fibers.” *Advanced Functional Materials*, 27(20), 1605630.
- Fassler, A., and Majidi, C. (2013). “Soft-matter capacitors and inductors for hyperelastic strain sensing and stretchable electronics.” *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, 22(5), 055023.
- Fraden, J. (2004). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Frutiger, A., Muth, J. T., Vogt, D. M., Mengüç, Y., Campo, A., Valentine, A. D., Walsh, C. J., and Lewis, J. A. (2015). “Capacitive Soft Strain Sensors via Multicore–Shell Fiber Printing.” *Advanced Materials*, 27(15), 2440–2446.
- Fuard, D., Tzvetkova-Chevolleau, T., Decossas, S., Tracqui, P., and Schiavone, P. (2008). “Optimization of poly-di-methyl-siloxane (PDMS) substrates for studying cellular

adhesion and motility." *Microelectronic Engineering*, Proceedings of the Micro- and Nano-Engineering 2007 Conference, 85(5), 1289–1293.

Gong, S., Lai, D. T., Su, B., Si, K. J., Ma, Z., Yap, L. W., Guo, P., and Cheng, W. (2015a). "Highly stretchy black gold E-skin nanopatches as highly sensitive wearable biomedical sensors." *Advanced Electronic Materials*, Wiley Online Library, 1(4), 1400063.

Gong, S., Lai, D. T., Wang, Y., Yap, L. W., Si, K. J., Shi, Q., Jason, N. N., Sridhar, T., Uddin, H., and Cheng, W. (2015b). "Tattoo-like polyaniline microparticle-doped gold nanowire patches as highly durable wearable sensors." *ACS applied materials & interfaces*, ACS Publications, 7(35), 19700–19708.

Gullapalli, H., Vemuru, V. S. M., Kumar, A., Botello-Mendez, A., Vajtai, R., Terrones, M., Nagarajaiah, S., and Ajayan, P. M. (2010). "Flexible Piezoelectric ZnO–Paper Nanocomposite Strain Sensor." *Small*, 6(15), 1641–1646.

Hsu, C.-L., Su, I.-L., and Hsueh, T.-J. (2017). "Tunable Schottky contact humidity sensor based on S-doped ZnO nanowires on flexible PET substrate with piezotronic effect." *Journal of Alloys and Compounds*, 705, 722–733.

Hu, L., Kim, H. S., Lee, J.-Y., Peumans, P., and Cui, Y. (2010). "Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes." *ACS Nano*, American Chemical Society, 4(5), 2955–2963.

Hu, N., Fukunaga, H., Atobe, S., Liu, Y., and Li, J. (2011). "Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites." *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, 11(11), 10691–10723.

Hu, N., Karube, Y., Yan, C., Masuda, Z., and Fukunaga, H. (2008). "Tunneling effect in a polymer/carbon nanotube nanocomposite strain sensor." *Acta Materialia*, 56(13), 2929–2936.

Hwang, B.-U., Lee, J.-H., Trung, T. Q., Roh, E., Kim, D.-I., Kim, S.-W., and Lee, N.-E. (2015). "Transparent Stretchable Self-Powered Patchable Sensor Platform with Ultrasensitive Recognition of Human Activities." *ACS Nano*, American Chemical Society, 9(9), 8801–8810.

Jeong, Y. R., Park, H., Jin, S. W., Hong, S. Y., Lee, S.-S., and Ha, J. S. (2015). "Highly stretchable and sensitive strain sensors using fragmentized graphene foam." *Advanced Functional Materials*, Wiley Online Library, 25(27), 4228–4236.

- Jin, L., Tao, J., Bao, R., Sun, L., and Pan, C. (2017). "Self-powered Real-time Movement Monitoring Sensor Using Triboelectric Nanogenerator Technology." *Scientific Reports*, 7(1), 10521.
- Kaltenbrunner, M., Sekitani, T., Reeder, J., Yokota, T., Kuribara, K., Tokuhara, T., Drack, M., Schwödiauer, R., Graz, I., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., and Someya, T. (2013). "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics." *Nature*, Nature Publishing Group, 499(7459), 458–463.
- Kang, D., Pikhitsa, P. V., Choi, Y. W., Lee, C., Shin, S. S., Piao, L., Park, B., Suh, K.-Y., Kim, T., and Choi, M. (2014). "Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system." *Nature*, Nature Publishing Group, 516(7530), 222–226.
- Kim, K., Choi, J., Jeong, Y., Cho, I., Kim, M., Kim, S., Oh, Y., and Park, I. (2019). "Highly Sensitive and Wearable Liquid Metal-Based Pressure Sensor for Health Monitoring Applications: Integration of a 3D-Printed Microbump Array with the Microchannel." *Advanced Healthcare Materials*, 8(22), 1900978.
- Kong, J.-H., Jang, N.-S., Kim, S.-H., and Kim, J.-M. (2014). "Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors." *Carbon*, Elsevier, 77, 199–207.
- Larmagnac, A., Eggenberger, S., Janossy, H., and Vörös, J. (2014). "Stretchable electronics based on Ag-PDMS composites." *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 4(1), 7254.
- Lee, H., Seong, B., Moon, H., and Byun, D. (2015a). "Directly printed stretchable strain sensor based on ring and diamond shaped silver nanowire electrodes." *Rsc Advances*, Royal Society of Chemistry, 5(36), 28379–28384.
- Lee, J., Kwon, H., Seo, J., Shin, S., Koo, J. H., Pang, C., Son, S., Kim, J. H., Jang, Y. H., Kim, D. E., and Lee, T. (2015b). "Conductive Fiber-Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor for Wearable Electronics." *Advanced Materials*, 27(15), 2433–2439.
- Lee, S. W., Park, J. J., Park, B. H., Mun, S. C., Park, Y. T., Seo, T. S., Hyun, W. J., and Park, O. O. (2017). "Enhanced Sensitivity of Patterned Graphene Strain Sensors Used for Monitoring Subtle Human Body Motions." *ACS Applied Materials & Interfaces*, American Chemical Society, 9(12), 11176–11183.
- Li, Y., Samad, Y. A., Taha, T., Cai, G., Fu, S.-Y., and Liao, K. (2016). "Highly Flexible Strain Sensor from Tissue Paper for Wearable Electronics." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, American Chemical Society, 4(8), 4288–4295.

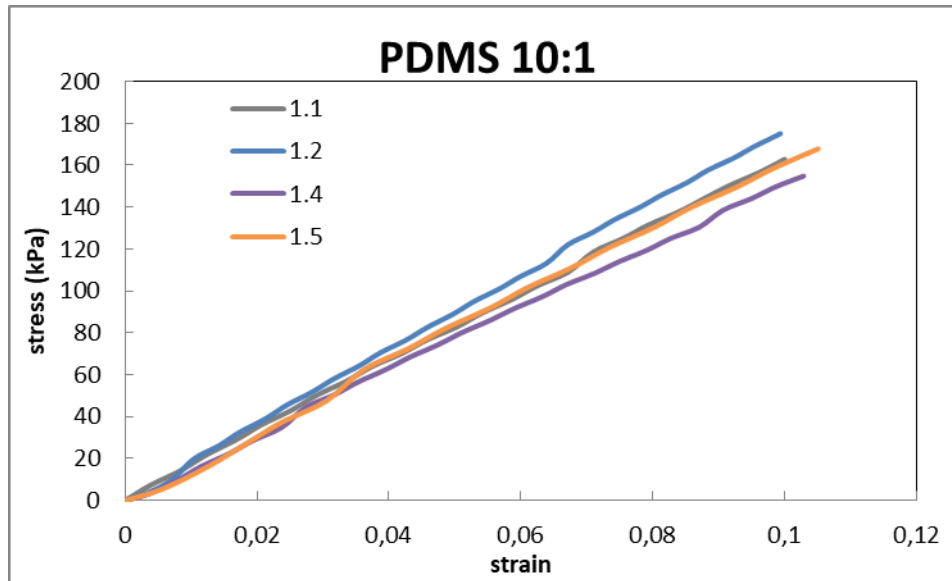
- Li, Y.-Q., Huang, P., Zhu, W.-B., Fu, S.-Y., Hu, N., and Liao, K. (2017). "Flexible wire-shaped strain sensor from cotton thread for human health and motion detection." *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 7(1), 45013.
- Lim, G.-H., Lee, N.-E., and Lim, B. (2016). "Highly sensitive, tunable, and durable gold nanosheet strain sensors for human motion detection." *Journal of Materials Chemistry C*, The Royal Society of Chemistry, 4(24), 5642–5647.
- Lin, W., Rotenberg, Y., Ward, K. P., Fekrmandi, H., and Levy, C. (2017). "Polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites for structural vibration damping and strain sensing." *Journal of Materials Research*, Cambridge University Press, 32(1), 73–83.
- Liu, C.-X., and Choi, J.-W. (2014). "Analyzing resistance response of embedded PDMS and carbon nanotubes composite under tensile strain." *Microelectronic engineering*, Elsevier, 117, 1–7.
- Liu, M., Sun, J., Sun, Y., Bock, C., and Chen, Q. (2009). "Thickness-dependent mechanical properties of polydimethylsiloxane membranes." *Journal of Micromechanics and Microengineering*, IOP Publishing, 19(3), 035028.
- Lu, N., Lu, C., Yang, S., and Rogers, J. (2012). "Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers." *Advanced Functional Materials*, Wiley Online Library, 22(19), 4044–4050.
- Lu, Y., Biswas, M. C., Guo, Z., Jeon, J.-W., and Wujcik, E. K. (2019). "Recent developments in bio-monitoring via advanced polymer nanocomposite-based wearable strain sensors." *Biosensors and Bioelectronics*, 123, 167–177.
- Ma, J., Wang, P., Chen, H., Bao, S., Chen, W., and Lu, H. (2019). "Highly Sensitive and Large-Range Strain Sensor with a Self-Compensated Two-Order Structure for Human Motion Detection." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(8), 8527–8536.
- Malekzadeh, M., and Catbas, F. (2014). "Application of two individual data-driven based change/damage detection methods for bridge monitoring." *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*, G. Deodatis, B. Ellingwood, and D. Frangopol, eds., CRC Press, 2241–2248.
- Mattmann, C., Clemens, F., and Tröster, G. (2008). "Sensor for measuring strain in textile." *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, 8(6), 3719–3732.

- Muth, J. T., Vogt, D. M., Truby, R. L., Mengüç, Y., Kolesky, D. B., Wood, R. J., and Lewis, J. A. (2014). "Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers." *Advanced materials*, Wiley Online Library, 26(36), 6307–6312.
- Niu, D., Jiang, W., Ye, G., Wang, K., Yin, L., Shi, Y., Chen, B., Luo, F., and Liu, H. (2018). "Graphene-elastomer nanocomposites based flexible piezoresistive sensors for strain and pressure detection." *Materials Research Bulletin*, 102, 92–99.
- Park, J. J., Hyun, W. J., Mun, S. C., Park, Y. T., and Park, O. O. (2015). "Highly Stretchable and Wearable Graphene Strain Sensors with Controllable Sensitivity for Human Motion Monitoring." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(11), 6317–6324.
- Park, S.-J., Kim, J., Chu, M., and Khine, M. (2016). "Highly Flexible Wrinkled Carbon Nanotube Thin Film Strain Sensor to Monitor Human Movement." *Advanced Materials Technologies*, 1(5), 1600053.
- Patel, G., Arvelakis, A., Sauter, B. V., Gondolesi, G. E., Caplivski, D., and Huprikar, S. (2008). "Strongyloides hyperinfection syndrome after intestinal transplantation." *Transplant Infectious Disease*, 10(2), 137–141.
- Qiu, W., Kang, Y.-L., Lei, Z.-K., Qin, Q.-H., Li, Q., and Wang, Q. (2010). "Experimental study of the Raman strain rosette based on the carbon nanotube strain sensor." *Journal of Raman Spectroscopy*, 41(10), 1216–1220.
- Ramsteiner, F., and Armbrust, T. (2001). "Fatigue crack growth in polymers." *Polymer Testing*, 20(3), 321–327.
- Ripka, P., and Tipek, A. (2007). *Modern Sensors Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Rogers, J. A., Someya, T., and Huang, Y. (2010). "Materials and Mechanics for Stretchable Electronics." *Science*, 327(5973), 1603–1607.
- Roh, E., Hwang, B.-U., Kim, D., Kim, B.-Y., and Lee, N.-E. (2015). "Stretchable, transparent, ultrasensitive, and patchable strain sensor for human–machine interfaces comprising a nanohybrid of carbon nanotubes and conductive elastomers." *ACS nano*, ACS Publications, 9(6), 6252–6261.
- Ryu, S., Lee, P., Chou, J. B., Xu, R., Zhao, R., Hart, A. J., and Kim, S.-G. (2015). "Extremely Elastic Wearable Carbon Nanotube Fiber Strain Sensor for Monitoring of Human Motion." *ACS Nano*, American Chemical Society, 9(6), 5929–5936.

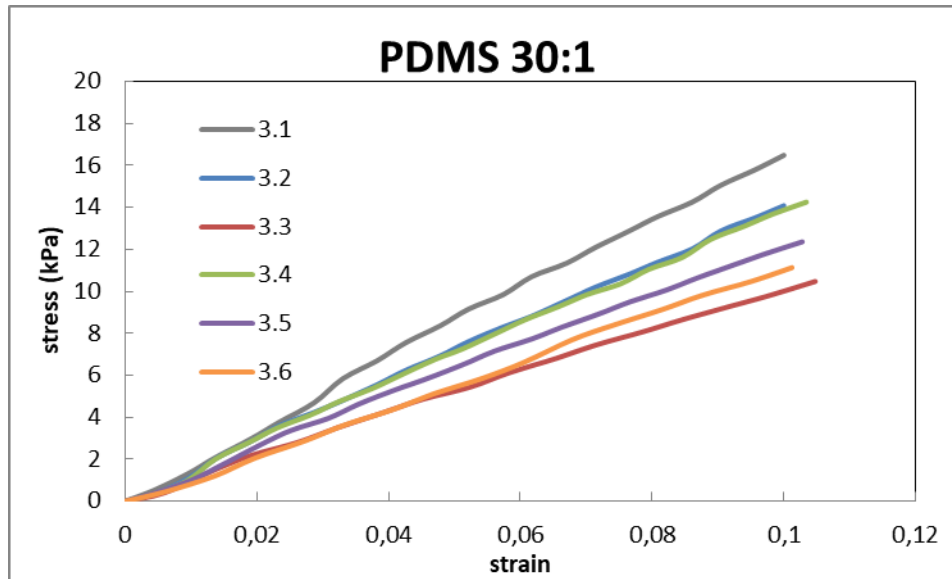
- Shang, S., Yue, Y., and Wang, X. (2016). "Piezoresistive strain sensing of carbon black /silicone composites above percolation threshold." *Review of Scientific Instruments*, American Institute of Physics, 87(12), 123910.
- Simmons, J. G. (1963). "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film." *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, 34(6), 1793–1803.
- Tadakaluru, S., Thongsuwan, W., and Singjai, P. (2014). "Stretchable and flexible high-strain sensors made using carbon nanotubes and graphite films on natural rubber." *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 14(1), 868–876.
- Tao, L.-Q., Wang, D.-Y., Tian, H., Ju, Z.-Y., Liu, Y., Pang, Y., Chen, Y.-Q., Yang, Y., and Ren, T.-L. (2017). "Self-adapted and tunable graphene strain sensors for detecting both subtle and large human motions." *Nanoscale*, The Royal Society of Chemistry, 9(24), 8266–8273.
- Tsouti, V. (2009) "Development of a Silicon Nanocantilever Array for Effective Chemical Sensing." National Technical University of Athens.
- Tsouti, V., Mitrakos, V., Broutas, P., and Chatzandroulis, S. (2016). "Modeling and Development of a Flexible Carbon Black-Based Capacitive Strain Sensor." *IEEE Sensors Journal*, 16(9), 3059–3067.
- Wu, X., Han, Y., Zhang, X., Zhou, Z., and Lu, C. (2016). "Large-Area Compliant, Low-Cost, and Versatile Pressure-Sensing Platform Based on Microcrack-Designed Carbon Black@Polyurethane Sponge for Human–Machine Interfacing." *Advanced Functional Materials*, 26(34), 6246–6256.
- Wujcik, E. K., Blasdel, N. J., Trowbridge, D., and Monty, C. N. (2013). "Ion sensor for the quantification of sodium in sweat samples." *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 13(9), 3430–3436.
- Wujcik, E. K., and Monty, C. N. (2013). "Nanotechnology for implantable sensors: carbon nanotubes and graphene in medicine." *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 5(3), 233–249.
- Xiao, X., Yuan, L., Zhong, J., Ding, T., Liu, Y., Cai, Z., Rong, Y., Han, H., Zhou, J., and Wang, Z. L. (2011). "High-strain sensors based on ZnO nanowire/polystyrene hybridized flexible films." *Advanced materials*, Wiley Online Library, 23(45), 5440–5444.

- Xu, F., Li, X., Shi, Y., Li, L., Wang, W., He, L., and Liu, R. (2018). "Recent Developments for Flexible Pressure Sensors: A Review." *Micromachines*, 9(11), 580.
- Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D. N., and Hata, K. (2011). "A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection." *Nature nanotechnology*, Nature Publishing Group, 6(5), 296.
- Yang, C., Dong, J., Fang, Y., Ma, L., Zhao, X., and Zhang, Q. (2018). "Preparation of novel low- κ polyimide fibers with simultaneously excellent mechanical properties, UV-resistance and surface activity using chemically bonded hyperbranched polysiloxane." *Journal of Materials Chemistry C*, The Royal Society of Chemistry, 6(5), 1229–1238.
- Yang, L., Zou, M., Wu, S., Xu, W., Wu, H., and Cao, A. (2017). "Graphene Oxide Glue-Electrode for Fabrication of Vertical, Elastic, Conductive Columns." *ACS Nano*, American Chemical Society, 11(3), 2944–2951.
- Zhang, D., Yang, Z., Zhang, J., Mao, H., Yang, J., and Qian, Y. (2018). "Truncated cobalt hexacyanoferrate nanocubes threaded by carbon nanotubes as a high-capacity and high-rate cathode material for dual-ion rechargeable aqueous batteries." *Journal of Power Sources*, 399, 1–7.
- Zhang, M., Wang, C., Wang, H., Jian, M., Hao, X., and Zhang, Y. (2017). "Carbonized Cotton Fabric for High-Performance Wearable Strain Sensors." *Advanced Functional Materials*, 27(2), 1604795.
- Zhao, X., Xu, W., Yi, W., and Peng, Y. (2019). "A flexible and highly pressure-sensitive PDMS sponge based on silver nanoparticles decorated reduced graphene oxide composite." *Sensors and Actuators A: Physical*, 291, 23–31.
- Zhu, J., Wang, H., and Zhu, Y. (2018). "A flexible piezoresistive carbon black network in silicone rubber for wide range deformation and strain sensing." *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, 123(3), 034505.

Παράρτημα



Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα tensilon για δείγματα PDMS 10:1



Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα tensilon για δείγματα PDMS 30:1