



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ »



Όνοματεπώνυμο Συγγραφέα : Μεθενίτης - Γκρος Ιωάννης

Επιβλέπων Καθηγητής : Σαρρής Ιωάννης

ΑΘΗΝΑ, 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

DIPLOMA THESIS

« HEAT TRANSFER BY USING THERMAL METAMATERIALS »



Author Name : Methenitis - Gkros Ioannis

Supervising Professor : Sarris Ioannis

ATHENS, 2023

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
Καθ. Ιωάννης Σαρρής	
Κανετάκη Ζωή	
Εμμανουήλ Προεστάκης	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μεθενίτης - Γκρος Ιωάννης του Σπυρίδωνος, με αριθμό μητρώου 51204394, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

«Είμαι συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, επιβεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών :



Μεθενίτης - Γκρος Ιωάννης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου και Καθηγητή στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κ. Ιωάννη Σαρρή για την εμπιστοσύνη, τη βοήθεια και την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους της εταιρείας Meta Materials Inc. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ θερμά τον Αντιπρόεδρο της εταιρείας κ. Παναγιώτη Κοσμά για την φιλοξενία στα εργαστήρια της εταιρείας στο Μαρούσι Αττικής και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, και βεβαίως, τους, Θωμά Βασιλείου για τον συμβουλευτικό ρόλο που είχε σχετικά με όλα τα θέματα που προέκυπταν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και Ιωάννη Σωτηρίου για την πολύτιμη βοήθεια και τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχε κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που ήταν κοντά μου και με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΤΙΤΛΟΣ : « Μετάδοση θερμότητας με θερμικά μεταυλικά ».

ΟΝΟΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: Μεθενίτης - Γκρος Ιωάννης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Σαρρής Ιωάννης, Καθηγητής ΠΑΔΑ

Η εξέλιξη της ποιότητας ζωής του ανθρώπου ανά τα χρόνια είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας στον τομέα των υλικών. Όσο προοδεύει η επιστήμη αυτή βρίσκονται λύσεις σε όλο και πιο σύνθετα προβλήματα που παρουσιάζονται καθημερινά. Υλικά που έχουν τεράστια εφαρμογή τόσο σε καθημερινά αγαθά (οθόνες αφής κινητών ή τηλεοράσεων) όσο και σε πιο εξειδικευμένα επιστημονικά πεδία (φωτοβολταϊκά ή ακόμα και διαστημική τεχνολογία) είναι οι ημιαγωγοί, και ειδικότερα τα διαφανή ημιαγωγιμα υμένα (φιλμ). Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα για την κατασκευή διαφανών αγωγιμων μεμβρανών είναι το Οξειδίο του Κασσιτέρου του Ινδίου (ITO). Η κυριαρχία του ITO στον συγκεκριμένο τομέα είναι δεδομένη, ωστόσο για διάφορους λόγους, όπως το υψηλό κόστος, η ευθραυστότητά του και η σπανιότητα του Ινδίου, στους οποίους γίνεται εκτενής αναφορά στην πορεία της εργασίας, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί των υλικών έχουν εντείνει την έρευνά τους στην εύρεση νέων υλικών και μεταυλικών υψηλότερης ποιότητας και απόδοσης που δυνητικά θα αντικαταστήσουν το ITO στις πιο πολλές εφαρμογές του. Ένα μεταυλικό (τεχνητό υλικό που έχει ιδιότητες που δεν συναντώνται στα φυσικά υλικά) που αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς της Meta Materials στην κατεύθυνση αυτή είναι το Nanoweb. Το Nanoweb είναι ένα πολυμερές διάφανο λεπτό υπόστρωμα με ένα μικροσκοπικό μεταλλικό πλέγμα εφαρμοσμένο επάνω του που έχει συγκεκριμένες οπτο-ηλεκτρικές και θερμοηλεκτρικές ιδιότητες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι θερμοηλεκτρικές του ιδιότητες, κατασκευάζοντας πρώτα ένα ρεαλιστικό θεωρητικό μοντέλο, το οποίο θα προσομοιάζει τη συμπεριφορά ενός θεωρητικού αγωγιμου υλικού εάν το συνδέσουμε με πηγή ρεύματος συγκεκριμένης έντασης. Στόχος λοιπόν του θεωρητικού μοντέλου είναι η κατανόηση και η εμβάθυνση στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που διέπουν μία τέτοια διάταξη. Στην συνέχεια, στο πειραματικό μέρος, κατασκευάζεται σχετικό δοκίμιο και πραγματοποιείται το ίδιο πείραμα σε δείγμα από Nanoweb το οποίο μας παρείχε η ίδια εταιρεία. Αφού ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις και γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου που είχε κατασκευαστεί προηγουμένως. Με την σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου μεταυλικού υπό μελέτη, δηλαδή του Nanoweb.

Λέξεις κλειδιά : Υλικά, μεταυλικά, θερμικά μεταυλικά, Nanoweb, φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας

ABSTRACT

TITLE : « Heat transfer by using thermal metamaterials »

STUDENT NAME : Methenitis - Gkros Ioannis

SUPERVISOR : Sarris Ioannis, Professor of UNIWA

The evolution of the quality of human life over the years is inextricably linked to the progress of science and technology in the field of materials. As this science progresses, solutions to increasingly complex problems that arise on a daily basis are provided. Materials that have a huge application both in everyday goods (mobile phone touch screens or TV screens) and in more specialized scientific fields (photovoltaics or even space technology) are semiconductors, and in particular transparent semiconducting films. The material widely used for the manufacture of transparent conducting films is Indium Tin Oxide (ITO). The dominance of ITO in this field is a given, but for various reasons, such as its cost, its brittleness and the rarity of the Indium, which are discussed at length in the course of this paper, material scientists and material engineers have intensified their research in finding new materials and metamaterials of higher quality and performance that will potentially replace ITO in most of its applications. One metamaterial (man-made material that has properties not found in natural materials) developed by Meta Materials engineers in this direction is Nanoweb. Nanoweb is a polymer transparent thin substrate with a microscopic metal mesh applied on it, that has specific opto-electrical and thermoelectric properties. In this thesis, its thermoelectric properties are investigated by first constructing a realistic theoretical model, which simulates the behavior of a theoretical conducting material if connected to a current source of a specific intensity. The aim of the theoretical model is therefore to understand and deepen the heat transfer phenomena governing such a device. Then, in the experimental part, a relevant test specimen is constructed and the same experiment is performed on a Nanoweb sample provided by the company. After taking the necessary measurements and processing the results, they are compared with the results of the previously constructed theoretical model. By comparing the theoretical and experimental results, useful conclusions can be drawn about the behavior of the specific metamaterial under study, namely Nanoweb.

Key words : Materials, metamaterials, thermal metamaterials, Nanoweb, heat transfer phenomena

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
Κατάλογος Εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1) Τεχνολογία των Υλικών.....	14
1.1.1) Ιστορική Αναδρομή.....	14
1.1.2) Προηγμένα Υλικά.....	14
1.1.3) Μεταϋλικά.....	15
1.1.4) Η Επιστήμη των Μεταϋλικών.....	15
1.2) Διαφανή Αγώγιμα Υμένια (Φιλμ).....	17
Εισαγωγή.....	17
1.2.1) Indium Tin Oxide (ITO).....	18
1.2.2) Εναλλακτικά υλικά για την αντικατάσταση του ITO.....	20
1.3) NANOWEB®.....	21
1.3.1) Γενικές πληροφορίες / Περιγραφή του Nanoweb®.....	21
1.3.2) Τεχνικά χαρακτηριστικά και συγκριτικά πλεονεκτήματα του Nanoweb®.....	22
1.3.3) Τρόπος κατασκευής / παραγωγή Nanoweb.....	23
1.3.3.1) Rolling Mask Lithography.....	23
1.3.3.2) Διαδικασία παραγωγής του Nanoweb®.....	25
1.3.4) Πεδία εφαρμογής του Nanoweb.....	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.1) Θεωρητικές Έννοιες.....	28
2.1.1) Ηλεκτρική Αντίσταση και παραγωγή θερμότητας.....	28
2.1.2) Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας.....	28
2.1.2.1) Μεταφορά θερμότητας με Αγωγή.....	28
2.1.2.2) Μεταφορά θερμότητας με Συναγωγή.....	30
2.1.2.3) Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία.....	31
2.1.2.4) Μόνιμη Κατάσταση.....	31
2.1.3) Ιδιότητες Υλικών.....	32
2.1.3.1) Πυκνότητα.....	32
2.1.3.2) Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας Στερεών.....	32
2.1.3.3) Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας.....	32
2.1.3.4) Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση (Resistivity).....	33
2.1.3.5) Αντίσταση φύλλου (Sheet Resistance).....	33
2.2) Παρουσίαση Θεωρητικού Μοντέλου.....	34
2.2.1) Εισαγωγή.....	34
2.2.2) Δεδομένα και Περιγραφή.....	34
2.2.3) Φαινόμενα Μεταφοράς θερμότητας στο Θεωρητικό Μοντέλο.....	36
2.3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	37
2.3.1) Υπολογισμός συνολικής θερμικής αντίστασης.....	37

2.3.2) Υπολογισμοί θεωρητικού μοντέλου.....	38
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1) Περιγραφή και στόχος της πειραματικής διαδικασίας.....	41
3.2) Κατασκευή του Δοκιμίου Βήμα προς Βήμα.....	43
3.3) Όργανα Μετρήσεων - Πηγή ρεύματος.....	45
3.4) Διαδικασία Μετρήσεων.....	48
3.4.1) Μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης Nanoweb.....	48
3.4.2) Μέτρηση με τη μέθοδο του ανιχνευτή τεσσάρων σημείων (Four Point Probe).....	50
3.4.2.1) Γενικά για την Μέθοδο μέτρησης τεσσάρων ακροδεκτών (Four Point Probe).....	50
3.4.2.2) Κατασκευή μετρητικής διάταξης στο εργαστήριο για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του Nanoweb®.....	51
3.4.2.3) Έλεγχος εγκυρότητας και ακρίβειας των μετρήσεων της μετρητικής διάταξης που κατασκευάστηκε.....	52
3.4.2.4) Μέτρηση αντίστασης φύλλου (Sheet Resistance) και ειδικής αντίστασης (Resistivity) του Nanoweb®.....	54
3.4.3) Μέτρηση της αλλαγής στη θερμοκρασία του Nanoweb ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει.....	56
3.4.3.1) Στόχος πειράματος.....	56
3.4.3.2) Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων.....	56
3.4.3.3) Μετρήσεις θερμοκρασίας Nanoweb®.....	58
3.5) Σύγκριση τιμών θεωρητικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα.....	61
3.6) Συμπεράσματα - Σχόλια.....	63
Επίλογος και πρόταση για περαιτέρω έρευνα.....	64
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Εικόνα 1.1 : Παράδειγμα μεταλλικού που έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης. Η συνολική διάταξη αποτελείται από 3×20×20 μοναδιαίες κυψέλες με συνολικές διαστάσεις 10×100×100 mm.....	16
Εικόνα 1.2 : (α) Σκόνη ΙΤΟ, (β) Σκόνη ΙΤΟ μεγεθυμένη x1000 φορές.....	18
Εικόνα 1.3 : Δείγμα λεπτού αγώγιμου φιλμ με επίστρωση ΙΤΟ.....	18
Εικόνα 1.4 : Πλήθος ατόμων των διαφόρων χημικών στοιχείων ανά εκατομμύρια άτομα Σιδήρου.....	19
Εικόνα 1.5 : Διακυμάνσεις στην τιμή του Ινδίου (\$ / kg) από το 1992 έως το 2012.....	19
Εικόνα 1.6 : Μεταλλικό πλέγμα Nanoweb - εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.....	22
Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα Διαφάνειας - Αντίστασης Φύλλου. Σύγκριση των διαφόρων υφιστάμενων TCFs.....	22
Εικόνα 1.8 : 3D απεικόνιση διαδικασίας RML.....	24
Εικόνα 1.9 : Δημιουργία του μοτίβου με την τεχνική RML στο υπόστρωμα που έχει προηγουμένως επικαλυφθεί με φωτοανθεκτικό υλικό - μέρος της διαδικασίας παραγωγής του Nanoweb.....	25
Εικόνα 1.10 : Σύγκριση κεραιών - διάφανη από Nanoweb με συμβατική μεταλλική.....	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Εικόνα 2.1 : Θερμοκρασιακή Διανομή Μονοδιάστατης Μόνιμης ροής θερμότητας.....	29
Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση θεωρητικού πειράματος (σε τομή) - Διάγραμμα ισοδύναμου κυκλώματος.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εικόνα 3.1 : Μικρό κομμάτι Nanoweb®.....	41
Εικόνα 3.2 : Φωτογραφία του πλέγματος του Nanoweb: (α) μεγέθυνση 10X (β) μεγέθυνση 40X.....	42
Εικόνα 3.3 : Απεικόνιση στρωμάτων του εργαστηριακού δείγματος Nanoweb.....	42
Εικόνα 3.4 : Συναρμολόγημα Nanoweb - Δακτυλίου - PMMA : α) 3D απεικόνιση, β) Πάνω όψη.....	43
Εικόνα 3.5 : Σημείο σύνδεσης Nanoweb με το καλώδιο - σύσφιξη δακτυλίου.....	44
Εικόνα 3.6 : Τελική μορφή συστήματος με αριθμημένα τα καλώδια.....	44
Εικόνα 3.7 : Πηγή Ρεύματος.....	45
Εικόνα 3.8 : Πολύμετρο No 1.....	45
Εικόνα 3.9 : Πολύμετρο No 2.....	46
Εικόνα 3.10 : Θερμόμετρο με Laser.....	46
Εικόνα 3.11 : Μικροσκόπιο.....	47
Εικόνα 3.12 : Σχέδιο nanoweb με ακροδέκτες αριθμημένους.....	48
Εικόνα 3.13 : Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης με τη μέθοδο του ανιχνευτή τεσσάρων σημείων (4 point probe).....	50
Εικόνα 3.14 : Ακροδέκτες μετρητικής διάταξης 4 Point Probe που κατασκευάστηκε.....	51
Εικόνα 3.15 : Τελική μορφή μετρητικής διάταξης Four Point Probe. (α) Φωτογραφία από το εργαστήριο. (β) Σχηματική απεικόνιση.....	52
Εικόνα 3.16 : Σύνδεση nanoweb - power supply.....	57
Εικόνα 3.17 : σημεία μέτρησης a,b,c,d,e.....	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

—

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Πίνακας 2.1 : Δεδομένα θεωρητικού μοντέλου.....	35
Πίνακας 2.2 : Μεταβολή θερμοκρασίας T1 ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πίνακας 3.1 : Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης Nanoweb®.....	49
Πίνακας 3.2 : Μετρήσεις και υπολογισμός ειδικής αντίστασης φύλλου Χαλκού (Cu).....	53
Πίνακας 3.3 : Ειδική αντίσταση και αγωγιμότητα υλικών.....	53
Πίνακας 3.4 : Μέτρηση αντίστασης φύλλου και ειδικής αντίστασης Nanoweb.....	54
Πίνακας 3.5 : Μέση τιμή αντίστασης φύλλου και ειδικής αντίστασης για κάθε σετ μετρήσεων.....	55
Πίνακας 3.6 : Πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας Nanoweb.....	58
Πίνακας 3.7 : Ένταση ρεύματος (I) και Διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) - σύγκριση τιμών Θεωρητικού Μοντέλου και μετρήσεων.....	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

—

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Διάγραμμα 2.1 : Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας T1 ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.....	40
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Διάγραμμα 3.1 : Μεταβολή θερμοκρασίας Nanoweb σε σχέση με την ένταση του ρεύματος - Πειραματικές μετρήσεις.....	60
Διάγραμμα 3.2 : Μεταβολή θερμοκρασίας σε σχέση με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος - Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις.....	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1) Τεχνολογία των Υλικών

1.1.1) Ιστορική Αναδρομή

Τα υλικά είναι πιθανό βαθύτερα συνδεδεμένα με τον πολιτισμό μας από όσο συνειδητοποιούμε οι περισσότεροι από εμάς. Τα μέσα μεταφοράς, η στέγαση, ο ρουχισμός, οι επικοινωνίες, η ψυχαγωγία και η παραγωγή τροφίμων, ουσιαστικά κάθε τμήμα της καθημερινής μας ζωής επηρεάζεται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό από τα υλικά. Η ανάπτυξη και η πρόοδος των κοινωνιών ήταν στενά συνδεδεμένες με την ικανότητα των μελών τους να παράγουν και να χειρίζονται υλικά ώστε να εξυπηρετούν τις ανάγκες τους. Πράγματι, οι πρώτοι πολιτισμοί έχουν καθοριστεί από το επίπεδο ανάπτυξης των υλικών τους (Εποχή του Λίθου, Εποχή του Χαλκού, Εποχή του Σιδήρου).

Με το πέρασμα του χρόνου ανακαλύφθηκαν τεχνικές παραγωγής υλικών με ανώτερες ιδιότητες από τα φυσικά υλικά. Νέα υλικά συμπεριλάμβαναν είδη αγγειοπλαστικής και διάφορα μέταλλα. Επιπλέον, ανακαλύφθηκε ότι οι ιδιότητες ενός υλικού ήταν δυνατόν να τροποποιηθούν με θερμικές κατεργασίες καθώς και με την προσθήκη άλλων ουσιών.

Φθάνοντας στις μέρες μας, δεκάδες χιλιάδων διαφορετικά υλικά αναπτύσσονται καθημερινά με όλο και πιο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά με σκοπό να ανταποκριθούν στις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας μας και να λύσουν όλο και πιο σύνθετα προβλήματα που παρουσιάζονται. Αυτά τα υλικά περιλαμβάνουν τα μέταλλα, τα πλαστικά, τα κεραμικά, τα γυαλιά και τις ίνες.

Η πρόοδος στην κατανόηση μιας κατηγορίας υλικών είναι συνήθως προάγγελος της βαθμιαίας ανάπτυξης μιας τεχνολογίας. Η κατασκευή αυτοκινήτων για παράδειγμα, θα ήταν ανέφικτη χωρίς τη διαθεσιμότητα φθηνού ατσαλιού ή κάποιου άλλο παρόμοιου υποκατάστατου. Στη σύγχρονη εποχή προηγμένες ηλεκτρονικές συσκευές βασίζονται σε εξαρτήματα φτιαγμένα από αυτά που ονομάζουμε ημιαγωγιμα υλικά.

1.1.2) Προηγμένα Υλικά

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας τα αποκαλούμε πολλές φορές και προηγμένα υλικά. Με τον όρο υψηλή τεχνολογία εννοούμε ένα εξάρτημα ή προϊόν το οποίο λειτουργεί ή επιτελεί εργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν σχετικά περίπλοκες και εξεζητημένες αρχές συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών συσκευών (βίντεο συσκευές, cd, dvd), των υπολογιστών, των συστημάτων οπτικών ινών, των διαστημοπλοίων, των αεροσκαφών και των στρατιωτικών πυραύλων. Αυτά τα προηγούμενα υλικά είναι τυπικά παραδοσιακά υλικά των οποίων οι ιδιότητες έχουν βελτιωθεί αναπτύσσοντας εκ νέου υλικά υψηλής απόδοσης. Επιπλέον, αυτά μπορεί να αποτελούνται από όλους τους τύπους υλικών (π.χ. μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή) και είναι συνήθως ακριβά. Τα προηγμένα υλικά

περιλαμβάνουν τους ημιαγωγούς, τα βιοϋλικά και αυτά που μπορούμε να ορίσουμε ως υλικά του μέλλοντος ευφυή υλικά και νανο-κατασκευασμένα υλικά.

(«Material science and Engineering», Calister, Rethwish)

1.1.3) Μεταϋλικά

Μεταϋλικό, εξ ορισμού είναι κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να έχει μια ιδιότητα που δεν απαντάται σε φυσικά υλικά. Είναι κατασκευασμένα από σύνολα πολλαπλών στοιχείων που προέρχονται από σύνθετα υλικά όπως μέταλλα και πλαστικά. Η μικροδομή τους αποτελείται από επαναλαμβανόμενα μοτίβα, σε κλίμακες που είναι μικρότερες από τα μήκη κύματος των φαινομένων που επηρεάζουν. Τα μεταϋλικά αντλούν τις ιδιότητές τους όχι από τις ιδιότητες των βασικών υλικών, αλλά από τις νεοσχεδιασμένες δομές τους. Το ακριβές σχήμα, η γεωμετρία, το μέγεθος, ο προσανατολισμός και η διάταξή τους, τους προσδίδει τις έξυπνες ιδιότητές που τελικά έχουν, ικανές να χειρίζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα: εμποδίζοντας, απορροφώντας, ενισχύοντας ή κάμπτοντας τα κύματα, ώστε να επιτυγχάνονται οφέλη που υπερβαίνουν αυτό που είναι εφικτό με τα συμβατικά υλικά.

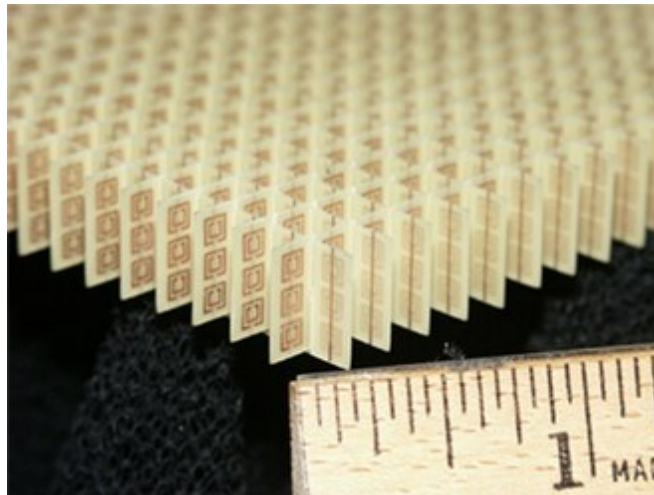
Τα κατάλληλα σχεδιασμένα μεταϋλικά μπορούν να επηρεάσουν τα κύματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή του ήχου με τρόπο που δεν παρατηρείται στα συμπαγή υλικά. Αυτά τα υλικά είναι γνωστά ως μεταϋλικά με αρνητικό δείκτη διάθλασης για συγκεκριμένα μήκη κύματος και έχουν αποτελέσει το επίκεντρο μεγάλου όγκου ερευνών.

Η έρευνα στα μεταϋλικά είναι διεπιστημονική και περιλαμβάνει τομείς όπως η ηλεκτρολογία, η ηλεκτρομαγνητική, η κλασική οπτική, η φυσική στερεάς κατάστασης, η μηχανική μικροκυμάτων και κεραιών, η οπτοηλεκτρονική, οι επιστήμες υλικών, η νανο-επιστήμη και η μηχανική ημιαγωγών.

(«A brief intro to metamaterials», R.S. Kshetrimayum)

1.1.4) Η Επιστήμη των Μεταϋλικών

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τα μεταϋλικά αποτελούνται από λεπτομερώς σχεδιασμένες δομές ή μοτίβα σε κλίμακα μικρότερη του μήκους κύματος του φαινομένου που “θέλουν” να επηρεάσουν, επιτρέποντάς τους να χειρίζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ηχητικά κύματα ή άλλους τύπους κυμάτων με αντισυμβατικούς τρόπους. Για αυτό τον λόγο τα μεταϋλικά έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή στην επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 1.1 : Παράδειγμα μεταλλικού που έχει αρνητικό δείκτη διάθλασης. Η συνολική διάταξη αποτελείται από 3×20×20 μοναδιαίες κυψέλες με συνολικές διαστάσεις 10×100×100 mm (πηγή : Wikipedia)

Τα βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των μεταλλικών περιλαμβάνουν:

Αρνητική διάθλαση: Μια από τις καθοριστικές ιδιότητες των μεταλλικών είναι η ικανότητά τους να επιτυγχάνουν αρνητικό δείκτη διάθλασης, φαινόμενο το οποίο δεν συναντάται στα φυσικά υλικά. Η αρνητική διάθλαση επιτρέπει στα κύματα να κάμπτονται προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά, με αποτέλεσμα να προσφέρουν μοναδικά οπτικά φαινόμενα και δυνατότητες απεικόνισης σε υποκύματα.

Ηλεκτρομαγνητική απόκρυψη: Τα μεταλλικά μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να κάμπτουν το φως ή άλλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα γύρω από ένα αντικείμενο, κάνοντάς το να φαίνεται αόρατο ή καλυμμένο από τα κύματα αυτά. Αυτή η έννοια της απόκρυψης έχει καταδειχθεί σε διάφορες μελέτες, αν και οι πρακτικές εφαρμογές για το ορατό φως εξακολουθούν να αποτελούν πρόκληση.

Υπερκάλυψη: Τα μεταλλικά μπορούν να ξεπεράσουν το όριο περίθλασης των συμβατικών φακών, επιτρέποντας την απεικόνιση σε μήκος κύματος. Με τον χειρισμό του μετώπου κύματος του φωτός, μεταλλικά με τις συγκεκριμένες ιδιότητες μπορούν να εστιάσουν το φως πέρα από αυτό που είναι δυνατό με τους παραδοσιακούς φακούς, παρέχοντας δυνατότητες απεικόνισης υψηλής ανάλυσης.

Έλεγχος απορρόφησης και εκπομπής: Τα μεταλλικά μπορούν να σχεδιαστούν για να ελέγχουν την απορρόφηση και την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συγκεκριμένες συχνότητες. Αυτή η ιδιότητα έχει επιπτώσεις σε εφαρμογές όπως η συλλογή ενέργειας, οι ηλιακές κυψέλες και η θερμική διαχείριση.

Ακουστικά μεταλλικά: Οι έννοιες των μεταλλικών δεν περιορίζονται στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, αλλά μπορούν επίσης να επεκταθούν για τον χειρισμό των ηχητικών κυμάτων. Τα ακουστικά μεταλλικά έχουν αναπτυχθεί για τον έλεγχο των ηχητικών κυμάτων, οδηγώντας σε

εφαρμογές όπως η μείωση του θορύβου, η απεικόνιση με υπερήχους και η αρχιτεκτονική ακουστική.

Τα μεταϋλικά συνήθως κατασκευάζονται με τη χρήση μοναδιαίων κυψελών ή δομικών στοιχείων υπο-μηκών κύματος που επαναλαμβάνονται σε περιοδική διάταξη. Αυτά τα μοναδιαία κύτταρα σχεδιάζονται ώστε να διαθέτουν μοναδικές ηλεκτρομαγνητικές ή ακουστικές ιδιότητες, οι οποίες συλλογικά οδηγούν στις επιθυμητές ιδιότητες του μεταϋλικού στο σύνολό του.

Οι δυνητικές εφαρμογές των μεταϋλικών είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν οπτικά φίλτρα, ιατρικές συσκευές, απομακρυσμένες αεροδιαστημικές εφαρμογές, αισθητήρες ανίχνευσης και συσκευές παρακολούθησης, έξυπνη διαχείριση ηλιακής ενέργειας, λέιζερ, επικοινωνία στο πεδίο της μάχης υψηλής συχνότητας και φακούς για κεραίες υψηλής απόδοσης, βελτίωση αισθητήρων υπερήχων, ακόμη και θωράκιση κατασκευών από σεισμούς. Τα μεταϋλικά επίσης, προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας ισχυρών υπερ-φακών. Ένας τέτοιος φακός μπορεί να επιτρέψει την απεικόνιση κάτω από το όριο της περίθλασης, δηλαδή την ελάχιστη ανάλυση $d=\lambda/(2NA)$ που μπορεί να επιτευχθεί με συμβατικούς φακούς. Τα οπτικά μεταϋλικά, όταν ενσωματώνονται με οπτικά μέσα εγγραφής (εικόνα ή βίντεο), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη οπτικής πυκνότητας δεδομένων υψηλότερης από την μέχρι τώρα δυνατότητα που περιορίζεται από την περίθλαση. Τα ακουστικά και σεισμικά μεταϋλικά αποτελούν επίσης ερευνητικούς τομείς.

(«*Metamaterials : Physics and Engineering Explorations*», *Engrheta, Ziolkowski*)

1.2) Διαφανή Αγωγή Υμένια (Φιλμ)

Εισαγωγή

Τα Διαφανή Αγωγή Υμένια (Transparent Conductive Films / TCF) είναι λεπτές μεμβράνες από οπτικά διαφανές και ηλεκτρικά αγωγικό υλικό. Η πρωταρχική λειτουργία μιας διαφανούς αγωγίμης μεμβράνης είναι να παρέχει ένα αγωγικό στρώμα διατηρώντας παράλληλα υψηλή οπτική διαφάνεια. Αυτό επιτρέπει στο φως να διέρχεται μέσα από το φιλμ με ελάχιστη παραμόρφωση ή απορρόφηση. Συνήθως, τα TCF εναποτίθενται σε υποστρώματα όπως γυαλί, πλαστικό ή εύκαμπτα υλικά. Αποτελούν σημαντικό στοιχείο σε μια σειρά από ηλεκτρονικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένων οθονών υγρών κρυστάλλων , OLED , οθονών αφής και φωτοβολταϊκών.

1.2.1) Indium Tin Oxide (ITO)

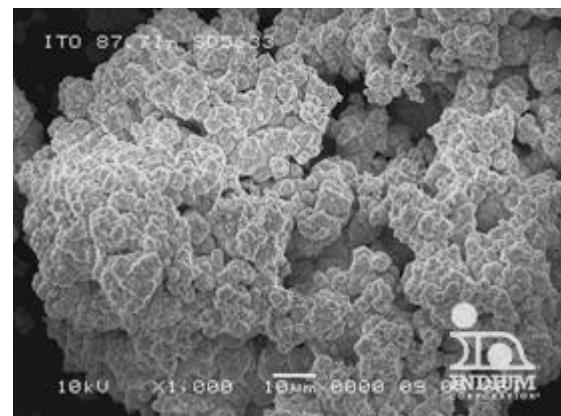
Το Οξειδίο του Κασσίτερου του Ινδίου (ITO) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως υλικό για διαφανή αγώγιμα φιλμ λόγω του πολύ καλού συνδυασμού οπτικής διαφάνειας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της χημικής του αντοχής στην υγρασία και της ευκολίας με την οποία μπορεί να εναποτεθεί ως λεπτό υμένιο πάνω σε άλλες επιφάνειες (διαφανείς ή μη).

Τα λεπτά υμένια οξειδίου του κασσίτερου του ινδίου εναποτίθενται συνήθως σε επίπεδες επιφάνειες με φυσική εναπόθεση ατμών. Συχνά χρησιμοποιείται η εξάτμιση με δέσμη ηλεκτρονίων ή μια σειρά τεχνικών εναπόθεσης με σπατουλάρισμα (sputtering).

α)



β)



Εικόνα 1.2 : (α) Σκόνη ITO, (β) Σκόνη ITO μεγεθυμένη x1000 φορές (Πηγή : indium.com)



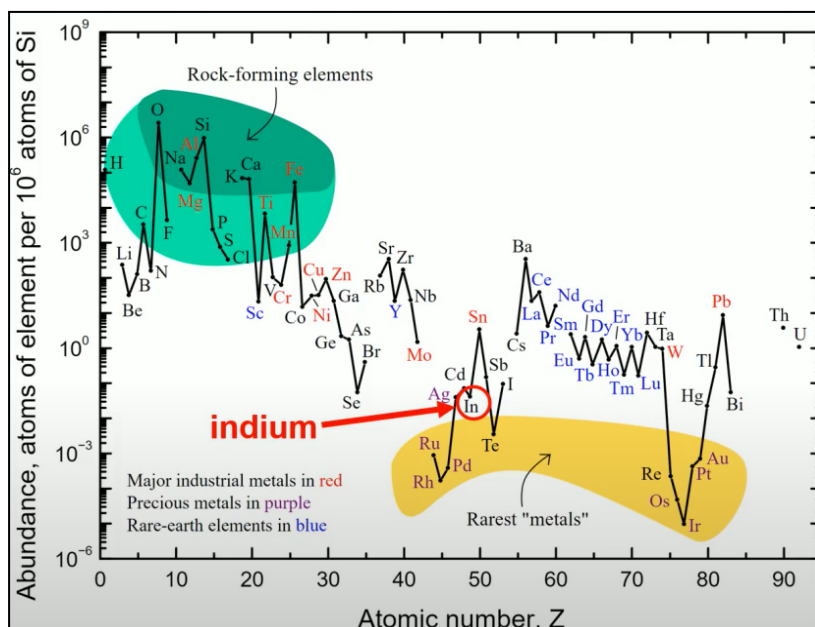
Εικόνα 1.3 : Δείγμα λεπτού αγώγιμου φιλμ με επίστρωση ITO.

Το Οξειδίο Κασσίτερου του Ινδίου, ευρέως γνωστό ως ΙΤΟ είναι μια τριμερής σύνθεση Ινδίου, Κασσίτερου και Οξυγόνου του οποίου οι αναλογίες ποικίλουν. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε οξυγόνο, μπορεί να περιγραφεί είτε ως κεραμικό είτε ως κράμα. Η συνηθέστερη σύνθεση του ΙΤΟ κορεσμένη σε οξυγόνο είναι 74% In, 18% Sn και 8% O κατά βάρος. Σε λεπτά στρώματα, η όψη του είναι διαφανής και άχρωμη, ενώ σε πιο συμπαγή μορφή έχει χρώμα από κιτρινωπό έως γκριζό. Επίσης, στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος λειτουργεί ως κάτοπτρο και μοιάζει με μέταλλο.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, το ΙΤΟ είναι το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στον τομέα των διάφανων λεπτών ημιαγωγικών μεμβρανών. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές του είναι τόσο σε οθόνες LCD, LED, OLED τηλεοράσεων και smartphone, όσο και σε φωτοβολταϊκά που συμβάλλουν στην βελτίωση της απόδοσης τους. Ωστόσο, το Ινδίο το οποίο περιέχεται σε μεγάλο ποσοστό (γύρω στο 74%) στη σύσταση του ΙΤΟ, είναι ένα πολύ σπάνιο και κατά συνέπεια πολύ ακριβό στοιχείο, όπως φαίνεται και στις εικόνες 1.2 και 1.3, αποτελώντας τροχοπέδη στην περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή του ΙΤΟ σε περισσότερους τομείς. Επίσης, σημαντικό μειονέκτημα του ΙΤΟ αποτελεί η ευθραυστότητα του ως λεπτό μεμβράνη σε κάποιες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών OLED και LED για smartphone.

Ως αποτέλεσμα, οι ερευνητές και οι βιομηχανίες που ασχολούνται με την τεχνολογία των υλικών τα τελευταία χρόνια έχουν εντείνει τις προσπάθειες αναζήτησης εναλλακτικών, καινοτόμων, πιο βιώσιμων και οικονομικότερων υλικών με στόχο τον περιορισμό της χρήσης και τελικά την σταδιακή αντικατάσταση του ΙΤΟ τα επόμενα χρόνια.

(«Thin Solid Films», Tadatsugu Minami)



Εικόνα 1.4 : Πλήθος ατόμων των διαφόρων χημικών στοιχείων ανά εκατομμύρια άτομα Σιδήρου (Πηγή : Wikipedia)



Εικόνα 1.5 : Διακυμάνσεις στην τιμή του Ινδίου (\$ / kg) από το 1992 έως το 2012 (Πηγή : dailymetalprices.com)

1.2.2) Εναλλακτικά υλικά για την αντικατάσταση του ΙΤΟ

Κάποια εναλλακτικά υλικά στον τομέα των διαφανών αγώγιμων υμενίων που έχουν αναπτυχθεί είναι :

- Διαφανή αγώγιμα πολυμερή: Πολυμερή όπως το πολυ(3,4-αιθυλενοδιοξυθειοφαίνιο) (PEDOT) και η πολυανιλίνη (PANI) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αγώγιμων υμενίων με καλή διαφάνεια. Τα υλικά αυτά προσφέρουν ευελιξία, χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας και δυνητικά χαμηλότερο κόστος.
- Μεταλλικό πλέγμα: Λεπτά μεταλλικά πλέγματα ή πλέγματα, όπως νανοκαλώδια αργύρου ή πλέγματα χαλκού, μπορούν να σχεδιαστούν ή να εναποτεθούν σε ένα υπόστρωμα για τη δημιουργία αγώγιμων υμενίων. Οι μεμβράνες μεταλλικών πλεγμάτων παρέχουν υψηλή αγωγιμότητα, καλή διαφάνεια και ευελιξία. Είναι κατάλληλα για εύκαμπτες και κυρτές οθόνες.
- Νανοσωλήνες άνθρακα (CNT): Οι CNTs είναι κυλινδρικές δομές άνθρακα με εξαιρετικές ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Μπορούν να σχηματίσουν ένα αγώγιμο δίκτυο όταν διασκορπίζονται ή ευθυγραμμίζονται σε ένα υπόστρωμα, με αποτέλεσμα διαφανή αγώγιμα φιλμ. Τα TCF με βάση τους CNT προσφέρουν καλή διαφάνεια, ευελιξία και υψηλή αγωγιμότητα.
- Γραφένιο: Το γραφένιο, ένα ενιαίο στρώμα ατόμων άνθρακα τοποθετημένων σε δισδιάστατο κηρήθραίο πλέγμα, διαθέτει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και διαφάνεια. Μπορεί να εναποτεθεί ως λεπτό υμένιο για τη δημιουργία διαφανών αγώγιμων στρωμάτων. Τα TCF με βάση το γραφένιο υπόσχονται διάφορες εφαρμογές.

(«*Microelectronic Engineering*», Alexandrova, Kurtev, Videkov, Tzanova, Schintke)

1.3) NANOWEB®

Εισαγωγή

Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης συνεχίζονται για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων, των επιδόσεων και των διαδικασιών κατασκευής των διαφανών αγωγίμων υμενίων. Ο στόχος είναι να επιτευχθούν υλικά με υψηλή αγωγιμότητα, ανώτερη διαφάνεια, ευελιξία, ανθεκτικότητα και οικονομική αποδοτικότητα για την ικανοποίηση των εξελισσόμενων αναγκών των ηλεκτρονικών συσκευών και των αναδυόμενων τεχνολογιών. Ένα τέτοιο υλικό που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια προς αυτή την κατεύθυνση είναι το Nanoweb®.

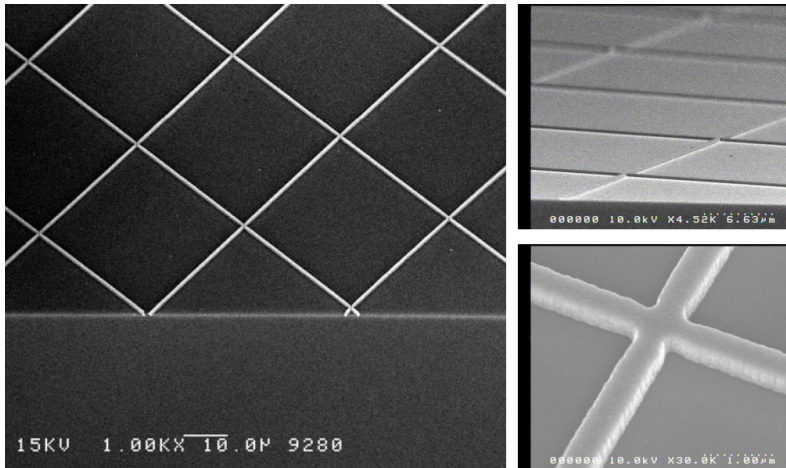
1.3.1) Γενικές πληροφορίες / Περιγραφή του Nanoweb®

Το Nanoweb® είναι ένα καινοτόμο υλικό και ανήκει στην κατηγορία των μεταλλικών, έχει δηλαδή ιδιότητες που δεν συναντώνται σε φυσικά υλικά. Αναπτύχθηκε από την εταιρία Meta Materials Inc., η οποία είναι μια startup εταιρεία τεχνολογίας που εδράζεται στον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες και μεταξύ άλλων δραστηριοποιείται στην ανάπτυξη νέων επαναστατικών τεχνολογιών στον τομέα των προηγμένων υλικών και των μεταλλικών.

Το Nanoweb είναι ένα λεπτό διαφανές αγωγίμο υμένιο (film) το οποίο δεν περιέχει καθόλου Ίνδιο στην σύστασή του (Indium free material) και σχεδιάστηκε με σκοπό να παρουσιάσει μια ποιοτικότερη λύση στην αυξημένη ζήτηση ημιαγωγίμων υμενίων που δεν έχουν ως βάση το Ίνδιο, από αυτές που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα. Διαθέτει ένα μικροσκοπικό, νανοδομημένο λεπτό μεταλλικό στρώμα που στην πραγματικότητα είναι ένα δισδιάστατο πλέγμα συνεχών συρμάτων (βλ. Εικόνα 1.6) και μπορεί να εναποτεθεί σε οποιαδήποτε γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του πλέγματος, του επιτρέπει να είναι ιδιαίτερα αγωγίμο και διαφανές ταυτόχρονα. Έτσι, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του, μπορεί να λειτουργεί χρησιμοποιώντας πολλή λίγη ενέργεια, ενώ παραμένει ιδιαίτερα διαυγές και διαφανές.

Το πλέγμα του, φτιαγμένο από εξαιρετικά αγωγίμες γραμμές επιτρέπει τη διέλευση περισσότερης ενέργειας μέσω μιας συνεχούς επιφάνειας σε σχέση με τα μη διαμορφωμένα αγωγίμα υλικά.

Το μεταλλικό πλέγμα μπορεί να αποτελείται από ασήμι, αλουμίνιο, πλατίνα, χαλκό ή νικέλιο, ωστόσο μπορεί να κατασκευαστεί με σχεδόν οποιοδήποτε είδος μετάλλου, καθώς η διαφάνεια του Nanoweb εξαρτάται μόνο από τον γεωμετρικό σχεδιασμό του πλέγματος και όχι από τον τύπο του μεταλλικού υλικού. Οι γραμμές αυτές είναι κατασκευασμένες σε τόσο μικρή κλίμακα (< 1 μm) που δεν μπορούν να γίνουν ορατές στο ανθρώπινο μάτι.

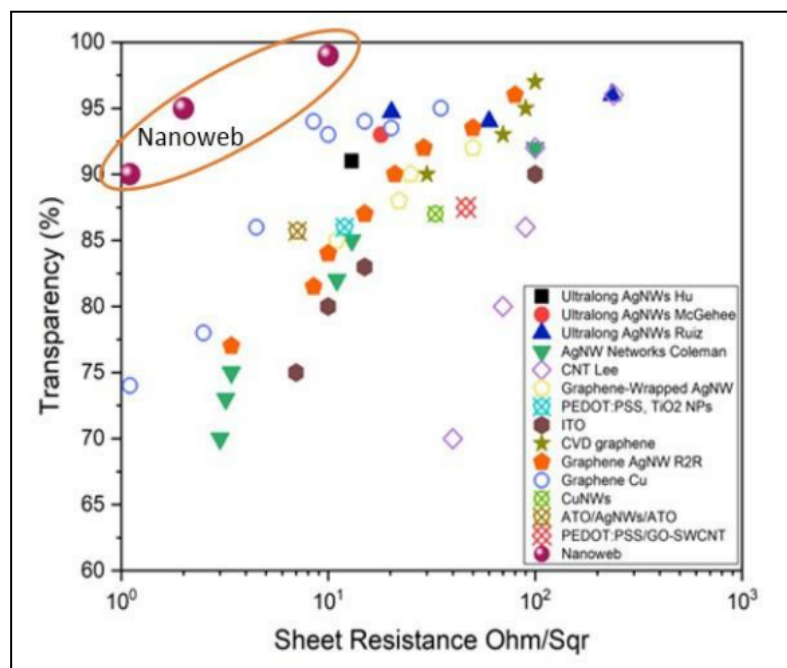


Εικόνα 1.6 : Μεταλλικό πλέγμα Nanoweb - εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. (Πηγή : Meta Materials)

1.3.2) Τεχνικά χαρακτηριστικά και συγκριτικά πλεονεκτήματα του Nanoweb®

→ Υψηλή αγωγιμότητα και μεγάλη διαφάνεια

Το Nanoweb® έχει υψηλή αγωγιμότητα (High conductivity), με μικρή ειδική αντίσταση (0,1 - 20 Ω/sq), και ταυτόχρονα, χάρη στις αόρατες με γυμνό μάτι μεταλλικές γραμμές παραμένει εξαιρετικά διαφανές (95 - 99% διαφάνεια). Τα επίπεδα αγωγιμότητάς του μπορούν να διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του μετάλλου και τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του πλέγματος (πάχος γραμμής, ύψος, απόσταση μεταξύ των κυψελών). Συγκριτικά με την τωρινή τεχνολογία του ITO που κυριαρχεί στην αγορά αλλά και άλλων παρόμοιων υλικών, το Nanoweb υπερτερεί και στα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά, όντας το πιο διαφανές και περισσότερο αγώγιμο ταυτόχρονα. Η σύγκριση είναι εμφανέστερη στην Εικόνα 1.5 .



Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα Διαφάνειας - Αντίστασης Φύλλου. Σύγκριση των διαφόρων υφιστάμενων TCFs (Πηγή : Meta Materials)

→ Ευελιξία και ανθεκτικότητα

Η λεπτή μεμβράνη (film) πάνω στην οποία είναι τοποθετημένο το αγώγιμο μεταλλικό πλέγμα είναι κατασκευασμένη από πολύ εύκαμπτο υλικό, με αποτέλεσμα να επιτρέπει την κάμψη, ακόμα και την αναδίπλωση χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή του. Το Nanoweb® έχει επίσης την ικανότητα να διαμορφώνεται πάνω σε ένα αντικείμενο, καλύπτοντας την επιφάνεια διατηρώντας τις ιδιότητές του. Επιπλέον, το Nanoweb® είναι ελαφρύ, αντέχει σε ακραία περιβάλλοντα και μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες εύκαμπτες ή άκαμπτες επιφάνειες.

→ Κάλυψη μεγάλων επιφανειών και χαμηλή τάση λειτουργίας

Το Nanoweb® κατασκευάζεται σε μεγάλα ρολά με την τεχνική της Λιθογραφίας Κυλιόμενης Μάσκας (Rolling Mask Lithography / RML®) (βλέπε Κεφάλαιο 1.3.3) και έτσι μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες γυαλιού. Μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι το μέγεθος των κομματιών του Nanoweb δεν επηρεάζει την απόδοσή του. Επίσης, η υψηλή αγωγιμότητα του Nanoweb® του επιτρέπει να λειτουργεί με μπαταρίες και τροφοδοτικά χαμηλής τάσης που συναντώνται για παράδειγμα σε αυτοκίνητα, μέσα μεταφοράς και αεροπλάνα, χωρίς την ανάγκη μετασχηματιστών. Μικρές μπαταρίες ή ακόμη και μικροί συλλέκτες ενέργειας είναι επαρκείς για την τροφοδοσία του Nanoweb® σε συσκευές όπως γυαλιά, κινητά τηλέφωνα και έξυπνα ρολόγια.

→ Χαμηλό κόστος

Το Nanoweb® μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα με αποτέλεσμα την δραματική μείωση του κόστους όσο αυξάνεται ο όγκος παραγωγής.

1.3.3) Τρόπος κατασκευής / παραγωγή Nanoweb

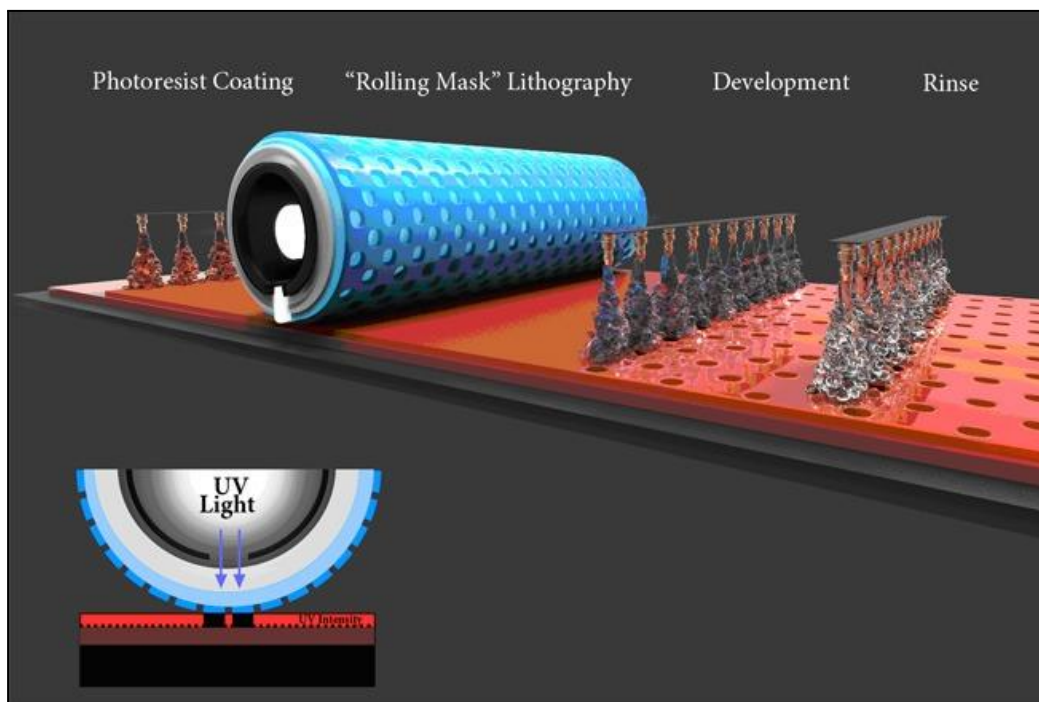
1.3.3.1) Rolling Mask Lithography

Η μέθοδος Rolling Mask Lithography (RML®) είναι μια μέθοδος λιθογραφίας, που στα ελληνικά ονομάζεται Λιθογραφία με Κυλιόμενη Μάσκα. Η λιθογραφία με κυλιόμενη μάσκα είναι κατοχυρωμένη τεχνολογία κατασκευής με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, η οποία προσφέρει ένα μοναδικό πλεονέκτημα στον κλάδο των έξυπνων υλικών.

Η RML® χρησιμοποιεί ένα παράλληλο σύστημα δημιουργίας μοτίβων που μπορεί εύκολα να επεκταθεί τόσο σε μεγάλες επιφάνειες άκαμπτων υλικών υποστρώματος (πλάκες και πάνελ) όσο και σε ρολά εύκαμπτων ταινιών. Η συγκεκριμένη μέθοδος νανοκατασκευής συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της Μαλακής Λιθογραφίας (Soft Lithography) και της Οπτικής λιθογραφίας κοντινού πεδίου (Near-field Optical Lithography) και έχει αποδειχθεί αξιόπιστη στην κατασκευή νανοδομών πέρα από το όριο περίθλασης.

Η τεχνολογία RML χρησιμοποιείται για την παραγωγή ορισμένων τύπων έξυπνων υλικών από διάφορα υποστρώματα, όπως γυαλί, μεταλλικούς ημιαγωγούς και πολυμερή φιλμ.

Χρησιμοποιεί φωτολιθογραφία μετατόπισης φάσης κοντινού πεδίου, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί ως συνεχής, απρόσκοπτη και κλιμακούμενη διαδικασία παραγωγής και χρησιμοποιείται για την κατασκευή έξυπνων υλικών σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Η τεχνολογία RML είναι επαναστατική διότι βάση αυτής δημιουργείται μια νέα γενιά οπτικών μεταλλικών που ικανοποιούν τις εμπορικές απαιτήσεις για νανοδομημένες επιφάνειες με μεγάλη επιφάνεια και χαμηλό κόστος. Επίσης είναι συμβατή με τους τρόπους επεξεργασίας roll-to-plate και roll-to-roll και είναι απαλλαγμένη από τους περιορισμούς που σχετίζονται με την τελευταίας τεχνολογίας οπτική λιθογραφία προβολής, τους περιορισμούς στον τύπο του μοτίβου που υπάρχουν μέθοδο της ολογραφικής και αυτοσυναρμολογούμενης λιθογραφίας και τους περιορισμούς της λιθογραφίας νανο-αποτύπωσης.



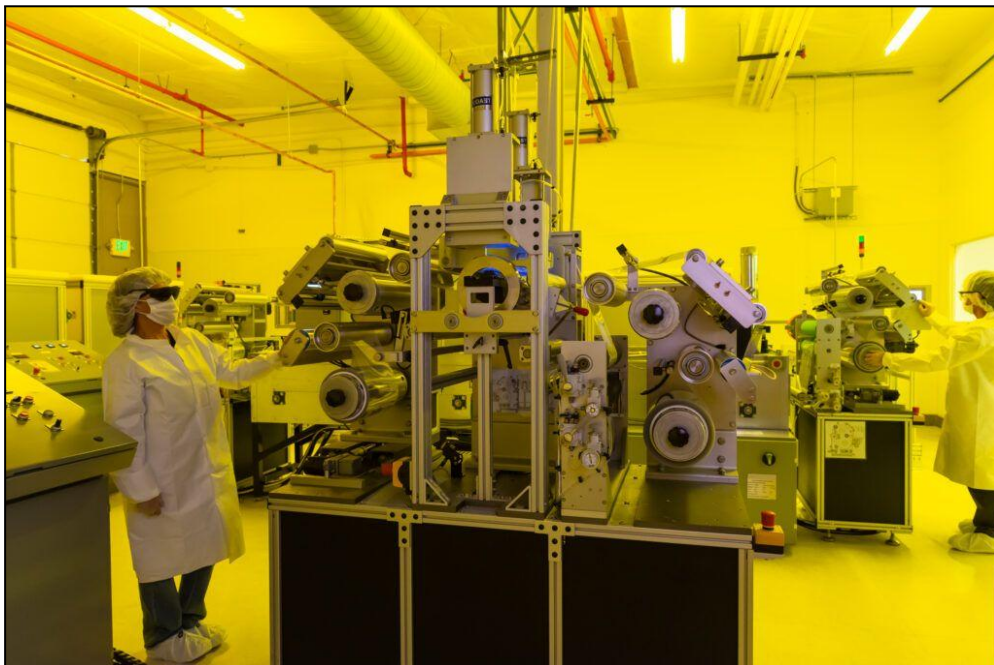
Εικόνα 1.8 : 3D απεικόνιση διαδικασίας RML (Πηγή : Meta Materials Inc.)

Προκειμένου να διαφοροποιηθεί ο τρόπος με τον οποίο το φως αλληλεπιδρά με δομημένα υλικά, χρησιμοποιείται εσωτερικό λογισμικό υπολογιστή για να κατασκευαστούν νανοδομές με μοτίβα. Μοντελοποιείται, βελτιστοποιείται και στη συνέχεια μεταφέρεται σε μια μαλακή κυλινδρική φωτομάσκα. Η RML χρησιμοποιεί τη μάσκα για να σχεδιάσει πάνω σε φωτοευαίσθητα υλικά που εναποτίθενται σε μια επιφάνεια, όπως μια γυάλινη πλάκα ή ένα λεπτό πλαστικό φιλμ. Στη συνέχεια, τα πρότυπα (patterns) χρησιμοποιούνται ως μάσκες χάραξης για την μετέπειτα χάραξη ενός υποστρώματος (γυαλιού, ημιαγωγού) ή ως πρότυπα για την κατασκευή νανοδομημένων μετάλλων ή άλλων λειτουργικών υλικών. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα επιθυμητό μοτίβο στην επιφάνεια, η τεχνική RML χρησιμοποιεί υπεριώδη (UV) ακτινοβολία καθώς η μάσκα κυλιέται πάνω στο φωτοευαίσθητο φιλμ. Η τεχνική RML είναι εξαιρετικά χρήσιμη και επαναστατική λόγω της μοναδικής της ικανότητας να δημιουργεί νανοδομές πάνω σε φιλμ σε εξαιρετικά μικρή κλίμακα, που αγγίζει τα 175 νανόμετρα. Ανάλογα με τον τύπο του έξυπνου υλικού που παράγεται, είναι δυνατό να προστεθούν περισσότερα στρώματα στο φιλμ για να αυξηθούν τη λειτουργικότητά του.

Η ευελιξία που έχει η μέθοδος RML προάγει την έρευνα για τα έξυπνα υλικά και συμβάλλει στην παραγωγή νέων λύσεων μεταλλικών που εκτείνονται από συστήματα ιατρικής απεικόνισης έως εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τις τηλεπικοινωνίες και τα ηλεκτρονικά ευρείας κατανάλωσης, μέχρι δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη.

1.3.3.2) Διαδικασία παραγωγής του Nanoweb®

Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής του Nanoweb® απαιτεί ένα εξαιρετικά αποστειρωμένο περιβάλλον, για τον λόγο αυτό γίνεται σε cleanroom. Τα cleanrooms είναι εργαστήρια ειδικά σχεδιασμένα να διατηρούν την συγκέντρωση μικροσκοπικών αιωρούμενων σωματιδίων σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθώς ελέγχονται για μολύνσεις και καθαρίζονται ενεργά.



Εικόνα 1.9 : Δημιουργία του μοτίβου με την τεχνική RML στο υπόστρωμα που έχει προηγουμένως επικαλυφθεί με φωτοανθεκτικό υλικό - μέρος της διαδικασίας παραγωγής του Nanoweb (Πηγή : Meta Materials Inc.)

Πρώτα από όλα, η διαδικασία παραγωγής του Nanoweb είναι μια συνεχής διαδικασία διαδοχικών “roll to roll” διεργασιών. Το λεπτό φιλμ φτιαγμένο από πλαστικό (PET) έρχεται σε ρολό το οποίο ξετυλίγεται σιγά σιγά και η διαδικασία ξεκινά με την εναπόθεση στρώματος φωτοανθεκτικού υλικού (photoresist) πάνω στην επιφάνεια του φιλμ. Στη συνέχεια, η ταινία περνάει από θάλαμο μέσα στον οποίο εκτίθεται σε ακτινοβολία και στερεοποιείται το φωτοανθεκτικό υλικό, πριν εκτεθεί στην τεχνολογία RML® (που αναλύθηκε πιο πάνω), όπου με τη χρήση ακτινοβολίας UV 365 nm εκτυπώνεται το μοτίβο (pattern) πάνω στο στρώμα του φωτοανθεκτικού υλικού που στη συνέχεια θα διαμορφώσει το σχήμα του μεταλλικού πλέγματος. Έπειτα, η ταινία περνάει πρώτα μέσα από θάλαμο θερμοκρασίας 110°C και “ψήνεται” για να σταθεροποιηθεί η χημική σύσταση του εκτυπωμένου σχεδίου, και

ακολουθώντας μέσα από ειδικά χημικά και ακτινοβολία έτσι ώστε να σχηματιστούν οι τελικές τρισδιάστατες δομές που επιθυμούμε πάνω στο φωτοανθεκτικό υλικό. Μετά από όλη την παραπάνω διαδικασία γίνεται η εναπόθεση του μετάλλου (μπορεί να είναι Ag,Cu,Au,Al και άλλα) πάνω στην επιφάνεια για να δημιουργηθεί ένα συνεχές μεταλλικό πλέγμα. Τελικά, με τη βοήθεια χημικών διεργασιών αφαιρείται το φωτοανθεκτικό υλικό και το περιττό μέταλλο από την επιφάνεια και το Nanoweb πλέον, στεγνώνει, τυλίγεται σε ρολό και αποθηκεύεται.

1.3.4) Πεδία εφαρμογής του Nanoweb

Γενικά το Nanoweb αποτελεί μία εξαιρετική περίπτωση στον τομέα των λεπτών αγωγίμων υμενίων, καθώς δεν περιέχει Ίνδιο (Indium free) και ταυτόχρονα έχει ανώτερες ιδιότητες από το ITO, όπως μεγαλύτερη διαφάνεια, υψηλότερη αγωγιμότητα, κλπ (βλ. Κεφάλαιο 1.3.2). Αυτά του τα πλεονεκτήματα το καθιστούν χρήσιμο σε διάφορα τεχνολογικά πεδία. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται κάτω :

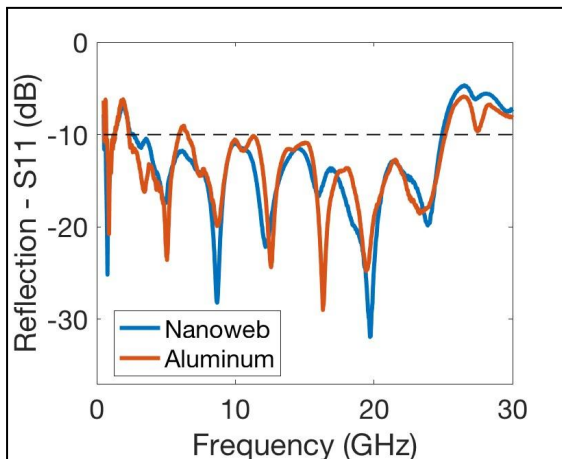
→ Οθόνες αφής και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης

Οι οθόνες αφής επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με έναν υπολογιστή αγγίζοντας περιοχές της οθόνης. Για να γίνει αυτό, η οθόνη πρέπει να διαθέτει ένα στρώμα υλικού που μπορεί να μετατρέψει την κίνηση του δακτύλου σε υπολογιστική πληροφορία. Τα υλικά των οθονών αφής πρέπει να είναι ιδιαίτερα διαφανή και αγωγιμα, ενώ παράλληλα να είναι πολύ διαυγή και μην δημιουργούν αντανάκλασεις. Το Nanoweb είναι ιδανικό υλικό για να εκπληρώσει αυτό το έργο, καθώς εκτός από το ότι διαθέτει μεγάλη διαφάνεια και είναι εξαιρετικά αγωγιμο, είναι πολύ εύκαμπτο, γεγονός που δίνει επιπλέον λύσεις στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών αφής.

→ Τηλεπικοινωνίες 5G και διάφανες κεραίες 5G

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G υπόσχονται υψηλές ταχύτητες ασύρματα και υποστήριξη για πολύ περισσότερες ταυτόχρονες συνδέσεις. Ωστόσο, αυτά τα σήματα υψηλής συχνότητας έχουν μικρότερη εμβέλεια, και εμποδίζονται ή απορροφώνται εύκολα από αντικείμενα στο περιβάλλον. Η διαφανής αγωγιμη μεμβράνη του Nanoweb είναι σε θέση να αντανάκλα ή ακόμα και να ανακατευθύνει παθητικά τα σήματα 5G προς ασυνήθιστες για τα κοινά υλικά κατευθύνσεις, χωρίς να απαιτεί ισχύ ή σύνδεση δικτύου, προσφέροντας μια πιο βιώσιμη, αισθητική και οικονομικά αποδοτική λύση σε σύγκριση με την εγκατάσταση πρόσθετου υλικού δικτύου.

Επιπλέον, το Nanoweb μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή διάφανων κεραιών. Οι διάφανες κεραίες είναι χρήσιμες για την ενσωμάτωση της λειτουργικότητας της κεραίας σε επιφάνειες, διατηρώντας παράλληλα την ορατότητα, όπως τα παρμπρίζ και τα παράθυρα οχημάτων. Το βασικό πλεονέκτημα των διαφανών κεραιών Nanoweb είναι ότι διατηρείται υψηλή αγωγιμότητα χωρίς να θυσιάζεται η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των κεραιών. Παρακάτω στο διάγραμμα συγκρίνεται η απόδοση μίας διάφανης κεραίας 5GHz από Nanoweb με μια πανομοιότυπη μεταλλική. Παρατηρείται ότι η διάφανη κεραία Nanoweb (μπλέ χρώμα) έχει παρόμοια συμπεριφορά με την συμβατική μεταλλική κεραία (πορτοκαλί χρώμα).



Εικόνα 1.10 : Σύγκριση κεραιών - διάφανη από Nanoweb με συμβατική μεταλλική (Πηγή : Meta Materials)

→ **Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση σε φούρνους μικροκυμάτων (EMI Shielding)**

Το Nanoweb μπορεί να αποτεθεί πάνω σε τζάμι φούρνου μικροκυμάτων, καθώς εξασφαλίζει την θωράκιση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται μέσα στον φούρνο κατά την λειτουργία του, προστατεύοντας τον άνθρωπο από την ακτινοβολία μικροκυμάτων και παράλληλα παρέχει έως και 99% διαφάνεια επιτρέποντας έτσι την οπτική επαφή με το εσωτερικό του. Αυτό είναι δυνατό διότι το μεταλλικό πλέγμα είναι κατασκευασμένο σε κλίμακα μικρότερη από 1μm με αποτέλεσμα να αντανάκλα την επιβλαβή ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων μικροκυμάτων (RF).

→ **Αποπαγοποίηση επιφανειών και αποθαμβωτική δράση**

Το Nanoweb λόγω της υπο-μικροδομής του έχει την ικανότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν σε αυτό λοιπόν εφαρμοστεί συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, χάρη στην αντίσταση που έχει θερμαίνεται. Επίσης, είναι αρκετά εύκαμπτο και ανθεκτικό ώστε να κάμπτεται, και να διπλώνεται ή να θερμοδιαμορφώνεται χωρίς να διακυβεύεται η αγωγιμότητα ακεραιότητά του. Έτσι, μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε διαφανείς επιφάνειες όπως τζάμια, παρμπρίζ αυτοκινήτων ή παράθυρα αεροπλάνων και να χρησιμοποιηθεί ως θερμαντήρας αντίστασης για το ξεπάγωμα ή το ξεθόλωμα των τζαμιών (μικρών ή και μεγάλων επιφανειών) σε πολύ λίγο χρόνο με μεγάλη αποτελεσματικότητα και ευκολία. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και σε γυαλιά με την ίδια λειτουργία.

* **Επισήμανση** : Όλα τα παραπάνω στοιχεία και οι πληροφορίες που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1.3 σχετικά με το Nanoweb χρησιμοποιήθηκαν με την συναίνεση της Meta Materials και βρίσκονται αναρτημένα στην επίσημη ιστοσελίδα της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.1) ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1.1) Ηλεκτρική Αντίσταση και παραγωγή θερμότητας

Ο νόμος που συσχετίζει και περιγράφει τα φυσικά μεγέθη (τάση (V) και ένταση (I) του ρεύματος) που ορίζουν την σταθερή ηλεκτρική αντίσταση (R) ενός αντιστάτη είναι ο νόμος του Ohm : $R = \frac{V}{I}$

Επίσης, σύμφωνα με το νόμο του Joule, όπως διατυπώθηκε από τον Άγγλο φυσικό, “η θερμότητα που απελευθερώνεται από τον αγωγό είναι ανάλογη της αντίστασης του, του τετραγώνου της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει και βέβαια του χρονικού διαστήματος που αυτός διαρρέεται από ρεύμα”, άρα ισχύει η σχέση : $dq = I^2 \cdot R \cdot dt$

διαιρώντας με τον χρόνο προκύπτει ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας :

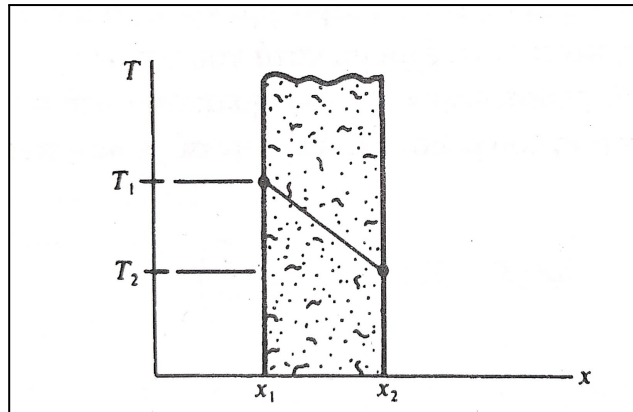
$$\frac{dq}{dt} = I^2 \cdot R \Rightarrow Q = I^2 \cdot R \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

2.1.2) Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας

2.1.2.1) Μεταφορά θερμότητας με Αγωγή

Ο φυσικός μηχανισμός της αγωγής είναι η διάχυση της ενέργειας που προέρχεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων ενός μέσου. Η διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα ομογενές υλικό οδηγεί σε ένα ρυθμό μεταφοράς ενέργειας εντός του μέσου. Στην μονοδιάστατη και σταθερή περίπτωση, ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας διαμέσου ενός τοιχώματος θα πρέπει να δίνεται από την ακόλουθη έκφραση :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{Σχέση 2.2})$$



Εικόνα 2.1 : Θερμοκρασιακή Διανομή Μονοδιάστατης Μόνιμης ροής θερμότητας
(Πηγή : « Heat Transfer », Donald Pitts, Leighton Sisson)

όπου $\partial T/\partial n$ είναι η θερμοκρασιακή κλίση κάθετη στην επιφάνεια A. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k είναι μία πειραματική σταθερά για το εν λόγω μέσο και μπορεί να εξαρτάται από άλλες φυσικές ιδιότητες όπως από τη θερμοκρασία και την πίεση. Οι μονάδα μέτρησης του k είναι W/mK στο διεθνές σύστημα SI.

Η παραπάνω σχέση (Σχέση 2.1) είναι γνωστή ως νόμος του Fourier. Το αρνητικό πρόσημο στο νόμο του Fourier υπάρχει διότι σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, Θερμική μεταφορά ενέργειας που προέρχεται από μία διαφορά θερμοκρασίας πρέπει υποχρεωτικά να είναι από μία θερμότερη προς μία ψυχρότερη περιοχή.

Όπου :

q = ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W)

k =θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος (W/m K)

A = κάθετη ζώνη προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας (m^2)

L = πάχος τοιχώματος

T_2 = θερμοκρασία κρύας επιφάνειας του τοιχώματος (K)

T_1 = θερμοκρασία της ζεστής επιφάνειας του τοιχώματος (K)

Στη μεταφορά θερμότητας μπορούμε να ορίσουμε την θερμική αντίσταση με τον παρακάτω τύπο :

$$Rt = \frac{T_1 - T_2}{q} \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

Από τις Σχέσεις (2.2) και (2.3) προκύπτει η αντίσταση αγωγής: $Rt, cond = \frac{L}{k \cdot A}$ (Σχέση 2.4)

(« Heat Transfer », Pitts, Sisson)

2.1.2.2) Μεταφορά θερμότητας με Συναγωγή

Όταν ένα στερεό σώμα εκτεθεί σε ένα κινούμενο ή ακίνητο ρευστό που έχει θερμοκρασιακή διαφορά με το σώμα τότε ενέργεια μεταφέρεται η συνάγεται από το ρευστό προς το σώμα ή το αντίστροφο. Εάν η θερμοκρασία ελεύθερου ρεύματος του ρευστού (δηλαδή πριν συναντήσει στην επιφάνεια του σώματος) είναι T^∞ και η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού είναι T_s τότε η μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνου δίνεται από τη σχέση :

$$q = hA(T_s - T^\infty) \quad (\text{Σχέση 2.5})$$

όπου :

q = ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (W)

h = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (W/m^2K)

A = εμβαδόν μεταφοράς θερμότητας (m^2)

T_s = θερμοκρασία επιφάνειας (K)

T^∞ = θερμοκρασία ρευστού (K)

Η Παραπάνω σχέση είναι γνωστή και ως νόμος της ψύξης του Newton. Αυτή η εξίσωση ορίζει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (h) ως τη σταθερά αναλογίας που συσχετίζει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας προς την ολική θερμοκρασιακή διαφορά. Οι μονάδα μέτρησης του h είναι W/m^2K στο διεθνές μετρητικό σύστημα SI. Είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι ο θεμελιώδης μηχανισμός ανταλλαγής θερμότητας στο σύνορο ρευστού και στερεού είναι η αγωγή και ότι αυτή η ενέργεια στη συνέχεια απομακρύνεται (συν-άγεται) από την ροή του ρευστού.

Από την σύγκριση, λοιπόν, των σχέσεων (2.2) και (2.5) έχουμε για $y=n$,

$$hA(T_s - T^\infty) = -kA\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_s \quad (\text{Σχέση 2.6})$$

(« Heat Transfer », Pitts, Sisson)

- Ελεύθερη Συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαναγκασμένη ή ως φυσική μεταφορά. Χαρακτηρίζουμε φυσική ή ελεύθερη την συναγωγή θερμότητας όταν η ταχύτητα του ρευστού το οποίο έρχεται σε επαφή με το στερεό σώμα διαφορετικής θερμοκρασίας είναι μηδενική, το ρευστό δηλαδή είναι ακίνητο. Ανεξάρτητα από το αν μπορεί να είναι ένα στρωτό ή τυρβώδες καθεστώς, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός ρευστού δίνεται από νόμο του Νεύτωνα της ψύξης, που αναφέρθηκε παραπάνω.

αντίστοιχα με την αγωγή, για την Θερμική αντίσταση έχουμε τον τύπο $Rt = \frac{(T1-T2)}{Q}$

Επομένως προκύπτει : $Rt, conv = \frac{1}{h \cdot A}$ (Σχέση 2.7)

(«Momentum, heat and mass transfer», Bennett, Carroll, Earle)

2.1.2.3) Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία

Ο τρίτος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας περιγράφει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από απόλυτο κενό ή υλικό μέσο. Πειραματικά διαπιστώνεται ότι η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας, σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή που είναι ανάλογες ως προς μία γραμμική θερμοκρασιακή διαφορά. Ο θεμελιώδης Νόμος των Stefan - Boltzmann είναι :

$$q = \sigma AT^4 \quad (\text{Σχέση 2.8})$$

όπου T η απόλυτη θερμοκρασία. Η σταθερά σ είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας, του μέσου και της θερμοκρασίας και ισούται με $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ στο SI.

(Chapter 1, Zhang, Li, Zhon)

2.1.2.4) Μόνιμη Κατάσταση

Εάν η θερμοκρασιακή κατατομή (profile) εντός του μέσου είναι γραμμική (Εικόνα 2.1) μπορούμε να αντικαταστήσουμε τη θερμοκρασιακή κλίση (μερική παραγωγό) με

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T2 - T1}{x2 - x1} \quad (\text{Σχέση 2.9})$$

Τέτοια γραμμικότητα υπάρχει πάντα σε ομογενές μέσο σταθερού k κατά τη διάρκεια μόνιμης κατάστασης μεταφοράς θερμότητας.

Μεταφορά θερμότητας σε μόνιμη κατάσταση (steady state) συμβαίνει όταν η θερμοκρασία κάθε σημείου του σώματος, συμπεριλαμβανομένων και των επιφανειών, είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Εάν η θερμοκρασία μεταβάλλεται με το χρόνο τότε η ενέργεια αποθηκεύεται ή αφαιρείται από το σώμα.

(« Heat Transfer », Pitts, Sisson)

2.1.3) Ιδιότητες Υλικών

Πρέπει να ορίσουμε κάποιες από τις ιδιότητες της ύλης, οι οποίες είναι σημαντικό να κατανοηθούν σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς εμπλέκονται στους υπολογισμούς που θα γίνουν στα Κεφάλαια 2.3 (Υπολογισμοί θεωρητικού μοντέλου) και 3 (Πειραματικό Μέρος) της παρούσας εργασίας.

2.1.3.1) Πυκνότητα

Η πυκνότητα σε ένα συνεχές μέσο ορίζεται ως η μάζα ανά μονάδα όγκου. Στα περισσότερα στερεά και υγρά σώματα η πυκνότητα είναι ελάχιστα εξαρτώμενη από την θερμοκρασία και με αμελητέα επίδραση της πίεσης μέχρι τις 100 atm. Η πυκνότητα των αερίων, ωστόσο, εξαρτάται άμεσα τόσο από την πίεση, όσο και από την θερμοκρασία. Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας στο διεθνές σύστημα SI είναι τα kg/m^3 .

(Density, Definition, Encyclopedia Britannica)

2.1.3.2) Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας Στερεών

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (k) εκφράζει το ποσό της θερμότητας που περνά από τη μάζα ενός υλικού επιφάνειας $1 m^2$ και πάχους $1 m$ στη μονάδα του χρόνου όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών του σώματος είναι $1^\circ C$.

Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενός γλυκού τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της στερεάς φάσης ενός μετάλλου γνωστής σύστασης εξαρτάται πρωτίστως από τη θερμοκρασία. Γενικά το k για ένα καθαρό μέταλλο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο προσμίξεις στοιχείων συνήθως αντιστρέφουν αυτή την τάση. Σε μη ομογενή υλικά, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται σημαντικά από την φαινομενική πυκνότητα συνολικού όγκου (apparent bulk density), που ισούται με τη μάζα του υλικού διαιρεμένη με τον συνολικό κατεχόμενο όγκο.

(« Heat Transfer », Pitts, Sisson)

2.1.3.3) Συντελεστής Θερμικής Συναγωγιμότητας

Η συναγωγή θερμότητας είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο. Κατά την μοντελοποίηση της, για να προκύψει η εξίσωση που περιγράφει τη θερμοροή (Σχέση 2.5), συχνά πρέπει να ληφθούν υπόψη και να επιλυθούν προβλήματα που σχετίζονται με τη ροή των ρευστών.

Για να απλοποιηθεί λοιπόν η πολυπλοκότητα του φαινομένου, για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις με κατάλληλο συντελεστή μεταφοράς, ο οποίος προκύπτει από πειραματικά δεδομένα για διάφορες περιπτώσεις και διαφορετικές γεωμετρίες προβλημάτων συναγωγής. Η εύρεση του συντελεστή θερμικής συναγωγιμότητας ή απλούστερα του συντελεστή μεταφοράς h γίνεται με την αδιάστατη μορφή του που είναι ο αριθμός Nusselt (Nu) ο οποίος υπολογίζεται συναρτήσει των αριθμών Reynolds (Re) και Prantl (Pr).

(« Heat Transfer », Pitts, Sisson)

2.1.3.4) Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση (Resistivity)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (γνωστή ως ειδική ηλεκτρική αντίσταση ή ειδική αντίσταση όγκου) είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα ενός υλικού που μετρά πόσο ισχυρά αντιστέκεται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Μια χαμηλή ειδική αντίσταση υποδηλώνει ένα υλικό που επιτρέπει εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ειδική αντίσταση παριστάνεται συνήθως με το ελληνικό γράμμα ρ .

Για γνωστό τρισδιάστατο αγωγό ισχύει : $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$, άρα η ειδική αντίσταση περιγράφεται

από τον τύπο : $\rho = R \cdot \frac{l}{A}$, (Ohm*m) (Σχέση 2.10)

(Resistivity Measurement, L.B. Valdes)

2.1.3.5) Αντίσταση φύλλου (Sheet Resistance)

Η αντίσταση φύλλου (επίσης γνωστή ως αντίσταση επιφάνειας ή ειδική αντίσταση επιφάνειας) είναι μια κοινή ηλεκτρική ιδιότητα που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό λεπτών υμενίων αγωγίμων και ημιαγωγίμων υλικών. Είναι ένα μέτρο της πλευρικής αντίστασης μέσω ενός λεπτού τετράγωνου υλικού, δηλαδή της αντίστασης μεταξύ των αντίθετων πλευρών ενός τετραγώνου. Το βασικό πλεονέκτημα της αντίστασης φύλλου έναντι άλλων μετρήσεων αντίστασης είναι ότι είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της επιφάνειας - επιτρέποντας την εύκολη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων.

Η χρησιμότητα της αντίστασης φύλλου σε αντίθεση με την αντίσταση ή την ειδική αντίσταση είναι ότι μετριέται άμεσα χρησιμοποιώντας μια μέτρηση ανίχνευσης τεσσάρων ακροδεκτών (γνωστή και ως μέτρηση με καθετήρα τεσσάρων σημείων) ή έμμεσα με τη χρήση μιας συσκευής δοκιμής που βασίζεται σε δινορεύματα χωρίς επαφή. Η αντίσταση φύλλου ενός φιλμ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών που διαφέρουν σημαντικά σε μέγεθος.

Η Αντίσταση φύλλου (R_s) σαν φυσικό μέγεθος σχετίζεται άμεσα από την ειδική αντίσταση και το πάχος (t) του υμενίου που εξετάζεται. Επομένως περιγράφεται από τον τύπο :

$$\rho = R_s \cdot t \quad \Rightarrow \quad R_s = \frac{\rho}{t} \quad (\text{Ohm}) \quad (\text{Σχέση 2.11})$$

Μονάδα μέτρησης της αντίστασης φύλλου είναι τα Ω (Ohm) ή εναλλακτικά, είναι σύνηθες να γράφεται με τα σύμβολο Ω/\square ή Ω/\square ή ακόμα και Ω/sq .

Ο λόγος για την ονομασία "Ωμ ανά τετράγωνο" είναι ότι ένα τετράγωνο φύλλο με αντίσταση φύλλου $10 \Omega/\square$ έχει πραγματική αντίσταση 10Ω , ανεξάρτητα από το μέγεθος του τετραγώνου.

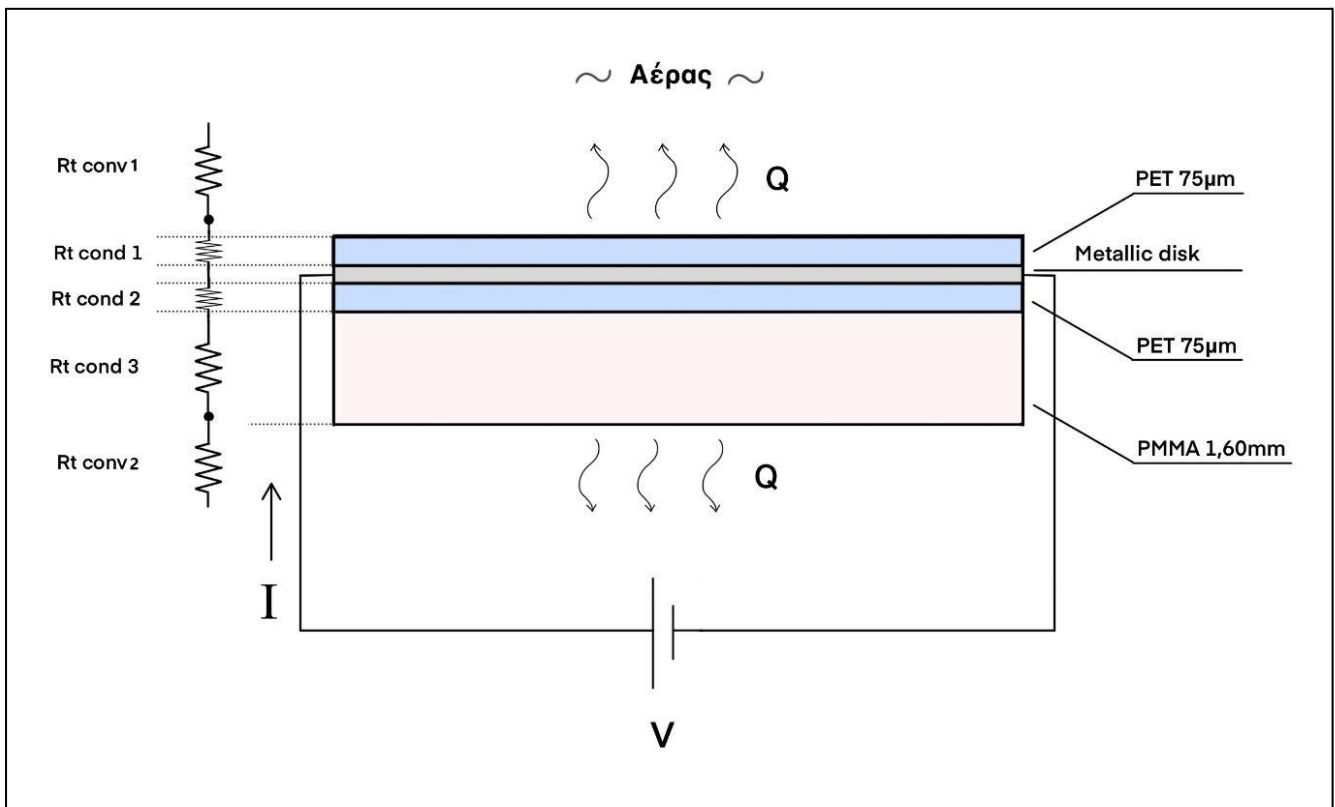
(Lurie Nanofabrication Facility (LNF), The University of Michigan Wiki)

2.2) ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.2.1) Εισαγωγή

Παραπάνω έγινε αναφορά στη θεωρία και αναλύθηκαν οι μαθηματικοί τύποι που διέπουν κάποια φυσικά φαινόμενα και ιδιότητες των υλικών, που μελετώνται στην εργασία (φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ειδική αντίσταση, αντίσταση φύλλου). Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να κατασκευαστεί θεωρητικό μοντέλο που θα προσομοιώνει ρεαλιστικά και θα απεικονίζει σχηματικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στο Κεφάλαιο 3.

2.2.2) Δεδομένα και Περιγραφή



Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση θεωρητικού πειράματος (σε τομή) - Διάγραμμα ισοδύναμου κυκλώματος

- Η θερμοκρασία του μεταλλικού δίσκου συμβολίζεται με T_1 στους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 2.3

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Ηλεκτρική αντίσταση μεταλλικού δίσκου	R	2,5	Ohm
Πάχος πλαστικού (PET)	LPET	75	μm
Πάχος πλεξιγκλας (PMMA)	LPMMA	1,6	mm
Διάμετρος	D	200	mm
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{∞}	293	K
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πλαστικού (PET)	k_{PET}	0,11	W/mK
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας πλεξιγκλας (PMMA)	k_{PMMA}	0,18	W/mK

Πίνακας 2.1 : Δεδομένα θεωρητικού μοντέλου

Η διαστρωμάτωση των διαφορετικών υλικών απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2. Στην βάση βρίσκεται ένα κομμάτι πλεξιγκλας (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο ή PMMA) πάχους 1,60mm. Ακριβώς πάνω απ το πλεξιγκλας εναλλάσσονται δύο στρώματα πλαστικού (PET) με τον μεταλλικό δίσκο να βρίσκεται στην μέση.

Καθώς συνδέουμε τον τον μεταλλικό δίσκο με την πηγή (V, I) διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασης. Λόγω της σταθερής εσωτερικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχει, χάρη στην γεωμετρία και την φύση του υλικού, ξεκινάει να θερμαίνεται. Το περιβάλλον έχει σταθερή και χαμηλότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να παρατηρούνται δύο φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

Το πρώτο έχει να κάνει με την αγωγή της θερμότητας από το θερμότερο σώμα (μεταλλικός δίσκος) προς το ψυχρότερο (πλαστικό), διότι είναι δύο στερεά σώματα που βρίσκονται σε άμεση επαφή. Το δεύτερο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας, είναι η ελεύθερη συναγωγή της θερμότητας από το στρώμα πλαστικού προς τον αέρα για τον οποίο γίνεται η παραδοχή ότι είναι ακίνητος (δεν εξαναγκάζεται η ροή του από εξωγενείς παράγοντες). Ελεύθερη συναγωγή έχουμε τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω, αφού το σύστημα έρχεται σε επαφή με τον αέρα.

Όταν περάσει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που το μέταλλο διαρρέεται από σταθερό ρεύμα, το σύστημα φτάνει στην μόνιμη κατάσταση. Στην μόνιμη κατάσταση το μέταλλο έχει φτάσει στην μέγιστη θερμοκρασία που θα μπορούσε με το συγκεκριμένο ρεύμα (βάσει της ειδικής του θερμοχωρητικότητας - που εξαρτάται από την μάζα του και τον συντελεστή θερμοχωρητικότητας του συγκεκριμένου υλικού) και η θερμοκρασία του θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη. Έτσι, η παραγόμενη θερμική ισχύς μεταφέρεται εξ ολοκλήρου με τους τρόπους που αναγράφονται παραπάνω.

2.2.3) Φαινόμενα Μεταφοράς θερμότητας στο Θεωρητικό Μοντέλο :

- Αγωγή θερμότητας από την μεταλλική πλάκα στο πλαστικό :

Η θερμότητα που παράγεται από την διέλευση του ρεύματος διαμέσου της μεταλλικής πλάκας διαδίδεται από την μεταλλική πλάκα στο πλαστικό με αγωγή.

Παραδοχές :

- Θεωρούμε ότι τα διαφορετικά στρώματα υλικών εφάπτονται τέλεια μεταξύ τους και έτσι στις επιφάνειες επαφής τους δεν λαμβάνονται υπόψη κενά αέρος, συνεπώς έχουν μηδενική τραχύτητα.
- Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των στερεών υλικών (PET, PMMA, μέταλλο) παραμένει σταθερός με την μεταβολή της θερμοκρασίας.

- Ελεύθερη / Φυσική Συναγωγή θερμότητας από το πλαστικό προς τον αέρα :

Ελεύθερη ή Φυσική Συναγωγή έχουμε στο σημείο που η εξωτερική επιφάνεια του πλαστικού έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη διότι η ταχύτητα του αέρα είναι (σχεδόν) μηδενική και η συναγωγή δεν εξαναγκάζεται από από άλλους παράγοντες, παρά μόνο από την διαφορά θερμοκρασίας και κατά συνέπεια την διαφορά στην πυκνότητα των στρωμάτων του αέρα.

Παραδοχές:

- Η βασική προϋπόθεση πίσω από την ελεύθερη συναγωγή είναι ότι η θερμή ύλη γίνεται λιγότερο πυκνή και «ψηλώνει», ενώ τα ψυχρότερα υλικά «βουλιάζουν»
- Η ελεύθερη συναγωγή συμβαίνει σε κάθε υγρό ή αέριο το οποίο διαστέλλεται ή συστέλλεται ως απάντηση στις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες όταν εκτίθεται σε πολλαπλές θερμοκρασίες σε ένα πεδίο επιτάχυνσης όπως η βαρύτητα ή μία φυγόκεντρος δύναμη. Οι τοπικές διαφορές στην πυκνότητα έχουν σαν αποτέλεσμα δυνάμεις άνωσης οι οποίες προκαλούν ρεύματα στο υγρό.

Εύρος εμπειρικών τιμών για τον συντελεστή θερμικής Συναγωγής 'h' για ελεύθερη ή φυσική συναγωγή είναι $3,5 \sim 35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Για τους υπολογισμούς στο παρακάτω κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2.3) επιλέχθηκε $h_1 = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ για την ελεύθερη συναγωγή προς τα πάνω και $h_2 = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ για την ελεύθερη συναγωγή της θερμότητας προς τα κάτω.

2.3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

2.3.1) Υπολογισμός συνολικής θερμικής αντίστασης

Η μεταφορά θερμότητας γίνεται προς δύο κατευθύνσεις (δηλαδή προς τα πάνω και προς τα κάτω. Προς τα πάνω, η θερμότητα μεταφέρεται δια μέσω του πλαστικού (PET) φιλμ (~75μm) με αγωγή και επείτα διαχέεται στο περιβάλλον (ελεύθερη συναγωγή). Αντίστοιχα, προς τα κάτω έχουμε μεταφορά θερμότητας με αγωγή μέσα από τα δύο στρώματα PET και πλεξιγκλας (PMMA) και εν συνεχεία γίνεται συναγωγή της θερμότητας προς το περιβάλλον. Θα βρούμε λοιπόν την θερμική αντίσταση R_t για κάθε προσανατολισμό ξεχωριστά και στη συνέχεια θα καταλήξουμε στον τελικό τύπο της ολικής θερμικής αντίστασης.

- Για τη ροή θερμότητας προς τα πάνω :

Οι θερμικές αντιστάσεις αγωγής ($R_{t,cond1}$) και συναγωγής ($R_{t,conv1}$) είναι σε σειρά, οπότε η συνολική θερμική αντίσταση R_{t1} θα ισούται με το άθροισμα των δύο αντιστάσεων.

$$R_{t1} = R_{t,cond1} + R_{t,conv1} = \frac{L_{pet}}{k_{pet} \cdot A} + \frac{1}{h_1 \cdot A} \quad (\text{Σχέση 2.12})$$

- Για τη ροή θερμότητας προς τα κάτω :

Οι θερμικές αντιστάσεις αγωγής $R_{t,cond2}$ και $R_{t,cond3}$ για PET και PMMA αντίστοιχα και συναγωγής $R_{t,conv2}$ είναι σε σειρά, οπότε η συνολική θερμική αντίσταση R_{t2} θα ισούται με το άθροισμα των τριών αυτών αντιστάσεων όπως παραπάνω.

$$R_{t2} = R_{t,cond2} + R_{t,cond3} + R_{t,conv2} = \frac{L_{pet}}{k_{pet} \cdot A} + \frac{L_{pmma}}{k_{pmma} \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \quad (\text{Σχέση 2.13})$$

- Συνολική θερμική αντίσταση R_t

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2, οι συνισταμένες αντιστάσεις R_{t1} και R_{t2} βρίσκονται διατεταγμένες παράλληλα. Άρα η συνολική θερμική αντίσταση θα βρεθεί από την σχέση :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{t1}} + \frac{1}{R_{t2}} \quad (\text{Σχέση 2.14})$$

Επίσης, ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας θα είναι :

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{Rt} \quad \text{ή} \quad Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_\infty) \quad (\text{Σχέση 2.15})$$

όπου U είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τον οποίο ισχύει : $Rt = \frac{1}{U \cdot A}$

Από την (Σχέση 2.1) και την (Σχέση 2.15) και εφόσον έχουμε μόνιμη κατάσταση μπορούμε να καταλήξουμε στην εξίσωση που περιγράφει την ροή θερμότητας στην περίπτωση μας :

$$I^2 \cdot R = \frac{T_1 - T_\infty}{Rt} \quad (\text{Σχέση 2.16})$$

2.3.2) Υπολογισμοί θεωρητικού μοντέλου

Έχοντας καταλήξει στην Σχέση 2.16 , η οποία περιγράφει το θεωρητικό μας μοντέλο, μένει να τοποθετηθούν οι αριθμητικές τιμές που έχουμε ως δεδομένα στο πείραμα (αναφέρονται στον Πίνακα 2.1).

Πρώτα υπολογίζουμε τις επιμέρους θερμικές αντιστάσεις αγωγής και συναγωγής για κάθε υλικό ξεχωριστά :

$$Rt, \text{cond1} = \frac{L_{pet}}{k_{pet} \cdot A} = \frac{0,000075}{0,11 \cdot 0,0314} = 0,022 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt, \text{cond2} = \frac{L_{pet}}{k_{pet} \cdot A} = \frac{0,000075}{0,11 \cdot 0,0314} = 0,022 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt, \text{cond3} = \frac{L_{pmma}}{k_{pmma} \cdot A} = \frac{0,0016}{0,18 \cdot 0,0314} = 0,283 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt, \text{conv1} = \frac{1}{h_1 \cdot A} = \frac{1}{10 \cdot 0,0314} = 3,185 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt, \text{conv2} = \frac{1}{h_2 \cdot A} = \frac{1}{5 \cdot 0,0314} = 6,369 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt_1 = Rt, \text{cond1} + Rt, \text{conv1} = 0,022 + 3,185 = 3,207 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$Rt_2 = Rt, \text{cond2} + Rt, \text{cond3} + Rt, \text{conv2} = 0,022 + 0,283 + 6,369 = 6,674 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$\text{Άρα σύμφωνα με τη (Σχέση 2.14) έχουμε : } \frac{1}{Rt} = \frac{1}{Rt_1} + \frac{1}{Rt_2} = \frac{1}{3,207} + \frac{1}{6,674} =$$

$$= 0,312 + 0,15 = 0,462 \Rightarrow Rt = 2,165 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Επίσης, γνωρίζοντας τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης του μετάλλου ($R = 2,5 \Omega$) και την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T^\infty = 293K$ ή $T^\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) έχουμε άγνωστες μεταβλητές την τιμή της έντασης του ρεύματος (I) και της θερμοκρασίας (T_1) που αναπτύσσεται από την θέρμανση του λεπτού μεταλλικού δίσκου.

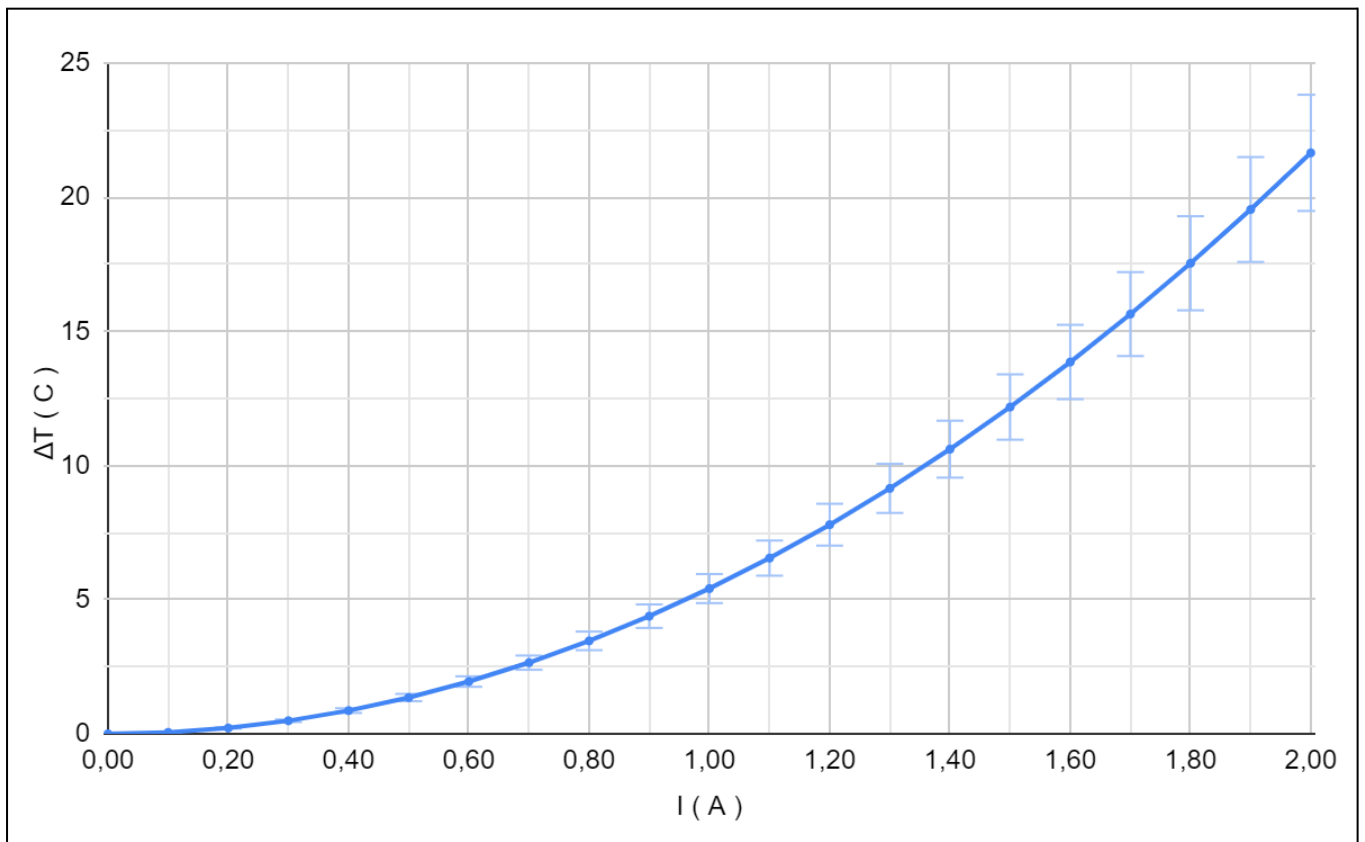
Αυτό σημαίνει ότι αν τοποθετήσουμε διάφορες τιμές έντασης ηλεκτρικού ρεύματος, μπορούμε να εξετάσουμε το πώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία T_1 . Έτσι κατασκευάστηκε στο Excel ο παρακάτω πίνακας που εφαρμόζει την Σχέση 2.16 που προέκυψε, και εμφανίζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Στην 1η στήλη ορίζουμε εμείς την τιμή της έντασης (I) ξεκινώντας από τα $0,0A$ και καταλήγοντας στα $2,00A$ με βήμα $0,10A$. Στην 2η και την 3η στήλη εμφανίζεται η θερμοκρασία T_1 σε Kelvin και βαθμούς Κελσίου αντίστοιχα, και τέλος στην 4η στήλη έχουμε την Διαφορά θερμοκρασίας ΔT μεταξύ T_1 και θερμοκρασίας περιβάλλοντος T^∞ .

I (A)	T1 (K)	T1 (°C)	ΔT (°C)
0,00	293	20	0
0,10	293,05	20,05	0,05
0,20	293,22	20,22	0,22
0,30	293,49	20,49	0,49
0,40	293,87	20,87	0,87
0,50	294,35	21,35	1,35
0,60	294,95	21,95	1,95
0,70	295,65	22,65	2,65
0,80	296,47	23,47	3,47
0,90	297,39	24,39	4,39
1,00	298,41	25,41	5,41
1,10	299,55	26,55	6,55
1,20	300,80	27,80	7,80
1,30	302,15	29,15	9,15
1,40	303,61	30,61	10,61
1,50	305,18	32,18	12,18
1,60	306,86	33,86	13,86
1,70	308,65	35,65	15,65
1,80	310,54	37,54	17,54
1,90	312,55	39,55	19,55
2,00	314,66	41,66	21,66

Πίνακας 2.2 : Μεταβολή θερμοκρασίας T_1 ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση

Τα παραπάνω στοιχεία του Πίνακα 2.1 απεικονίζονται γραφικά στο Διάγραμμα 2.1 :



Διάγραμμα 2.1 : Γραφική απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας T1 ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.

Παρατηρήσεις διαγράμματος :

- Η συνάρτηση που προκύπτει είναι παραβολική διότι περιγράφει μια μαθηματική εξίσωση δευτέρου βαθμού.
- Η θερμοκρασία ανεβαίνει ευκολότερα εάν η ένταση του ρεύματος είναι υψηλότερη. Για παράδειγμα, για αύξηση έντασης ρεύματος κατά 0,10 A, από τα 0,90 A στο 1,00 A, παρατηρείται άνοδος στη θερμοκρασία 1,03 °C, ενώ αντίστοιχα για την ίδια αύξηση (0,10 A) από τα 1,90 A στα 2,00 A σημειώνεται αύξηση θερμοκρασίας 2,11 °C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα μελετώνται οι ηλεκτρικές και οι θερμικές ιδιότητες του Nanoweb®. Αναλυτικότερα, αρχικά μετριέται πειραματικά η ηλεκτρική αντίσταση του Nanoweb, στη συνέχεια προσδιορίζεται η αντίσταση φύλλου και η ειδική ηλεκτρική αντίστασή του, και μελετάται η ικανότητα του Nanoweb® να αυξάνει την θερμοκρασία του μόλις εφαρμοστεί σε αυτό γνωστή τάση και ρεύμα αντίστοιχα μέσω πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, χάρη στην εσωτερική ηλεκτρική αντίστασή του. Τέλος, γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου που κατασκευάστηκε στο Κεφάλαιο 2.

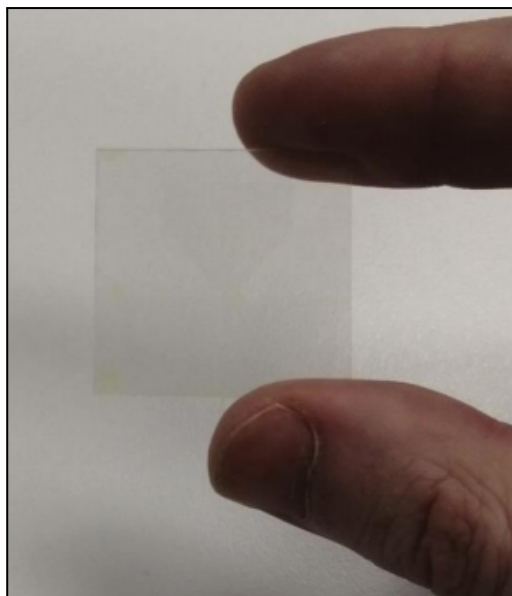
Το δείγμα του Nanoweb® είχαμε στην διάθεσή μας για το πείραμα είχε τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά :

Σχήμα : κυκλικό

διάμετρος : 200mm

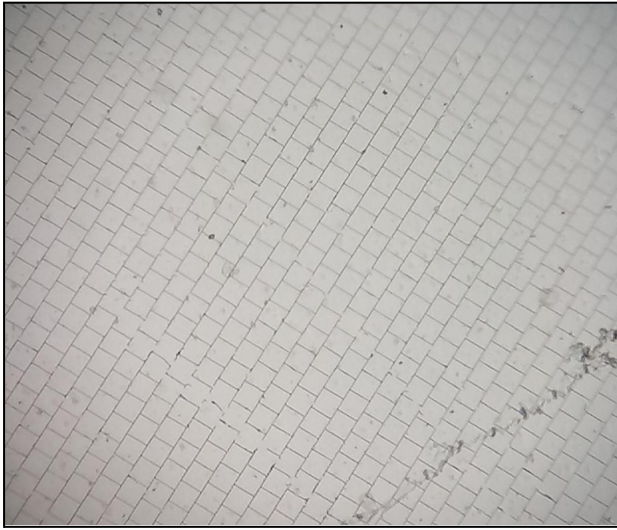
πάχος : 75μm

Πάνω από το Nanoweb® , σε άμεση επαφή υπάρχει ένα λεπτό φιλμ φτιαγμένο από PET (polyethylene terephthalate ή τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο), πάχους ~50-75 μm το οποίο υπάρχει για να προσφέρει προστασία στην ευαίσθητη αγωγίμη επιφάνεια του Nanoweb® από εξωγενείς παράγοντες όπως σκόνη ή μικρογρρατζουνιές. Τα δύο λεπτά φιλμ είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα διαφανές κομμάτι Πλεξιγκλάς (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο ή PMMA) πάχους 1,60mm.

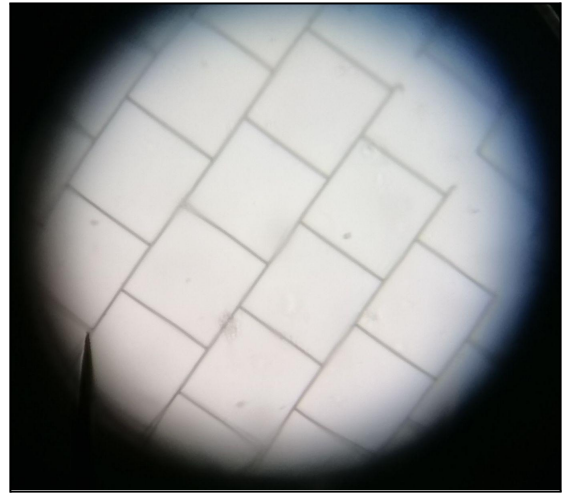


Εικόνα 3.1 : Μικρό κομμάτι Nanoweb® (Πηγή : Meta Materials)

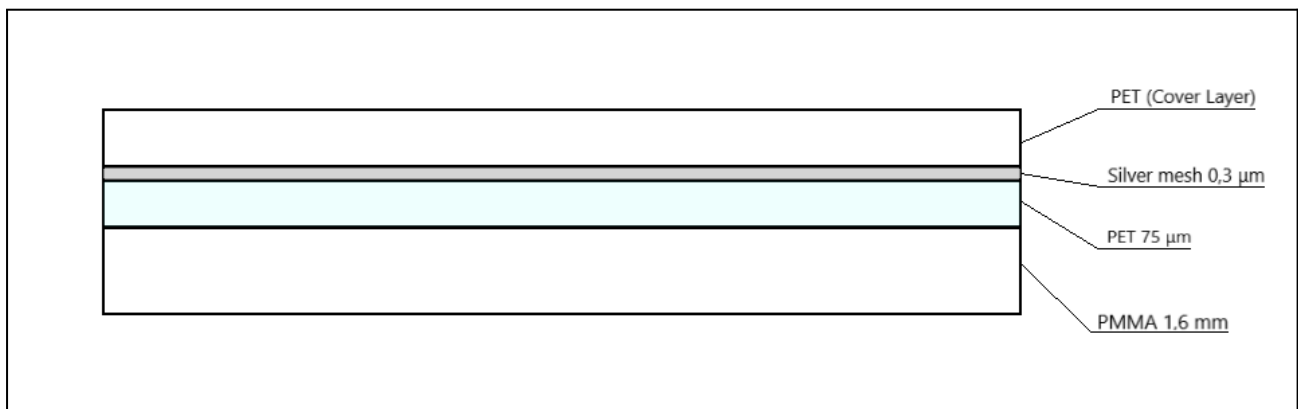
α)



β)



Εικόνα 3.2 : Φωτογραφία του πλέγματος του Nanoweb : (α) μεγέθυνση 10X
(β) μεγέθυνση 40X (Φωτογραφία από εργαστήριο)



Εικόνα 3.3 : Απεικόνιση στρωμάτων του εργαστηριακού δείγματος Nanoweb

3.2) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΒΗΜΑ

Για την επίτευξη της σύνδεσης του Nanoweb με την πηγή του ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν λεπτά φύλλα χαλκού (Copper) πάνω στα οποία κολλήθηκαν καλώδια με κόλληση (soldering), με στόχο να επιτευχθεί καλή και σταθερή σύνδεση των καλωδίων με τα φύλλα χαλκού. Τα φύλλα χαλκού με την σειρά τους “αγκαλιάζουν” το Nanoweb όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5 προσφέροντας μία αρκετά μεγάλη επιφάνεια επαφής.

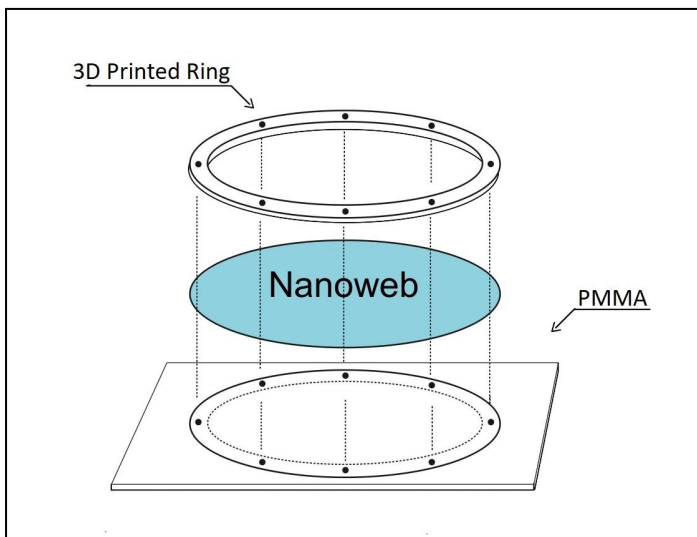
Για να διασφαλιστεί όμως η ομαλή ροή του ρεύματος μέσα απ το Nanoweb, χωρίς απώλειες λόγω της αντίστασης επαφής θα πρέπει να ασκείται συνεχώς δύναμη που θα κρατάει τα δύο υλικά σε άμεση επαφή.

Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε σε πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης (Autodesk Inventor) ένας κυκλικός 3D δακτύλιος και εκτυπώθηκε σε 3D Printer που υπάρχει διαθέσιμος στο εργαστήριο, και σε συνδυασμό με 8 πλαστικές βίδες M4x30mm και αντιστοίχα 8 παξιμάδια επιτεύχθηκε πολύ ικανοποιητική και σταθερή σύσφιξη περιμετρικά του Nanoweb.

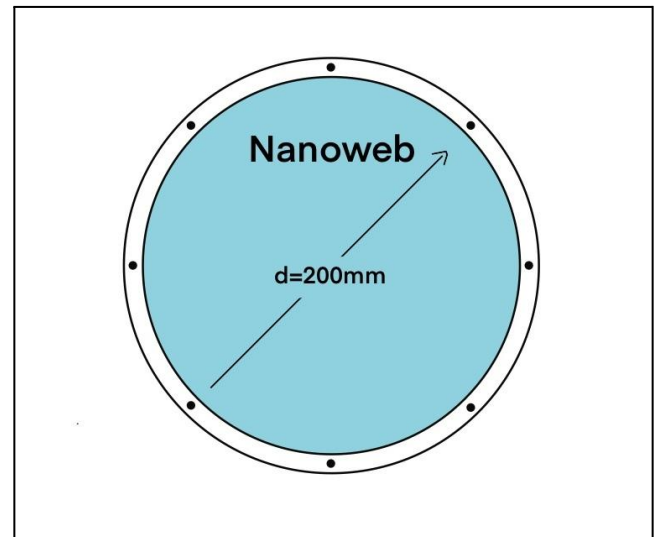
Τα σημεία επαφής του Nanoweb με τα φύλλα χαλκού είναι συνολικά 6 (τρία δεξιά και τρία αριστερά) για να γίνεται πιο ομοιόμορφα η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος τα καλώδια αριθμήθηκαν από το 1 έως το 6 αντιστοίχα.

- Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν χαρακτηριστικά τα όσα περιγράφονται παραπάνω.

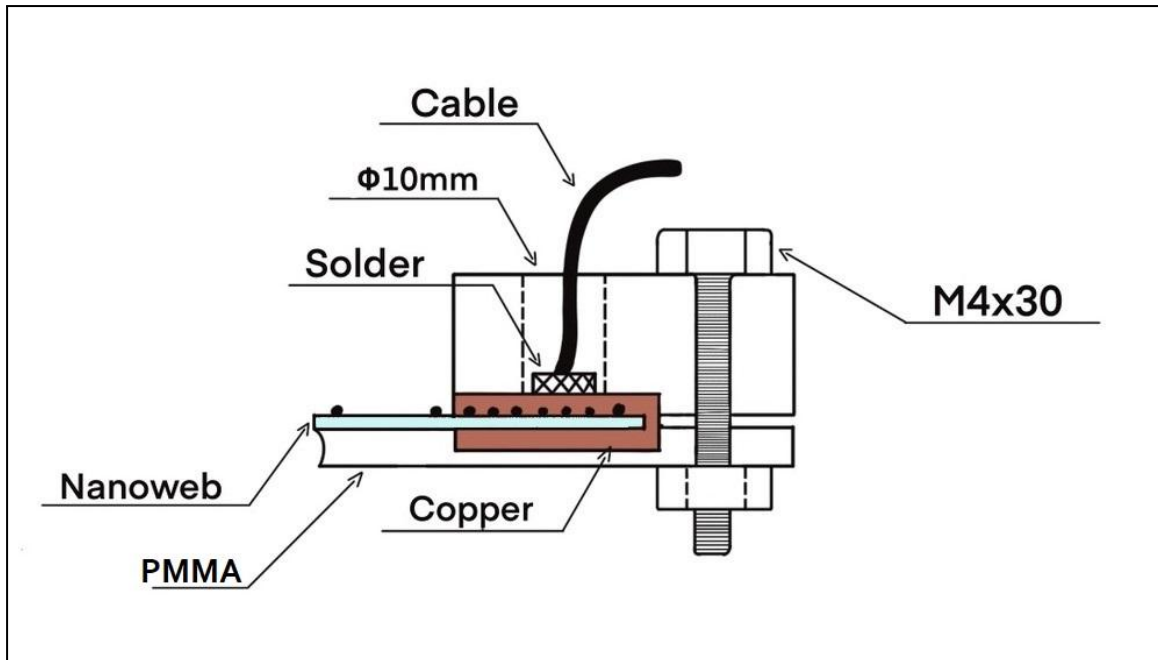
α)



β)



Εικόνα 3.4 : Συναρμολόγημα Nanoweb - Δακτυλίου - PMMA : α) 3D απεικόνιση , β) Πάνω όψη



Εικόνα 3.5 : Σημείο σύνδεσης Nanoweb με το καλώδιο - σύσφιξη δακτυλίου



Εικόνα 3.6 : Τελική μορφή συστήματος με αριθμημένα τα καλώδια (φωτογραφία εργαστηρίου)

3.3) ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΠΗΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία των μετρήσεων είναι μία πηγή ισχύος, δύο ψηφιακά ηλεκτρονικά πολύμετρα για την μέτρηση της αντιστάσεων, ρεύματος ή τάσης όπου χρειαζόταν, ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο με laser για την μέτρηση της θερμοκρασίας και ένα οπτικό μικροσκόπιο για την απεικόνιση του πλέγματος του Nanoweb. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά :

- ΠΗΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Τύπος συσκευής : DC Power Supply

Μάρκα : UNI-T

Μοντέλο : UTP3305

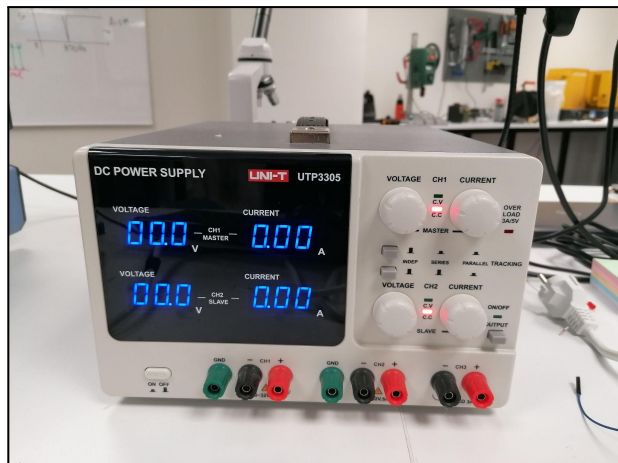
Max Voltage : 32 Volt

Max Current : 5 Amps

- Σφάλματα ενδείξεων :

Τάση : $\pm 0,1$ Volt

Ρεύμα : $\pm 0,01$ Amp



Εικόνα 3.7 : Πηγή Ρεύματος (Εικόνα εργαστηρίου)

- ΠΟΛΥΜΕΤΡΟ Νο1

Τύπος οργάνου : Ψηφιακό Πολύμετρο

Μάρκα : FLUKE

Μοντέλο : 110 TRUE RMS MULTIMETER

-Μετρητική ικανότητα :

Τάση :

Ηλεκτρική Αντίσταση :

-Σφάλματα ενδείξεων :

Τάση :

Ηλεκτρική Αντίσταση : $\pm 0,1(\Omega)$



Εικόνα 3.8 : Πολύμετρο Νο 1 (Εικόνα εργαστηρίου)

- Έλεγχος οργάνου :

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια των μετρήσεων και κατα συνέπεια η ορθότητα των μετρήσεων, μετρήθηκε γνωστή αντίσταση (με χρώματα) : $27 \cdot 10 \pm 5\% = 270 \pm 13,5 (\Omega)$

Η μέτρηση του οργάνου ήταν 266 (Ω) → ΑΠΟΔΕΚΤΗ

Συνεπώς οι μετρήσεις του συγκεκριμένου οργάνου είναι ακριβείς.

• ΠΟΛΥΜΕΤΡΟ Νο2

Τύπος οργάνου : Ψηφιακό Πολύμετρο

Μάρκα : UNI-T

Μοντέλο : UT131B

-Μετρητική ικανότητα

Τάση : 0,1 mV – 250 V

Ένταση : 0,1 μ A – 10 A

Ηλεκτρική Αντίσταση : 0,1 Ω – 20 M Ω

-Σφάλματα ενδείξεων

Τάση : $\pm 0,1$ mV

Ηλεκτρική Αντίσταση : $\pm 0,1$ Ω



Εικόνα 3.9 : Πολύμετρο Νο 2 (Εικόνα εργαστηρίου)

**Αντίστοιχη διαδικασία για τον έλεγχο της ακρίβειας των μετρήσεων έγινε και για το Πολύμετρο 2

• ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ

Τύπος οργάνου : Ηλεκτρονικό θερμόμετρο με Laser

Μάρκα : InfraRed Thermometer

Μοντέλο : -

Μετρητική ικανότητα : -50.0 – 330 $^{\circ}$ C

Μονάδα Μέτρησης : $^{\circ}$ C

Σφάλματα ενδείξεων : 0,1 $^{\circ}$ C



Εικόνα 3.10 : Θερμόμετρο με Laser (Εικόνα εργαστηρίου)

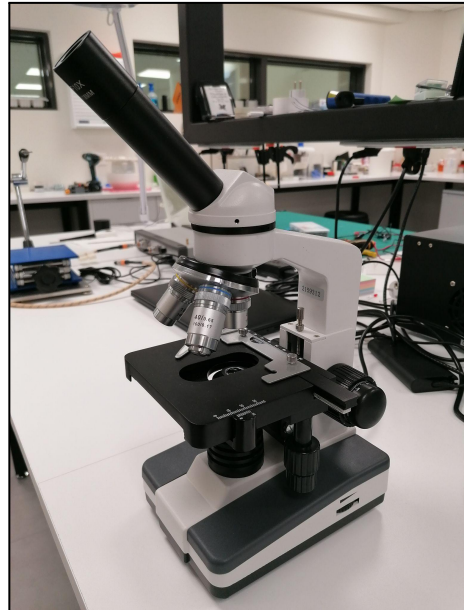
- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Τύπος οργάνου : Μονοφθαλμικό βιολογικό
μικροσκόπιο

Κατασκευαστής : HINOTEK

Μοντέλο : XSP-116L

Μεγεθυντική ικανότητα : 4X, 10X, 40X



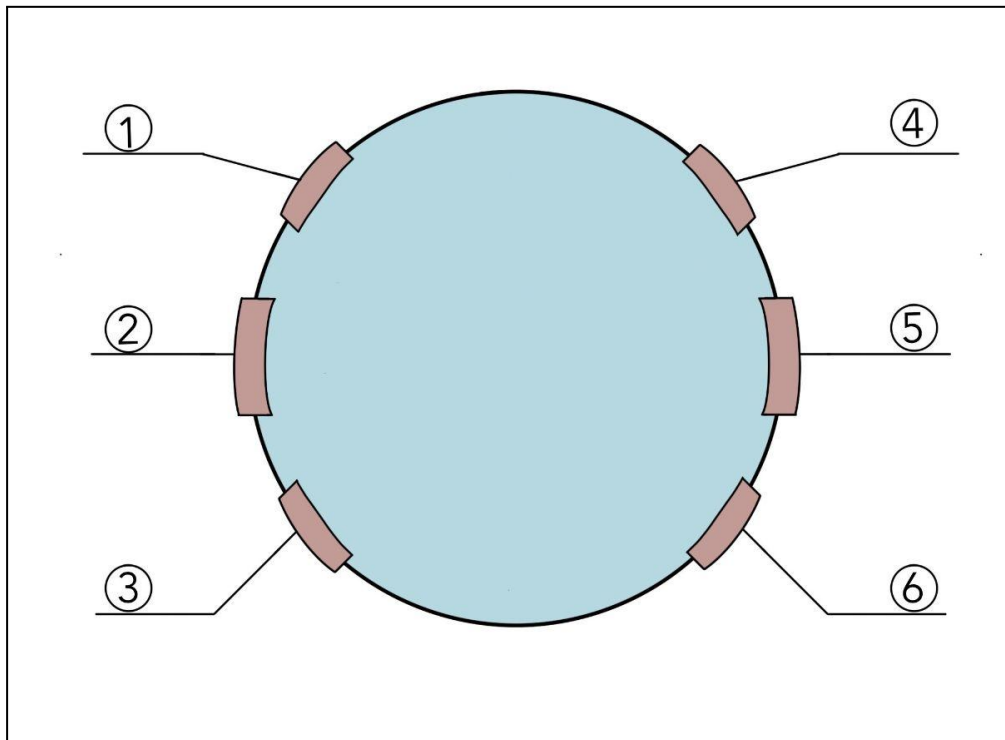
Εικόνα 3.11 : Μονοφθαλμικό βιολογικό Μικροσκόπιο
(Εικόνα εργαστηρίου)

3.4) ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.4.1) ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ NANOWEB®

Αρχικά, έγιναν μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης του Nanoweb με το Πολύμετρο Νο1 (FLUKE 110 TRUE RMS MULTIMETER) το οποίο έχει ακρίβεια μέτρησης αντίστασης 0,1 Ω. Οι μετρήσεις αφορούσαν κάθε φορά διαφορετικά ζευγάρια ακροδεκτών όπως απεικονίζεται και στον Πίνακα 3.1 . Έγιναν τρία σετ μετρήσεων και το κάθε σετ περιελάμβανε 9 μετρήσεις για να καταγραφούν όλες οι μετρήσεις που αφορούν τον κάθε συνδυασμό ζεύγους ακροδεκτών.

Στο πρώτο και το δεύτερο σετ μετρήσεων η σύσφιξη του δακτυλίου έγινε μόνο με τις οκτώ περαστές πλαστικές βίδες, ενώ στο τρίτο σετ έχουμε πρόσθετη σύσφιξη στα σημεία επαφής του χαλκού με το Nanoweb με την βοήθεια πλαστικών σφιγκτήρων.



Εικόνα 3.12 : Σχέδιο Nanoweb με ακροδέκτες αριθμημένους

ΜΕΤΡΗΣΗ ΩΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ				
ΑΚΡΑ	1η ΜΕΤΡΗΣΗ (Ω)	2η ΜΕΤΡΗΣΗ (Ω)	Μ.Ο. ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (Ω)	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΣΥΣΦΙΞΗ (Ω)
1-4	4,7	4,4	4,6	4,3
1-5	5,4	5,1	5,3	5,3
1-6	5,8	5,4	5,6	5,1
2-4	6,9	7,1	7,0	6,3
2-5	7,7	7,7	7,7	6,9
2-6	7,4	7,5	7,5	6,6
3-4	5,9	5,5	5,7	5,5
3-5	5,7	5,1	5,4	5,3
3-6	5,0	4,6	4,8	4,6

Πίνακας 3.1 : Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης Nanoweb®

- Η διαφορά στις μετρήσεις του κάθε ζεύγους ακροδεκτών οφείλεται στην διαφορά της απόστασης των σημείων επαφής μεταξύ τους.
- Τυχόν διαφορές ανάμεσα στην πρώτη και την δεύτερη μέτρηση του ίδιου ζεύγους ακροδεκτών μπορεί να οφείλεται στην μετρητική ικανότητα του οργάνου και είναι μέσα στο περιθώριο του σφάλματος του οργάνου στις περισσότερες περιπτώσεις. Για την μείωση της περίπτωσης των εν λόγω σφαλμάτων υπολογίστηκε ο Μέσος Όρος των δύο μετρήσεων για κάθε ζεύγος ακροδεκτών.
- Στο τρίτο σετ μετρήσεων που εφαρμόζεται επιπλέον σύσφιξη παρατηρείται πτώση της αντίστασης σε όλες τις μετρήσεις από 0.1 Ω έως 0.9 Ω. Από αυτό συμπεραίνουμε πως χάρη στην επιπλέον σύσφιξη στα σημεία της επαφής, μειώνεται ακόμα περισσότερο η ηλεκτρική αντίσταση επαφής.
- Για τον παραπάνω λόγο θεωρούνται εγκυρότερες οι μετρήσεις της αντίστασης του Nanoweb του τρίτου σετ μετρήσεων, δηλαδή με την πρόσθετη σύσφιξη.

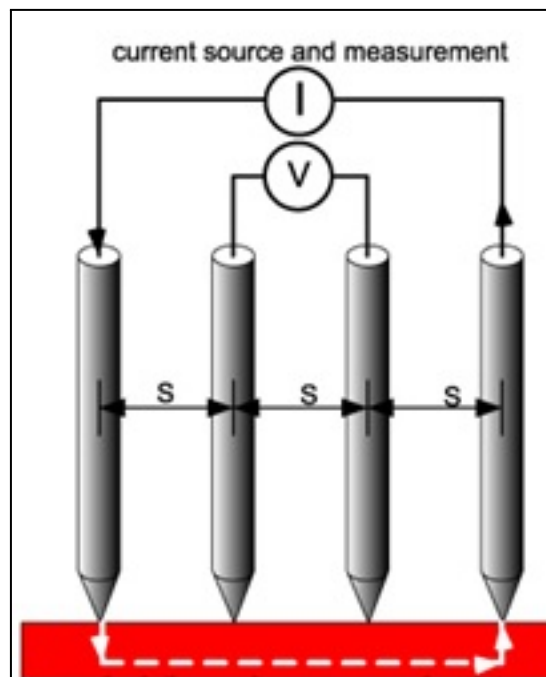
Τέλος, μετρήθηκε η αντίσταση χρησιμοποιώντας και τους 6 ακροδέκτες μαζί (τρεις και τρεις). Καταγράφηκε δηλαδή η μέτρηση $123-456 = 2,5 \Omega$. Αυτή η διάταξη είναι και η τελική διάταξη του πειράματος κατά το οποίο θα γίνουν οι μετρήσεις στην θερμοκρασία του Nanoweb στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4.2) ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ (FOUR POINT PROBE)

3.4.2.1) Γενικά για την Μέθοδο μέτρησης τεσσάρων ακροδεκτών (Four Point Probe)

Ο ανιχνευτής τεσσάρων σημείων χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ιδιοτήτων αντίστασης των πλακών ημιαγωγών και των λεπτών υμενίων. Εάν το πάχος ενός λεπτού υμενίου είναι γνωστό, η αντίσταση φύλλου που μετράται με ανιχνευτή τεσσάρων σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του υλικού- αντίστροφα, εάν η ειδική αντίσταση του υλικού είναι γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί το πάχος του λεπτού υμενίου.

Ένας αισθητήρας τεσσάρων σημείων χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης φύλλου, χωρίς αυτή να επηρεάζεται από την αντίσταση επαφής, η οποία μπορεί συχνά να έχει την ίδια τάξη μεγέθους με την αντίσταση του φύλλου. Συνήθως εφαρμόζεται σταθερό ρεύμα στους δύο εξωτερικούς ακροδέκτες και το δυναμικό στους άλλους δύο εσωτερικούς ακροδέκτες με βολτόμετρο υψηλής αντίστασης.



Εικόνα 3.13 : Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης με τη μέθοδο του ανιχνευτή τεσσάρων σημείων (4 point probe). Πηγή : LNF WIKI - University of Michigan

Σύμφωνα με την μέθοδο του ανιχνευτή τεσσάρων σημείων, υπάρχουν τέσσερις ακίδες οι οποίες είναι διατεταγμένες στη σειρά, όμοιες και απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους. Επίσης πρέπει να είναι κάθετες προς το δείγμα και να επιτυγχάνεται πολλή καλή επαφή μεταξύ δείγματος (υμενίου) και ακίδων. Στις δύο εξωτερικές ακίδες εφαρμόζεται ρεύμα σταθερής και

γνωστής έντασης από μια πηγή ισχύος και στις δύο εσωτερικές συνδέεται βολτόμετρο υψηλής ακρίβειας για την μέτρηση της τάσης.

Η μέτρηση του βολτομέτρου καταγράφεται και γνωρίζοντας την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το δείγμα, μπορούμε με την βοήθεια της παρακάτω σχέσης να βρούμε την αντίσταση φύλλου R_s (Sheet Resistance) :

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \Rightarrow \quad R_s = 4,53236 \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Ohm}) \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

Εν συνεχεία, γνωρίζοντας την αντίσταση φύλλου και το πάχος του λεπτού υμενίου μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση του δείγματος με την σχέση :

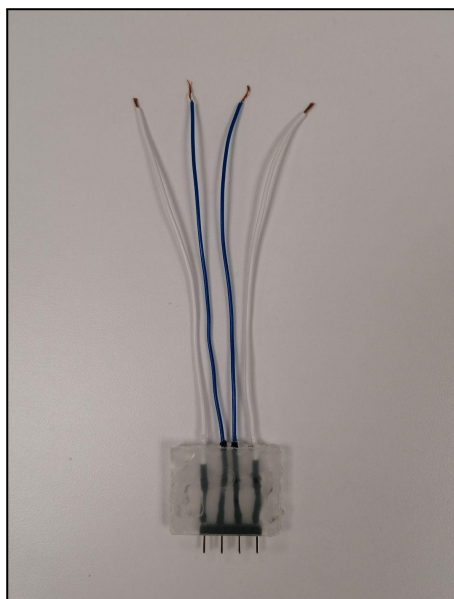
$$\rho = R_s \cdot t \quad (\text{Ohm} \cdot \text{m}) \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

, όπου t το πάχος του υμενίου (thickness).

(Lurie Nanofabrication Facility (LNF), The University of Michigan Wiki)

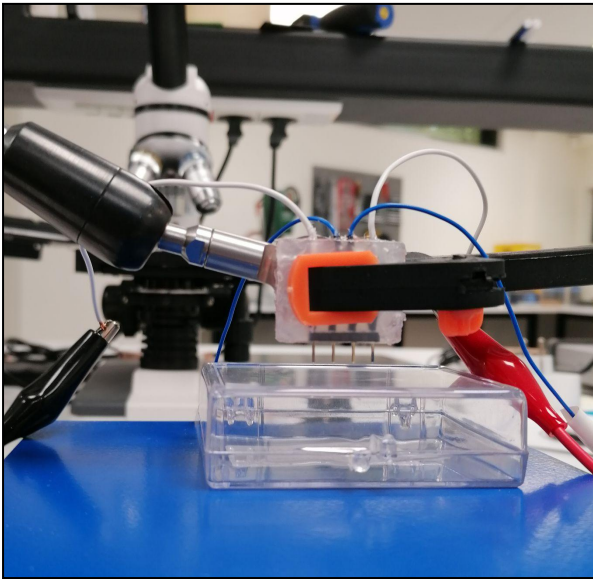
3.4.2.2) Κατασκευή μετρητικής διάταξης στο εργαστήριο για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του Nanoweb®

Με στόχο την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του Nanoweb κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μετρητική διάταξη ανιχνευτή τεσσάρων σημείων, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα απόκτησης εξειδικευμένης συσκευής για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μέτρησης. Το κομμάτι της διάταξης το οποίο φέρει επάνω τους τέσσερις ακροδέκτες στερεώθηκε σε σταθερό σημείο πάνω από μια μικρή επίπεδη και οριζόντια επιφάνεια ρυθμιζόμενου ύψους. Πάνω στην επίπεδη επιφάνεια τοποθετείται το εκάστοτε δείγμα προς εξέταση και επείτα ανεβάζοντας την επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τις τέσσερις ακίδες.

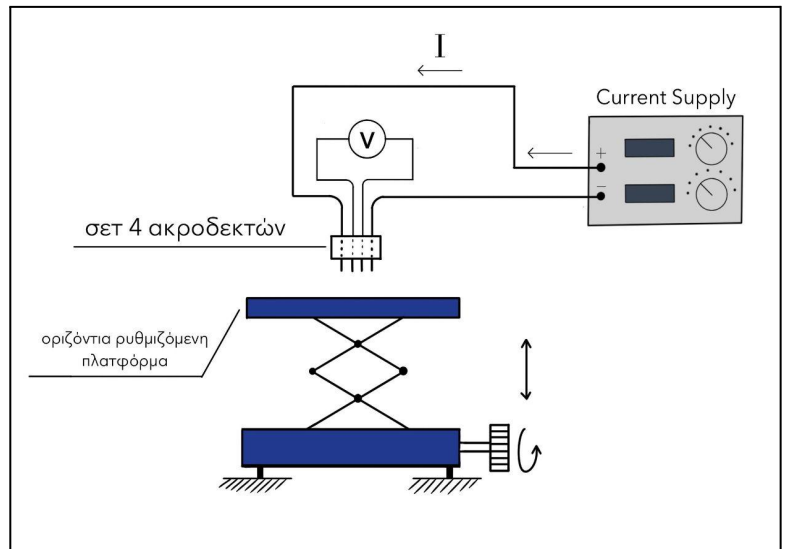


Εικόνα 3.14 : Ακροδέκτες μετρητικής διάταξης 4 Point Probe που κατασκευάστηκε

(α)



(β)



Εικόνα 3.15 : Τελική μορφή μετρητικής διάταξης Four Point Probe. (α) Φωτογραφία από το εργαστήριο. (β) Σχηματική απεικόνιση.

3.4.2.3) Έλεγχος εγκυρότητας και ακρίβειας των μετρήσεων της μετρητικής διάταξης που κατασκευάστηκε

Για να βεβαιωθούμε ότι οι μετρήσεις για την εύρεση της ειδικής αντίστασης του Nanoweb με την παραπάνω μέθοδο είναι έγκυρες και μπορούν να ληφθούν υπόψη, πρέπει να ελεγχθεί η μετρητική ακρίβεια της διάταξης που κατασκευάσαμε. Για να γίνει αυτό μετρήθηκε η ειδική αντίσταση ενός κομματιού φύλλου χαλκού γνωστού πάχους. Τέλος, η τιμή της ειδικής αντίστασης που βρέθηκε συγκρίθηκε με την πραγματική τιμή ειδικής αντίστασης του χαλκού (Cu) όπως αυτή αποτυπώνεται σε σχετικό πίνακα ιδιοτήτων υλικών (βλ. Πίνακας 3.3).

Συνολικά έγιναν τρεις μετρήσεις, σε τρία διαφορετικά σημεία του φύλλου χαλκού. Για κάθε μέτρηση καταγράφηκε η ένδειξη της πηγής ισχύος (Power Supply) όσον αφορά τις τιμές της έντασης του ρεύματος και για την μέτρηση της τάσης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό Πολύμετρο Νο2 (UT131B) με ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1$ mV. Το σύνολο των μετρήσεων, καθώς και ο υπολογισμός της αντίστασης φύλλου (R_s) και της ειδικής αντίστασης (ρ) του δείγματος φύλλου χαλκού αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.2 .

Η διαδικασία υπολογισμών για την εύρεση της αντίστασης φύλλου και εν συνεχεία της ειδικής αντίστασης του φύλλου χαλκού περιγράφεται αναλυτικά παραπάνω και προκύπτει από τις σχέσεις 3.1 και 3.2 αντίστοιχα.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ					
I (A)	V (mV)	Rs (Ω)	t (m)	ρ (Ω*m)	ρμέσο (Ω*m)
1,63	0,3	0,0008342	0,00005	$4,17 \cdot 10^{-8}$	$4,39 \cdot 10^{-8}$
2,03	0,4	0,0008931		$4,47 \cdot 10^{-8}$	
3,00	0,6	0,0009065		$4,53 \cdot 10^{-8}$	

Πίνακας 3.2 : Μετρήσεις και υπολογισμός ειδικής αντίστασης φύλλου Χαλκού (Cu).

Resistivity and Temperature Coefficient at 20 C					
Material	Resistivity ρ (ohm m)		Temperature coefficient α per degree C	Conductivity σ x 10 ⁷ /Ωm	Ref
Silver	1.59	x10 ⁻⁸	.0038	6.29	3
Copper	1.68	x10 ⁻⁸	.00386	5.95	3
Copper, annealed	1.72	x10 ⁻⁸	.00393	5.81	2
Aluminum	2.65	x10 ⁻⁸	.00429	3.77	1
Tungsten	5.6	x10 ⁻⁸	.0045	1.79	1
Iron	9.71	x10 ⁻⁸	.00651	1.03	1
Platinum	10.6	x10 ⁻⁸	.003927	0.943	1

Πίνακας 3.3 : Ειδική αντίσταση και αγωγιμότητα υλικών. (Πηγή: Hyperphysics, resistivity and conductivity table - απόσπασμα σχετικού πίνακα).

	Ειδική αντίσταση Χαλκού ρ (Ωm)
Μέση τιμή μετρήσεων	$4,39 \cdot 10^{-8}$
Τιμή Πίνακα	$1,68 \cdot 10^{-8}$

Συγκρίνοντας την μέση τιμή της ειδικής αντίστασης που προέκυψε από τους σχετικούς υπολογισμούς με την αντίστοιχη τιμή του σχετικού πίνακα ιδιοτήτων (Πίνακας 3.3) παρατηρούμε πως οι δύο τιμές βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους, γεγονός που δείχνει ότι η διαδικασία των μετρήσεων έγινε σωστά και με αρκετή ακρίβεια. Ωστόσο, η ευαισθησία του οργάνου που κατασκευάσαμε δεν είναι ιδανική και έτσι δεν μας επιτρέπει να πετύχουμε απόλυτη ταύτιση της μέτρησής μας με την πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης (ρ) του χαλκού, δίνοντας τιμή περίπου δυόμιση φορές μεγαλύτερη. Αυτό το σφάλμα στη μέτρηση ωστόσο θεωρείται φυσιολογικό δεδομένου ότι δεν είχαμε στην διάθεσή μας κάποιο πολύ ακριβό και αξιόπιστο όργανο μέτρησης για την αντίσταση φύλλου. Επίσης η αναμενόμενη τιμή για το Nanoweb είναι της τάξης του 1 Ohm, οπότε η ακρίβεια του οργάνου είναι επαρκής για το εύρος τιμών του Nanoweb.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μέτρηση της ειδικής αντίστασης που γίνεται με την παρούσα μετρητική διάταξη είναι **αποδεκτή**.

3.4.2.4) Μέτρηση αντίστασης φύλλου (Sheet Resistance) και ειδικής αντίστασης (Resistivity) του Nanoweb®

Η διαδικασία των μετρήσεων αποτελούνταν από 3 σετ μετρήσεων. Σε κάθε σετ λαμβάνονταν μετρήσεις σε διαφορετικό σημείο του δείγματος και με διαφορετικό προσανατολισμό (κάθετα και οριζόντια). Όπως και στο παραπάνω κεφάλαιο για τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του φύλλου χαλκού, για κάθε μέτρηση καταγράφηκε η ένδειξη της πηγής ισχύος (Power Supply) όσον αφορά τις τιμές της έντασης του ρεύματος, με σφάλμα μέτρησης $\pm 0,01A$ και για την μέτρηση της τάσης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό Πολύμετρο No2 (UT131B) με ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1 mV$.

Οι μετρήσεις που έγιναν καθώς και οι τιμές της αντίστασης φύλλου και της ειδικής αντίστασης του Nanoweb που προέκυψαν, καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

FOUR POINT PROBE											
1ο ΣΕΤ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ				2ο ΣΕΤ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ				3ο ΣΕΤ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ			
I (A)	V (mV)	Rs (Ω)	ρ (Ωm)	I (A)	V (mV)	Rs (Ω)	ρ (Ωm)	I (A)	V (mV)	Rs (Ω)	ρ (Ωm)
0,05	102,2	9,26	0,000417	0,05	57	5,16	0,000232	0,05	28,4	2,57	0,000116
0,10	169,2	7,66	0,000345	0,10	105	4,76	0,000214	0,10	49,1	2,22	0,000100
0,15	244	7,37	0,000332	0,15	145,5	4,39	0,000198	0,15	70,8	2,14	0,000096
0,20	334	7,57	0,000340	0,20	192	4,35	0,000196	0,20	92,5	2,10	0,000094
0,25	406	7,36	0,000331	0,25	234	4,24	0,000191	0,25	112,3	2,03	0,000092
0,30	470	7,10	0,000319	0,30	284	4,29	0,000193	0,30	-	-	-

Πίνακας 3.4 : Μέτρηση αντίστασης φύλλου και ειδικής αντίστασης Nanoweb

Η αντίσταση φύλλου υπολογίστηκε βάση της Σχέσης 3.1 $R_s = 4,53236 \cdot \frac{\Delta V}{I}$

και εν συνεχεία η ειδική αντίσταση μέσω της Σχέσης 3.2 $\rho = R_s \cdot t$

όπου t είναι το συνολικό πάχος (thickness) του Nanoweb και ισούται με $45\mu\text{m} = 45 \cdot 10^{-6}\text{m}$ σύμφωνα με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Η απόσταση μεταξύ των ακίδων είναι **4,88 mm**.

Παρατηρήσεις σχετικά με τις μετρήσεις :

- Η ένταση του ρεύματος που εφαρμόζεται στο υμένιο (Nanoweb) είναι εξαιρετικά μικρή και ελεγχόμενη (αυξάνεται με βήμα 0,05 A), διότι παρατηρήθηκε ότι για τιμές έντασης του ρεύματος μεγαλύτερες από 0,30 Amp αναπτύσσεται αρκετά μεγάλη θερμοκρασία στα σημεία επαφής των ακίδων με το Nanoweb η οποία είχε ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του λεπτού υμενίου και κατά συνέπεια την καταστροφή του μεταλλικού νανο-πλέγματος στα σημεία αυτά.
- Οι διαστάσεις του δείγματος είναι τέτοιες ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί η Σχέση 2.10 , δηλαδή :
 - πάχος φιλμ $\leq 0,5$ *(απόσταση ακίδων)
 - διάμετρος υμενίου > 40 *(απόσταση ακίδων)

Αν για κάθε σετ μετρήσεων υπολογίσουμε την μέση τιμή της αντίστασης φύλλου και της ειδικής αντίστασης προκύπτουν :

	1ο ΣΕΤ	2ο ΣΕΤ	3ο ΣΕΤ
R_s (Ω)	7,72	4,53	2,21
ρ (Ωm)	0,000347	0,000204	0,00010

Πίνακας 3.5 : Μέση τιμή αντίστασης φύλλου και ειδικής αντίστασης για κάθε σετ μετρήσεων

Επομένως, η αντίσταση φύλλου του Nanoweb σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων κυμαίνεται από **2,21 Ω έως 7,72 Ω** .

Αντίστοιχα, η ειδική αντίστασή του βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 10^{-4} **εώς** $3,47 \cdot 10^{-4}$ **Ωm** .

Η κατασκευάστρια εταιρεία του Nanoweb, η Meta Materials, αναφέρει στα τεχνικά χαρακτηριστικά του πως η αντίσταση φύλλου (R_s) του συγκεκριμένου προϊόντος είναι **3,5 $\Omega\text{m/sq}$** , με απόκλιση 0,5 Ωm . Αντίστοιχα, η ειδική αντίσταση (ρ) για πάχος $45\mu\text{m}$ προκύπτει $1,575 \cdot 10^{-4}$ **Ωm**

3.4.3) ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ NANOWEB® ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΤΟ ΔΙΑΡΡΕΕΙ

3.4.3.1) Στόχος πειράματος

Το Nanoweb χάρη στην νανοδομή την οποία έχει, όταν διαπερνάται από ρεύμα έχει την ιδιότητα να αυξάνει την θερμοκρασία του. Η συγκεκριμένη ιδιότητά του είναι αρκετά χρήσιμη και μπορεί να βρει εφαρμογές σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής, όπως αναλυτικότερα παρουσιάζεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 1.3) .

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η αλλαγή στην θερμοκρασία του Nanoweb και η μεταφορά θερμότητας από το υλικό στο περιβάλλον όσο αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πειραματικά και καταγράφεται η αλλαγή στην τιμή της θερμοκρασίας του υλικού για ελεγχόμενα μεταβαλλόμενες τιμές στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος όταν το σύστημα βρίσκεται στην μόνιμη κατάσταση (βλ. κεφάλαιο 2.1.2.4).

Στο τέλος γίνεται σύγκριση των τιμών που βρέθηκαν πειραματικά στο εργαστήριο με τις τιμές του πειραματικού μοντέλου που κατασκευάστηκε (βλ. Κεφάλαιο 2) και γίνεται απεικόνιση μέσω διαγράμματος.

3.4.3.2) Περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων

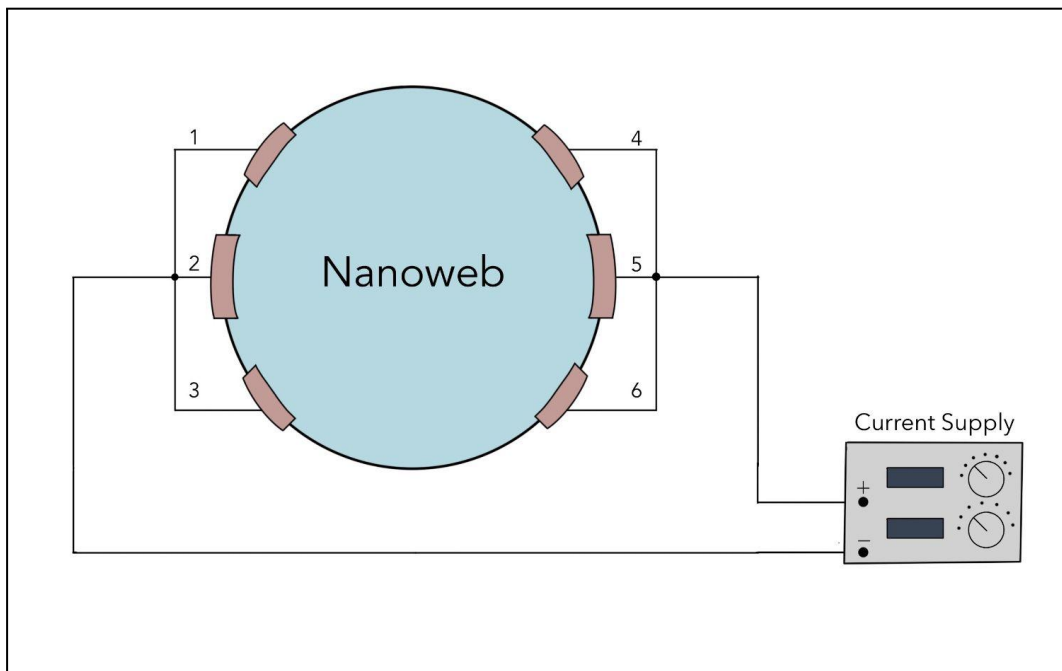
Για την εκτέλεση των μετρήσεων των θερμικών ιδιοτήτων του Nanoweb χρησιμοποιείται η διάταξη που παρουσιάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 3.2).

Η σύνδεση του Nanoweb με πηγή ρεύματος έγινε χρησιμοποιώντας όλους τους ακροδέκτες (σύνδεση 123-456), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.17, έχοντας ηλεκτρική αντίσταση 2,5 Ω (μετρήθηκε στο κεφάλαιο 3.4.1).

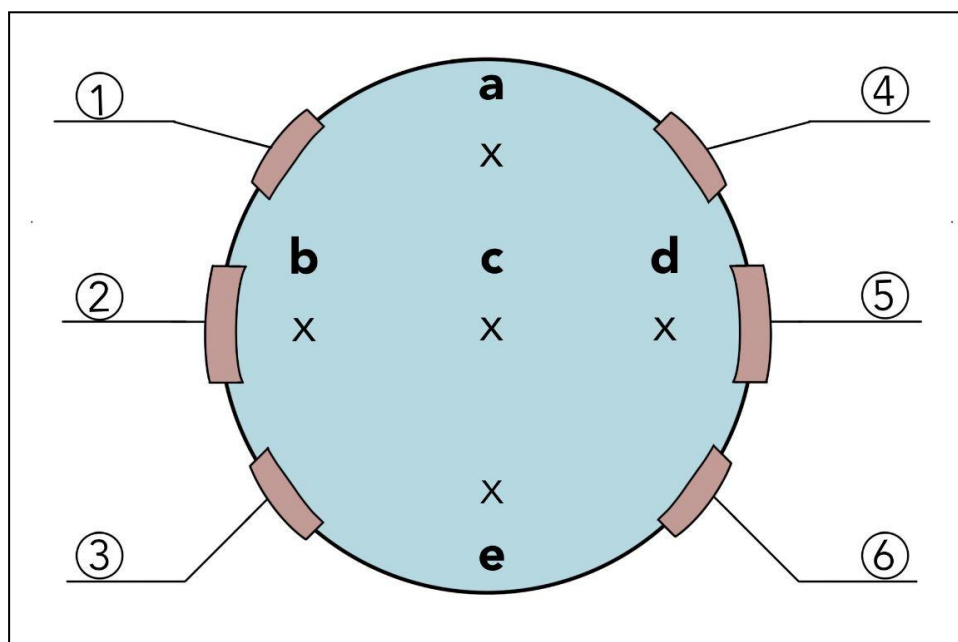
Έχοντας συνδέσει το Nanoweb στην πηγή, αρχικά θέτουμε ανώτατο όριο στην τιμή της τάσης της πηγής τα 10 Volts. Οι μετρήσεις ξεκινούν με την αρχική τιμή του ρεύματος τοποθετημένη στα 0,05A, περιμένουμε 5 με 6 λεπτά έως ότου να φτάσει το σύστημα στη μόνιμη κατάσταση (επιβεβαιώσαμε την μόνιμη κατάσταση του συστήματος με διαδοχικές μετρήσεις της θερμοκρασίας) και να μην μεταβάλλεται άλλο η θερμοκρασία και εν συνεχεία καταγράφονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας οι οποίες έγιναν με την χρήση του ψηφιακού θερμομέτρου με laser (InfraRed Thermometer).

Για κάθε τιμή της έντασης του ρεύματος λαμβάνονται 5 ξεχωριστές μετρήσεις θερμοκρασίας σε 5 διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του δοκιμίου (a,b,c,d,e) όπως απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 3.18), για να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές στη διαφορές στην θερμοκρασία της επιφάνειας. Αφού καταγραφούν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας αυξάνουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στα 0,10A και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται αυξάνοντας την ένταση του ρεύματος με βήμα 0,10A.

Για κάθε αλλαγή στην ένταση του ρεύματος, καταγράφεται στον πίνακα η ένδειξη της τάσης που αναγράφεται στην οθόνη της πηγής.



Εικόνα 3.16 'Σύνδεση nanoweb - Current supply



Εικόνα 3.17 : Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας στην επιφάνεια του Nanoweb (a, b, c, d, e)

3.4.3.3) Μετρήσεις θερμοκρασίας Nanoweb®

Το σύνολο των μετρήσεων που έγιναν καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα :

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ NANOWEB								
V (V)	I (A)	ΤΣΗΜΕΙΑΚΟ (°C)					Tm (°C)	ΔT (°C)
		a	b	c	d	e		
0,0	0,05	23,0	23,1	23,1	23,0	23,1	23,1	0,1
0,2	0,10	23,1	23,1	23,1	23,2	23,2	23,1	0,1
0,4	0,20	23,8	23,7	23,8	23,7	23,9	23,8	0,8
0,7	0,30	24,3	24,1	24,1	24,1	24,6	24,2	1,2
0,9	0,40	24,7	24,3	24,4	24,1	24,9	24,5	1,5
1,2	0,50	25,6	24,7	24,9	24,8	25,7	25,1	2,1
1,4	0,60	26,2	24,7	25,4	25,0	26,6	25,6	2,6
1,7	0,70	26,9	25,1	26,0	25,6	27,5	26,2	3,2
2,0	0,80	28,4	25,5	26,7	26,0	29,1	27,1	4,1
2,2	0,90	29,4	25,6	27,4	26,4	29,7	27,7	4,7
2,5	1,00	30,6	26,0	28,4	27,1	31,2	28,7	5,7
2,7	1,10	31,8	26,6	29,9	28,2	32,7	29,8	6,8
3,0	1,20	33,2	27,2	31,0	28,8	34,8	31,0	8,0
3,3	1,30	34,4	28,4	31,7	29,9	35,9	32,1	9,1
3,5	1,40	36,4	28,5	33,6	31,2	38,2	33,6	10,6
3,9	1,50	37,5	29,1	35,1	32,1	39,9	34,7	11,7
4,1	1,60	39,5	29,6	36,4	33,2	41,2	36,0	13,0
4,4	1,70	41,8	30,7	37,5	34,3	44,3	37,7	14,7
4,8	1,80	44,3	32,1	38,8	35,7	46,9	39,6	16,6
5,0	1,90	45,6	33,2	41,3	36,0	49,2	41,1	18,1
5,5	2,00	46,8	35,9	43,9	38,3	52,2	43,4	20,4

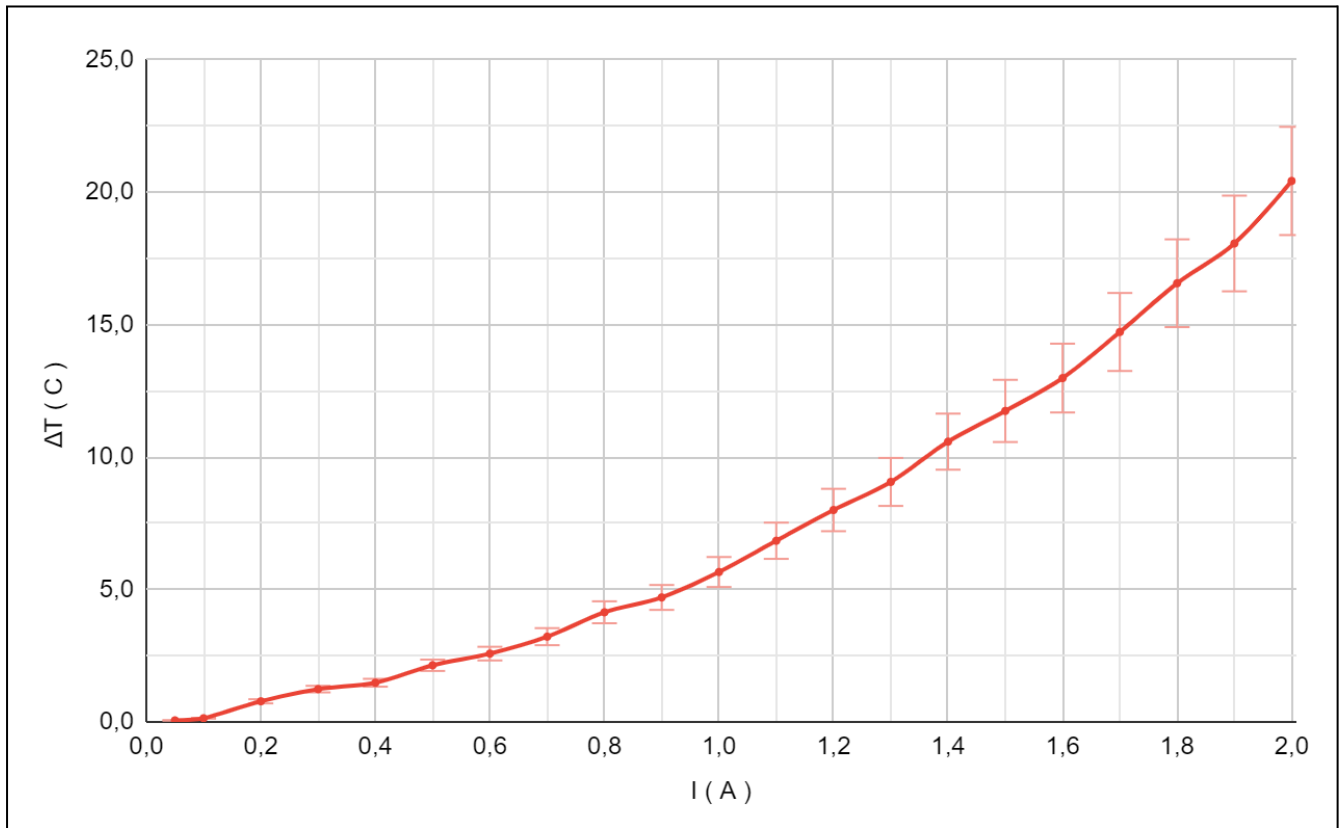
Πίνακας 3.6 : Πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας Nanoweb.

Παρατηρήσεις κατά τις μετρήσεις :

- Το Nanoweb δεν ζεσταίνεται ομοιόμορφα.
- Από τα σημεία που λαμβάνονταν οι μετρήσεις (a, b, c, d, e), στα σημεία a και e παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, την υψηλότερη τιμή θερμοκρασίας για κάθε τιμή ρεύματος (I) την συναντάμε στο σημείο e της επιφάνειας.
- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια του δείγματος παρατηρούνται κατ'επανάληψη στο κάτω μέρος της επιφάνειας του δείγματος και συγκεκριμένα ανάμεσα στα σημεία b - e και στα σημεία e - d.
- Στην 21η μέτρηση (σετάραμε το ρεύμα στα 2,00A), η τάση που προέκυψε στην οθόνη του Power Supply ήταν 5,5 Volts. Ωστόσο, μετά το πέρασμα 5 λεπτών, η τιμή της τάσης που αναγράφεται στην οθόνη ήταν 5,7 Volts.
- Αφού πέρασαν άλλα 30 min, η τιμή της τάσης έγινε 6,1 Volts ενώ το ρεύμα παρέμεινε σταθερό στα 2,00 A. Επομένως, από τα 2,00 A και πάνω λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας φαίνεται να αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση του Nanoweb.
- Στην 22η μέτρηση (σετάραμε το ρεύμα στα 2,10 A) και η ένδειξη της τάσης στην οθόνη της πηγής ρεύματος ήταν 6,4 V.
Μετά από 10 min : 2,10 A – 7,5 V
Μετά από 12 min : η τάση ξεπερνάει τα 10 Volts και κατα συνέπεια τερματίζονται οι μετρήσεις.
- Η υψηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε τοπικά ήταν 75 – 80 °C
- Υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία (T_m) των μετρήσεων που έγιναν στα 5 διαφορετικά σημεία της επιφάνειας και καταγράφεται στην προτελευταία στήλη.
- Στην τελευταία στήλη του πίνακα 3.5, με ΔT συμβολίζεται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στη θερμοκρασία του Nanoweb και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_∞) που παραμένει σταθερή.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του Nanoweb αναλογικά με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζεται γραφικά στο Διάγραμμα 3.1.

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΝΑΝΟΨΕΒ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ



Διάγραμμα 3.1 : Μεταβολή θερμοκρασίας Nanoweb σε σχέση με την ένταση του ρεύματος - Πειραματικές μετρήσεις

3.5) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

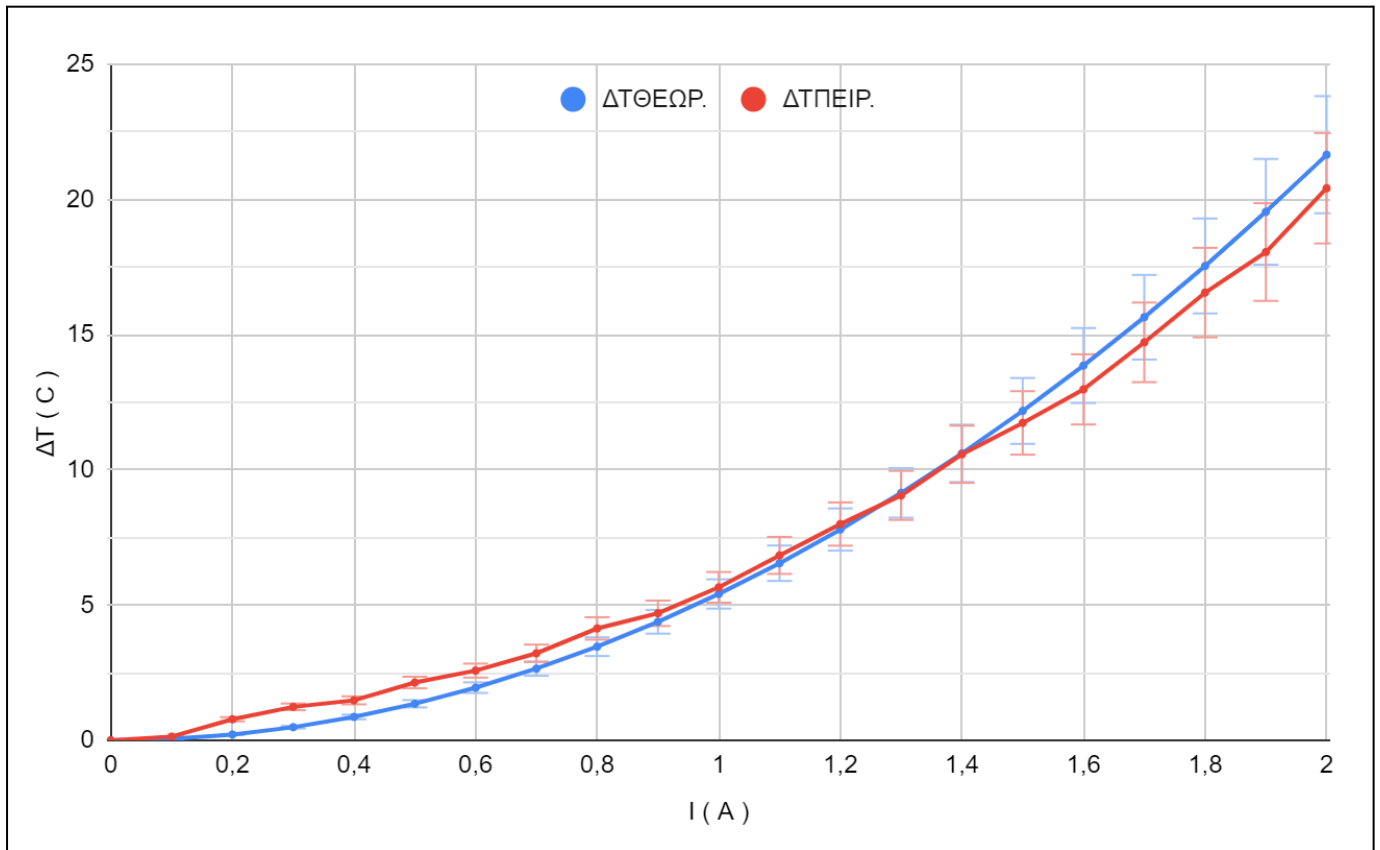
Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να ελέγξουμε το κατά πόσο τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου που κατασκευάστηκε στο Κεφάλαιο 2 συμπίπτουν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στο Nanoweb στο Κεφάλαιο 3.4. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του Nanoweb ως μετα-υλικό.

Στον πίνακα που ακολουθεί είναι αναγράφονται συγκεντρωτικά οι πληροφορίες από τον Πίνακα 2.1 και τον Πίνακα 3.5 για το θεωρητικό μοντέλο και τις πραγματικές μετρήσεις αντίστοιχα.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ		ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	
I (A)	ΔT (°C)	I (A)	ΔT (°C)
0,00	0	0,05	0,06
0,10	0,05	0,10	0,14
0,20	0,22	0,20	0,78
0,30	0,49	0,30	1,24
0,40	0,87	0,40	1,48
0,50	1,35	0,50	2,14
0,60	1,95	0,60	2,58
0,70	2,65	0,70	3,22
0,80	3,47	0,80	4,14
0,90	4,39	0,90	4,70
1,00	5,41	1,00	5,66
1,10	6,55	1,10	6,84
1,20	7,80	1,20	8,00
1,30	9,15	1,30	9,06
1,40	10,61	1,40	10,58
1,50	12,18	1,50	11,74
1,60	13,86	1,60	12,98
1,70	15,65	1,70	14,72
1,80	17,54	1,80	16,56
1,90	19,55	1,90	18,06
2,00	21,66	2,00	20,42

Πίνακας 3.7 : Ένταση ρεύματος (I) και Διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) - σύγκριση τιμών Θεωρητικού Μοντέλου και μετρήσεων.

Αντίστοιχα, γίνεται η σύγκριση των καμπυλών που προέκυψαν (θεωρητική και πειραματική) στο ίδιο καρτεσιανό επίπεδο.



Διάγραμμα 3.2 : Μεταβολή θερμοκρασίας σε σχέση με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος - Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις

3.6) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

- 1) Η καμπύλη με το γαλάζιο χρώμα που απεικονίζει τις θεωρητικές τιμές της θερμοκρασίας που προέκυψαν από το θεωρητικό μοντέλο αυξάνει παραβολικά καθώς αυξάνεται σταθερά η ένταση του ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι απεικονίζει μία εξίσωση δεύτερου βαθμού ($I^2 \cdot R = \frac{T1-T\infty}{Rt}$, Σχέση 2.16) για θετικές τιμές του I από 0 έως 2,00 Amp. ($I \in [0,2.00]$).
- 2) Από την άλλη η κόκκινη καμπύλη που απεικονίζει τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο πάνω στο Nanoweb είναι λογικό να μην είναι απόλυτα σταθερή και να έχει μικρές διακυμάνσεις, εφόσον αναφερόμαστε σε πραγματικές τιμές που επηρεάζονται από τα σφάλματα των οργάνων μέτρησης και τα σημεία λήψης των μετρήσεων.
- 3) Οι γραμμές σφάλματος που τέμνουν τις δύο καμπύλες ανά 0,10 A συμβολίζουν το εύρος των σφαλμάτων της κάθε καμπύλης αντίστοιχα.
- 4) Για τιμές έντασης του ρεύματος από 1,00 έως 1,40 Amp. η θεωρητική θερμοκρασία του υλικού σχεδόν ταυτίζεται με την θερμοκρασία που προέκυψε από τις μετρήσεις, αφού όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 3.2, οι δύο καμπύλες “πέφτουν” η μία πάνω στην άλλη.
- 5) Οι δύο καμπύλες (θεωρητική και πειραματική) είναι αρκετά κοντά η μία με την άλλη και ακολουθούν την ίδια πορεία όσο μεγαλώνει η ένταση του ρεύματος (για κάποιες τιμές της έντασης του ρεύματος ταυτίζονται - βλ. Σχόλιο 4). Αυτό σημαίνει ότι οι παραδοχές και η γενικότερη θεωρητική προσέγγιση του πειράματος που έγινε στο Κεφάλαιο 2 ήταν ρεαλιστική και έτσι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που τελικά προέκυψαν είναι τα αναμενόμενα.
- 6) Το Nanoweb σαν υλικό λειτουργεί όπως ένα οποιοδήποτε άλλο συμπαγές υλικό (πχ κάποιο κράμα μετάλλου) ως αναφορά τις θερμο-ηλεκτρικές του ιδιότητες, παρόλο που η σύνθεσή του (μεταλλικό νανο-πλέγμα) μόνο συμπαγής δεν είναι.

Επίλογος και πρόταση για περαιτέρω έρευνα :

Οι επιστήμονες των υλικών έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών και στην αναζήτηση νέων υλικών με καλύτερες ιδιότητες και υψηλότερη απόδοση στον τομέα των διάφανων ημιαγώγιμων υμενίων τα τελευταία χρόνια, καθώς έχουν πολλά πεδία εφαρμογής. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθούν οι θερμοηλεκτρικές ιδιότητες ενός καινούργιου υλικού αυτής της κατηγορίας, το Nanoweb. Το Nanoweb αποτελεί επαναστατικό υλικό τόσο γιατί παράγεται χάρη σε πρωτοπόρες και επαναστατικές μεθόδους και τεχνολογίες, όσο και για την ευελιξία, την υψηλή ποιότητα και απόδοσή που έχει. Πρώτα από όλα, στο πρώτο Κεφάλαιο, αφού παρουσιάστηκαν θεωρητικά κάποια υφιστάμενα δεδομένα σχετικά με την τεχνολογία των υλικών γενικά και των λεπτών αγώγιμων υμενίων ειδικότερα παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά, ο τρόπος κατασκευής και οι εφαρμογές του Nanoweb. Στο δεύτερο Κεφάλαιο κατασκευάστηκε θεωρητικό μοντέλο που εμβάθυνε στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που διέπουν μία διάταξη αντίστοιχη του Nanoweb στη μόνιμη κατάσταση. Στο τρίτο Κεφάλαιο έγιναν τρία είδη μετρήσεων στο δείγμα του Nanoweb, η μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης, η μέτρηση της Αντίστασης φύλλου και ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του υλικού με τη μέθοδο του ανιχνευτή τεσσάρων σημείων και τέλος λήφθηκαν μετρήσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του υλικού στην μόνιμη κατάσταση εφαρμόζοντας σταθερό ρεύμα. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα που βρέθηκαν συμφωνούσαν με τα επίσημα στοιχεία που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία του Nanoweb, Meta Materials, και ήταν : για την ηλεκτρική αντίσταση 2,5 Ω, για την αντίσταση φύλλου και ειδική αντίσταση έχουν εύρος 2,21 Ω έως 7,72 Ω και 10^{-4} έως $3,47 \cdot 10^{-4}$ Ωm αντίστοιχα. Τέλος, οι μετρήσεις που έγιναν για την αύξηση της θερμοκρασίας συμφωνούν με τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου, επομένως οι παραδοχές και οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 2 είναι σωστοί.

Εν κατακλείδι, αξίζει να γίνει εκτενέστερη έρευνα όσον αφορά την εφαρμογή του Nanoweb για την κατασκευή διάφανων κεραιών, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην περαιτέρω ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών 5G.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Materials science and Engineering» (SI Version), 9th Edition, William D. Callister, David G. Rethwish, 2015.
2. «Materials, Engineering, science, processing and design», 2nd Edition, Michael Ashby, Hugh Shereliff and David Cebon, Cambridge University, 2007.
3. «A brief intro to metamaterials», R.S. Kshetrimayum, 2004.
4. «Metamaterials : Physics and Engineering Explorations», Nader Engheta, Richard W. Ziolkowski, John Wiley & Sons, 2006.
5. «Negative Refraction», Science Article by J. B. Pendry, 2004.
6. «Structure and characteristics of ultrathin tin oxide films», Er-Jia Guo, Huibin Lu, Kuijuan Jin, Meng He, Guozhen Yang, 2011.
7. <https://www.indium.com/products/thin-film-materials/ito/>
8. «Thin Solid Films», Chapter : «Present status of transparent conducting oxide thin film development for Indium Tin-Oxide (ITO) substitutes», Tadatsugu Minami, 2008.
9. «Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics», E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, March 2007.
10. R&D World science magazine, Article Title : «Researchers find replacement for rare material Indium Tin Oxide», Research done at Eindhoven University of Technology, 2011.
11. «Microelectronic Engineering», «Material alternative to ITO for transparent conductive electrode in flexible displays and photovoltaic devices», Mariya Aleksandrova, Nikolay Kurtev, Valentin Videkov, Slavka Tzanova, Silvia Schintke, 2015.
12. Daily Metal Prices official website / Price metal charts.
13. Meta Materials Inc. - Functional Materials and Nanocomposites (official website) / «Nanoweb® : A Revolutionary Transparent Conductive Film» / The Benefits / Nanoweb® Capabilities.
14. «Ηλεκτρικό Ρεύμα και Αντίσταση» (PDF). Χημικό, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
15. «Schaum's Outline of Theory and Problems of HEAT TRANSFER», Donald R. Pitts, Leighton E. Sisson, 2001.

16. «Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces», Chapter 1 : «Theoretical foundation and Basic Properties of Thermal Radiation», Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhon, 2016.
17. «Momentum, heat and mass transfer», Bennett, Carroll O. Myers, John Earle, New York, 1962.
18. «Density | Definition, Symbol, Unit, Formula & Facts», Encyclopedia Britannica.
19. «Μηχανική Ρευστών», Α. Λιακόπουλος, Εκδ. Τζιόλα, 2011.
20. «Resistivity Measurements on Germanium for Transistors», L. B. Valdes, Feb. 1954.
21. [ossila.com / Calculate Sheet Resistance using the Four Point Method / What is the sheet resistance?](https://ossila.com/Calculate-Sheet-Resistance-using-the-Four-Point-Method/)
22. «Semiconductor material and device characterization», Schroder, Dieter K., New York, 1998.
23. The University of Michigan Wiki, Lurie Nanofabrication Facility (LNF).
24. «Measurement of Sheet Resistivities with the Four Point Probe», by F. M. Smits, Manuscript received October 15, 1957.
25. Hyperphysics, Resistivity and Conductivity table.
26. Material Property Database | Material : PMMA | Thermal conductivity | [mit.edu/~6.77/matprops/pmma.htm](https://matprops.mit.edu/~6.77/matprops/pmma.htm)
27. «Thermal analysis and control for heating of an extrusion die», Table 2 : «Approximate values of heat transfer coefficient», Ramiro Vargas, Viktor Gonda, March 2018.