



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Παραγωγή και Χαρακτηρισμός Σύνθετων Μονωτικών
Υλικών Εποξειδικής Ρητίνης – Νανοδομών Οξειδίου του
Ψευδαργύρου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Δ. Γεωργίου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Παραγωγή και Χαρακτηρισμός Σύνθετων Μονωτικών Υλικών Εποξειδικής Ρητίνης – Νανοδομών Οξειδίου του Ψευδαργύρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθύμιος Δ. Γεωργίου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....

Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Ματσόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

.....

Ευθύμιος Δ. Γεωργίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευθύμιος Δ. Γεωργίου, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά βρίσκονται τελευταία στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος, γιατί υπάρχει μεγάλη ανάγκη για καινούρια υλικά με άριστες ιδιότητες. Ιδιαίτερα τα υλικά που έχουν μία τουλάχιστον διάσταση στην νανοκλίμακα εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες από τα αντίστοιχα υλικά σε μεγαλύτερη κλίμακα. Το οξείδιο του ψευδαργύρου αποτελεί παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού. Το οξείδιο του ψευδαργύρου είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός με άμεσο ενεργειακό διάκενο (3,37 eV) και μεγάλη ενέργεια σύνδεσης εξιτονίων (60 meV).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραγωγή και ο χαρακτηρισμός σύνθετων μονωτικών υλικών εποξειδικής ρητίνης με πληρωτικό μέσο νανοδομές (νανολουλούδια) οξειδίου του ψευδαργύρου. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν δοκίμια ρητίνης με διαφορετικές περιεκτικότητες σε οξείδιο του ψευδαργύρου για να συγκριθούν με δοκίμια σκέτης ρητίνης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διηλεκτρικός και οπτοηλεκτρονικός χαρακτηρισμός των δοκιμίων. Επιπλέον, ερευνήθηκε τεχνητά σε τρεις κύκλους η επίδραση της περιβαλλοντικής γήρανσης στις ιδιότητες των υλικών.

Ο διηλεκτρικός χαρακτηρισμός αφορά τις υψηλές (τηλεπικοινωνιακές) συχνότητες (1 MHz – 1 GHz). Σε σχέση με τα δοκίμια σκέτης ρητίνης η διηλεκτρική σταθερά των δοκιμίων με 0,5% οξείδιο του ψευδαργύρου μειώνεται, ενώ η διηλεκτρική σταθερά των δοκιμίων με 2% οξείδιο του ψευδαργύρου αυξάνεται. Η εφαπτομένη απωλειών αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε οξείδιο του ψευδαργύρου. Μετά τη γήρανση οι τιμές των δύο αυτών μεγεθών λαμβάνουν ικανοποιητικές τιμές.

Ο οπτοηλεκτρονικός χαρακτηρισμός προσδιορίζει το ενεργειακό διάκενο των δοκιμίων, μέσω μετρήσεων διαπερατότητας και ανάκλασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ενεργειακό διάκενο είναι περίπου στα 3,3 eV. Ακόμα, το οξείδιο του ψευδαργύρου μειώνει τη διαπερατότητα και αυξάνει την ανάκλαση, θωρακίζοντας τα υλικά από την υπεριώδη ακτινοβολία.

Λέξεις Κλειδιά: Σύνθετα υλικά, Εποξειδική ρητίνη, Οξείδιο του ψευδαργύρου, Νανολουλούδια, Διηλεκτρική σταθερά, Εφαπτομένη απωλειών, Ενεργειακό διάκενο, Διαπερατότητα, Ανάκλαση, Περιβαλλοντική γήρανση

ABSTRACT

Composite materials have been recently in the spotlight, due to the increasing need of new materials with excellent properties. Especially the materials which have at least one dimension on the nanoscale present different properties in comparison to larger-scale materials. Zinc oxide is an example of these materials. Zinc oxide is a semiconductor with a direct energy gap (3.37 eV) and a high binding exciton energy (60 meV).

The aim of this thesis is the manufacture and the characterization of ZnO nanostructures (nanoflowers)/epoxy composites. For this reason, epoxy samples with different percentages of zinc oxide were produced and compared to samples of neat resin. Consequently the samples were examined in respect to their dielectric and optoelectronic characterization. Furthermore, the effect of the environmental aging was investigated artificially on samples' properties in three cycles.

The dielectric characterization was performed in high-radio frequencies (1 MHz - 1 GHz). In comparison to the samples of neat resin the dielectric constant of the samples with 0.5% zinc oxide decreases, whereas the dielectric constant of the samples with 2% zinc oxide increases. The loss tangent increases in accordance to the percentage of zinc oxide. Once the aging is completed these two quantities present satisfactory prices.

The optoelectronic characterization specifies the band gap of the samples by measuring the transmittance and the reflectance of the electromagnetic radiation. The band gap for the samples with zinc oxide is approximately 3.3 eV. In addition, zinc oxide reduces the transmittance and increases the reflectance, shielding the samples from the UV radiation.

Key words: Composite materials, Epoxy resin, Zinc oxide, Nanoflowers, Dielectric constant, Loss tangent, Band gap, Transmittance, Reflectance, Aging

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για την εμπιστοσύνη, που μου επέδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την άριστη καθοδήγηση καθώς και τις πολύτιμες γνώσεις, που μου προσέφερε καθ' όλην τη διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών κυρία Παναγιώτα Βασιλείου για τη διάθεση σημαντικού υλικοτεχνικού εξοπλισμού για την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ τους Υποψήφιους Διδάκτορες, κύριο Γιώργο Γλένη και κύριο Γιώργο Παπαλάμπρη για τη συνεργασία, τη συνεχή παρουσία και την καθοριστική βοήθεια τους στην αποπεράτωση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ βαθύτατα την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ευθύμιος Γεωργίου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ.....	17
1.1 Γενικά.....	17
1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών	18
1.2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με την ενίσχυση.....	18
1.2.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μήτρα	20
1.2.2.1 Μήτρες θερμοπλαστικών ρητινών	23
1.2.2.2.1 Εποξειδική ρητίνη	25
1.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών και Προσδιοριστικοί παράγοντες	28
1.4 Εφαρμογές σύνθετων υλικών	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ.....	35
2.1 Γενικές ιδιότητες	35
2.2 Κρυσταλλική δομή	37
2.3 Μέθοδοι παραγωγής.....	39
2.4 Νανοδομές ZnO	40
2.4.1 Νανοσωματίδια (Nanoparticles).....	40
2.4.2 Νανολουλούδια (Nanoflowers)	43
2.5 Νανοσύνθετα εποξειδικής ρητίνης με ZnO.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	49
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Παρασκευή δοκιμίων	49
3.2.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά	49
3.2.2 Χρησιμοποιούμενα όργανα	51
3.2.3 Διαδικασία παρασκευής	52
3.3 Διηλεκτρικές μετρήσεις.....	55
3.3.1 Διηλεκτρική θεωρία.....	55
3.3.1.1 Διηλεκτρική σταθερά.....	55
3.3.1.2 Ηλεκτρική επιτρεπτότητα	57
3.3.1.3 Εφαπτομένη απωλειών	57
3.3.1.4 Διηλεκτρική φασματοσκοπία.....	59

3.3.2 Χρησιμοποιούμενα όργανα	63
3.3.3 Διαδικασία μετρήσεων στη γέφυρα υψηλών συχνοτήτων	64
3.4 Μετρήσεις σε φασματοφωτόμετρο	65
3.4.1 Φασματοφωτόμετρο Jasco V-770	66
3.4.2 Διαδικασία μετρήσεων	68
3.5 Γήρανση δοκιμίων.....	69
3.5.1 QUV Accelerated Weathering Tester - Model QUV/spray.....	69
3.5.2 Διαδικασία γήρανσης	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	73
4.1 Επεξεργασία διηλεκτρικών μετρήσεων	73
4.2 Διαγράμματα διηλεκτρικών μετρήσεων.....	78
4.2.1 Διηλεκτρική σταθερά.....	78
4.2.2 Εφαπτομένη απωλειών	84
4.3 Διαγράμματα φασματοφωτομετρίας	90
4.3.1 Διαπερατότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	90
4.3.1.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τους κύκλους γήρανσης	90
4.3.1.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ψευδαργύρου.....	96
4.3.2 Ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	97
4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τους κύκλους γήρανσης	97
4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ψευδαργύρου.....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Έλασμα και Πολυστρωματικό υλικό ανάλογα με την κατεύθυνση των ινών [3].....	20
Σχήμα 2: Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με το υλικό της μήτρας [4]	20
Σχήμα 3: Εποξιομάδα ή Οξιρανικός δακτύλιος [3]	26
Σχήμα 4: Ανάπτυξη σταυροειδών δεσμών εποξειδικής ρητίνης με σκληρυντή αμίνης [3].....	27
Σχήμα 5: Διγλυκιδυλικός αιθέρας διφαινόλης A (DGEBA) [3].....	27
Σχήμα 6: Τετραγλυκιδυλικός αιθέρας (TGMDA) [3]	27
Σχήμα 7: Αντιδράσεις φωτοοξειδωσης πολυμερών [13].....	31
Σχήμα 8: Κρυσταλλικές δομές ZnO (a) Αλίτης (b) Σφαλερίτης (c) Βουρτσίτης (Οι μαύρες σφαίρες αναπαριστούν το Zn και οι άσπρες αναπαριστούν το O) [19]	37
Σχήμα 9: Δομή ιδανικού βουρτσίτη [17]	38
Σχήμα 10: Ανακλαστικότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [18]	38
Σχήμα 11: Διαπερατότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [18].....	39
Σχήμα 12: Απεικόνιση λειτουργίας αισθητήρα ZnO [24]	42
Σχήμα 13: Διαδικασία σχηματισμού ενός νανολουλουδιού ZnO [24]	44
Σχήμα 14: Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας [36]	56
Σχήμα 15: Διανυσματικό διάγραμμα της μιγαδικής ηλεκτρικής επιτρεπτότητας [36] 58	
Σχήμα 16: Διανυσματικό διάγραμμα της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας με σφάλμα μέτρησης ϵ_{error} (δείκτης m : μετρούμενες ποσότητες) [36].....	58
Σχήμα 17: Πραγματικό και φανταστικό μέρος διηλεκτρικής σταθεράς για μηχανισμό Debye [8]	61
Σχήμα 18: Διάγραμμα διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσει της συχνότητας και οι πολώσεις που επενεργούν [38]	62
Σχήμα 19: Σχηματική άποψη της σφαίρας ολοκλήρωσης [43]	67
Σχήμα 20: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης πριν τη γήρανση	78
Σχήμα 21: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 0,5% ZnO πριν τη γήρανση	78
Σχήμα 22: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 2% ZnO πριν τη γήρανση	79
Σχήμα 23: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης μετά απο 72 ώρες ..	79
Σχήμα 24: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 72 ώρες	80
Σχήμα 25: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 72 ώρες	80
Σχήμα 26: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 144 ώρες.....	81
Σχήμα 27: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες.....	81
Σχήμα 28: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων με 2% ZnO μετά από 144 ώρες.....	82
Σχήμα 29: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 216 ώρες.....	82
Σχήμα 30: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες	83
Σχήμα 31: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων 2% ZnO μετά από 216 ώρες	83
Σχήμα 32: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης.....	84
Σχήμα 33: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια με 0,5% ZnO	84
Σχήμα 34: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια με 2% ZnO πριν τη γήρανση.....	85
Σχήμα 35: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης μετά από 72 ώρες	85
Σχήμα 36: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια 0,5% ZnO μετά από 72 ώρες.....	86

Σχήμα 37: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια 2% ZnO μετά από 72 ώρες.....	86
Σχήμα 38: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 144 ώρες	87
Σχήμα 39: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες	87
Σχήμα 40: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων 2% ZnO μετά από 144 ώρες	88
Σχήμα 41: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 216 ώρες	88
Σχήμα 42: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων με 0,5 % ZnO μετά από 216 ώρες	89
Σχήμα 43: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων με 2% ZnO μετά από 216 ώρες	89
Σχήμα 44: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων πριν τη γήρανση	90
Σχήμα 45: Μεγέθυνση του Σχήματος 44 και υπολογισμός ενεργειακού διακένου	91
Σχήμα 46: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από γήρανση 72 ωρών.....	91
Σχήμα 47: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από γήρανση 72 ωρών ..	92
Σχήμα 48: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από γήρανση 72 ωρών	92
Σχήμα 49: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες γήρανσης	93
Σχήμα 50: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 144 ώρες γήρανσης	93
Σχήμα 51: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 144 ώρες γήρανσης.....	94
Σχήμα 52: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες γήρανσης	94
Σχήμα 53: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 216 ώρες γήρανσης	95
Σχήμα 54: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 216 ώρες γήρανσης.....	95
Σχήμα 55: Διαπερατότητα Δοκιμίου 4 (Σκέτη ρητίνη) σε όλους τους κύκλους γήρανσης.....	96
Σχήμα 56: Διαπερατότητα Δοκιμίου 8 (Ρητίνη και 0,5% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης.....	96
Σχήμα 57: Διαπερατότητα Δοκιμίου 10 (Ρητίνη και 2% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης.....	97
Σχήμα 58: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων πριν τη γήρανση.....	97
Σχήμα 59: Ανάκλαση δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά τις 72 ώρες.....	98
Σχήμα 60: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 72 ώρες.....	98
Σχήμα 61: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά τις 72 ώρες.....	99
Σχήμα 62: Ανάκλαση των δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες	99
Σχήμα 63: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 144 ώρες.....	100
Σχήμα 64: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 144 ώρες.....	100
Σχήμα 65: Ανάκλαση δοκιμίων 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες	101
Σχήμα 66: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 216 ώρες.....	101
Σχήμα 67: Ανάκλαση όλων των τύπων δοκιμίων μετά από 216 ώρες	102
Σχήμα 68: Ανάκλαση Δοκιμίου 4 (Σκέτη Ρητίνη) σε όλους τους κύκλους γήρανσης	102
Σχήμα 69: Ανάκλαση Δοκιμίου 8 (Ρητίνη και 0,5% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης.....	103
Σχήμα 70: Ανάκλαση Δοκιμίου 10 (Ρητίνη και 2% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης.....	103

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάταξη ινών (α) Ευθυγραμμισμένες, (β) Τυχαίου προσανατολισμού, (γ) Πλέγμα ύφανσης, (δ) Ττισορθογώνια πλέξη [4]	19
Εικόνα 2: Αεροσκάφος Boeing 787 Dreamliner [3]	33
Εικόνα 3: Οξειδίο του ψευδαργύρου σε μορφή σκόνης [16]	36
Εικόνα 4: Νανολουλούδια ZnO (η εικόνα b είναι μεγέθυνση της a) [30]	45
Εικόνα 5: Η χρησιμοποιούμενη εποξειδική ρητίνη Epoxol 2874 [35]	50
Εικόνα 6: Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110	51
Εικόνα 7: Λουτρό υπερήχων Bek Nilas U25H	52
Εικόνα 8: Παραχθέντα δοκίμια (1-4 Σκέτη ρητίνη, 5-8 Ρητίνη με 0,5% ZnO, 9-12 Ρητίνη με 2% ZnO)	54
Εικόνα 9: Γέφυρα υψηλών συχνοτήτων Agilent 4287A [39]	63
Εικόνα 10: Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A με δοκίμιο προς μέτρηση	64
Εικόνα 11: Μέτρηση δοκιμίου στη γέφυρα υψηλών συχνοτήτων	65
Εικόνα 12: Φασματοφωτόμετρο Jasco V-770	66
Εικόνα 13: Άποψη της σφαίρας ολοκλήρωσης	67
Εικόνα 14: Η συνολική μετρούμενη διάταξη του φασματοφωτόμετρου	69
Εικόνα 15: Εσωτερική άποψη QUV Accelerated Weathering Tester	70
Εικόνα 16: QUV Accelerated Weathering Tester	71

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας [4]	21
Πίνακας 2: Παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας [4].....	22
Πίνακας 3: Παραδείγματα σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας [4].....	25
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης [7]	25
Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες ZnO [17]	36
Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά Eroxol 2874 [34]	50
Πίνακας 7: Αντοχές της Eroxol 2874 μετά την ανάμειξη [34]	51
Πίνακας 8: Συνθήκες κατά την παρασκευή των δοκιμίων	53
Πίνακας 9: Διηλεκτρικές μετρήσεις πριν τη γήρανση	74
Πίνακας 10: Διηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 72 ώρες γήρανσης	75
Πίνακας 11: Διηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 144 ώρες γήρανσης	76
Πίνακας 12: Διηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 216 ώρες γήρανσης	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

1.1 Γενικά

Η αναζήτηση για καινούρια υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες και οικονομικό τρόπο παρασκευής συντέλεσε στην ανάπτυξη του κλάδου των σύνθετων υλικών. Επιθυμητές ιδιότητες όπως η υψηλή αντοχή και το μικρό βάρος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των κατάλληλων υλικών.

Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά δεν αποτελούν μία καινούρια εφεύρεση του ανθρώπου, καθώς συναντώνται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Ήδη από το 5000 π.Χ. είχε ανακαλυφθεί ο πηλός ενώ περίπου το 3000 π.Χ. στην Αίγυπτο χρησιμοποιούνταν ως μεταφορικό μέσο καλαμένιες βάρκες εμποτισμένες σε πίσσα. Οι λαοί της Μεσοποταμίας το 2500 π.Χ. τοποθετούσαν πέτρες ή πηλό στους τοίχους για αυξημένη προστασία. Στη Μογγολία κατασκευάζονταν τόξα από διάφορα στέρεα υλικά όπως ξύλο, κέρατα, μετάξι και τένοντες ζώων. Παράλληλα, φυσικά σύνθετα υλικά όπως ο πάπυρος, η περγαμηνή και το χαρτί ήταν ευρέως γνωστά αν και η ανακάλυψη του τελευταίου ήρθε πολλούς αιώνες αργότερα. Στην Αρχαία Ελλάδα οι ασπίδες, ένα από τα κυριότερα προστατευτικά όπλα, κατασκευάζονταν αρχικά από ξύλο ιτιάς και δέρμα βοοειδών και στη συνέχεια από μεταλλικά φύλλα συνδυασμένα με πολύτιμα μέταλλα.

Ο όρος «**Σύνθετα υλικά**» αναφέρεται στη μακροσκοπική ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την ανάπτυξη νέων υλικών με ιδιότητες διαφορετικές από αυτές των αρχικών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις, τη μήτρα και τη φάση ενίσχυσης. Οι δύο φάσεις διαχωρίζονται μεταξύ τους από μία διεπιφάνεια, η οποία έχει περίπλοκη δομή και επηρεάζει σημαντικά την αντοχή των σύνθετων υλικών απέναντι στη διάβρωση. [1] Η μήτρα είναι η συνεχής φάση, η οποία περιβάλλει τη φάση ενίσχυσης και κατέχει συνήθως το υψηλότερο ποσοστό του όγκου του σύνθετου υλικού. Στην περίπτωση βέβαια των συνεχών σύνθετων υλικών με ίνες το ποσοστό των ινών μπορεί να φθάσει το 90,7% του συνολικού όγκου του υλικού και το ποσοστό της μήτρας μόλις το 9,3%. [2] Τότε όμως, η μήτρα αδυνατεί να προστατεύσει την ενίσχυση με

αποτέλεσμα το ποσοστό της ενίσχυσης να φθάνει σήμερα περίπου το 70%. Η μήτρα λειτουργεί ως προστασία της φάσης ενίσχυσης από την τριβή και τις φθορές του εξωτερικού περιβάλλοντος. Επίσης, μεταφέρει διαμέσου της διεπιφάνειας φορτία διατμητικής τάσης στη φάση ενίσχυσης. Η φάση ενίσχυσης περιέχει τα εγκλείσματα και είναι αυτή που καθορίζει την αντοχή και την ακαμψία του τελικού υλικού. [3]

1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Οι δύο επικρατέστεροι είναι ανάλογα με το υλικό της ενίσχυσης και ανάλογα με το υλικό της μήτρας.

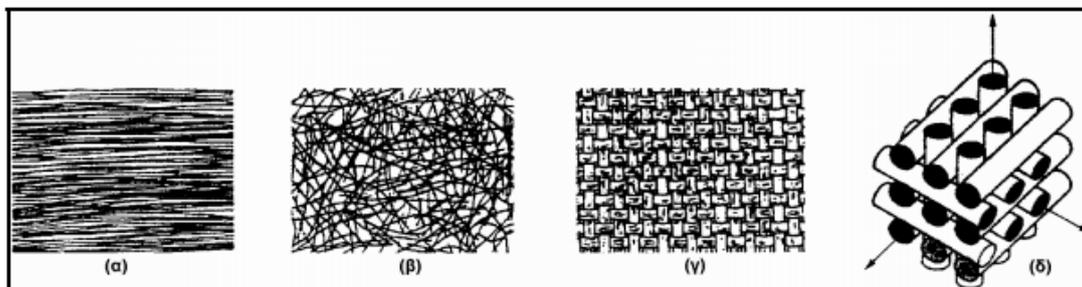
1.2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με την ενίσχυση

Σύμφωνα με το υλικό της ενίσχυσης, τα σύνθετα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

Σωματιδιακά Σύνθετα: Τα σωματίδια μπορούν να είναι οργανικά ή ανόργανα που ο λόγος μορφής τους πρέπει να είναι ίσος με ένα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να έχουν περίπου ίσες διαστάσεις προς όλες τις κατευθύνσεις. Για το λόγο αυτό υπάρχει πληθώρα σχημάτων και μορφών των σωματιδίων όπως στερεά, επίπεδα, σφαιρικά, ελλειψοειδή, κοίλα καθώς και μη συγκεκριμένου σχήματος. Η κατανομή τους μέσα στη μήτρα ενδέχεται να είναι ομοιόμορφη ή με μεγάλη διασπορά. Το σχήμα των σωματιδίων σε συνδυασμό με την κατανομή, το μέγεθος και το πλήθος διαφοροποιούν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. [2]

Ινώδη Σύνθετα: Το κύριο χαρακτηριστικό των ινών είναι ότι έχουν μεγάλο λόγο μορφής (l/d), δηλαδή το μήκος τους είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο τους. Το σχήμα τους είναι κυκλικό και περιέχονται περισσότερο σε πολυμερικές μήτρες ώστε να αυξήσουν την αντοχή και την ακαμψία. Γενικά, οι ίνες είναι περισσότερο ανθεκτικές από ότι είναι το υλικό στην κλασσική του μορφή. [3] Έχουν αναπτυχθεί ίνες από γυαλί, άνθρακα, κεραμικά, μεταλλικά και πολυμερή υλικά, οι οποίες μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή να έχουν τυχαίο προσανατολισμό (πλέγμα ύφανσης, τρισσορθογώνια πλέξη) μέσα στο υλικό (Εικόνα 1). Ακόμα, χωρίζονται σε συνεχείς ή ασυνεχείς, όταν ο λόγος μορφής είναι μεγαλύτερος και μικρότερος του 100 αντίστοιχα. Οι συνεχείς ίνες παρέχουν καλύτερη ενίσχυση από τις ασυνεχείς και βελτιώνουν περισσότερο τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, τη θερμική τους αγωγιμότητα καθώς

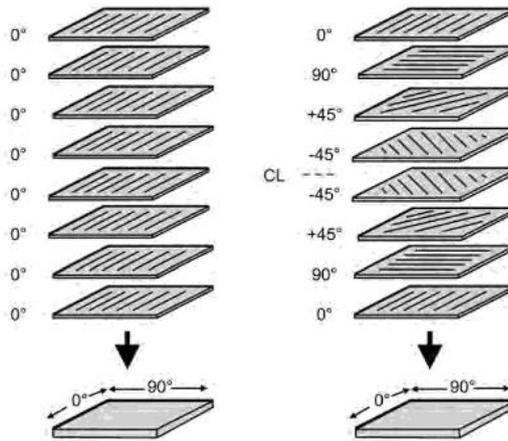
και την ηλεκτρική αντίσταση. Όταν το μήκος των ινών είναι περίπου 100 μm και η διάμετρος τους μικρότερη από 1 μm , τότε οι ίνες ονομάζονται νηματίδια ή τριχίτες. Εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους τους τα νηματίδια αγνοούν κάποιες ασυνέχειες της κρυσταλλικής δομής και αποτελούν να μεν πολύ ανθεκτικά αλλά ακριβά υλικά. [4][5]



Εικόνα 1: Διάταξη ινών (α) Ευθυγραμμισμένες, (β) Τυχαίον προσανατολισμού, (γ) Πλέγμα ύφανσης, (δ) Τρισσορθογώνια πλέξη [4]

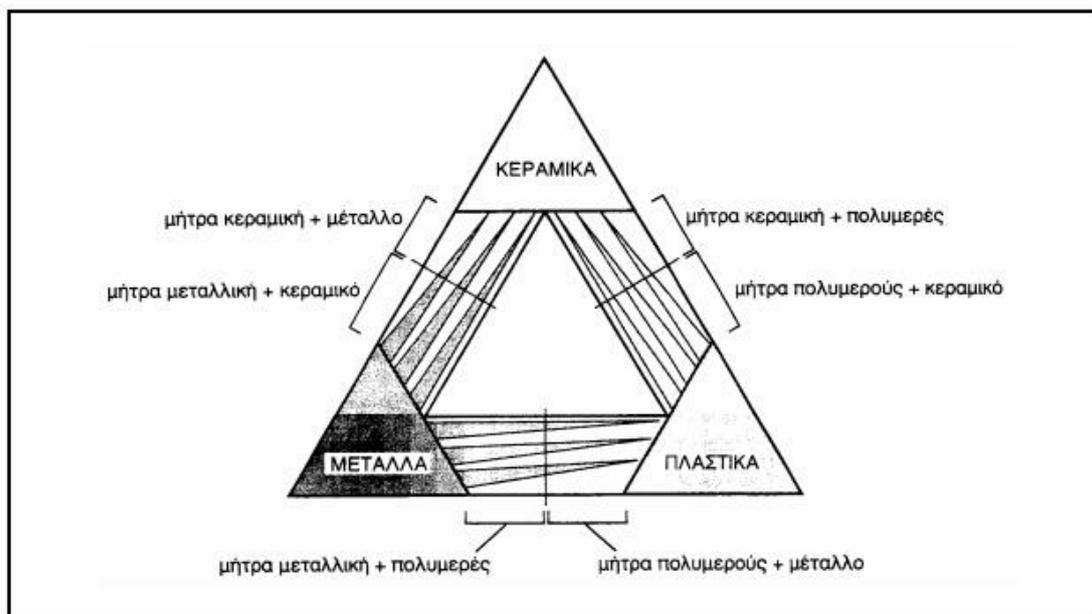
Πολυστρωματικά Σύνθετα: Η μήτρα και η ενίσχυση αυτών των υλικών αποτελούνται από φύλλα ή στρώματα ομοιογενών ή ινώδων σύνθετων υλικών, τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο. Τα ινώδη φύλλα που έχουν την ίδια διεύθυνση σε όλο το πάχος του σύνθετου υλικού ονομάζονται ελάσματα, ενώ τα φύλλα των οποίων οι διευθύνσεις μεταβάλλονται ονομάζονται πολυστρωματικά (Σχήμα 1). Στις 0° το έλασμα έχει πολύ μεγάλη αντοχή και ακαμψία εν αντιθέσει με τις 90°, όπου τα φορτία πρέπει αναγκαστικά να περάσουν διαμέσου της μήτρας. Συνεπώς, μέσω των διαφορετικών κατευθύνσεων επιτυγχάνεται η αύξηση της αντοχής του σύνθετου, καθώς τα φορτία μεταφέρονται ομοιόμορφα διαμέσου των ινών προς όλες τις κατευθύνσεις. [3]

Επίσης, υπάρχουν και τα πολυστρωματικά υλικά τύπου σάντουιτς. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ένα στρώμα μικρής αντοχής, τον κορμό, ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο ανθεκτικά φύλλα. Ο κορμός βοηθά στην αποφυγή των κάθετων παραμορφώσεων και εξασφαλίζει τη συνολική ανθεκτικότητα. [6] Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι η ύαλος ασφαλείας, τα φύλλα της οποίας είναι ύαλου και ο κορμός είναι ένα πλαστικό υλικό, το πολυβινύλιο (polyvinyl butryal). Η ύαλος καθιστά το πολυβινύλιο λιγότερο εύκαμπτο και το τελευταίο μειώνει την ευθραυστότητα της πρώτης. [1]



Σχήμα 1: Έλασμα και Πολυστρωματικό υλικό ανάλογα με την κατεύθυνση των ινών [3]

1.2.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μήτρα



Σχήμα 2: Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με το υλικό της μήτρας [4]

Σύμφωνα με το υλικό της μήτρας, τα σύνθετα υλικά χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

Σύνθετα Μεταλλικής Μήτρας: Η μήτρα μπορεί να αποτελείται από μέταλλα ή κράματα μετάλλων, τα οποία είναι ιστροπικά και ελατά υλικά. Συνήθως τα μέταλλα αυτά είναι το αργίλιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο, το νικέλιο και ο χαλκός. Το αργίλιο επιδεικνύει μεγάλη σκληρότητα και αντίσταση στη διάβρωση. Έχει μικρή πυκνότητα

και χαμηλό σημείο τήξης, γεγονός που σημαίνει ότι είναι ελαφρύ και μεταχειρίζεται εύκολα. Το μαγνήσιο αποτελεί επίσης ένα υλικό με πολύ μικρή πυκνότητα αλλά για να επεξεργαστεί πρέπει πρώτα να θερμανθεί. Το τιτάνιο έχει μεγαλύτερο σημείο τήξης από το αργίλιο (1672°C), γεγονός που το κάνει πιο ανθεκτικό στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά, τα συγκεκριμένα σύνθετα αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, δεν απορροφούν υγρασία, έχουν χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, μεγάλη αντοχή και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Όμως, η παρασκευή τους απαιτεί πολύωρες, σύνθετες και ακριβείς διεργασίες, όπως η αποφυγή της οξείδωσης και η εφαρμογή υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών. [5][7]

Πίνακας 1: Παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας [4]

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al ₂ O ₃	Εμβολα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B ₄ N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

Σύνθετα Κεραμικής Μήτρας: Τα κεραμικά υλικά αποτελούν χημικές ενώσεις μετάλλων και αμετάλλων στοιχείων. Τα πιο συνηθισμένα κεραμικά είναι τα οξείδια, τα νιτρίδια και τα καρβίδια. Ο όρος «κεραμικά» προέρχεται από τον τρόπο παρασκευής τους, καθώς υφίστανται επεξεργασία (ψήνονται) σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, είναι πυρίμαχα υλικά που αντιστέκονται ικανοποιητικά στη διάβρωση του περιβάλλοντος. Είναι χημικά αδρανή και παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα εξαιτίας της απουσίας ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Έχουν χαμηλή πυκνότητα και ακαμψία αλλά παράλληλα δεν είναι σκληρά. Για το λόγο αυτό, προστίθεται η κατάλληλη ενίσχυση. Εάν η ενίσχυση είναι ινώδης, τότε τα επιμέρους υλικά έχουν διαφορετικό συντελεστή διαστολής και οι ίνες τείνουν να βγουν έξω από το υλικό, απορροφώντας ενέργεια η οποία και τελικά χαρίζει τη σκληρότητα στο σύνθετο. Εάν η ενίσχυση είναι με ίνες άνθρακα, τότε αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που καθιστά το υλικό κατάλληλο για την απαγωγή της θερμότητας.

Ειδική κατηγορία κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο, στο οποίο προστίθεται άμμος, χαλίκια και άλλες προσμίξεις σχηματίζοντας το σκυρόδεμα. Με την προσθήκη χάλυβα δημιουργείται το οπλισμένο σκυρόδεμα που αντέχει μεγάλες εφελκυστικές, θλιπτικές και διατμητικές τάσεις, ενώ με την προσθήκη λεπτών ενισχύσεων το ασβεστοκονίαμα. Αυτά τα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε οικοδομικές κατασκευές. [5][8]

Πίνακας 2: Παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας [4]

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δυσκώφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

Σύνθετα Πολυμερικής Μήτρας: Τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας αποτελούν τα πιο συχνά εμφανιζόμενα σύνθετα υλικά εξαιτίας των θετικών χαρακτηριστικών των πολυμερών. Τα πολυμερή βρίσκονται συνήθως σε υγρή μορφή, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία τους με χαμηλό κόστος. Έχουν χαμηλή πυκνότητα γιατί αποτελούνται από υλικά με μικρό ειδικό βάρος. Επίσης, είναι ανθεκτικά σε χημικές ουσίες και δεν άγουν τη θερμότητα και τον ηλεκτρισμό. Η δομή τους είναι πιο σύνθετη από τα μέταλλα και κεραμικά αλλά σε σχέση με αυτά παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. [7]

Ο όρος «πολυμερές» αναφέρεται σε ένα καθαρό υλικό χωρίς προσμίξεις, του οποίου τα μόρια του (μονομερή) παρατάσσονται σε μακρές αλυσίδες από επαναλαμβανόμενα τμήματα, τις δομικές μονάδες. Ο αριθμός των δομικών μονάδων κάθε πολυμερούς ονομάζεται βαθμός πολυμερισμού. Τα χημικά στοιχεία που απαρτίζουν τις πολυμερικές αλυσίδες είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο, το χλώριο, το φθόριο και το θείο. [2] Τα μονομερή συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικό δεσμό, καθώς τα άτομα μοιράζονται ένα κοινό ζεύγος ηλεκτρονίων. Ο ομοιοπολικός δεσμός είναι γενικά πολύ ισχυρός και επηρεάζει άμεσα τη θερμική και φωτοχημική αντοχή των πολυμερών. Όμως, τα ηλεκτρόνια στα κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων εναλλάσσονται

συνεχώς λόγω της συνεχούς κίνησης τους. Κάποιο άτομο μπορεί να φορτισθεί στιγμιαία θετικά και κάποιο άλλο αρνητικά, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ασθενείς ελκτικές δυνάμεις μέσα στο μόριο των μονομερών. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται δευτερεύουσες ή Van der Waals και καθορίζουν τη διαλυτότητα, την τήξη, την απορρόφηση και την παραμόρφωση των πολυμερών. Ακόμα, αναπτύσσονται και κάποιες άλλες ελκτικές δυνάμεις, ο λεγόμενος δεσμός υδρογόνου, καθώς το υδρογόνο λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ δύο άλλων μορίων και συγκεκριμένα του οξυγόνου, του αζώτου ή του φθορίου.

Ως προς τη χρήση σε μήτρες συνήθως δε χρησιμοποιούνται τα καθαρά πολυμερή αλλά προστίθενται σε αυτά διάφορες ουσίες. Τότε τα υλικά που σχηματίζονται ονομάζονται πλαστικά ή ρητίνες. Όπως τα πολυμερή, έτσι και οι ρητίνες μπορούν να είναι θερμοπλαστικές ή θερμοσκληρυνόμενες. [1]

1.2.2.1 Μήτρες θερμοπλαστικών ρητινών

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες αποτελούνται από γραμμικά μακρομόρια τα οποία μπορούν να σχηματίζουν μόνο γραμμικές ή διακλαδωμένες αλυσίδες. Οι δεσμοί μεταξύ των μονομερών είναι οι ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Με τη θέρμανση τους οι δεσμοί γίνονται πιο χαλαροί, με αποτέλεσμα οι ρητίνες να αρχίζουν να τήκονται, γεγονός που σημαίνει ότι το ιξώδες τους είναι χαμηλό και μειώνεται ακόμα περισσότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εν συνέχεια, με τη διακοπή της θέρμανσης και τη σταδιακή ψύξη αποκτούν και πάλι τη στερεή τους κατάσταση. Αυτή η εναλλαγή στη φυσική κατάσταση των θερμοπλαστικών μπορεί να θεωρείται πλεονέκτημα για κάποιες εφαρμογές, όμως, υπάρχει ο κίνδυνος να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις ιδιότητες τους όπως στην κρυσταλλικότητα. [1][2][7]

Γενικά, οι θερμοπλαστικές μήτρες μπορούν να ανασκευάζονται εύκολα είτε για την επιδιόρθωση τυχόν ατελειών ή την ανακύκλωση των παραγόμενων αποκομμάτων. Έχουν χαμηλό κόστος παρασκευής και θεωρητικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Έχουν μεγάλο μοριακό βάρος και είναι διαλυτές σε κάποιους διαλύτες. Κατά τη διάρκεια παρασκευής τους οι χημικές ουσίες είναι λιγότερο επικίνδυνες σε σχέση με τις αντίστοιχες για τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, ενώ η υγρασία κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Επιπρόσθετα, οι θερμοπλαστικές ρητίνες παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα μεγάλη ανοχή σε βλάβη. Όμως, οι μέθοδοι επεξεργασίας τους απαιτούν υψηλά σημεία τήξης, υψηλό ιξώδες,

υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. [3][5] Χαρακτηριστικές θερμοπλαστικές μήτρες είναι το νάιλον, οι θερμοπλαστικοί πολυεστέρες και τα πολυανθρακικά (PC). Για την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας χρησιμοποιούνται τελευταία τα πολυαμίδια-ιμίδια (PA), τα θειούχα πολυφινελένια (PPS) και οι πολυαιθεροαιθεροκετόνες (PEEK). [7]

1.2.2.2 Μήτρες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες βρίσκονται σε υαλώδη μορφή και με την αύξηση της θερμοκρασίας παίρνουν στερεή μορφή (σκληραίνουν), όπως υπονοεί εξάλλου και το όνομα τους. Έχουν χαμηλό μοριακό βάρος. Η βασική διαφορά των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών από τις θερμοπλαστικές είναι πως την ώρα της μορφοποίησης τους αναπτύσσουν σταυροειδείς δεσμούς μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων. Η δημιουργία αυτών των δεσμών προκαλείται με την παρουσία θερμότητας είτε αυτή επιβάλλεται εξωτερικά είτε προέρχεται από εξώθερμες χημικές αντιδράσεις των μορίων που σχηματίζουν τη ρητίνη. Οι σταυροειδείς δεσμοί δεν επιτρέπουν τη μεγάλη κίνηση των αλυσίδων, χαρίζοντας στη ρητίνη ακαμψία και μεγάλη αντίσταση στην παραμόρφωση. Έτσι, η δομή των ρητινών αποκτά τη μορφή τρισδιάστατου πλέγματος. Όταν η διαδικασία της σκλήρυνσης ολοκληρωθεί, οι παραγόμενες ρητίνες δε μπορούν με την αύξηση της θερμοκρασίας να γυρίσουν πίσω στην υαλώδη φάση τους, όπως οι θερμοπλαστικές ρητίνες. Αντίθετα, αντιστέκονται στη θέρμανση αλλά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφούν. Παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή απέναντι σε διαλύτες. Τέλος, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι συνήθως ψαθυρά υλικά που αντιστέκονται στον ερπυσμό και παρέχουν πολλή καλή ηλεκτρική μόνωση. [2][3]

Οι κατηγορίες των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών είναι οι πολυεστέρες, οι βινυλεστέρες, οι εποξειδικές, οι δισμηλεϊνιμίδες, οι κυανικοί εστέρες, οι φαινόλες και τα πολυιμίδια. Βασικό κριτήριο επιλογής της κατάλληλης ρητίνης είναι η απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας. Για τις υψηλότερες θερμοκρασίες που αντέχουν τα πολυμερή, έως 315°C χρησιμοποιούνται τα πολυιμίδια. Για θερμοκρασίες μεταξύ 135°C και 175°C χρησιμοποιούνται οι δισμηλεϊνιμίδες, ενώ για θερμοκρασίες έως 135°C περίπου χρησιμοποιούνται οι εποξειδικές ρητίνες, οι πολυεστέρες και οι βινυλεστέρες. Οι κυανικοί εστέρες αποτελούν ακριβές ρητίνες αλλά προσλαμβάνουν λιγότερη υγρασία στο εσωτερικό τους και παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική

συμπεριφορά. Οι φαινόλες χρησιμοποιούνται και αυτές σε υψηλές θερμοκρασίες, γιατί αντιστέκονται αποτελεσματικά στη φωτιά. [3]

Πίνακας 3: Παραδείγματα σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας [4]

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τέννις, μπάστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

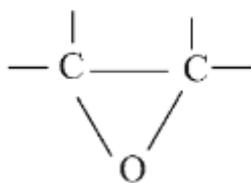
1.2.2.2.1 Εποξειδική ρητίνη

Η εποξειδική ρητίνη αποτελεί το πιο συνηθισμένο υλικό πολυμερικής μήτρας, γιατί συνδυάζει πλήθος θετικών χαρακτηριστικών όπως εύκολη επεξεργασία, μεγάλη ακαμψία, άριστη ηλεκτρική μόνωση, αντοχή στην υγρασία και στην εκδήλωση φωτιάς και χαμηλή συρρίκνωση στη σκλήρυνση.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης [7]

Πυκνότητα ρ (g cm⁻³)	1,2 - 1,3
Εφελκυστική αντοχή σ (MPa)	50 - 125
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	2,5 - 4
Λόγος Poisson ν	0,2 - 0,33
Συντελεστής γραμμικής διαστολής (10⁻⁶ K⁻¹)	50 - 100
Συρρίκνωση σκλήρυνσης (%)	1 - 5
Θερμοκρασιακή χρήση (°C)	150

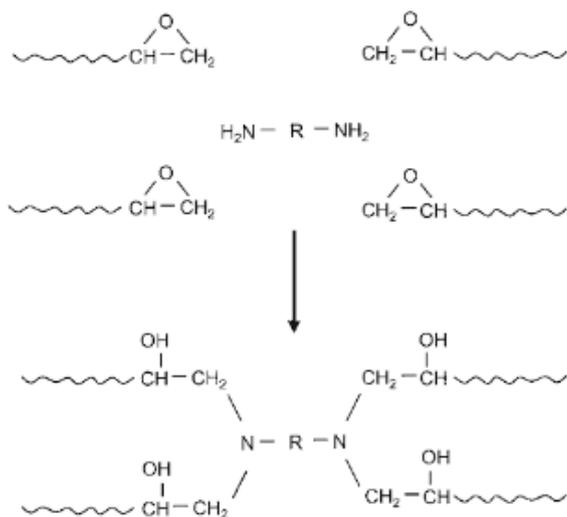
Χαρακτηριστικό γνώρισμα της δομής της συγκεκριμένης ρητίνης είναι η παρουσία στα άκρα των μορίων της της εποξιομάδας ή αλλιώς του οξιρανικού δακτυλίου, ο οποίος αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα άνθρακα.



Σχήμα 3: Εποξιομάδα ή Οξιρανικός δακτύλιος [3]

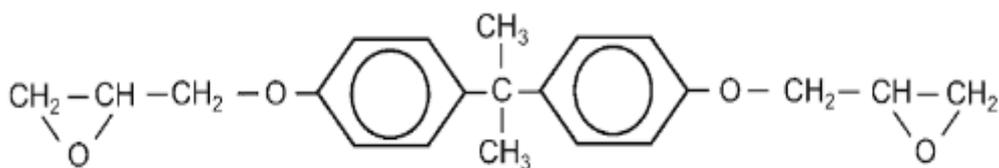
Η εποξειδική ρητίνη σχηματίζεται από ένα κύριο εποξειδικό μονομερές, μέχρι τρία ελλάσσοντα εποξειδικά μονομερή και μέχρι δύο παράγοντες σκλήρυνσης. Τα ελλάσσοντα εποξειδικά μονομερή είναι αμινικές φαινόλες, νεολάκες ή κυκλοαλειφατικά και χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση κάποιων ιδιοτήτων της ρητίνης όπως μείωση του ιξώδους, μείωση της υγρασίας και αύξηση της ανοχής στη θερμοκρασία. Οι σκληρυντές που χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό πολυμερικών μητρών είναι αλειφατικές αμίνες, αρωματικές αμίνες ή ανιδρώτες, των οποίων η επιλογή και η ποσότητα επηρεάζουν καθοριστικά το χρόνο ζωής των υλικών. Πολλές φορές προστίθενται στη ρητίνη μικρή ποσότητα διαλυτών προκειμένου να μειωθεί η συρρίκνωση της και η θερμότητα που εκλύεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις καθώς και καταλυτών προκειμένου να επιταχυνθεί ο σχηματισμός της.

Αρχικά, η εποξιομάδα αντιδρά με τα ελλάσσοντα μονομερή και σχηματίζει ένα προπολυμερές με μικρό βάρος και μεγάλο ιξώδες. Στη συνέχεια, το προπολυμερές δημιουργεί σταυροειδείς δεσμούς με τη βοήθεια του σκληρυντή, δίνοντας στη ρητίνη τη στερεή μορφή της. Το ποσοστό του σκληρυντή επηρεάζει το βαθμό ανάπτυξης των σταυροειδών δεσμών. Όσο δηλαδή μεγαλύτερη ποσότητα σκληρυντή χρησιμοποιείται, τόσο αυξάνεται ο σχηματισμός των σταυροειδών δεσμών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακαμψία και η αντοχή της σχηματιζόμενης εποξειδικής ρητίνης. Όμως, η σκληρότητα δεν ακολουθεί την ίδια αύξηση αντίθετα μειώνεται.

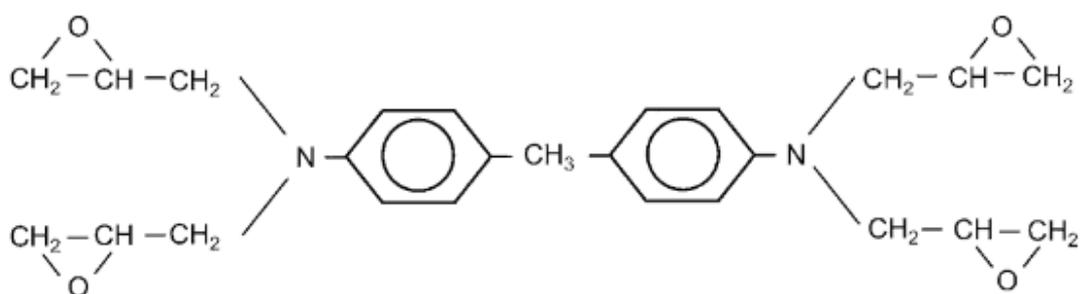


Σχήμα 4: Ανάπτυξη σταυροειδών δεσμών εποξειδικής ρητίνης με σκληροντή αμίνης [3]

Οι κύριοι τύποι εποξειδικών ρητίνων είναι ο διγλυκιδυλο-αιθέρας της διφαινόλης Α (DGEBA) και ο τετραγλυκιδυλικός αιθέρας της διανυλίνης (TGMDA). Η DGEBA είναι χαμηλό μοριακό βάρος και μπορεί να βρίσκεται σε στερεή ή υγρή κατάσταση. Περιέχει δύο εποξιομάδες και σχηματίζεται από την αντίδραση της διφαινόλης-Α με επιγλωρυδίνη παρουσία αλκαλίων. Η TGMDA περιέχει τέσσερις εποξιομάδες οπότε μπορεί να αναπτύξει εκτεταμένο πλέγμα, το οποίο προσφέρει μεγάλη μηχανική αντοχή, ακαμψία και αυξημένη ανοχή στη θερμοκρασία. [3][7][9]



Σχήμα 5: Διγλυκιδυλικός αιθέρας διφαινόλης Α (DGEBA) [3]



Σχήμα 6: Τετραγλυκιδυλικός αιθέρας (TGMDA) [3]

1.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών και Προσδιοριστικοί παράγοντες

Τα σύνθετα υλικά μπορούν συνήθως να διατηρούν κάποιες από τις ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν, αλλά παράλληλα να εμφανίζουν και τελείως καινούριες. Οι βελτιωμένες ιδιότητες που επιδεικνύουν τα σύνθετα υλικά δεν εμφανίζονται φυσικά ταυτόχρονα σε ένα υλικό, αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Οι ιδιότητες αυτές των υλικών συνοπτικά είναι οι εξής:

- **Άριστες μηχανικές ιδιότητες:** Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, ακαμψία, σκληρότητα αλλά και καλύτερη συμπεριφορά απέναντι στον ερπυσμό.
- **Αντίσταση σε διαβρωτικό περιβάλλον:** Αντιστέκονται σθεναρά στην ηλεκτροχημική διάβρωση σε αντίθεση με τα μέταλλα. Ωστόσο, η υπερϊώδης ακτινοβολία του ήλιου επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες των υλικών, γεγονός που θα εξηγηθεί στη συνέχεια αναλυτικότερα.
- **Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία:** Τα σύνθετα υλικά ακόμα και όταν αστοχήσουν μπορούν να αναλαμβάνουν μεγάλα φορτία της τάξης του 85% έως και 150% του ορίου διαρροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα φορτία διασκορπίζονται μέσα στην ενισχυτική φάση σε διάφορες κατευθύνσεις.
- **Μικρή ευαισθησία σε εγχοπές:** Ενδεχόμενες ατέλειες στην επιφάνεια των σύνθετων υλικών δεν είναι επικίνδυνες για τη βιωσιμότητά τους, καθώς δεν μπορούν να εκκινήσουν από αυτές καταστροφικές ρωγμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα σύνθετα υλικά να είναι πολύ ανθεκτικά στην κόπωση και παράλληλα να λειτουργούν σωστά για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Απόσβεση σε ταλαντώσεις:** Απορροφούν σε ικανοποιητικό βαθμό την ενέργεια που προκαλείται από μηχανικές ταλαντώσεις με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ηχομονωτικά υλικά.
- **Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας:** Έχουν μεγάλη αντοχή σε κρουστικές τάσεις και περιορίζουν την καταστροφή αποκλειστικά γύρω από το σημείο εκδήλωσης τους. Επομένως, δεν εμφανίζουν ρωγμές, οι οποίες να απειλούν την ορθή λειτουργία των υλικών.
- **Μικρότερο βάρος κατασκευών:** Έχουν μικρότερο βάρος από τα συμβατικά υλικά και εξοικονομούν συνήθως από 20% έως 80% του συνολικού βάρους των κατασκευών. Κατ' επέκταση μειώνεται σημαντικά ο απαιτούμενος αριθμός των τμημάτων για τις κατασκευές.

- **Χαμηλό κόστος:** Παρόλο που η παρασκευή σύνθετων υλικών απαιτεί μεγάλο κόστος πρώτων υλών και επεξεργασίας, το κόστος συναρμολόγησης των υλικών μειώνεται. Και αυτό γιατί η συναρμολόγηση των επιμέρους υλικών αποτελεί τη βασική ιδέα των σύνθετων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος συναρμολόγησης αποτελεί περίπου το 50% του συνολικού κόστους.

Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά αυτές τις ιδιότητες είναι οι εξής:

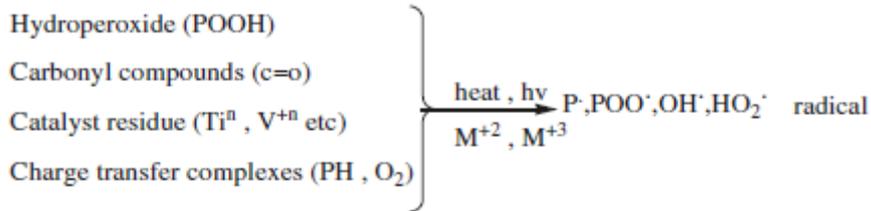
- **Υγρασία:** Γενικά, η υγρασία αποτελεί έναν ανεπιθύμητο παράγοντα για όλα τα υλικά. Η πρόσληψη υγρασίας εξαρτάται από το υλικό της μήτρας και τη σχετική υγρασία. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερη υγρασία θα απορροφάται από τη μήτρα. Συνεπώς, η υγρασία εγκλωβίζεται στη μήτρα, η οποία αυξάνει σε όγκο. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η υγρασία παίρνει στερεή μορφή (πάγος), ενώ σε υψηλές παίρνει αέρια μορφή (ατμός), γεγονός πολύ επικίνδυνο για τη δομή και τις ιδιότητες της μήτρας.
- **Διαχωρισμός στρωμάτων:** Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη μεταχείριση των ελασμάτων κατά την παραγωγή, συναρμολόγηση και χρήση τους, διότι ενδέχεται να προκύψουν ατέλειες στην επιφάνεια τους. Οι ατέλειες μπορεί να δείχνουν αμελητέες, αλλά, όταν δημιουργηθεί ένα πολυστρωματικό υλικό, αυτές δρουν συσσωρευτικά και ενδέχεται να οδηγήσουν σε αστοχία λόγω των συνεχών καταπονήσεων. Έτσι, μειώνεται η ακαμψία του υλικού και η αντοχή του στην κόπωση. [1][3]
- **Υπεριώδης ακτινοβολία:** Η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία υποβαθμίζει τις ιδιότητες των υλικών και ιδιαίτερος των πολυμερών που βρίσκονται σε ανοιχτό περιβάλλον. Χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες την ακτινοβολία UVA, UVB και UVC. Η UVA κυμαίνεται από 315 nm έως 400 nm, η UVB κυμαίνεται από 280 έως 315 nm και η UVC, η οποία εμφανίζει αντισηπτικές ιδιότητες, κυμαίνεται από 100 nm έως 280 nm.

Η ακτινοβολία UVB είναι η βασική υπαίτιος για την εκκίνηση διάφορων χημικών αντιδράσεων από τις οποίες οι κυριότερες είναι η φωτόλυση και η φωτοοξειδωση. Κατά τη φωτόλυση οι χημικές αντιδράσεις αποικοδόμησης λαμβάνουν χώρα κατευθείαν με την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. [10] Αντίθετα, κατά τη φωτοοξειδωση αρχικά διασπώνται οι πολυμερικές

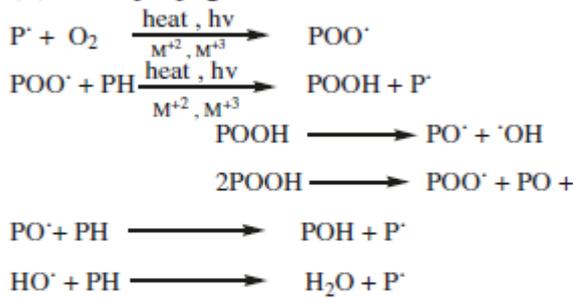
αλυσίδες ή δημιουργούνται ταυτόχρονα και νέοι σταυροειδείς δεσμοί στα μόρια της επιφάνειας του πολυμερούς, καθώς αυτά εκτίθενται περισσότερο στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ελεύθερες ρίζες που προκύπτουν να αντιδρούν με τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας και να δημιουργούν ένα λεπτό και εύθραυστο στρώμα κοντά στην επιφάνεια του υλικού με χαμηλότερο μοριακό βάρος. Όσο αυξάνεται η καταπόνηση του υλικού από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, το στρώμα γίνεται όλο και πιο παχύ και οι ρωγμές αδυνατούν να φθάσουν στο υπόστρωμα, που διατηρεί τις καλές ιδιότητες του. Τότε υπάρχει ο κίνδυνος το ανώτατο στρώμα να σπάσει και να αποκολληθεί, γεγονός που καθιστά το υλικό ανίκανο για περαιτέρω χρήση. [11]

Παράλληλα, η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά στην αλλαγή του χρώματος των πολυμερών είτε φυσικών είτε σύνθετων. Οι επιφάνειες τους δηλαδή κιτρινίζουν, γεγονός που οφείλεται για τα φυσικά πολυμερή, όπως το ξύλο, στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τις χρωμοφόρες ομάδες της λιγνίνης και για τα σύνθετα πολυμερή στη διάσπαση των πολυμερικών αλυσίδων.

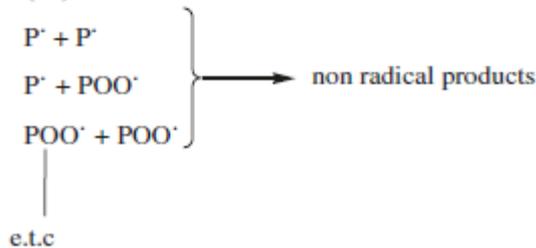
(i) Chain initiation:



(ii) Chain propagation:



(iii) Chain termination:



Where P[·] is polymer radical, M⁺ is metal ion, and PH is polymer molecule

Σχήμα 7: Αντιδράσεις φωτοοξειδωσης πολυμερών [13]

Το φαινόμενο της υποβάθμισης των πολυμερών ενισχύεται περισσότερο σήμερα λόγω της τρύπας του όζοντος, καθώς δε φιλτράρονται επαρκώς οι υπεριώδεις ακτίνες. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην αποικοδόμηση των πολυμερών διαδραματίζει το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής όπου βρίσκονται. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, γεγονός που επιτείνει την υποβάθμιση. [12]

Η αποικοδόμηση των πολυμερών αποδίδεται στην παρουσία εσωτερικών και εξωτερικών ακαθαρσιών. Οι εσωτερικές ακαθαρσίες εισέρχονται στα μακρομόρια κατά τον πολυμερισμό και είναι συνήθως υδροϋπεροξείδιο, καρβονύλιο, ακόρεστες ενώσεις και σύμπλοκα μεταφοράς φορτίου με οξυγόνο. Οι εξωτερικές ακαθαρσίες είναι χρωστικές ουσίες, θερμικοί σταθεροποιητές,

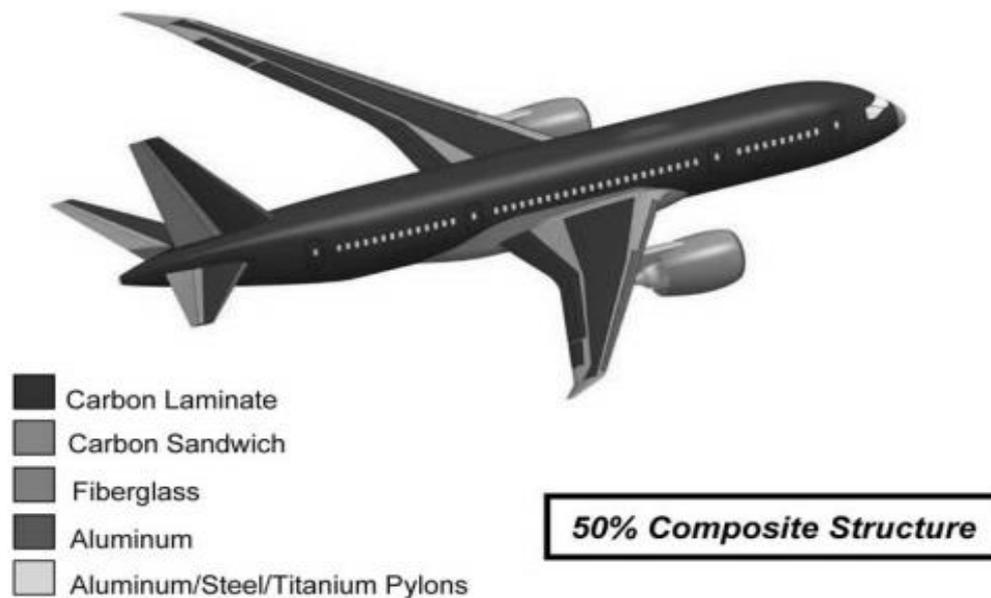
χημικές ενώσεις που υπάρχουν σε μολυσμένο περιβάλλον, ίχνη από διαλύτες και καταλύτες.

Επομένως, για την προστασία των πολυμερών από την υπεριώδη ακτινοβολία προστίθενται ειδικές χημικές ουσίες, όπως σταθεροποιητές φωτός, απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας, καταστολείς διεγερμένης κατάστασης, αποικοδομητές υπεροξειδίου και δεσμευτές ριζών. Ενδείκνυται η χρήση αντιοξειδωτικών μέσων ώστε οι χημικές αντιδράσεις να παράγουν προϊόντα που να μην αντιδρούν περαιτέρω. [14]

1.4 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας, καθώς αναπτύσσονται με αλματώδεις ρυθμούς. Οι κυριότεροι κλάδοι παρουσιάζονται παρακάτω.

Αεροναυπηγική – Αεροδιαστημική: Βασικό κριτήριο για την επιλογή υλικών στον τομέα της εμπορικής και στρατιωτικής αεροναυπηγικής είναι το μικρό βάρος. Για το λόγο αυτό καθώς και για την καλή ανοχή τους σε κόπωση, χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα τα πλαστικά υλικά με ίνες γυαλιού και τελευταία τα σύνθετα με συνεχείς ίνες άνθρακα, οι οποίες συνδυάζουν και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Τα υλικά αυτά προσφέρουν αύξηση του ωφέλιμου φορτίου ή σημαντική μείωση του συνολικού βάρους του αεροσκάφους που συνεπάγεται την αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η άτρακτος του Boeing 787, η οποία είναι κατασκευασμένη κατά το ήμισυ από σύνθετα υλικά. Εξίσου σημαντικές είναι οι απαιτήσεις για μικρό βάρος, χαμηλό κόστος και μεγάλη σταθερότητα κατασκευών και στις αεροδιαστημικές εφαρμογές.



Εικόνα 2: Αεροσκάφος Boeing 787 Dreamliner [3]

Αυτοκινητοβιομηχανία: Τα σύνθετα υλικά προτιμώνται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες για παρόμοιους λόγους με αυτούς της αεροναυπηγικής. Συγκεκριμένα, οι επιθυμητές ιδιότητες εδώ είναι το μικρό βάρος, η οικονομία καυσίμων και το μικρό κόστος συντήρησης. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι τα ενισχυμένα πλαστικά με ίνες γυαλιού (GRP). Οι ίνες γυαλιού προσφέρουν μεγάλη αντοχή και μείωση του βάρους. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αμαξωμάτων, προφυλακτήρων και καμπινών σε φορτηγά αυτοκίνητα. Στα οχήματα της Φόρμουλα 1 χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα για τα αμαξώματα, τα φτερά και τα καλύμματα των κινητήρων.

Ναυπηγική: Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στον τομέα της ναυπηγικής, όπου είναι απαραίτητη η προστασία από τη διάβρωση του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, έχουν αντικαταστήσει τα μέταλλα και το ξύλο στις κατασκευές και διαθέτουν επίσης χαμηλή πυκνότητα και ευκολία παραγωγής. Στα κελύφη των σκαφών χρησιμοποιούνται πολυεστέρες ή βινυλεστέρες με ίνες γυαλιού και στα ιστία χρησιμοποιούνται σύνθετα με ίνες άνθρακα.

Ανεμογεννήτριες: Για τα πτερύγια των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά και συνήθως με συνεχείς ίνες γυαλιού, καθώς έχουν μεγάλη αντίσταση στη

διάβρωση που προκαλούν οι εξωτερικές συνθήκες και, συνεπώς, καλύτερη απόδοση για τη μετατροπή της ενέργειας.

Ηλεκτρολογικά είδη: Για την παρασκευή ηλεκτρολογικών ειδών χρησιμοποιούνται πολυμερικές μήτρες με ίνες γυαλιού τύπου E-glass (E=electrical). Αυτός ο τύπος ινών γυαλιού είναι κατάλληλος για εφαρμογές που απαιτούν άριστη ηλεκτρική μόνωση, όπως ηλεκτρικοί διακόπτες, ηλεκτρικοί διανομείς, υποδοχείς λαμπτήρων και αγωγοί καλωδίων σε μονωμένους μετασχηματιστές.

Ηλεκτρονική: Αντικείμενο έρευνας της ηλεκτρονικής για τη δημιουργία νέων ημιαγωγών είναι μία νέα σφαιρική μορφή άνθρακα, το φουλερένιο. Σκοπός των ερευνητών είναι η αύξηση της αγωγιμότητας μέσω της προσθήκης βορίου και φωσφόρου αλλά και η αύξηση του ενεργειακού διακένου. Για τους υπεραγωγούς ενδείκνυται η παρασκευή ενός κεραμικού υλικού που αποτελείται από θάλλιο, βάριο, ασβέστιο, χαλκό και οξυγόνο.

Βιοϊατρική: Τα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον ανθρώπινο οργανισμό με ασφαλή τρόπο χωρίς να είναι τοξικά και να δημιουργούν άλλα προβλήματα. Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται για την κατασκευή τεχνητών οργάνων, συνδέσμων, τενόντων αλλά και ολόκληρων μελών του ανθρωπίνου σώματος. Ακόμα, σε περιπτώσεις σοβαρών εγκαυμάτων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τεχνητού δέρματος. Τελευταία η χρήση τους επεκτείνεται και στα οδοντιατρικά εμφυτεύματα.

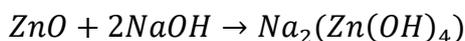
Αθλητικός εξοπλισμός: Σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την παρασκευή ελαφρύτερων και ανθεκτικότερων ρακετών τένις, ιστιοσανίδων και μπαστουινών γκολφ. Επίσης, χρησιμοποιούνται στα πλαίσια ποδηλάτων χάρη στην μεγάλη αντίσταση τους στην αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται κατά την πέδηση. Παράλληλα, υλικά τύπου σάντουιτς χρησιμοποιούνται στα πέδιλα σκι και τις χιονοσανίδες για την ενίσχυση της ακαμψίας τους. [1][3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

2.1 Γενικές ιδιότητες

Το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO αποτελεί ένα σύνθετο ημιαγωγό και ανήκει στις II-VI ομάδες του περιοδικού πίνακα. Στη φύση συναντάται στη μορφή του ψευδαργυρίτη, ο οποίος έχει κίτρινο-κόκκινο χρώμα και αποτελείται από μαγγάνιο και άλλα χημικά στοιχεία. Όμως, το οξείδιο του ψευδαργύρου που χρησιμοποιείται σήμερα σε όλες τις εφαρμογές είναι τεχνητά κατασκευασμένο. [15] Στην κρυσταλλική του μορφή είναι λευκή σκόνη και έχει την τάση να διατηρεί το λευκό του χρώμα όταν εκτεθεί σε υδρόθειο ή σε υπεριώδη ακτινοβολία. Όμως, είναι θερμοχρωμικό και αλλάζει το χρώμα του σε κίτρινο μόνο για όσο χρονικό διάστημα του επιβάλλεται θερμότητα. Έχει αμφότερη δράση σε όξινο και βασικό περιβάλλον. Είναι σχεδόν αδιάλυτο στο νερό αλλά διαλυτό στα περισσότερα οξέα, όπως το υδροχλωρικό οξύ.



Το οξείδιο του ψευδαργύρου είναι μία πολύ σταθερή χημική ουσία και αποσυντίθεται σε ατμούς ψευδαργύρου και οξυγόνου σε θερμοκρασία 1975°C. Η σταθερή του δομή είναι ο βουρτσιτίτης, ο οποίος θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα. Εξαιτίας της έλλειψης κεντρικής συμμετρίας στη δομή του εμφανίζει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τον πυροηλεκτρισμό.

Το οξείδιο του ψευδαργύρου αποτελεί ένα σχετικά μαλακό υλικό με σκληρότητα 4,5 στην κλίμακα Mohs. Έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και υψηλό σημείο τήξης.

Παράλληλα, διαθέτει υψηλό ενεργειακό διάκενο και ίσο με 3,37 eV σε θερμοκρασία δωματίου, το οποίο μπορεί να αυξομειωθεί μεταξύ 3 eV και 4 eV ανάλογα με τη χρήση άλλων οξειδίων. Είναι ένας καθαρά ημιαγωγός τύπου n λόγω των βαθέων ενεργειακών σταθμών. Η νόθευση του παραμένει δύσκολη διαδικασία, καθώς διάφορα χημικά

στοιχεία όπως το λίθιο, το νάτριο, το κάλιο, το άζωτο και ο φώσφορος δεν έχουν φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. [16]



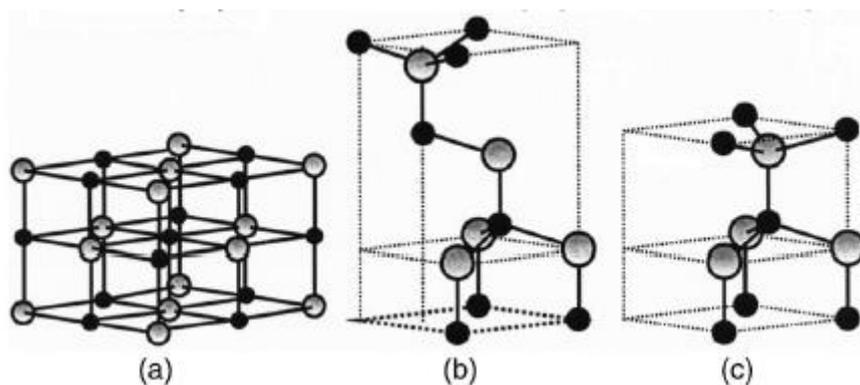
Εικόνα 3: Οξείδιο του ψευδαργύρου σε μορφή σκόνης [16]

Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες ZnO [17]

Παράμετροι πλέγματος στους 300 K	
a_0 (nm)	0.32495
b_0 (nm)	0.52069
c_0/a_0	1.602 (1.633 σε ιδανική εξαγωνική δομή)
Ποκνότητα (g/cm³)	5.606
Σταθερή φάση στους 300 K	Βουρτσιτής
Σημείο τήξης (°C)	1975
Θερμική αγωγιμότητα (Wcm⁻¹ ° C⁻¹)	0.6, 1-1.2
Συντελεστής γραμμικής διαστολής (°C)	a_0 : $6.5 \text{ cm}^3 \times 10^{-6}$ c_0 : $3.0 \text{ cm}^3 \times 10^{-6}$
Στατική διηλεκτρική σταθερά	8.656
Δείκτης διάθλασης	2.008
Ενεργειακό διάκενο (RT)	3.370 eV
Ενεργειακό διάκενο (4 K)	3.437 eV
Ενέργεια σύνδεσης εξιτονίων (meV)	60
Ενεργός μάζα ηλεκτρονίου	0.24
Κινητικότητα ηλεκτρονίου Hall στους 300 K (cm²/Vs)	200
Ενεργός μάζα οπής	0.59
Κινητικότητα οπής Hall στους 300 K (cm²/Vs)	5 έως 50

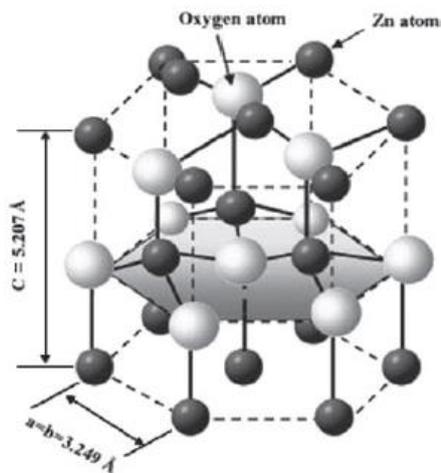
2.2 Κρυσταλλική δομή

Το οξείδιο του ψευδαργύρου εμφανίζει συνήθως τρεις διαφορετικές κρυσταλλικές δομές, το βουρτσίτη (wurtzite B4), το σφαλερίτη (zinc blende B3) και τον αλίτη (rocksalt B1). Ο βουρτσίτης αποτελεί την πιο σταθερή ενεργειακά δομή σε συνθήκες περιβάλλοντος, η οποία καθορίζεται από τη σταθερά πλέγματος a , το λόγο c/a και την παράμετρο u . Αντίθετα, σε υψηλές πιέσεις της τάξης των 10 GPa εμφανίζεται η δομή του αλίτη, καθώς οι διαστάσεις του πλέγματος μειώνονται. Ο σφαλερίτης είναι μετασταθής και έχει την τάση να μετατραπεί σε βουρτσίτη. Μπορεί να σταθεροποιηθεί μόνο με την ανάπτυξη του σε κυβικά υποστρώματα όπως τα ZnS, GaAs/ZnS και Pt/Ti/SiO₂/Si. Οι τελευταίες δύο δομές καθορίζονται αποκλειστικά από τη σταθερά πλέγματος a . [18][19]



Σχήμα 8: Κρυσταλλικές δομές ZnO (a) Αλίτης (b) Σφαλερίτης (c) Βουρτσίτης (Οι μαύρες σφαίρες αναπαριστούν το Zn και οι άσπρες αναπαριστούν το O) [19]

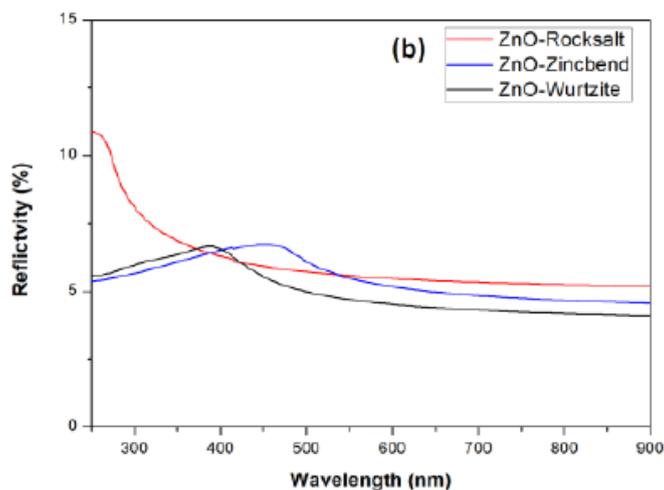
Ο βουρτσίτης έχει εξαγωνική στοιχειώδη κυψελίδα και ανήκει στις ομάδες C_{6V}^4 ή $P6_3mc$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει δύο σταθερές a και c , οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 9. Η παράμετρος c είναι παράλληλη στον άξονα z . Κατιόντα ψευδαργύρου Zn^{2+} και ανιόντα οξυγόνου O^{2-} τοποθετούνται εναλλάξ κατά μήκος του άξονα z , χωρίς να παρουσιάζουν κεντρική συμμετρία, και περιβάλλονται από τετράεδρα ιόντων του αντίθετου χημικού στοιχείου. Εξαιτίας αυτού του τετραεδρικού σχηματισμού ο δεσμός μεταξύ των ιόντων είναι ομοιοπολικός με υβριδισμό sp^3 . [17]



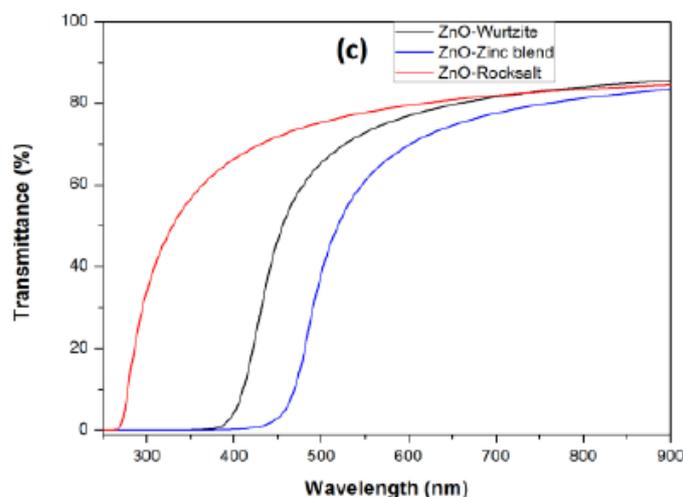
Σχήμα 9: Δομή ιδανικού βουρτσίτη [17]

Αντίθετα, τα άτομα του αλίτη ενώνονται μεταξύ τους με ιοντικό δεσμό. Επίσης, ο αλίτης έχει έμμεσο ενεργειακό διάκενο, ενώ ο βουρτσίτης και ο σφαλερίτης έχουν άμεσο ενεργειακό διάκενο.

Οι οπτικές ιδιότητες των δομών του οξειδίου του ψευδαργύρου απέναντι στην ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζονται στα εξής διαγράμματα (Σχήματα 10 και 11). Η ανακλαστικότητα του σφαλερίτη και του βουρτσίτη αυξάνεται από το 5% έως 7% στο υπεριώδες, ενώ στη συνέχεια μειώνεται και πάλι στο 5% από το ορατό στο υπέρυθρο. Η διαπερατότητα και για τις τρεις δομές ανέρχεται στο 85% της ηλιακής ακτινοβολίας. Διαφοροποιείται, όμως, το μήκος κύματος από το οποίο η κάθε δομή αρχίζει να την απορροφά. Για το βουρτσίτη το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι περίπου στα 370 nm. [18]



Σχήμα 10: Ανακλαστικότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [18]

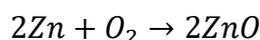
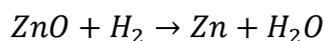


Σχήμα 11: Διαπερατότητα των τριών κρυσταλλικών δομών του ZnO [18]

2.3 Μέθοδοι παραγωγής

Το οξείδιο του ψευδαργύρου που χρησιμοποιείται σήμερα σε όλες τις εφαρμογές είναι τεχνητό υλικό, το οποίο παρασκευάζεται εργαστηριακά με διάφορες μεθόδους.

Η πρώτη μέθοδος πραγματοποιείται με μεταφορά αδρανούς αερίου, όπως το άζωτο. Αφορά πεπιεσμένες και πορώδεις σκόνες οξειδίου του ψευδαργύρου, οι οποίες σε υψηλές θερμοκρασίες, με την παρουσία υδρογόνου ή γραφίτη, μετατρέπονται σε υδρατμούς ψευδαργύρου και μεταφέρονται μέσω της ροής του αζώτου προκειμένου να οξειδωθούν σε χαμηλή θερμοκρασία. Οι αντιδράσεις που περιγράφουν αυτήν τη μέθοδο είναι οι εξής:



Η δεύτερη αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας αν ο ψευδάργυρος βρίσκεται σε μορφή ατμού. [15] Όμως, δεν επιτυγχάνεται εύκολα ο έλεγχος των συγκεκριμένων αντιδράσεων.

Η δεύτερη και πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η υδροθερμική. Μονοκρυσταλλικοί σπόροι ZnO τοποθετούνται σε κεραμικό χωνευτήριο μαζί με μικρά πορώδη τμήματα ZnO, τα οποία διαλύονται σε KOH και LiOH. Το χωνευτήριο τοποθετείται και αυτό

με τη σειρά του σε αεροστεγές δοχείο, το οποίο είναι κατάλληλο για χρήση σε φούρνο, όπου ασκούνται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Μέσα στο φούρνο επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες στην πλευρά των πορώδων τμημάτων και χαμηλότερες στην πλευρά των σπόρων. Οι κρύσταλλοι του ZnO δημιουργούνται από τη μεταφορά του πορώδους ZnO προς τους σπόρους, οι οποίοι αρχίζουν να αυξάνονται. Το σχήμα τους καθορίζεται από τη σύσταση των διαλυμάτων και το αρχικό σχήμα των κρυσταλλικών σπόρων. Κατά την παραγωγή του ZnO είναι συνηθισμένο να εισάγονται ορισμένες ακαθαρσίες, όπως αλκαλικά μέταλλα και υπολείμματα ουσιών από τα διαλύματα. [19]

2.4 Νανοδομές ZnO

Το οξείδιο του ψευδαργύρου διαθέτει πολύ καλές ιδιότητες, όπως το μεγάλο ενεργειακό διάκενο (3,37 eV), την υψηλή ενέργεια σύνδεσης εξιτονίων (60 meV) και την εμφάνιση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για οπτικές, ηλεκτρονικές και χημικές εφαρμογές. Παράλληλα, είναι επιτακτική η ανάγκη για όλο και μικρότερα μεγέθη συσκευών. Επομένως, η ανάπτυξη νανοδομών του ZnO βρίσκεται στο επίκεντρο του ερευνητικού τομέα τα τελευταία χρόνια.

Κάποιες ιδιότητες των υλικών είναι πιθανόν να μεταβληθούν όταν παράγονται στην νανοκλίμακα, καθώς αρχίζουν να κυριαρχούν τα κβαντικά φαινόμενα. Λόγω του κβαντικού περιορισμού το ενεργειακό διάκενο του οξειδίου του ψευδαργύρου και η ενέργεια σύνδεσης εξιτονίων μπορούν να αυξηθούν, οι επιφανειακές στάθμες του να βελτιωθούν και το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας να μετατοπιστεί προς το κυανό. Επιπρόσθετα, οι νανοδομές παρουσιάζουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο, γεγονός που τις καθιστά χημικά περισσότερο ενεργές. [20]

Χάρη στην εύκολη παραγωγή και επεξεργασία του, το οξείδιο του ψευδαργύρου μπορεί να πάρει ποικίλες μορφές, από τις οποίες οι κυριότερες είναι τα νανοσωματίδια (nanoparticles) και τα νανολουλούδια (nanoflowers).

2.4.1 Νανοσωματίδια (Nanoparticles)

Τα νανοσωματίδια έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από 1 nm έως 100 nm και διατηρούν τις πολύ καλές ιδιότητες του οξειδίου του ψευδαργύρου. Έχουν παρόμοιο μέγεθος με

τα βιομόρια και μπορούν να συνδυαστούν με πληθώρα μετάλλων και ημιαγωγών. Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν τους εξής κλάδους:

- **Βιοϊατρική**

Τα νανοσωματίδια του ZnO έχουν μη τοξική σύνθεση και είναι βιοσυμβατά. Η επιφάνεια τους καλύπτεται με συνδέτες που να διαλύονται στο νερό, με μόρια σιλανίου ή τοποθετούνται μέσα σε μικύλλια, προκειμένου να μπορούν να διαλυθούν στο νερό. Αυτό αποτελεί προαπαιτούμενο για τη χρήση τους σε ιατρικές εφαρμογές. Το pH τους βρίσκεται μεταξύ 7 και 8, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για κατάποση.

Αναπτύσσουν αντιβακτηριακή και αντιμυκητιακή δράση απέναντι σε παθογόνους μικροοργανισμούς, όπως ο «Escherichia coli», ο «Staphylococcus aureus», ο «Bacillus subtilis» και ο «Klebsiella aerogenes», και σταματούν την εξάπλωση τους. Όσο μάλλον μειώνεται το μέγεθος τους, τόσο περισσότερο οξυγόνο είναι διαθέσιμο με αποτέλεσμα να δρουν πιο αποτελεσματικά.

Επίσης, τα νανοσωματίδια του ZnO έχουν αντιοξειδωτική δράση. Σύμφωνα με τη μέθοδο 2,2 διφαινυλο-1-πικρυλυδραζύλιο (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) τα νανοσωματίδια του ZnO μπορούν να απορροφήσουν σε μεγάλο βαθμό τις ελεύθερες ρίζες. [21][22]

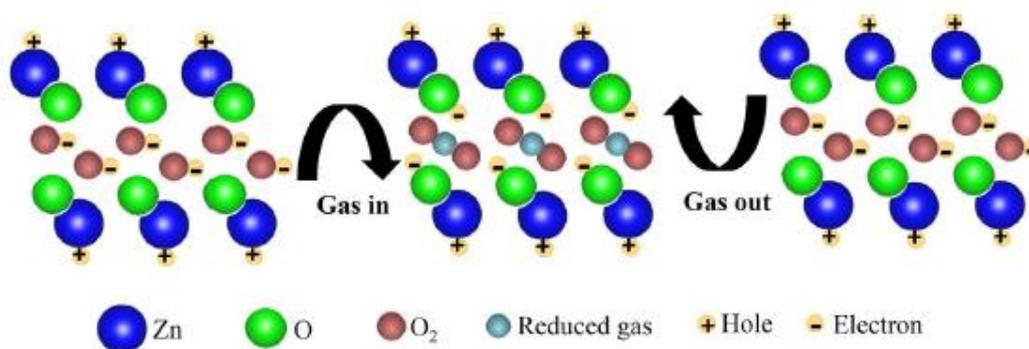
Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των νανοσωματιδίων ZnO στην αντιμετώπιση του καρκίνου. Τα νανοσωματίδια καταστρέφουν τα μολυσμένα κύτταρα και ενεργοποιούν τα T λεμφοκύτταρα. Παράλληλα, προκαλούν τη σταδιακή συρρίκνωση και αποδόμηση των κυττάρων T Jurkat.

- **Οπτοηλεκτρονική**

Τα νανοσωματίδια του ZnO έρχονται να αντικαταστήσουν τα νανοσωματίδια του TiO₂, καθώς έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν περισσότερο την ηλιακή ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όταν το ηλιακό φως πέσει πάνω στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών και σκεδαστεί, περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία θα απορροφηθεί. Συνεπώς, τα νανοσωματίδια συντελούν στην αύξηση της μέγιστης τάσης και του μέγιστου ρεύματος και κατά επέκταση μετατοπίζουν το σημείο μέγιστης ισχύος προς τα δεξιά. Δηλαδή, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών. [17]

Ακόμα, πεδίο εφαρμογής των νανοσωματιδίων του ZnO είναι οι φωτοανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από διόδους Schottky και καταγράφουν σε σκοτεινό περιβάλλον την παρουσία ασθενών ρευμάτων, των οποίων η αντίσταση ξεπερνά το 1 TΩ. Εξαιτίας της υπεριώδους ακτινοβολίας αναπτύσσεται ένα μεγαλύτερο ρεύμα, το φωτόρρευμα, το οποίο εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ και οφείλεται στην επανασύνδεση των εγκλωβισμένων ηλεκτρονίων και οπών που δημιουργούνται από τις υψηλές ενέργειες στο οξυγόνο. [23]

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική είναι η ανίχνευση επικίνδυνων αερίων τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον. Οι αισθητήρες από νανοσωματίδια ZnO έχουν πολύ καλή λειτουργία έναντι αερίων, χημικών και υγρασίας λόγω της υψηλής ενέργειας εξιτονίων τους. Ανταποκρίνονται θετικά με πλήθος αερίων, όπως το CO, H₂, O₃ και με άλλες πτητικές χημικές ενώσεις, όπως η αιθανόλη, το ξυλόλιο και η μεθανάλη.



Σχήμα 12: Απεικόνιση λειτουργίας αισθητήρα ZnO [24]

- **Προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία**

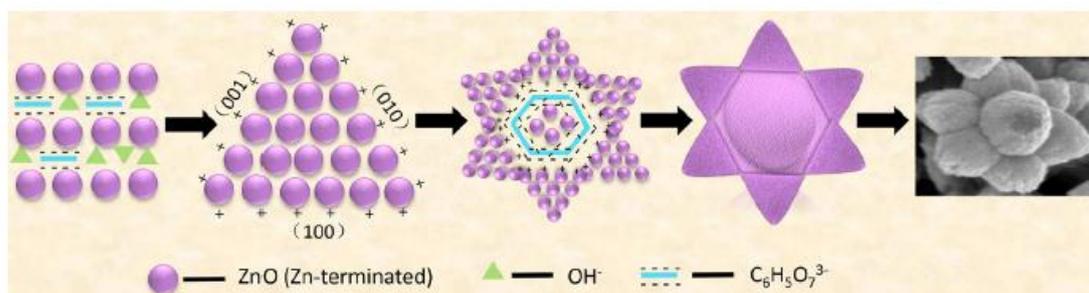
Τα νανοσωματίδια του ZnO επιδεικνύουν άριστες ιδιότητες στην προστασία από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Η UV-A ακτινοβολία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ακτινοβολίας και διεισδύει βαθύτερα από την UV-B στην επιδερμίδα, καθώς έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος. Όμως, και οι δύο θεωρούνται επικίνδυνες για τον ανθρώπινο οργανισμό, διότι η υπερβολική έκθεση στον ήλιο μπορεί να προκαλέσει σοβαρές δερματικές παθήσεις ακόμα και καρκίνο. Για τον λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται σε καλλυντικά προϊόντα, προκειμένου να απορροφήσουν ή και να αντανakλάσουν αυτές τις ακτινοβολίες, συμβάλλοντας στην προστασία της υγείας του ανθρώπου. [17]

Παράλληλα, η υπεριώδης ακτινοβολία είναι καταστροφική για τα φυσικά και τεχνητά πολυμερή που εκτίθενται σε εξωτερικό περιβάλλον. Η φωτοαποικοδόμηση που προκαλείται και οι μηχανισμοί της έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι η υπεριώδης ακτινοβολία αλλάζει το χρώμα των πολυμερών, σπάει τους χημικούς δεσμούς στο υπόστρωμα και καταστρέφει τη λιγνίνη και άλλες ουσίες, γεγονός που δημιουργεί ραγίσματα και ατέλειες στις επιφάνειες. Επομένως, διάφοροι τύποι ξύλων όπως το συνθετικό καουτσούκ, για να προστατευτούν πρέπει να επικαλυφθούν με άχρωμες βαφές και βερνίκια, που να εξασφαλίζουν τη φωτοσταθερότητα και να περιορίζουν την υπεριώδη ακτινοβολία. Νανοσωματίδια του ZnO προστίθενται σε αυτά, εξαιτίας των καλών οπτικών ιδιοτήτων τους και του διαφανούς χρώματος τους. [25]

2.4.2 Νανολουλούδια (Nanoflowers)

Όταν τα νανολουλούδια τοποθετηθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εμφανίζουν ένα σχήμα που μοιάζει με λεπτά άνθη λουλουδιών, όπως αναφέρει εξάλλου και το όνομα τους. Αποτελούν μία από τις πιο πρόσφατες ανακαλύψεις νανοδομών, που όμως συγκεντρώνουν όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Η μέθοδος ανάπτυξης που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι η υδροθερμική, καθώς αποτελεί μία εύκολη διαδικασία, φιλική στο περιβάλλον και οικονομική. Οι βασικές αρχές της μεθόδου έχουν παρουσιαστεί στην Ενότητα 2.3. Υπάρχουν ποικίλα αντιδρώντα από τα οποία μπορούν με διαδοχικές αντιδράσεις να παραχθούν τα νανολουλούδια. Όμως, η θερμοκρασία που εφαρμόζεται είναι πάντα καθοριστική για τη μορφολογία και τις οπτικές ιδιότητες τους. Αν η θερμοκρασία είναι δηλαδή χαμηλότερη από ότι πρέπει για να εκκινήσει τη δημιουργία των νανολουλουδιών, τα παραγόμενα νανολουλούδια δεν έχουν την απαιτούμενη μορφή. Όπως έχει αναφερθεί, όταν το μέγεθος των νανοδομών μικραίνει μεταβάλλονται κάποιες ιδιότητες. Το ενεργειακό διάκενο των νανολουλουδιών του ZnO μειώνεται στα 3,18 eV, διότι υπάρχουν κενές θέσεις οξυγόνου, οι οποίες είναι πιο πιθανό να καλυφθούν από τα ηλεκτρόνια. [26]



Σχήμα 13: Διαδικασία σχηματισμού ενός νανολουλουδιού ZnO [24]

Οι εφαρμογές των νανολουλουδιών είναι στους ίδιους κλάδους με τα νανοσωματίδια, αλλά εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά και αυξημένη απόδοση. Τα νανολουλούδια αποτελούν τρισδιάστατες δομές, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας προς όγκο και μικρά κενά με διάμετρο το πολύ λίγων μικρομέτρων. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

- **Αισθητήρες**

Τα νανολουλούδια του ZnO επιδεικνύουν μεγάλη ευαισθησία στην ανίχνευση επικίνδυνων αερίων, καθώς, όπως μόλις αναφέρθηκε, διαθέτουν υψηλή αναλογία επιφάνειας όγκου γεγονός που τα καθιστά να αντιδρούν πιο εύκολα. [27] Παράλληλα, προτιμώνται έναντι των νανοσωματιδίων, καθώς ο εντοπισμός των αερίων γίνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και σε λιγότερο χρόνο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επιβλαβών αερίων αποτελούν η αμμωνία (NH_3) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Το διοξείδιο του αζώτου προέρχεται από την οξείδωση που προκαλεί η ηλιακή ακτινοβολία στο μονοξείδιο του αζώτου, το οποίο είναι πρωταρχικό προϊόν καύσης. Και τα δύο αέρια ρυπαίνουν εκτεταμένα το περιβάλλον και επηρεάζουν αρνητικά την υγεία των ανθρώπων. Η παραγωγή τους έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα των αυξημένων αναγκών των βιομηχανιών τροφίμων, λιπασμάτων και μεταφορών. [24][28]

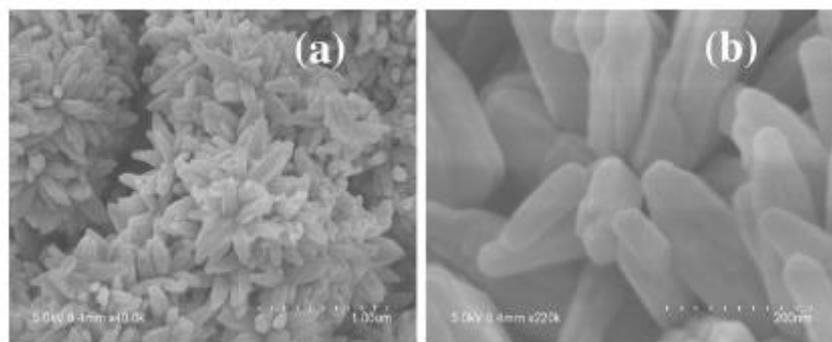
- **Φωτοβολταϊκά στοιχεία**

Νανολουλούδια ZnO τοποθετούνται στις δομές τύπου «μέταλλο-ημιαγωγός-μέταλλο», οι οποίες λειτουργούν ως φωτοβολταϊκά στοιχεία. Όταν φωτόνια με ενέργεια μικρότερη του ενεργειακού διακένου προσπίπτουν στην επιφάνεια και δε συμβάλλουν στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τότε αναπτύσσουν θερμότητα πάνω στα φωτοβολταϊκά

πλαίσια, η οποία είναι ανεπιθύμητη. Το ZnO κρίνεται κατάλληλο, γιατί έχει βαθιές ενεργειακές στάθμες, οι οποίες προέρχονται από κρυσταλλικές ατέλειες του πλέγματος, απορροφημένες ακαθαρσίες και ιόντα της επιφάνειας (O^- , O_2^- και O_2^{2-}). Έχει την ικανότητα να απορροφά τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας και να συμβάλλει συνεπώς στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών και την ταυτόχρονη προστασία τους.

Επίσης, η συγκεκριμένη δομή παράγει ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και όταν δε φωτίζεται, εξαιτίας των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα με μόρια ή ιόντα αέρα, νερού και άλλων ατμοσφαιρικών αερίων, που δεσμεύονται στα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των νανολουλουδιών.

Παράλληλα, χάρη σε αυτά τα κενά ενδείκνυται η χρήση των νανολουλουδιών για τη συλλογή μεγαλύτερου μέρους ηλιακής ακτινοβολίας, αφού εκεί μπορεί να αυξηθεί η αντανάκλαση. [29]



Εικόνα 4: Νανολουλούδια ZnO (η εικόνα b είναι μεγέθυνση της a) [30]

2.5 Νανοσύνθετα εποξειδικής ρητίνης με ZnO

Τα νανοσύνθετα εποξειδικής ρητίνης και οξειδίου του ψευδαργύρου συνδυάζουν τις θετικές ιδιότητες των δύο υλικών. Η εποξειδική ρητίνη προσφέρει υψηλή διηλεκτρική σταθερά, μεγάλη αντοχή και εύκολη επεξεργασία. Το οξείδιο του ψευδαργύρου διαθέτει σταθερή κρυσταλλική δομή και πολύ καλές οπτικές ιδιότητες.

Η εποξειδική ρητίνη είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο απορροφά σχεδόν όλη την υπεριώδη ακτινοβολία και ως γνωστό υφίσταται τις αρνητικές συνέπειες της. Το οξείδιο του ψευδαργύρου μπορεί να θωρακίσει τη ρητίνη έναντι της υπεριώδους ακτινοβολίας, γιατί αποτελεί ένα ανόργανο υλικό με χαμηλό δείκτη

διάθλασης. Ειδικά στην περιοχή των 300 nm με 400 nm η ρητίνη δεν προστατεύεται καλά. Το οξείδιο είναι ικανό, λοιπόν, να μειώσει τη διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο στο υπεριώδες όσο και στο ορατό φως. Με την αύξηση σε περιεκτικότητα του οξειδίου του ψευδαργύρου επιτυγχάνεται η μείωση της διαπερατότητας. [31] Αυτή η μείωση εξηγείται από το γεγονός πως τα δύο υλικά έχουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης και η συσσώρευση των νανοδομών προκαλεί μεγάλη σκέδαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο δείκτης διάθλασης για το οξείδιο του ψευδαργύρου είναι μεταξύ 1,9 και 2, ενώ για την εποξειδική ρητίνη είναι μεταξύ 1,54 και 1,55. Τέλος, η σκέδαση του φωτός επιτείνεται από την τραχιά επιφάνεια των νανοςύνθετων που δημιουργείται, όσο αυξάνει το ποσοστό των νανοδομών.

Η παραπάνω μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας περιγράφεται και από την εξίσωση

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[\frac{-3V_p \chi r^3}{4\lambda^4} \left(\frac{n_p}{n_m} - 1 \right) \right]$$

Όπου,

r : η ακτίνα των σφαιρικών σωματιδίων

n_p : ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων

n_m : ο δείκτης διάθλασης της μήτρας

I : η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός

I_0 : η ένταση του εισερχόμενου φωτός για μη απορροφητικά υλικά

V_p : το κλάσμα όγκου του σωματιδίου

λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

χ : το μήκος της οπτικής διαδρομής

Αμέσως υποδηλώνεται ότι οι διαφορετικοί δείκτες διάθλασης συμβάλλουν στη μείωση του ρεύματος και ειδικά με την αύξηση της ακτίνας r .

Επιπρόσθετα, με την προσθήκη του οξειδίου του ψευδαργύρου αυξάνεται η συγκέντρωση των ηλεκτρικών φορέων και εντείνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων και αυτού. Το ενεργειακό διάκενο των νανοςύνθετων

μειώνεται και μετατοπίζεται προς το ερυθρό, όπως υποδηλώνει και η παρακάτω εξίσωση

$$\Delta E_g = \frac{h^2}{8m^*} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{2/3}$$

Όπου,

ΔE_g : η μετατόπιση του ενεργειακού διακένου των σύνθετων υλικών σε σχέση με την καθαρή ρητίνη

m^* : η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου

h : η σταθερά του Plank

n_e : η συγκέντρωση των ηλεκτρικών φορέων [32]

Ακόμα, τα νανοσύνθετα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή κατάρρευσης σε σχέση με τη σκέτη ρητίνη και, επομένως, χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται ενδεχομένως στη δέσμευση κάποιων ηλεκτρονίων στη διεπιφάνεια και στην ανικανότητα τους να αποδράσουν από εκεί.

Η ειδική αντίσταση της εποξειδικής ρητίνης δεν επηρεάζεται από την προσθήκη νανοδομών οξειδίου του ψευδαργύρου εξαιτίας της λειτουργίας της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια φροντίζει να κρατά ενωμένη τη μήτρα με την ενίσχυση και δεν επιτρέπει τη διέλευση κρίσιμων ρευμάτων που θέτουν σε κίνδυνο τη συνοχή του υλικού. Παράλληλα, οι διάφορες νανοδομές εισάγουν ακαθαρσίες στα σύνθετα υλικά, οι οποίες συντελούν στον περιορισμό ανάπτυξης ρευμάτων. [33]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει την παρασκευή και μέτρηση δοκιμίων από σκέτη εποξειδική ρητίνη ή και από οξείδιο του ψευδαργύρου σε περιεκτικότητες 0,5% και 2%. Συνολικά παρασκευάστηκαν δώδεκα δοκίμια, από τα οποία τα πρώτα τέσσερα αποτελούνταν από σκέτη ρητίνη, τα επόμενα τέσσερα από ρητίνη και οξείδιο του ψευδαργύρου περιεκτικότητας 0,5% και τα τελευταία τέσσερα από ρητίνη και οξείδιο του ψευδαργύρου περιεκτικότητας 2%.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν διηλεκτρικές μετρήσεις στις υψηλές (τηλεπικοινωνιακές) συχνότητες καθώς και μετρήσεις διαπερατότητας και ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δοκίμια υποβλήθησαν σε τρεις διαδοχικούς κύκλους περιβαλλοντικής γήρανσης, που ο καθένας διαρκούσε 72 ώρες. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονταν κάθε φορά μεταξύ του κάθε κύκλου γήρανσης.

3.2 Παρασκευή δοκιμίων

3.2.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμίων είναι:

Εποξειδική ρητίνη Eroxol

Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα για την κατασκευή των δοκιμίων είναι η Eroxol 2874 της εταιρείας Neotex. Η ρητίνη αποτελείται από δύο ρευστά συστατικά, τα Α και Β. Το συστατικό Α αποτελεί την καθαρή ρητίνη και το συστατικό Β είναι ο σκληρυντής της. Η ρητίνη λαμβάνει την τελική μορφή της μετά από την ανάμειξη των δύο συστατικών της σε αναλογία 100 Α : 58 Β.

Γενικά, η συγκεκριμένη ρητίνη εμφανίζει υψηλή απόδοση, γιατί το ιξώδες της είναι χαμηλό και μπορεί να σχηματιστεί ευκολότερα. Διαθέτει υψηλή αντοχή έναντι της τριβής, της κάμψης και της θλίψης. Παράλληλα, αντιστέκεται ικανοποιητικά στο

κιτρίνισμα, που επιφέρει η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της. Είναι κατάλληλη για χρήση πάνω σε μέταλλα και πλαστικά, καθώς και για τον εγκιβωτισμό και τη χύτευση ηλεκτρολογικού υλικού, καθώς δεν απορροφά καθόλου λάδια ή νερό. Η χύτευση εφαρμόζεται στους μετασχηματιστές και τα καλώδια, προκειμένου να γίνουν αδιάβροχα. Τέλος, η ρητίνη συντελεί στην ενίσχυση των μαρμάρων και στην παραγωγή ρητινοκονιαμάτων με μεγάλη αντοχή. [34]



Εικόνα 5: Η χρησιμοποιούμενη εποξειδική ρητίνη Epoxol 2874 [35]

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ρητίνης Epoxol που χρησιμοποιήθηκε και στον Πίνακα 7 οι αντοχές που παρουσιάζει μετά την ανάμειξη.

Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά Epoxol 2874 [34]

Μορφή μείγματος	Διαφανές
Πυκνότητα	1,09g/cm ³
Αναλογία ανάμειξης(κατά βάρος)	100A:58B
Χρόνος σκλήρυνσης (+25°C)	3 ώρες περίπου
Χρόνος εργασιμότητας (Pot life) (+25°C)	1,5 ώρα
Απόκτηση πλήρους σκληρότητας	7 ημέρες

Πίνακας 7: Αντοχές της Evoxol 2874 μετά την ανάμειξη [34]

Σε συνεχή θερμοκρασία (HDT)	+46°C
Αντοχή σε εφελκυσμό (DIN 53452)	38 N/mm ²
Αντοχή σε κάμψη (DIN 53452)	80 N/mm ²
Αντοχή σε θλίψη (DIN 53452)	82 N/mm ²
Σκληρότητα-Shore D 15" (ASTM 2240)	83
Αντοχή σε τριβή (ASTM D 4060, TABER TEST, CS 10/1000/1000)	72 mg
Αντοχή σε κρούση (EN ISO 6272)	IR4
Αντοχή σε πρόσφυση (EN 13892-8)	≥ 2,5 N/mm ² (θραύση σκυροδέματος)

Οξείδιο του ψευδαργύρου

Για την ενίσχυση του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε οξείδιο του ψευδαργύρου σε μορφή νανολουλουδιών, το οποίο παράχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο σε εργαστήριο της Σχολής Χημικών Μηχανικών.

3.2.2 Χρησιμοποιούμενα όργανα

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρασκευή των δοκιμών είναι:

Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110

Ο ζυγός ακριβείας χρησιμεύει για το σωστό υπολογισμό των γραμμαρίων των συστατικών, ώστε τα δοκίμια να κατασκευαστούν σωστά και να τηρηθούν οι απαιτούμενες αναλογίες. Έχει ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και η ικανότητα μέτρησης του φτάνει τα 110 g.



Εικόνα 6: Ζυγός ακριβείας Ohaus Galaxy 110

Λουτρό υπερήχων Bek Nilas U25H

Το λουτρό υπερήχων Bek Nilas U25H 28kHz, 80W/160W χρησιμοποιείται κατά την ανάμειξη της ρητίνης με το οξείδιο του ψευδαργύρου προκειμένου το τελευταίο να διασκορπιστεί ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο της ρητίνης. Στο πάνω μέρος του έχει μία μεταλλική λεκάνη μέσα στην οποία τοποθετείται νερό κατά τα 2/3 και το γυάλινο δοχείο με το υλικό. Στη βάση του λουτρού υπάρχει χρονοδιακόπτης που ρυθμίζει το χρόνο λειτουργίας. Η ολική κατανάλωση ενέργειας του είναι 80W/160W. Η ανάδευση επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ηχητικών κυμάτων συχνότητας 28 kHz, τα οποία μετατρέπονται σε φυσαλίδες υψηλής ενέργειας και πίεσης που προσκρούουν πάνω στα τοιχώματα του γυάλινου δοχείου, προσφέροντας την απαραίτητη ενέργεια για να κινήσουν τα εγκλείσματα του οξειδίου του ψευδαργύρου.



Εικόνα 7: Λουτρό υπερήχων Bek Nilas U25H

3.2.3 Διαδικασία παρασκευής

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Γενικής Χημείας Α3 της σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Οι συνθήκες που επικρατούσαν στο εργαστήριο παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαμόρφωσης των δοκιμών και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Συνθήκες κατά την παρασκευή των δοκιμίων

Θερμοκρασία θ	32 °C
Υγρασία Η	27 %
Πίεση Ρ	987 hPa

Όλα τα δοκίμια φτιάχτηκαν πάνω σε βάσεις και μέσα σε δακτύλιους από τεφλόν. Το κάθε δοκίμιο είναι συνεπώς κυκλικό και έχει χωρητικότητα 11 γραμμαρίων. Αρχικά, κατασκευάστηκαν τα δοκίμια από σκέτη ρητίνη. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν τα δοκίμια ρητίνης με πρόσμιξη οξειδίου του ψευδαργύρου σε ποσοστό 0,5% και, τέλος, τα δοκίμια ρητίνης με πρόσμιξη 2% οξειδίου του ψευδαργύρου. Η συνολική χωρητικότητα της κάθε τετράδας δοκιμίων είναι 44 g. Σύμφωνα με την αναλογία των συστατικών Α και Β της ρητίνης υπολογίζεται ότι για κάθε τετράδα απαιτούνται 27,85g από το συστατικό Α και 16,15 g από το συστατικό Β.

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων που αποτελούνται από σκέτη ρητίνη είναι η εξής:

1. Αρχικά, ζυγίζονται οι ποσότητες των συστατικών Α και Β της ρητίνης στο ζυγό ακριβείας και προστίθενται σε ένα γυάλινο δοχείο.
2. Στη συνέχεια, το μείγμα αναδεύεται με ένα μεταλλικό εργαλείο για 1,5 λεπτό.
3. Έπειτα, αφήνεται για 2 λεπτά να ηρεμήσει ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας.
4. Τέλος, μοιράζεται σε τέσσερα καλούπια από τεφλόν και φυλάσσεται για μία εβδομάδα σε μέρος μακριά από τον ήλιο μέχρι να σκληροποιηθεί πλήρως.

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων που αποτελούνται από ρητίνη και 0,5% οξείδιο του ψευδαργύρου είναι η εξής:

1. Αρχικά, υπολογίζεται η ποσότητα οξειδίου του ψευδαργύρου που απαιτείται για αυτήν την τετράδα των δοκιμίων σύμφωνα με το ποσοστό της πρόσμιξης επί της συνολικής χωρητικότητας της ρητίνης, δηλαδή τα 44 g. Επομένως, χρειάζονται συνολικά 0,22 g οξειδίου του ψευδαργύρου.
2. Στη συνέχεια, τοποθετείται σε ένα γυάλινο δοχείο η μετρούμενη ποσότητα του συστατικού Α και η ποσότητα του οξειδίου του ψευδαργύρου. Το μείγμα αναδεύεται για 1,5 λεπτό με ένα μεταλλικό εργαλείο.

3. Το μείγμα τοποθετείται τώρα στο λουτρό υπερήχων για 5 λεπτά. Το λουτρό υπερήχων εκτός από νερό περιέχει και παγάκια, ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και να εμποδίζονται οι χημικές αντιδράσεις.
4. Έπειτα, προστίθεται στο μείγμα η ποσότητα του συστατικού Β και αναδεύεται πάλι μηχανικά για 1,5 λεπτό.
5. Το μείγμα τοποθετείται ξανά στο λουτρό υπερήχων αυτή τη φορά για 3 λεπτά.
6. Τέλος, μοιράζεται στα τέσσερα καλούπια από τεφλόν και φυλάσσεται για μία εβδομάδα σε μέρος μακριά από τον ήλιο μέχρι να σκληροποιηθεί πλήρως.

Η παρασκευή των δοκιμίων που αποτελούνται από ρητίνη και 2% οξείδιο του ψευδαργύρου ακολουθεί περίπου την ίδια διαδικασία με την παρασκευή των δοκιμίων ρητίνης και 0,5% οξειδίου του ψευδαργύρου. Η πρώτη διαφορά έγκειται στην ποσότητα του οξειδίου του ψευδαργύρου. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται το 2% της συνολικής χωρητικότητας της ρητίνης, δηλαδή 0,88 g. Η δεύτερη διαφορά αφορά την παράλειψη του βήματος 3 για να μην εκκινήσουν οι αντιδράσεις σκληροποίησης γρήγορα και το οξείδιο του ψευδαργύρου να μην κατακαθίσει στον πυθμένα του δοχείου.



Εικόνα 8: Παραχθέντα δοκίμια (1-4 Σκέτη ρητίνη, 5-8 Ρητίνη με 0,5% ZnO, 9-12 Ρητίνη με 2% ZnO)

3.3 Διηλεκτρικές μετρήσεις

3.3.1 Διηλεκτρική θεωρία

Η διηλεκτρική θεωρία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη των διηλεκτρικών υλικών και των ιδιοτήτων τους. Ως «διηλεκτρικό» ορίζεται ένα υλικό, το οποίο έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια, όταν επιβληθεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Οι όροι «διηλεκτρικό» και «μονωτικό» θεωρούνται πολλές φορές σχεδόν συνώνυμοι, ωστόσο υπάρχουν διαφορές. Ο όρος «μονωτικό» δηλώνει ένα διηλεκτρικό που να διαθέτει ικανές ιδιότητες, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρικές μονώσεις αγωγών καθώς και μονώσεις μεταξύ αγωγών και εδάφους σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Επίσης, η διηλεκτρική σταθερά ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι το πολύ 10, ενώ η αντίστοιχη τιμή για ένα διηλεκτρικό μπορεί να είναι αρκετά υψηλότερη. Τέλος, το μονωτικό πρέπει να έχει αρκετά χαμηλή αγωγιμότητα σε οποιοδήποτε εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Επομένως, ο πρώτος όρος αφορά περισσότερο τις ιδιότητες του υλικού από φυσική άποψη, ενώ ο δεύτερος αφορά τη χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές. [36]

3.3.1.1 Διηλεκτρική σταθερά

Στην περίπτωση ενός πυκνωτή με παράλληλες πλάκες στον οποίο εφαρμόζεται μία DC τάση θα αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια όταν μεταξύ των οπλισμών του υπάρχει κάποιο διηλεκτρικό σε σχέση με το αν δεν υπάρχει κανένα άλλο υλικό. Αυτό υποδηλώνει πως το διηλεκτρικό εξουδετερώνει κάποια φορτία των ηλεκτροδίων, τα οποία συμβάλλουν στον καθορισμό της συνολικής πεδιακής έντασης, και κατά συνέπεια αυξάνει τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Η αύξηση της χωρητικότητας σχετίζεται με τη διηλεκτρική σταθερά. Δηλαδή,

$$C = C_0 \cdot \kappa' \Rightarrow \kappa' = \frac{C}{C_0}$$

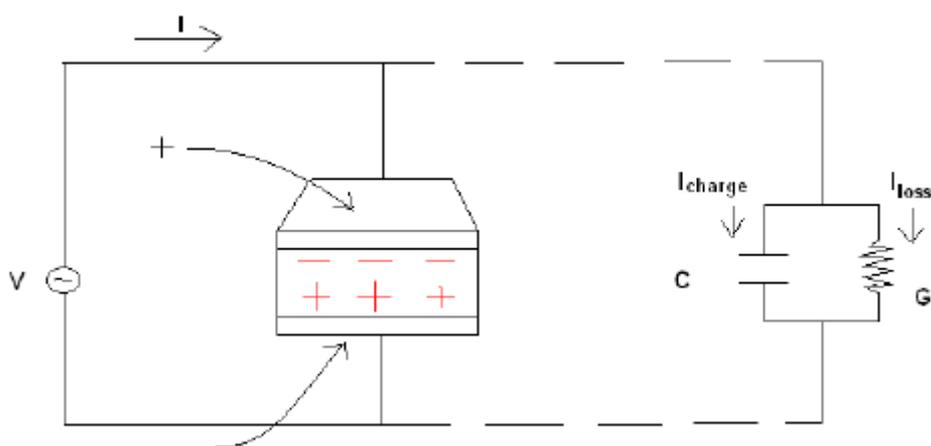
Όπου,

κ' : η διηλεκτρική σταθερά του υλικού

C : η χωρητικότητα με παρουσία διηλεκτρικού

C_0 : η χωρητικότητα χωρίς την προσθήκη υλικού

Όταν τα άκρα του ίδιου πυκνωτή συνδεθούν με πηγή εναλλασσόμενης τάσης, το συνολικό ρεύμα είναι το άθροισμα του ρεύματος φόρτισης I_{charge} και του ρεύματος απωλειών I_{loss} . Το ρεύμα φόρτισης είναι υπεύθυνο για τη διαδοχική φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή, ενώ το ρεύμα απωλειών σχετίζεται με την κατανάλωση της ενέργειας στο υλικό. Οι απώλειες του υλικού προσομοιώνονται με μία αγωγιμότητα G , η οποία συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή. Επομένως, χρησιμοποιείται το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας-αγωγιμότητας [36]

Το συνολικό ρεύμα είναι:

$$I = I_{charge} + I_{loss} = V(j\omega C + G) = V(j\omega C_0 \kappa' + G) \Rightarrow$$

$$I = V(j\omega C_0 \kappa' + \omega C_0 \kappa'') = V(j\omega C_0)(\kappa' - j\kappa'') = V(j\omega C_0)\kappa^*$$

Όπου,

$$\kappa^* = \kappa' - j\kappa''$$

Συνεπώς, η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά κ^* αποτελείται από το πραγματικό μέρος κ' που υποδηλώνει την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου στους σπλισμούς του πυκνωτή και από το φανταστικό μέρος κ'' που υποδηλώνει τις απώλειες φορτίων.

3.3.1.2 Ηλεκτρική επιτρεπτότητα

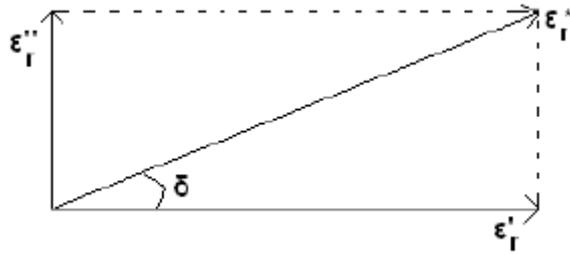
Η μιγαδική ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ_r^* εκφράζει την αλληλεπίδραση των υλικών με το ηλεκτρικό πεδίο και αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο συνδέεται άμεσα με τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά, αν η τελευταία διαιρεθεί με τη διηλεκτρική σταθερά του κενού ϵ_0 . Δηλαδή,

$$\epsilon_r^* = \frac{\kappa^*}{\epsilon_0} = \frac{\kappa'}{\epsilon_0} - j \frac{\kappa''}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

Συχνά το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται έναντι της διηλεκτρικής σταθεράς, καθώς λαμβάνει μικρότερες τιμές, οι οποίες είναι πιο εύκολα διαχειρήσιμες. Το πραγματικό μέρος ϵ_r' ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά (πολλές φορές και διηλεκτρική σταθερά) και είναι μία ένδειξη για το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο υλικό από το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και οι τιμές που παίρνει για τα μονωτικά συνήθως κυμαίνονται από 1 (κενό) έως 10. Για τους ημιαγωγούς οι τιμές είναι από 10 έως 20-40, ενώ για τα μέταλλα το ϵ_r' τείνει θεωρητικά στο άπειρο. Το μιγαδικό μέρος ϵ_r'' είναι ο συντελεστής απωλειών, ο οποίος αποτελεί μία ένδειξη της χαλαρότητας του υλικού απέναντι στο εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Έχει πάντα θετικό πρόσημο και είναι κατά κανόνα πολύ μικρότερος από το ϵ_r' . Τέλος, προσμετρά εκτός από τις διηλεκτρικές απώλειες και τα χαρακτηριστικά της αγωγιμότητας όγκου των υλικών.

3.3.1.3 Εφαπτομένη απωλειών

Η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά, όπως και η μιγαδική ηλεκτρική επιτρεπτότητα, μπορούν να σχεδιασθούν σε διανυσματική μορφή με τις δύο συνιστώσες τους να εμφανίζουν διαφορά φάσης 90° . Η διανυσματική συνιστώσα σχηματίζει γωνία δ με τον οριζόντιο άξονα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Η γωνία δ δείχνει τη χρονική προπορεία με την οποία το διηλεκτρικό παρακολουθεί τη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Τα επίπεδα χαλάρωσης για κάθε υλικό καθορίζονται από το λόγο της απολεσθείσας ενέργειας προς την αποθηκευόμενη ενέργεια στο χρονικό διάστημα μίας περιόδου, δηλαδή από την εφαπτομένη απωλειών ή αλλιώς συντελεστή απωλειών. [37]

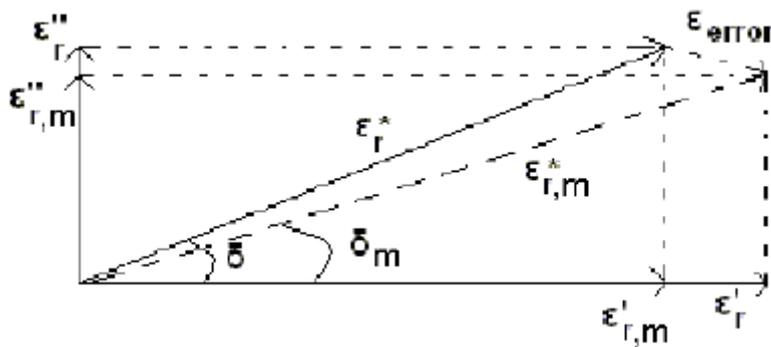


Σχήμα 15: Διανυσματικό διάγραμμα της μιγαδικής ηλεκτρικής επιτρεπτότητας [36]

Δηλαδή,

$$\tan \delta = \frac{I_{loss}}{I_{charge}} = \frac{\kappa''}{\kappa'} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

Στα ισχυρά μονωτικά υλικά το διάνυσμα ϵ_r^* τείνει προς το διάνυσμα ϵ_r' αφού η αγωγιμότητα G είναι αρκετά χαμηλή και η $\tan \delta$ τείνει στο μηδέν. Κατά τη μέτρηση της εφαπτομένης απωλειών, λοιπόν, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή για τυχόν σφάλματα, καθώς αυτά είναι διανυσματικά. Το σφάλμα οφείλεται κυρίως στην αδυναμία ακριβούς μέτρησης του ρεύματος απωλειών, καθώς αυτό είναι ασθενές. Το Σχήμα 16 απεικονίζει ακριβώς αυτήν την περίπτωση. Όταν το μέτρο του διανυσματικού σφάλματος ϵ_{error} της μετρητικής διάταξης ξεπεράσει το μέτρο του ϵ_r'' του υλικού, τότε η συνολικά μετρούμενη γωνία δ_{error} μπορεί να γίνει αρνητική.



Σχήμα 16: Διανυσματικό διάγραμμα της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας με σφάλμα μέτρησης ϵ_{error} (δείκτης m : μετρούμενες ποσότητες) [36]

Για το λόγο αυτό πρέπει το ρεύμα απωλειών να ενισχύεται, ώστε να μπορεί να μετρηθεί σωστά από μία γέφυρα LCR. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση του εμβαδού των οπλισμών ή με σωστή κατασκευή του κελιού μετρήσεων. [36]

3.3.1.4 Διηλεκτρική φασματοσκοπία

Όταν ένα υλικό βρεθεί σε ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο, τότε τα φορτισμένα σωματίδια του δέχονται δυνάμεις που τείνουν να τα μετακινήσουν μέσα σε αυτό. Άλλα από αυτά μετακινούνται περισσότερο και άλλα λιγότερο. Οι μετακινήσεις αυτές καθορίζουν την πόλωση του υλικού, η οποία εξαρτάται από τους εξής μηχανισμούς.

- **Πόλωση προσανατολισμού:** Οφείλεται στον προσανατολισμό των μόνιμων μοριακών διπόλων που υπάρχουν στον όγκο του υλικού προς τη διεύθυνση του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου.
- **Ηλεκτρονική πόλωση:** Δημιουργείται από την κίνηση του ηλεκτρονικού νέφους σχετικά με τον πυρήνα στα άτομα.
- **Ατομική ή ιοντική πόλωση:** Εμφανίζεται όταν μετατοπίζονται ιόντα στους κρυστάλλους ή άτομα μεταξύ τους, τα οποία έχουν διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα.
- **Πόλωση φορτίων χώρου:** Συμβαίνει όταν μετακινούνται φορτία λόγω αγωγιμότητας και παγιδεύονται σε ατέλειες ή διαχωριστικές επιφάνειες του υλικού.

Στην περίπτωση συνεχούς πεδίου η πόλωση παραμένει σταθερή για όσο χρόνο βρίσκεται το υλικό εντός αυτού. Αντίθετα, στην περίπτωση εναλλασσόμενου πεδίου, το πεδίο μεταβάλλεται με το χρόνο και η πόλωση θα πρέπει να το ακολουθεί. Αυτό δε συμβαίνει ακαριαία, καθώς απαιτείται ένα χρονικό διάστημα για τις μετακινήσεις των φορτίων και των διπόλων. Εμφανίζονται, λοιπόν, καθυστερήσεις στην πόλωση που επιφέρουν απώλειες ενέργειας.

Η μεταβολή της πόλωσης συναρτήσει του χρόνου περιγράφεται από την παρακάτω σχέση και εκφράζει ότι η πόλωση τείνει στην τιμή ισορροπίας της με ρυθμό ανάλογο

της απόστασης από την ισορροπία. Θεωρείται ότι ο μηχανισμός έχει μόνο ένα χρόνο αποκατάστασης.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P_s - P(t)}{\tau}$$

Όπου,

P_s : η πόλωση στην κατάσταση ισορροπίας

τ : ο χρόνος διηλεκτρικής αποκατάστασης, ο οποίος αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται μετά την απομάκρυνση του πεδίου για να μειωθεί η πόλωση στο $1/e$ της τιμής ισορροπίας της

Η διηλεκτρική σταθερά είναι αποτέλεσμα των επιμέρους συνεισφορών της πόλωσης προσανατολισμού (διπολικής) P_δ , της ατομικής P_{at} και της ηλεκτρονικής $P_{ηλ}$. Ακόμα, θεωρείται ότι μόνο η διπολική πόλωση καθυστερεί στην ακολουθία του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, προκύπτει:

$$\varepsilon_{(\omega)}^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} = \frac{\Delta\varepsilon}{1 + i\omega\tau}$$

Όπου,

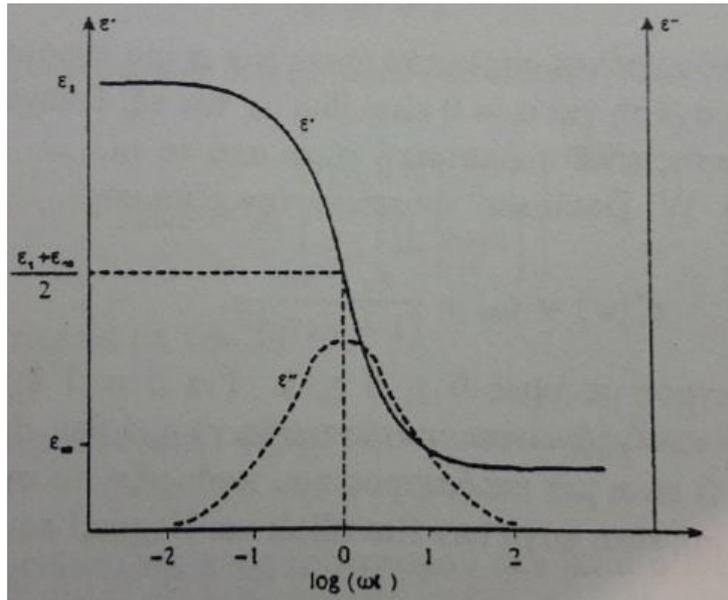
ε_∞ : η διηλεκτρική σταθερά σε πολύ μεγάλες συχνότητες δηλαδή αυτή που οφείλεται στην ατομική και ηλεκτρονική πόλωση

$\Delta\varepsilon$: η συνεισφορά του συγκεκριμένου μηχανισμού στην στατική διηλεκτρική σταθερά ε_s

Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν οι εξισώσεις Debye για το πραγματικό και φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς αντίστοιχα:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau$$



Σχήμα 17: Πραγματικό και φανταστικό μέρος διηλεκτρικής σταθεράς για μηχανισμό Debye [8]

Για τη σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon'(\omega)$ παρατηρείται ότι για συχνότητες κατά πολύ μικρότερες της ω_{max} τα δίπολα ακολουθούν τις μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ για μεγαλύτερες της ω_{max} δεν προλαβαίνουν και, επομένως, δε συνεισφέρουν στην πόλωση. Δηλαδή, για μικρές συχνότητες ισχύει $\epsilon' = \epsilon_s$, ενώ για μεγάλες συχνότητες ισχύει $\epsilon' = \epsilon_\infty$.

Η συνάρτηση $\epsilon''(\omega)$ παρουσιάζει μέγιστο στην συχνότητα $\omega_{max} = 1/\tau$ όπου $\epsilon''(\omega_{max}) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}$ και $\epsilon'(\omega_{max}) = \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2}$ καθώς εκεί τα δίπολα συντονίζονται με το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Όμως, στη στερεά κατάσταση η θεωρία του Debye αδυνατεί να ερμηνεύσει τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς εμφανίζονται περισσότεροι από ένα χρόνο αποκατάστασης στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων και των μορίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και άλλων θεωριών από τους Cole-Cole, Cole-Davidson και Havriliak-Negami, οι οποίοι εφαρμόζουν κατανομές χρόνων αποκατάστασης.

Cole-Cole:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha}}$$

Όπου, $0 \leq \alpha < 1$

Cole-Davidson:

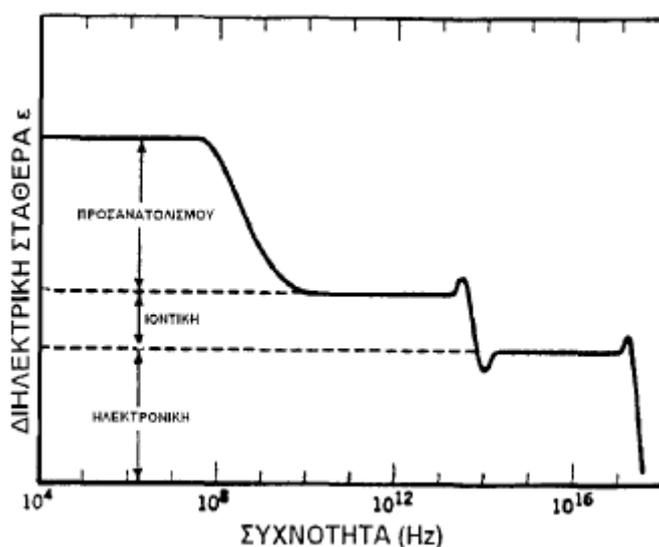
$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau_0)^\beta}$$

Όπου, $0 \leq \beta \leq 1$

Havriliak-Negami:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{[1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^\beta}$$

όπου, $0 \leq \alpha < 1$ και $0 < (1 - \alpha)\beta \leq 1$ [8]



Σχήμα 18: Διάγραμμα διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσει της συχνότητας και οι πολώσεις που επενεργούν [38]

Από το Σχήμα 18 συμπεραίνεται ότι για μικρές συχνότητες όλες οι μηχανισμοί πόλωσης καταφέρνουν να ακολουθήσουν το πεδίο. Όμως, με την αύξηση της συχνότητας η πόλωση προσανατολισμού δεν προλαβαίνει να φτάσει την τιμή ισορροπίας και συνεισφέρει όλο και λιγότερο. Η ιοντική πόλωση παραμένει σταθερή μέχρι τα 10^{13} Hz, ενώ στη συνέχεια φθίνει, γιατί τα ιόντα αρχίζουν να μη μετακινούνται εύκολα. Αντίθετα, η ηλεκτρονική πόλωση παραμένει σταθερή μέχρι τα 10^{17} Hz.

3.3.2 Χρησιμοποιούμενα όργανα

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των διηλεκτρικών μετρήσεων στις υψηλές συχνότητες είναι τα παρακάτω.

Agilent 4287A RF LCR Meter

Το όργανο Agilent 4287A αποτελεί μία γέφυρα μέτρησης LCR στις υψηλές συχνότητες από 1 MHz έως 3 GHz. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με βήμα 100 kHz και η καθεμία διαρκεί μέχρι 9 ms. Το συγκεκριμένο όργανο μπορεί να μετρήσει 11 παραμέτρους της σύνθετης αντίστασης ($|Z|$, $|Y|$, L, C, R, X, G, B, D, Q, θ) και να δείχνει στην οθόνη ταυτόχρονα τέσσερις από αυτές. Η κλίμακα μέτρησης του είναι από 200 mΩ έως 3 kΩ. Είναι ιδανικό όργανο για τον ποιοτικό έλεγχο της παραγωγής πηνίων SMD και φίλτρων EMI, όπου απαιτείται έλεγχος της σύνθετης αντίστασης σε υψηλές συχνότητες. Ακόμα, πρέπει να είναι συνδεδεμένη με υπολογιστή, ώστε να ρυθμιστούν οι παράμετροι της και να αποθηκευτούν οι μετρήσεις. [39][40]

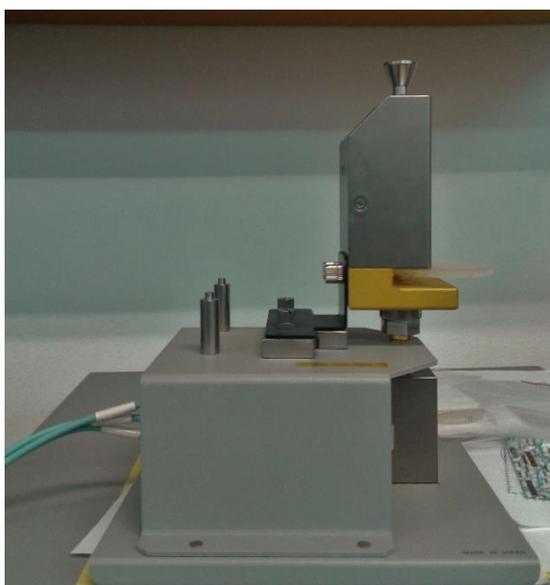


Εικόνα 9: Γέφυρα υψηλών συχνοτήτων Agilent 4287A [39]

Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A

Το κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των δοκιμίων και για τη μέτρηση των διηλεκτρικών τους μεγεθών, όπως η διηλεκτρική σταθερά και η εφαπτομένη απωλειών. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην

τοποθέτηση του προς μέτρηση δοκιμίου μεταξύ δύο παράλληλων πλακών σχηματίζοντας έναν πυκνωτή. Το εύρος συχνοτήτων που μπορεί να μετρήσει είναι από 1 MHz έως 1 GHz και συνδέεται με τη γέφυρα Agilent 4287A RF LCR Meter, ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις με βάση το παράλληλο κύκλωμα χωρητικότητας-αντίστασης. [41]



Εικόνα 10: Κελί διηλεκτρικών μετρήσεων Agilent 16453A με δοκίμιο προς μέτρηση

3.3.3 Διαδικασία μετρήσεων στη γέφυρα υψηλών συχνοτήτων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση των δοκιμίων παρουσιάζεται με τη μορφή βημάτων.

1. Αρχικά, κάθε δοκίμιο ορίστηκε να μετρηθεί σε 3 διαφορετικά σημεία, το καθένα μακριά από το άλλο, προκειμένου να εξασφαλισθούν όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικές μετρήσεις. Με ένα μικρόμετρο μετρήθηκε το πάχος του κάθε σημείου μέτρησης των δοκιμίων και καταγράφηκε σε ένα χαρτί. Το κάθε σημείο μέτρησης από τα 3 σημειώθηκε στο πλάι του δοκιμίου με λατινικά νούμερα I, II, III ώστε και μετά τη γήρανση να διατηρηθούν τα σημεία και να επαναληφθούν εκεί οι ίδιες μετρήσεις.
2. Στη συνέχεια, ένα-ένα σημείο τοποθετείται στο κελί διηλεκτρικών μετρήσεων. Μέσω της γέφυρας εμφανίζονται στην οθόνη οι μετρήσεις της παράλληλης χωρητικότητας C_p , της εφαπτομένης απωλειών $\tan D$, της παράλληλης αντίστασης R_p και της εφαρμοζόμενης συχνότητας f . Η διηλεκτρική σταθερά

κ' δεν υπολογίζεται απευθείας, αλλά προκύπτει κατά την επεξεργασία των μετρήσεων από το λόγο των χωρητικότητας C_p/C_0 , όπου C_0 είναι η χωρητικότητα του κενού.

3. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται στον υπολογιστή, το δοκίμιο αφαιρείται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Εικόνα 11: Μέτρηση δοκιμίου στη γέφυρα υψηλών συχνοτήτων

3.4 Μετρήσεις σε φασματοφωτόμετρο

Οι μετρήσεις που έγιναν στο φασματοφωτόμετρο αφορούν τη διαπερατότητα και την ανάκλαση των δοκιμίων έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και τη μέτρηση του ενεργειακού διακένου τους.

3.4.1 Φασματοφωτόμετρο Jasco V-770

Το χρησιμοποιούμενο όργανο για τις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι το φασματοφωτόμετρο Jasco V-770. Πρόκειται για ένα όργανο που λειτουργεί με πλήρως συμμετρική διπλή φωτεινή δέσμη. Το εύρος μετρήσεων του βρίσκεται μεταξύ 190 nm και 2700 nm, που, όμως, μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 3200 nm με πολλή μεγάλη ακρίβεια (μόλις $\pm 0,3$ nm στα 656,1 nm και $\pm 1,5$ nm στα 1312,2 nm). Η ταχύτητα σάρωσης του ξεκινά από τα 10 nm/min και φτάνει τα 4000 nm/min, ενώ το περιθώριο σφάλματος για τις μετρήσεις διαπερατότητας είναι $\pm 0,3\%$.

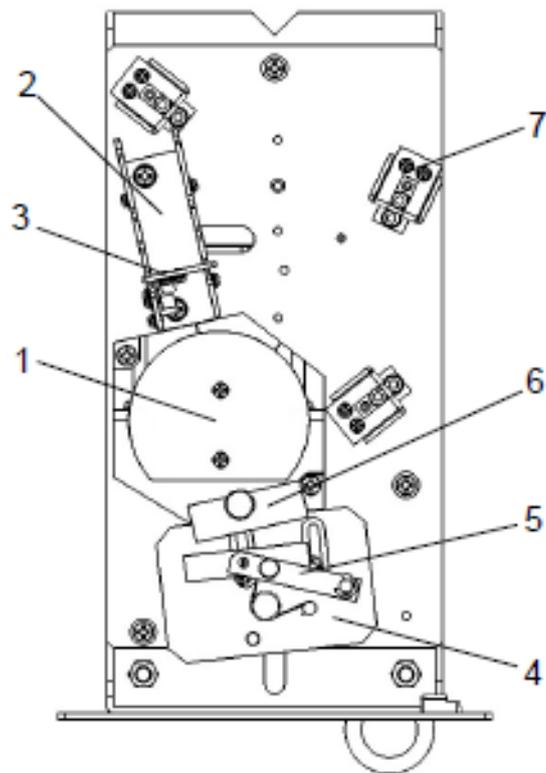


Εικόνα 12: Φασματοφωτόμετρο Jasco V-770

Τα βασικά μέρη του φασματοφωτόμετρου είναι η φωτεινή πηγή, το πρίσμα ή παραθλαστικό φράγμα, και ο ανιχνευτής. Η πηγή της ακτινοβολίας είναι λάμπα αλογόνου για το ορατό φως και λάμπα δευτερίου για το υπεριώδες. Το πρίσμα αποτελείται από μονό μονοχρωμάτορα, που αναλύει το λευκό φως στις διάφορες μονοχρωματικές περιοχές και επιλέγει το επιθυμητό μήκος κύματος. Ο ανιχνευτής της ηλιακής ακτινοβολίας για το ορατό και το υπεριώδες είναι ένας σωλήνας φωτοπολλαπλασιαστών (Photomultiplier tube), ενώ για το εγγύς υπέρυθρο είναι μια ψυχόμενη φωτοαγώγιμη δίοδος Peltier θειούχου μολύβδου (Peltier cooled PbS). [42]



Εικόνα 13: Άποψη της σφαίρας ολοκλήρωσης



Σχήμα 19: Σχηματική άποψη της σφαίρας ολοκλήρωσης [43]

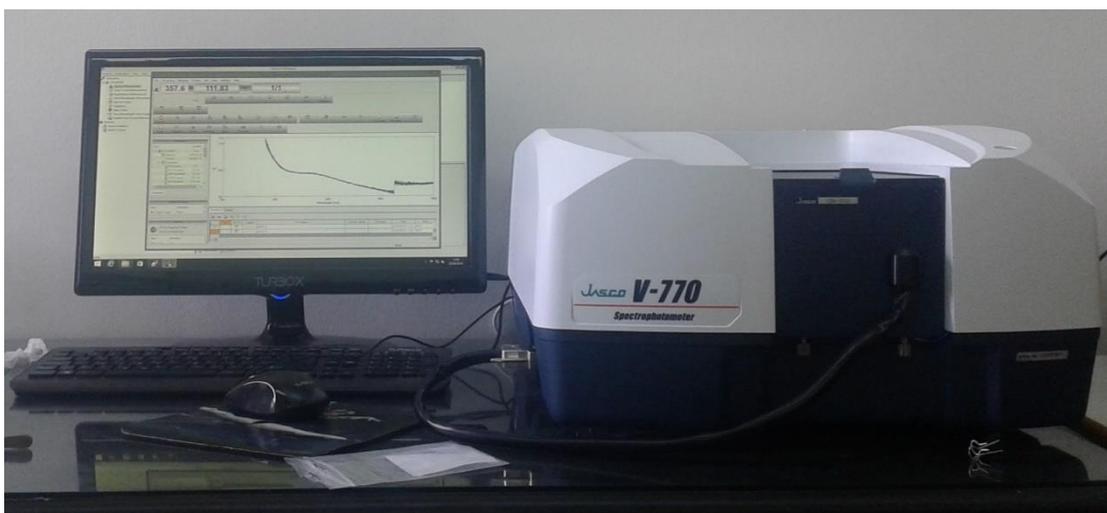
Η σφαίρα ολοκλήρωσης που περιέχεται μέσα στο φασματοφωτόμετρο αποτελείται από τα μέρη που δείχνει το Σχήμα 19. Τα νούμερα της εικόνας αντιστοιχούν σε:

1. **Σφαίρα ολοκλήρωσης (Integrating sphere):** Διαχέει το φως και το εισάγει στον ανιχνευτή.
2. **Ορθογώνιος υποδοχέας δείγματος (Sample-side rectangular cell holder) :** Δέχεται την ορθογώνια κυψελίδα όταν πρέπει να μετρηθεί η διαπερατότητα ενός διαλύματος.
3. **Χώρισμα (Partition):** Τοποθετείται σε κατάλληλη θέση για να περιορίσει το μήκος της φωτεινής δέσμης.
4. **Υποδοχέας δείγματος για μέτρηση ανάκλασης (Sample holder for reflectance measurement):** Χρησιμοποιείται σε μετρήσεις ανάκλασης για να τοποθετηθούν τα στερεά δείγματα με τη βοήθεια δύο βιδών.
5. **Συγκρατητής δείγματος (Sample retainer):** Στερεώνει το δείγμα και το προφυλάσσει από πτώση.
6. **Προσαρμογέας μέτρησης ανάκλασης (Reflectance measurement adapter):** Αφαιρεί το κατοπτρικά ανακλώμενο φως από το δοκίμιο.
7. **Καθρέφτης (Mirror):** Εισάγει το φως στη σφαίρα ολοκλήρωσης. Προστατεύεται με ένα κάλυμμα για να μην καταστραφεί το οπτικό σύστημα. [43]

3.4.2 Διαδικασία μετρήσεων

Η διαδικασία μετρήσεων στο φασματοφωτόμετρο είναι αρκετά απλή.

1. Αρχικά, ως δοκίμιο αναφοράς για τις μετρήσεις στο φασματοφωτόμετρο επιλέγεται να θεωρηθεί το Δοκίμιο 3, που αποτελείται από σκέτη ρητίνη. Το δοκίμιο αυτό τοποθετείται στο όργανο και αποθηκεύεται ως βάση για τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν.
2. Στη συνέχεια, το μετρούμενο φάσμα επιλέγεται να είναι από 200 nm έως 1800 nm με βήμα 0,2 nm. Η ταχύτητα σάρωσης του οργάνου είναι 400 nm/min. Πρώτα πραγματοποιούνται οι μετρήσεις διαπερατότητας και μετά οι μετρήσεις ανάκλασης.
3. Τοποθετούνται τα δοκίμια διαδοχικά στο φασματοφωτόμετρο και αρχίζουν οι μετρήσεις, οι οποίες καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με το όργανο.



Εικόνα 14: Η συνολική μετρούμενη διάταξη του φασματοφωτόμετρου

3.5 Γήρανση δοκιμίων

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της περιβαλλοντικής γήρανσης στα υλικά που εκτίθενται στο εξωτερικό περιβάλλον, τα δοκίμια υποβλήθησαν σε τρεις κύκλους τεχνητής γήρανσης.

3.5.1 QUV Accelerated Weathering Tester - Model QUV/spray

Το εν λόγω όργανο προξενεί στα δοκίμια τις αρνητικές συνέπειες του φωτός, της βροχής και της δρόσου. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσα σε λίγες μέρες ή εβδομάδες, ενώ στο κανονικό περιβάλλον παίρνει μήνες ή ακόμα και χρόνια. Η γήρανση επιτυγχάνεται με διαδοχικούς κύκλους υπερϊώδους ακτινοβολίας και υγρασίας σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες. Η υπερϊώδης ηλιακή ακτινοβολία παρέχεται από λάμπες φθορισμού υψηλής ποιότητας, που έχουν σταθερό φάσμα καθ' όλη τη διάρκεια χρήσης τους. Οι λάμπες UVA-340 είναι η ιδανική επιλογή για την περιοχή των 295nm και 365nm. Οι λάμπες UVB-313 είναι πολύ ισχυρές και χρησιμοποιούν μικρά μήκη κύματος, τα οποία είναι πιο καταστροφικά από τα αντίστοιχα στην επιφάνεια της γης. Παράλληλα, η δρόσος προέρχεται από συμπύκνωση της υγρασίας. Ο θάλαμος που γεμίζει με νερό θερμαίνεται από τις λάμπες φθορισμού και παράγει ατμό. Τα δοκίμια τοποθετούνται όρθια στο μηχάνημα με τη μία τους πλευρά να είναι προς τις λάμπες και την άλλη να είναι προς το εξωτερικό του οργάνου, όπου εκτίθενται στη θερμοκρασία

περιβάλλοντος. Έτσι, διασφαλίζεται ότι τα δοκίμια βρίσκονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την εσωτερική και το νερό θα συνεχίσει να συμπυκνώνεται στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει μία επιπλέον ιδιότητα. Είναι εφικτό να ψεκάζει τα δοκίμια με σπρέι νερού προκειμένου να μελετηθούν οι επιπτώσεις του θερμικού σοκ και γενικότερα της μηχανικής διάβρωσης, που προκαλούνται από την απότομη αλλαγή της θερμοκρασίας. [44]



Εικόνα 15: Εσωτερική άποψη QUV Accelerated Weathering Tester

3.5.2 Διαδικασία γήρανσης

Τα δοκίμια υποβλήθησαν σε γήρανση 3 φορές, κάθε φορά για 72 ώρες. Όμως, δεν τοποθετήθηκαν όλα στο μηχάνημα, διότι κάποια έπρεπε να μείνουν έξω για σύγκριση. Ένα δοκίμιο από κάθε τετράδα έμεινε εκτός γήρανσης και συγκεκριμένα τα Δοκίμια 3, 7 και 11. Για τα δοκίμια που υποβλήθησαν στη γήρανση επιλέχθηκε ο κάθε κύκλος των 72 ωρών να χωρίζεται σε συνεχόμενους υποκύκλους των 4 ωρών, οι οποίοι να περιλαμβάνουν αποκλειστικά υπεριώδη ακτινοβολία στους 50°C και αποκλειστικά συμπύκνωση στους 40°C.

Στη συνέχεια, αρκετά μεγάλη ποσότητα νερού προστέθηκε στο όργανο, καθώς υπάρχει μεγάλη απαίτηση σε νερό και δεν επιτρέπεται το άνοιγμα του, προτού ολοκληρωθεί ο κάθε κύκλος. Τα δοκίμια τοποθετούνται στις θέσεις τους και το μηχάνημα κλείνει οριστικά για τον κύκλο γήρανσης.

Στην Εικόνα 16 διακρίνονται οι οθόνες και τα κουμπιά με τα οποία χειρίζεται το μηχάνημα και καθορίζονται οι παράμετροι λειτουργίας του, όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος και το ποσοστό ακτινοβολίας.



Εικόνα 16: QUV Accelerated Weathering Tester

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1 Επεξεργασία διηλεκτρικών μετρήσεων

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διηλεκτρική σταθερά κ' υπολογίζεται από το λόγο C_p/C_0 . Η συγκεκριμένη χωρητικότητα υπολογίζεται θεωρητικά από τη σχέση

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

Όπου,

ε_0 : η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ίση με $8,85419 \cdot 10^{-12}$ F/m

S : το εμβαδόν του ηλεκτροδίου, ίσο με πr^2 (r : η ακτίνα του ηλεκτροδίου)

d : το πάχος του δοκιμίου

Για τις τελικές τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτομένης απωλειών λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων των τριών διαφορετικών σημείων του κάθε δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται περισσότερο αντικειμενικές μετρήσεις, καθώς η διασπορά της πρόσμιξης δεν είναι συμμετρική. Από τη διαδικασία της μέτρησης εξαιρείται το Δοκίμιο 2, καθώς έχει μεγάλο πάχος και δε χωράει στο κελί διηλεκτρικών μετρήσεων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τελικές τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς και της εφαπτομένης απωλειών όλων των δοκιμίων για την καθεμία φάση μέτρησης.

Πίνακας 9: Δηλεκτρικές μετρήσεις πριν τη γήρανση

f	Δοκίμιο 1		Δοκίμιο 3		Δοκίμιο 4		Δοκίμιο 5		Δοκίμιο 6		Δοκίμιο 7		Δοκίμιο 8		Δοκίμιο 9		Δοκίμιο 10		Δοκίμιο 11		Δοκίμιο 12	
	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'
1,00E+06	0,4165	8,36E+00	0,4071	8,45E+00	0,421267	8,85E+00	0,4138	8,82E+00	0,436633	7,61E+00	0,3784	9,15E+00	0,401433	7,88E+00	0,412767	8,62E+00	0,3847	8,09E+00	0,385567	8,95E+00	0,3781	8,74E+00
2,00E+06	0,258633	5,72E+00	0,266933	5,73E+00	0,266767	5,89E+00	0,279333	5,85E+00	0,268033	5,05E+00	0,267867	6,12E+00	0,279567	5,21E+00	0,278667	5,66E+00	0,238167	5,53E+00	0,250767	6,09E+00	0,2581	5,97E+00
3,00E+06	0,195567	5,65E+00	0,199867	5,63E+00	0,202667	5,82E+00	0,206367	5,78E+00	0,2107	5,00E+00	0,199467	6,06E+00	0,209967	5,17E+00	0,2142	5,57E+00	0,199467	5,46E+00	0,197933	5,95E+00	0,192367	5,92E+00
4,00E+06	0,158567	5,49E+00	0,1654	5,51E+00	0,1703	5,64E+00	0,170933	5,63E+00	0,1771	4,83E+00	0,172333	5,87E+00	0,179433	5,01E+00	0,1676	5,45E+00	0,1565	5,38E+00	0,1626	5,90E+00	0,1629	5,77E+00
5,00E+06	0,133333	5,44E+00	0,132767	5,46E+00	0,1423	5,59E+00	0,138733	5,57E+00	0,1415	4,80E+00	0,135633	5,88E+00	0,141233	4,96E+00	0,1396	5,40E+00	0,135833	5,31E+00	0,144233	5,80E+00	0,134567	5,75E+00
6,00E+06	0,113033	5,40E+00	0,1152	5,43E+00	0,1159	5,55E+00	0,1207	5,52E+00	0,121267	4,74E+00	0,119667	5,81E+00	0,1238	4,93E+00	0,127167	5,37E+00	0,1128	5,31E+00	0,116267	5,82E+00	0,119133	5,70E+00
7,00E+06	0,110167	5,35E+00	0,114267	5,36E+00	0,116467	5,47E+00	0,1216	5,45E+00	0,119233	4,71E+00	0,116833	5,76E+00	0,119933	4,93E+00	0,121433	5,33E+00	0,116133	5,24E+00	0,122133	5,76E+00	0,124533	5,66E+00
8,00E+06	0,107067	5,34E+00	0,1101	5,34E+00	0,112533	5,46E+00	0,112267	5,44E+00	0,110367	4,70E+00	0,114467	5,72E+00	0,118067	4,88E+00	0,1202	5,22E+00	0,1075	5,18E+00	0,1098	5,70E+00	0,109367	5,62E+00
9,00E+06	0,102833	5,32E+00	0,103967	5,33E+00	0,104633	5,44E+00	0,108267	5,41E+00	0,1057	4,70E+00	0,108267	5,72E+00	0,106667	4,89E+00	0,107567	5,26E+00	0,101767	5,20E+00	0,103033	5,71E+00	0,1026	5,63E+00
1,00E+07	0,099927	5,35E+00	0,10199	5,34E+00	0,105633	5,48E+00	0,107167	5,45E+00	0,106633	4,71E+00	0,1085	5,74E+00	0,109033	4,91E+00	0,109733	5,27E+00	0,1014	5,19E+00	0,105067	5,70E+00	0,1061	5,63E+00
2,00E+07	0,08314	5,20E+00	0,084997	5,19E+00	0,085683	5,31E+00	0,08805	5,28E+00	0,084663	4,57E+00	0,089537	5,56E+00	0,087607	4,75E+00	0,087433	5,13E+00	0,082733	5,05E+00	0,08439	5,54E+00	0,08431	5,46E+00
3,00E+07	0,07428	5,11E+00	0,078147	5,10E+00	0,077853	5,22E+00	0,08113	5,19E+00	0,076673	4,50E+00	0,081757	5,46E+00	0,07841	4,67E+00	0,078327	5,05E+00	0,07689	4,98E+00	0,079847	5,44E+00	0,080617	5,36E+00
4,00E+07	0,074553	5,05E+00	0,077143	5,03E+00	0,077607	5,15E+00	0,078877	5,12E+00	0,075523	4,44E+00	0,080113	5,38E+00	0,07683	4,61E+00	0,076467	4,98E+00	0,07623	4,91E+00	0,077867	5,36E+00	0,078227	5,29E+00
5,00E+07	0,075167	5,00E+00	0,07778	4,98E+00	0,077603	5,10E+00	0,078383	5,07E+00	0,075337	4,39E+00	0,079733	5,33E+00	0,07531	4,56E+00	0,075693	4,93E+00	0,074887	4,86E+00	0,077663	5,31E+00	0,078537	5,24E+00
6,00E+07	0,076233	4,95E+00	0,077627	4,93E+00	0,077923	5,05E+00	0,078963	5,02E+00	0,075927	4,35E+00	0,080963	5,27E+00	0,07649	4,52E+00	0,076403	4,89E+00	0,07614	4,82E+00	0,078433	5,26E+00	0,07906	5,19E+00
7,00E+07	0,0769	4,92E+00	0,078037	4,90E+00	0,077883	5,01E+00	0,078227	4,98E+00	0,07471	4,33E+00	0,079917	5,24E+00	0,075237	4,49E+00	0,075533	4,85E+00	0,0749	4,78E+00	0,07716	5,22E+00	0,078213	5,14E+00
8,00E+07	0,076813	4,89E+00	0,077637	4,87E+00	0,077827	4,98E+00	0,07802	4,95E+00	0,074133	4,30E+00	0,079417	5,20E+00	0,07415	4,46E+00	0,075237	4,83E+00	0,074527	4,75E+00	0,077493	5,19E+00	0,07801	5,11E+00
9,00E+07	0,07618	4,86E+00	0,07635	4,83E+00	0,076773	4,95E+00	0,07733	4,92E+00	0,072887	4,27E+00	0,078033	5,17E+00	0,072983	4,43E+00	0,073347	4,79E+00	0,073417	4,73E+00	0,07608	5,16E+00	0,076587	5,08E+00
1,00E+08	0,074907	4,83E+00	0,07511	4,81E+00	0,07552	4,93E+00	0,075967	4,90E+00	0,0721	4,25E+00	0,076623	5,14E+00	0,072827	4,42E+00	0,072513	4,77E+00	0,072317	4,71E+00	0,075023	5,14E+00	0,07627	5,06E+00
2,00E+08	0,070067	4,66E+00	0,07011	4,65E+00	0,070817	4,75E+00	0,07038	4,73E+00	0,06681	4,11E+00	0,07274	4,96E+00	0,06797	4,27E+00	0,068113	4,61E+00	0,0685	4,55E+00	0,071237	4,96E+00	0,07203	4,88E+00
3,00E+08	0,06938	4,58E+00	0,06961	4,56E+00	0,069767	4,67E+00	0,070003	4,64E+00	0,06584	4,03E+00	0,071553	4,87E+00	0,066903	4,19E+00	0,06741	4,53E+00	0,06822	4,47E+00	0,070563	4,87E+00	0,070957	4,79E+00
4,00E+08	0,068777	4,52E+00	0,069353	4,50E+00	0,07006	4,61E+00	0,070207	4,57E+00	0,06617	3,98E+00	0,071807	4,81E+00	0,06701	4,13E+00	0,067617	4,47E+00	0,0684	4,41E+00	0,070923	4,81E+00	0,071287	4,73E+00
5,00E+08	0,06678	4,46E+00	0,067683	4,44E+00	0,067617	4,55E+00	0,068017	4,51E+00	0,063763	3,93E+00	0,069813	4,74E+00	0,064983	4,08E+00	0,06582	4,41E+00	0,066553	4,36E+00	0,06927	4,74E+00	0,06946	4,67E+00
6,00E+08	0,067427	4,41E+00	0,067853	4,40E+00	0,06828	4,50E+00	0,068443	4,46E+00	0,064317	3,88E+00	0,07013	4,69E+00	0,065297	4,03E+00	0,066357	4,36E+00	0,06703	4,32E+00	0,069637	4,69E+00	0,069973	4,62E+00
7,00E+08	0,067337	4,38E+00	0,067873	4,36E+00	0,0682	4,47E+00	0,068263	4,42E+00	0,064097	3,84E+00	0,070207	4,66E+00	0,065367	4,00E+00	0,06645	4,33E+00	0,067163	4,29E+00	0,0697	4,66E+00	0,070177	4,59E+00
8,00E+08	0,06812	4,35E+00	0,0685	4,33E+00	0,069047	4,44E+00	0,068847	4,38E+00	0,064637	3,81E+00	0,070767	4,63E+00	0,065783	3,97E+00	0,06721	4,29E+00	0,067747	4,27E+00	0,07035	4,63E+00	0,070847	4,56E+00
9,00E+08	0,066753	4,32E+00	0,06755	4,30E+00	0,06819	4,42E+00	0,067873	4,35E+00	0,06344	3,77E+00	0,06995	4,60E+00	0,064827	3,93E+00	0,066283	4,26E+00	0,06697	4,25E+00	0,06958	4,60E+00	0,0701	4,53E+00
1,00E+09	0,068157	4,31E+00	0,069123	4,29E+00	0,07	4,42E+00	0,06963	4,33E+00	0,065113	3,75E+00	0,07206	4,59E+00	0,066753	3,91E+00	0,068673	4,25E+00	0,069193	4,24E+00	0,071927	4,59E+00	0,07204	4,53E+00

Πίνακας 10: Δηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 72 ώρες γήρανσης

	Δοκίμιο 1		Δοκίμιο 3		Δοκίμιο 4		Δοκίμιο 5		Δοκίμιο 6		Δοκίμιο 7		Δοκίμιο 8		Δοκίμιο 9		Δοκίμιο 10		Δοκίμιο 11		Δοκίμιο 12	
f	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'
1.00E+06	0.424667	8.32E+00	0.413067	9.42E+00	0.417767	9.44E+00	0.4167	9.74E+00	0.430633	8.82E+00	0.4239	9.76E+00	0.440633	9.16E+00	0.462067	9.58E+00	0.418833	8.62E+00	0.414833	9.75E+00	0.4194	9.20E+00
2.00E+06	0.2714	5.45E+00	0.2795	5.90E+00	0.279067	6.12E+00	0.272367	6.32E+00	0.274	5.71E+00	0.305533	6.07E+00	0.288667	5.74E+00	0.310967	5.87E+00	0.2885	5.51E+00	0.2976	5.95E+00	0.303567	5.76E+00
3.00E+06	0.210233	5.36E+00	0.210267	5.79E+00	0.210167	5.99E+00	0.2133	6.14E+00	0.194567	5.59E+00	0.213367	5.92E+00	0.2112	5.64E+00	0.237833	5.69E+00	0.215767	5.40E+00	0.2223	5.84E+00	0.209567	5.69E+00
4.00E+06	0.181033	5.23E+00	0.17	5.67E+00	0.178	5.77E+00	0.179	6.05E+00	0.172633	5.45E+00	0.1846	5.79E+00	0.1781	5.45E+00	0.180333	5.55E+00	0.170267	5.30E+00	0.180233	5.74E+00	0.177533	5.50E+00
5.00E+06	0.147133	5.19E+00	0.1394	5.38E+00	0.151533	5.74E+00	0.157667	5.98E+00	0.1396	5.41E+00	0.140133	5.70E+00	0.142333	5.43E+00	0.161933	5.51E+00	0.1403	5.22E+00	0.1385	5.65E+00	0.143	5.49E+00
6.00E+06	0.1268	5.16E+00	0.121	5.54E+00	0.132467	5.74E+00	0.142067	5.94E+00	0.130533	5.38E+00	0.121067	5.69E+00	0.133	5.36E+00	0.130767	5.47E+00	0.1264	5.20E+00	0.117633	5.60E+00	0.1278	5.41E+00
7.00E+06	0.1158	5.11E+00	0.118333	5.49E+00	0.1258	5.68E+00	0.130667	5.91E+00	0.124633	5.33E+00	0.122767	5.64E+00	0.130533	5.36E+00	0.132367	5.43E+00	0.124367	5.17E+00	0.118333	5.57E+00	0.124	5.38E+00
8.00E+06	0.110833	5.04E+00	0.112733	5.47E+00	0.113333	5.64E+00	0.125967	5.83E+00	0.118167	5.27E+00	0.114267	5.58E+00	0.121267	5.29E+00	0.123167	5.37E+00	0.116633	5.09E+00	0.1172	5.51E+00	0.120833	5.33E+00
9.00E+06	0.102867	5.06E+00	0.107167	5.45E+00	0.103233	5.63E+00	0.1129	5.83E+00	0.109267	5.27E+00	0.103933	5.60E+00	0.113733	5.31E+00	0.105933	5.40E+00	0.1088	5.10E+00	0.104833	5.55E+00	0.1128	5.33E+00
1.00E+07	0.1063	5.04E+00	0.105333	5.49E+00	0.1087	5.63E+00	0.111733	5.80E+00	0.105833	5.27E+00	0.105433	5.60E+00	0.110267	5.29E+00	0.113367	5.39E+00	0.1107	5.10E+00	0.104533	5.53E+00	0.114233	5.34E+00
2.00E+07	0.08682	4.91E+00	0.087697	5.31E+00	0.09154	5.46E+00	0.09783	5.62E+00	0.09087	5.11E+00	0.086863	5.43E+00	0.093297	5.12E+00	0.088647	5.24E+00	0.091803	4.95E+00	0.08518	5.38E+00	0.09357	5.17E+00
3.00E+07	0.07919	4.84E+00	0.07976	5.22E+00	0.083437	5.37E+00	0.091367	5.52E+00	0.083187	5.03E+00	0.079783	5.34E+00	0.085603	5.05E+00	0.081503	5.15E+00	0.084147	4.87E+00	0.078527	5.30E+00	0.086657	5.08E+00
4.00E+07	0.0785	4.77E+00	0.080043	5.15E+00	0.083043	5.29E+00	0.091183	5.43E+00	0.082393	4.95E+00	0.079777	5.27E+00	0.08665	4.96E+00	0.081557	5.08E+00	0.08362	4.80E+00	0.078583	5.22E+00	0.086647	5.00E+00
5.00E+07	0.079627	4.72E+00	0.080273	5.10E+00	0.08491	5.23E+00	0.092553	5.37E+00	0.084553	4.90E+00	0.080253	5.22E+00	0.086603	4.91E+00	0.08189	5.03E+00	0.08381	4.75E+00	0.07896	5.16E+00	0.086387	4.94E+00
6.00E+07	0.08212	4.68E+00	0.081383	5.04E+00	0.08643	5.18E+00	0.094037	5.30E+00	0.08558	4.85E+00	0.08103	5.17E+00	0.089167	4.86E+00	0.084543	4.98E+00	0.086017	4.71E+00	0.08052	5.12E+00	0.088507	4.89E+00
7.00E+07	0.083287	4.65E+00	0.08147	5.01E+00	0.086943	5.14E+00	0.094523	5.26E+00	0.086557	4.81E+00	0.081793	5.13E+00	0.088457	4.82E+00	0.083363	4.94E+00	0.085903	4.66E+00	0.080677	5.08E+00	0.089037	4.85E+00
8.00E+07	0.084537	4.61E+00	0.082197	4.97E+00	0.087907	5.10E+00	0.094797	5.22E+00	0.087003	4.77E+00	0.082257	5.09E+00	0.090663	4.78E+00	0.08616	4.91E+00	0.08686	4.63E+00	0.081367	5.05E+00	0.08897	4.81E+00
9.00E+07	0.084133	4.57E+00	0.08146	4.94E+00	0.086017	5.06E+00	0.094107	5.17E+00	0.086277	4.74E+00	0.0814	5.05E+00	0.08918	4.74E+00	0.0854	4.87E+00	0.08564	4.60E+00	0.081153	5.01E+00	0.088623	4.78E+00
1.00E+08	0.08305	4.54E+00	0.080083	4.91E+00	0.085723	5.03E+00	0.092693	5.14E+00	0.08454	4.71E+00	0.080137	5.03E+00	0.08775	4.71E+00	0.083793	4.83E+00	0.084473	4.57E+00	0.079527	4.98E+00	0.08679	4.75E+00
2.00E+08	0.077437	4.37E+00	0.075563	4.73E+00	0.08087	4.83E+00	0.08718	4.92E+00	0.079947	4.53E+00	0.075053	4.84E+00	0.082713	4.52E+00	0.078787	4.65E+00	0.080133	4.39E+00	0.074917	4.80E+00	0.08256	4.55E+00
3.00E+08	0.076563	4.28E+00	0.074817	4.64E+00	0.079737	4.73E+00	0.085673	4.81E+00	0.079423	4.44E+00	0.07488	4.75E+00	0.081403	4.42E+00	0.078027	4.56E+00	0.079503	4.30E+00	0.074413	4.71E+00	0.081837	4.46E+00
4.00E+08	0.075317	4.21E+00	0.074357	4.57E+00	0.07923	4.66E+00	0.084607	4.72E+00	0.07872	4.37E+00	0.07407	4.67E+00	0.0808	4.35E+00	0.07766	4.48E+00	0.07859	4.23E+00	0.074277	4.64E+00	0.080967	4.38E+00
5.00E+08	0.072913	4.15E+00	0.072617	4.52E+00	0.076977	4.59E+00	0.082077	4.65E+00	0.075537	4.31E+00	0.071927	4.61E+00	0.078047	4.28E+00	0.07535	4.42E+00	0.07677	4.16E+00	0.07232	4.57E+00	0.079177	4.31E+00
6.00E+08	0.073907	4.10E+00	0.072997	4.47E+00	0.077837	4.53E+00	0.08255	4.59E+00	0.077367	4.26E+00	0.072623	4.56E+00	0.078747	4.22E+00	0.076207	4.37E+00	0.07748	4.11E+00	0.07308	4.52E+00	0.07961	4.26E+00
7.00E+08	0.07379	4.06E+00	0.073037	4.43E+00	0.077693	4.49E+00	0.082177	4.54E+00	0.07734	4.23E+00	0.072547	4.52E+00	0.07826	4.18E+00	0.076187	4.33E+00	0.077143	4.06E+00	0.073037	4.47E+00	0.079333	4.21E+00
8.00E+08	0.074647	4.01E+00	0.07371	4.40E+00	0.078443	4.45E+00	0.082333	4.49E+00	0.078057	4.20E+00	0.073323	4.48E+00	0.079017	4.13E+00	0.077217	4.29E+00	0.07765	4.02E+00	0.07378	4.43E+00	0.079923	4.17E+00
9.00E+08	0.07266	3.97E+00	0.07259	4.38E+00	0.076913	4.41E+00	0.080667	4.45E+00	0.076707	4.18E+00	0.071863	4.44E+00	0.07683	4.09E+00	0.075633	4.25E+00	0.076123	3.98E+00	0.07236	4.40E+00	0.07835	4.12E+00
1.00E+09	0.072073	3.95E+00	0.073483	4.38E+00	0.077077	4.40E+00	0.081017	4.42E+00	0.077487	4.18E+00	0.072623	4.42E+00	0.076087	4.07E+00	0.075877	4.25E+00	0.076437	3.95E+00	0.073087	4.38E+00	0.078463	4.10E+00

Πίνακας 11: Δηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 144 ώρες γήρανσης

f	Δοκίμιο 1		Δοκίμιο 3		Δοκίμιο 4		Δοκίμιο 5		Δοκίμιο 6		Δοκίμιο 7		Δοκίμιο 8		Δοκίμιο 9		Δοκίμιο 10		Δοκίμιο 11		Δοκίμιο 12	
	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'	tanD	K'
1,00E+06	0,4155	8,20E+00	0,413067	9,42E+00	0,425467	8,83E+00	0,420467	9,07E+00	0,387767	8,13E+00	0,4229	9,76E+00	0,3872	8,32E+00	0,413533	8,58E+00	0,379667	7,98E+00	0,414833	9,75E+00	0,394933	8,57E+00
2,00E+06	0,256867	5,77E+00	0,2795	5,90E+00	0,2628	5,95E+00	0,2674	6,47E+00	0,260367	5,91E+00	0,305533	6,07E+00	0,265767	6,10E+00	0,281233	6,36E+00	0,263	6,19E+00	0,2976	5,95E+00	0,286533	6,83E+00
3,00E+06	0,201033	5,59E+00	0,210267	5,79E+00	0,212667	5,85E+00	0,221067	6,28E+00	0,1977	5,83E+00	0,213367	5,92E+00	0,201333	5,98E+00	0,2058	6,23E+00	0,203067	6,04E+00	0,2223	5,84E+00	0,231333	6,68E+00
4,00E+06	0,176167	5,45E+00	0,17	5,67E+00	0,183067	5,67E+00	0,1962	6,14E+00	0,181033	5,61E+00	0,1846	5,79E+00	0,178867	5,81E+00	0,181667	6,19E+00	0,176967	5,97E+00	0,180233	5,74E+00	0,202833	6,48E+00
5,00E+06	0,1431	5,41E+00	0,1394	5,58E+00	0,1423	5,63E+00	0,159067	6,08E+00	0,142733	5,66E+00	0,140133	5,70E+00	0,148867	5,83E+00	0,1554	6,09E+00	0,1529	5,89E+00	0,1385	5,65E+00	0,1695	6,46E+00
6,00E+06	0,1327	5,43E+00	0,121	5,54E+00	0,1284	5,60E+00	0,143667	6,05E+00	0,130733	5,59E+00	0,121067	5,69E+00	0,133033	5,77E+00	0,136567	6,08E+00	0,1381	5,84E+00	0,117633	5,60E+00	0,155533	6,36E+00
7,00E+06	0,1237	5,38E+00	0,118333	5,49E+00	0,1232	5,58E+00	0,136033	5,97E+00	0,120767	5,55E+00	0,122767	5,64E+00	0,1199	5,72E+00	0,1231	5,99E+00	0,1247	5,77E+00	0,118333	5,57E+00	0,1438	6,30E+00
8,00E+06	0,114833	5,30E+00	0,112733	5,47E+00	0,109033	5,52E+00	0,123467	5,87E+00	0,1152	5,47E+00	0,114267	5,58E+00	0,1141	5,64E+00	0,119933	5,93E+00	0,1202	5,70E+00	0,1172	5,51E+00	0,137267	6,22E+00
9,00E+06	0,105333	5,31E+00	0,107167	5,45E+00	0,103433	5,52E+00	0,1216	5,89E+00	0,109067	5,46E+00	0,103933	5,60E+00	0,109023	5,64E+00	0,109267	5,91E+00	0,1135	5,69E+00	0,104833	5,53E+00	0,131633	6,18E+00
1,00E+07	0,104167	5,28E+00	0,105333	5,49E+00	0,10219	5,50E+00	0,1185	5,88E+00	0,107333	5,48E+00	0,105433	5,60E+00	0,108967	5,63E+00	0,112	5,90E+00	0,12467	5,68E+00	0,104533	5,53E+00	0,132767	6,18E+00
2,00E+07	0,091543	5,15E+00	0,087697	5,31E+00	0,09068	5,34E+00	0,10223	5,68E+00	0,094753	5,29E+00	0,086863	5,43E+00	0,094083	5,45E+00	0,09703	5,72E+00	0,089887	5,50E+00	0,08518	5,38E+00	0,117067	5,92E+00
3,00E+07	0,08461	5,05E+00	0,07976	5,22E+00	0,082573	5,27E+00	0,094277	5,55E+00	0,086687	5,20E+00	0,079783	5,34E+00	0,088487	5,35E+00	0,090147	5,61E+00	0,09339	5,40E+00	0,078527	5,30E+00	0,110467	5,78E+00
4,00E+07	0,08539	4,98E+00	0,080043	5,15E+00	0,0835	5,19E+00	0,09465	5,46E+00	0,086527	5,12E+00	0,079777	5,27E+00	0,08754	5,27E+00	0,090417	5,52E+00	0,09301	5,30E+00	0,078583	5,22E+00	0,110267	5,68E+00
5,00E+07	0,086193	4,92E+00	0,080273	5,10E+00	0,08527	5,14E+00	0,095043	5,40E+00	0,087767	5,07E+00	0,080253	5,22E+00	0,08863	5,22E+00	0,090847	5,46E+00	0,092827	5,24E+00	0,07896	5,16E+00	0,110533	5,60E+00
6,00E+07	0,088447	4,87E+00	0,081383	5,04E+00	0,086817	5,08E+00	0,096933	5,33E+00	0,089857	5,01E+00	0,08103	5,17E+00	0,09115	5,15E+00	0,09296	5,40E+00	0,095453	5,18E+00	0,08052	5,12E+00	0,112133	5,52E+00
7,00E+07	0,089107	4,83E+00	0,08147	5,01E+00	0,08742	5,04E+00	0,09791	5,29E+00	0,090783	4,98E+00	0,081793	5,13E+00	0,092027	5,12E+00	0,094403	5,35E+00	0,09675	5,13E+00	0,080677	5,08E+00	0,113167	5,46E+00
8,00E+07	0,089707	4,79E+00	0,082197	4,97E+00	0,089273	5,00E+00	0,098877	5,25E+00	0,09285	4,93E+00	0,082257	5,09E+00	0,093307	5,07E+00	0,094813	5,30E+00	0,09726	5,09E+00	0,081367	5,05E+00	0,114067	5,41E+00
9,00E+07	0,08882	4,75E+00	0,08146	4,94E+00	0,088263	4,96E+00	0,098163	5,19E+00	0,09258	4,89E+00	0,0814	5,05E+00	0,0927	5,03E+00	0,093833	5,26E+00	0,096267	5,04E+00	0,081153	5,01E+00	0,113667	5,35E+00
1,00E+08	0,088083	4,72E+00	0,080083	4,91E+00	0,086267	4,93E+00	0,096233	5,15E+00	0,090993	4,85E+00	0,080137	5,03E+00	0,09096	4,99E+00	0,09233	5,22E+00	0,094817	5,01E+00	0,079527	4,98E+00	0,111833	5,31E+00
2,00E+08	0,08199	4,53E+00	0,075563	4,73E+00	0,080853	4,73E+00	0,089113	4,93E+00	0,084997	4,65E+00	0,075053	4,84E+00	0,085297	4,79E+00	0,086387	5,01E+00	0,08891	4,80E+00	0,074917	4,80E+00	0,105167	5,04E+00
3,00E+08	0,081027	4,44E+00	0,074817	4,64E+00	0,079687	4,63E+00	0,08695	4,82E+00	0,084188	4,56E+00	0,07488	4,75E+00	0,08406	4,69E+00	0,08525	4,90E+00	0,08794	4,69E+00	0,074413	4,71E+00	0,103033	4,91E+00
4,00E+08	0,080813	4,36E+00	0,074357	4,57E+00	0,079473	4,55E+00	0,086313	4,73E+00	0,083717	4,47E+00	0,07407	4,67E+00	0,08333	4,61E+00	0,08479	4,81E+00	0,087183	4,61E+00	0,074277	4,64E+00	0,101463	4,81E+00
5,00E+08	0,078493	4,30E+00	0,072617	4,52E+00	0,076997	4,48E+00	0,082897	4,66E+00	0,081027	4,41E+00	0,071927	4,61E+00	0,080963	4,55E+00	0,082243	4,74E+00	0,0845	4,54E+00	0,07232	4,57E+00	0,09816	4,72E+00
6,00E+08	0,078593	4,24E+00	0,072997	4,47E+00	0,077083	4,42E+00	0,082983	4,60E+00	0,08127	4,36E+00	0,072623	4,56E+00	0,081347	4,50E+00	0,082467	4,68E+00	0,084573	4,49E+00	0,07308	4,52E+00	0,097517	4,66E+00
7,00E+08	0,07831	4,20E+00	0,073037	4,43E+00	0,07682	4,37E+00	0,082407	4,55E+00	0,081053	4,32E+00	0,072547	4,52E+00	0,08088	4,47E+00	0,082027	4,64E+00	0,084027	4,46E+00	0,073037	4,47E+00	0,096423	4,60E+00
8,00E+08	0,078873	4,16E+00	0,07371	4,40E+00	0,077467	4,33E+00	0,08301	4,51E+00	0,08183	4,29E+00	0,073323	4,48E+00	0,081737	4,44E+00	0,082637	4,61E+00	0,084477	4,43E+00	0,07378	4,43E+00	0,09631	4,56E+00
9,00E+08	0,0771	4,12E+00	0,07259	4,38E+00	0,07542	4,28E+00	0,08068	4,47E+00	0,07983	4,26E+00	0,071863	4,44E+00	0,079883	4,42E+00	0,080933	4,57E+00	0,082803	4,41E+00	0,07236	4,40E+00	0,094077	4,52E+00
1,00E+09	0,076767	4,10E+00	0,073483	4,38E+00	0,074443	4,26E+00	0,07947	4,45E+00	0,078703	4,26E+00	0,072623	4,42E+00	0,079523	4,42E+00	0,080697	4,57E+00	0,082513	4,41E+00	0,073087	4,38E+00	0,09268	4,50E+00

Πίνακας 12: Δηλεκτρικές μετρήσεις μετά από 216 ώρες γήρανσης

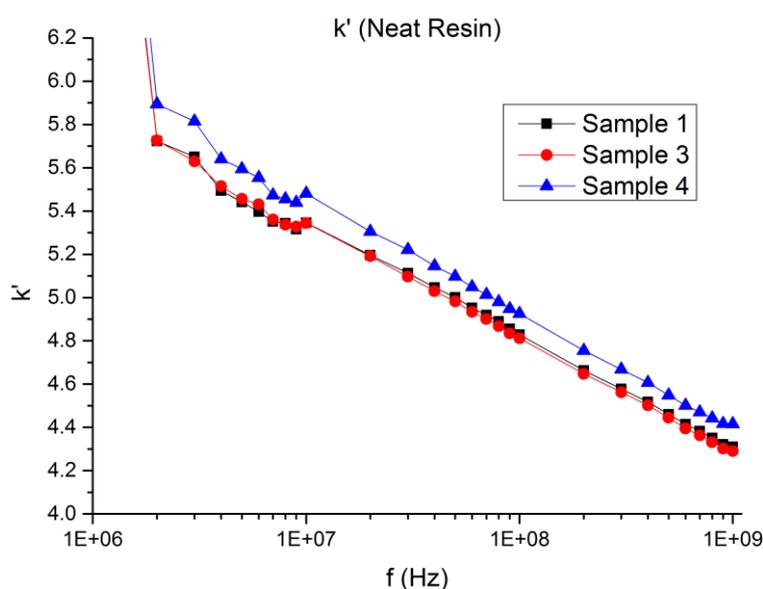
f	Δοκίμιο 1		Δοκίμιο 3		Δοκίμιο 4		Δοκίμιο 5		Δοκίμιο 6		Δοκίμιο 7		Δοκίμιο 8		Δοκίμιο 9		Δοκίμιο 10		Δοκίμιο 11		Δοκίμιο 12	
	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'	tand	K'
1,00E+06	0,405533	7,55E+00	0,413067	9,42E+00	0,39174	8,85E+00	0,404333	8,55E+00	0,393667	8,40E+00	0,4239	9,76E+00	0,423167	8,04E+00	0,4009	9,88E+00	0,3955	8,64E+00	0,414833	9,75E+00	0,3919	9,06E+00
2,00E+06	0,271567	5,59E+00	0,2795	5,90E+00	0,266167	6,09E+00	0,292067	5,69E+00	0,2631	5,67E+00	0,305333	6,07E+00	0,276	5,36E+00	0,250467	6,61E+00	0,255967	5,71E+00	0,2976	5,95E+00	0,254	6,07E+00
3,00E+06	0,1953	5,50E+00	0,210267	5,79E+00	0,2101	5,97E+00	0,224033	5,51E+00	0,207633	5,55E+00	0,213367	5,92E+00	0,217233	5,27E+00	0,2008	6,40E+00	0,195	5,60E+00	0,2223	5,84E+00	0,200133	5,87E+00
4,00E+06	0,167167	5,35E+00	0,17	5,67E+00	0,176067	5,83E+00	0,182267	5,43E+00	0,173867	5,45E+00	0,1846	5,79E+00	0,179967	5,21E+00	0,171333	6,33E+00	0,173167	5,50E+00	0,180233	5,74E+00	0,172367	5,77E+00
5,00E+06	0,135067	5,30E+00	0,1394	5,58E+00	0,136967	5,79E+00	0,139033	5,36E+00	0,134267	5,41E+00	0,140133	5,70E+00	0,1458	5,14E+00	0,143167	6,22E+00	0,140433	5,44E+00	0,1385	5,65E+00	0,1419	5,75E+00
6,00E+06	0,117267	5,27E+00	0,121	5,54E+00	0,127267	5,76E+00	0,127367	5,33E+00	0,1207	5,37E+00	0,121067	5,69E+00	0,117433	5,08E+00	0,1208	6,20E+00	0,122067	5,42E+00	0,117633	5,60E+00	0,125833	5,66E+00
7,00E+06	0,112433	5,21E+00	0,118333	5,49E+00	0,117867	5,74E+00	0,120767	5,26E+00	0,111467	5,33E+00	0,122767	5,64E+00	0,122367	5,03E+00	0,1156	6,15E+00	0,110567	5,35E+00	0,118333	5,57E+00	0,1154	5,62E+00
8,00E+06	0,1135	5,17E+00	0,112733	5,47E+00	0,114233	5,65E+00	0,113333	5,17E+00	0,111467	5,27E+00	0,114267	5,58E+00	0,110767	4,99E+00	0,104767	6,09E+00	0,10293	5,29E+00	0,1172	5,51E+00	0,106433	5,57E+00
9,00E+06	0,105967	5,16E+00	0,107167	5,45E+00	0,109367	5,64E+00	0,108767	5,22E+00	0,106967	5,28E+00	0,103933	5,60E+00	0,102467	4,99E+00	0,101367	6,07E+00	0,1027	5,31E+00	0,104833	5,53E+00	0,103867	5,58E+00
1,00E+07	0,1046	5,18E+00	0,105333	5,49E+00	0,109367	5,67E+00	0,111633	5,20E+00	0,103767	5,29E+00	0,105433	5,60E+00	0,106833	5,00E+00	0,106433	6,07E+00	0,1073	5,30E+00	0,104533	5,53E+00	0,108833	5,55E+00
2,00E+07	0,08566	5,03E+00	0,087697	5,31E+00	0,08732	5,50E+00	0,089667	5,06E+00	0,087633	5,12E+00	0,086863	5,43E+00	0,088793	4,85E+00	0,0867	5,91E+00	0,087137	5,16E+00	0,08518	5,38E+00	0,091803	5,39E+00
3,00E+07	0,07881	4,95E+00	0,07976	5,22E+00	0,080493	5,42E+00	0,07993	4,98E+00	0,080883	5,04E+00	0,079783	5,34E+00	0,078883	4,78E+00	0,079823	5,81E+00	0,079527	5,07E+00	0,078527	5,30E+00	0,083703	5,30E+00
4,00E+07	0,07942	4,88E+00	0,080043	5,15E+00	0,0808	5,34E+00	0,080907	4,91E+00	0,080573	4,97E+00	0,079777	5,27E+00	0,079767	4,72E+00	0,07963	5,73E+00	0,07978	5,00E+00	0,078583	5,22E+00	0,08418	5,22E+00
5,00E+07	0,079413	4,83E+00	0,080273	5,10E+00	0,081357	5,29E+00	0,08148	4,87E+00	0,081533	4,92E+00	0,080253	5,22E+00	0,080417	4,67E+00	0,080357	5,67E+00	0,07973	4,95E+00	0,07896	5,16E+00	0,083607	5,17E+00
6,00E+07	0,08212	4,79E+00	0,081383	5,04E+00	0,08421	5,24E+00	0,0844	4,82E+00	0,08363	4,88E+00	0,08103	5,17E+00	0,08348	4,63E+00	0,084127	5,62E+00	0,082133	4,91E+00	0,08052	5,12E+00	0,086393	5,11E+00
7,00E+07	0,083957	4,75E+00	0,08147	5,01E+00	0,084807	5,19E+00	0,085073	4,78E+00	0,084403	4,83E+00	0,081793	5,13E+00	0,08467	4,59E+00	0,0845	5,58E+00	0,08389	4,87E+00	0,080677	5,08E+00	0,08781	5,07E+00
8,00E+07	0,085383	4,71E+00	0,082197	4,97E+00	0,08716	5,16E+00	0,087253	4,75E+00	0,085477	4,80E+00	0,082257	5,09E+00	0,086297	4,56E+00	0,085443	5,54E+00	0,084287	4,83E+00	0,081367	5,05E+00	0,08827	5,04E+00
9,00E+07	0,084747	4,68E+00	0,08146	4,94E+00	0,08661	5,11E+00	0,086067	4,70E+00	0,084073	4,76E+00	0,0814	5,05E+00	0,085113	4,52E+00	0,085067	5,49E+00	0,083497	4,79E+00	0,081153	5,01E+00	0,087497	4,99E+00
1,00E+08	0,08352	4,64E+00	0,080083	4,91E+00	0,085033	5,07E+00	0,0853	4,67E+00	0,084187	4,73E+00	0,080137	5,03E+00	0,08373	4,49E+00	0,083713	5,45E+00	0,082823	4,76E+00	0,079527	4,98E+00	0,08735	4,96E+00
2,00E+08	0,077203	4,46E+00	0,075563	4,73E+00	0,078483	4,88E+00	0,078097	4,49E+00	0,077903	4,55E+00	0,075053	4,84E+00	0,078227	4,32E+00	0,077973	5,25E+00	0,07727	4,59E+00	0,074917	4,80E+00	0,081693	4,76E+00
3,00E+08	0,075953	4,37E+00	0,074817	4,64E+00	0,077857	4,78E+00	0,076813	4,40E+00	0,077113	4,45E+00	0,072488	4,75E+00	0,077533	4,23E+00	0,077093	5,14E+00	0,07636	4,50E+00	0,074413	4,71E+00	0,080873	4,66E+00
4,00E+08	0,075783	4,30E+00	0,074357	4,57E+00	0,077253	4,70E+00	0,0768	4,32E+00	0,076847	4,39E+00	0,07407	4,67E+00	0,077177	4,17E+00	0,07634	5,07E+00	0,075973	4,43E+00	0,074277	4,64E+00	0,080203	4,59E+00
5,00E+08	0,072863	4,24E+00	0,072617	4,52E+00	0,07464	4,63E+00	0,073977	4,26E+00	0,073353	4,33E+00	0,071927	4,61E+00	0,074547	4,11E+00	0,074113	5,00E+00	0,073217	4,38E+00	0,07232	4,57E+00	0,077213	4,52E+00
6,00E+08	0,073047	4,20E+00	0,072997	4,47E+00	0,074677	4,57E+00	0,074003	4,21E+00	0,0733923	4,28E+00	0,072623	4,56E+00	0,075237	4,07E+00	0,07488	4,95E+00	0,074337	4,34E+00	0,07308	4,52E+00	0,078413	4,47E+00
7,00E+08	0,072967	4,16E+00	0,073037	4,43E+00	0,074963	4,53E+00	0,074237	4,17E+00	0,074467	4,25E+00	0,072547	4,52E+00	0,075813	4,04E+00	0,07535	4,92E+00	0,074727	4,31E+00	0,073037	4,47E+00	0,07837	4,44E+00
8,00E+08	0,074383	4,12E+00	0,07371	4,40E+00	0,07579	4,48E+00	0,075523	4,13E+00	0,075487	4,21E+00	0,073323	4,48E+00	0,077273	4,01E+00	0,076413	4,88E+00	0,075867	4,29E+00	0,07378	4,43E+00	0,07936	4,41E+00
9,00E+08	0,072617	4,09E+00	0,07259	4,38E+00	0,07372	4,43E+00	0,073337	4,09E+00	0,073707	4,18E+00	0,071883	4,44E+00	0,075893	3,98E+00	0,074637	4,86E+00	0,07437	4,27E+00	0,07236	4,40E+00	0,07749	4,38E+00
1,00E+09	0,071927	4,08E+00	0,073483	4,38E+00	0,07358	4,41E+00	0,072557	4,07E+00	0,073363	4,17E+00	0,072623	4,42E+00	0,076567	3,97E+00	0,075623	4,86E+00	0,07556	4,29E+00	0,073087	4,38E+00	0,078653	4,37E+00

4.2 Διαγράμματα διηλεκτρικών μετρήσεων

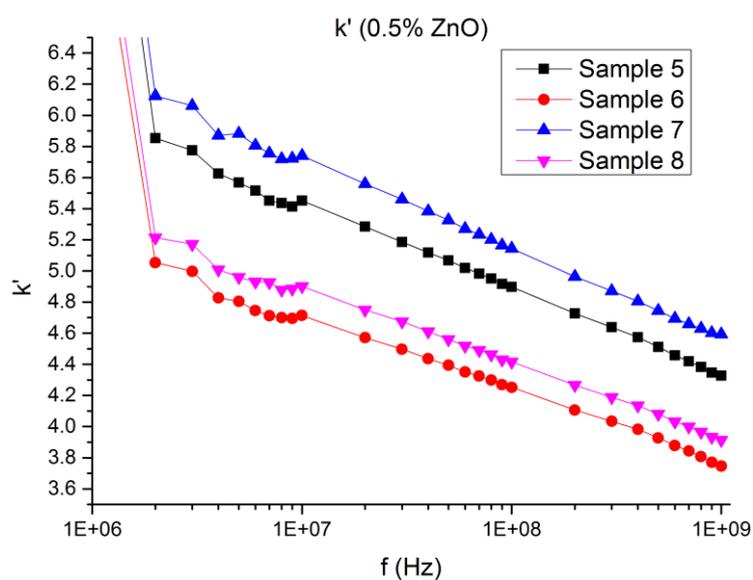
Η κατηγοριοποίηση των διαγραμμάτων για τις διηλεκτρικές μετρήσεις γίνεται με βάση τους κύκλους γήρανσης και το ποσοστό πρόσμιξης του οξειδίου του ψευδαργύρου. Τα διαγράμματα είναι μεγενθυμένα, ώστε να φαίνεται καθαρά η επίδραση της γήρανσης.

4.2.1 Διηλεκτρική σταθερά

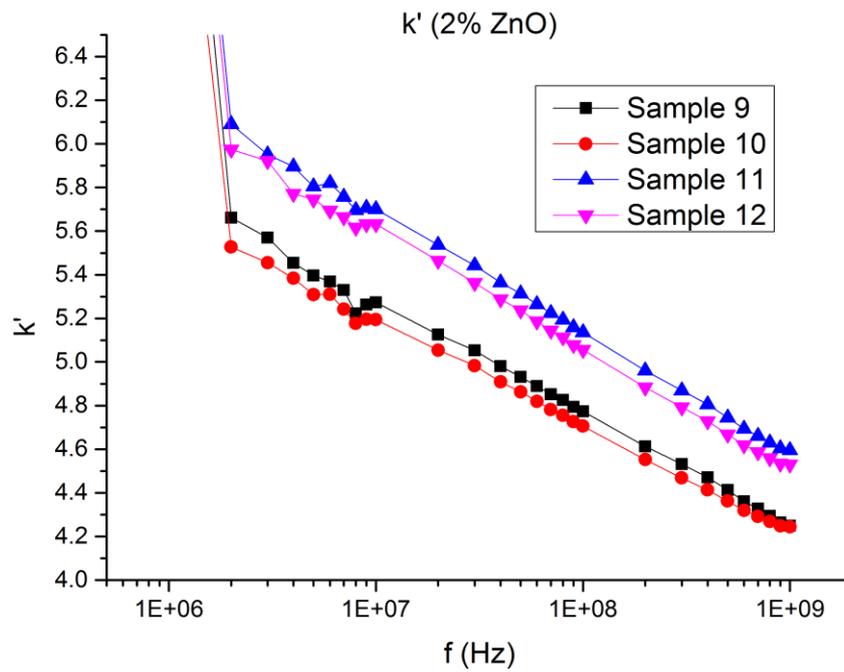
Πριν τη γήρανση



Σχήμα 20: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης πριν τη γήρανση

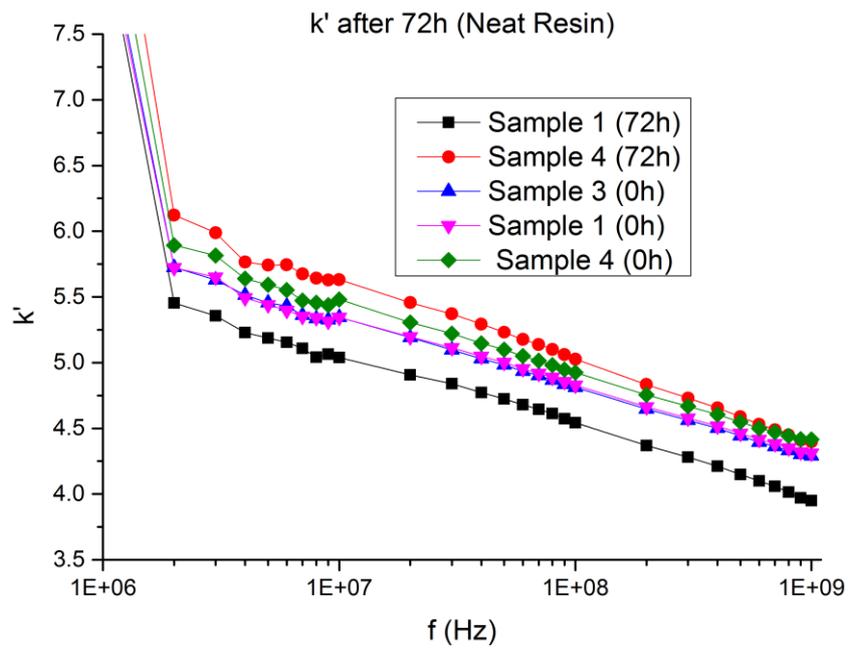


Σχήμα 21: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 0,5% ZnO πριν τη γήρανση

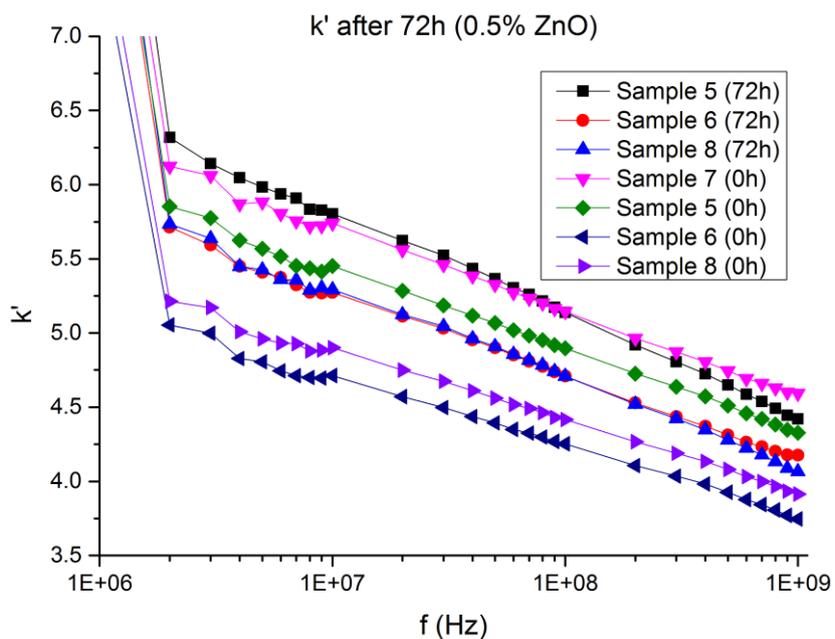


Σχήμα 22: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 2% ZnO πριν τη γήρανση

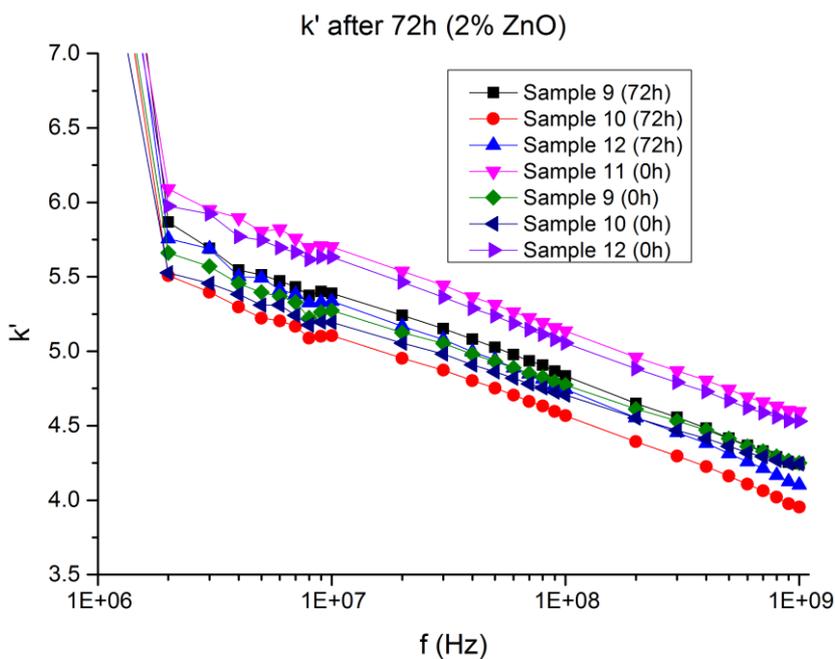
Μετά από 72 ώρες γήρανσης



Σχήμα 23: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης μετά απο 72 ώρες

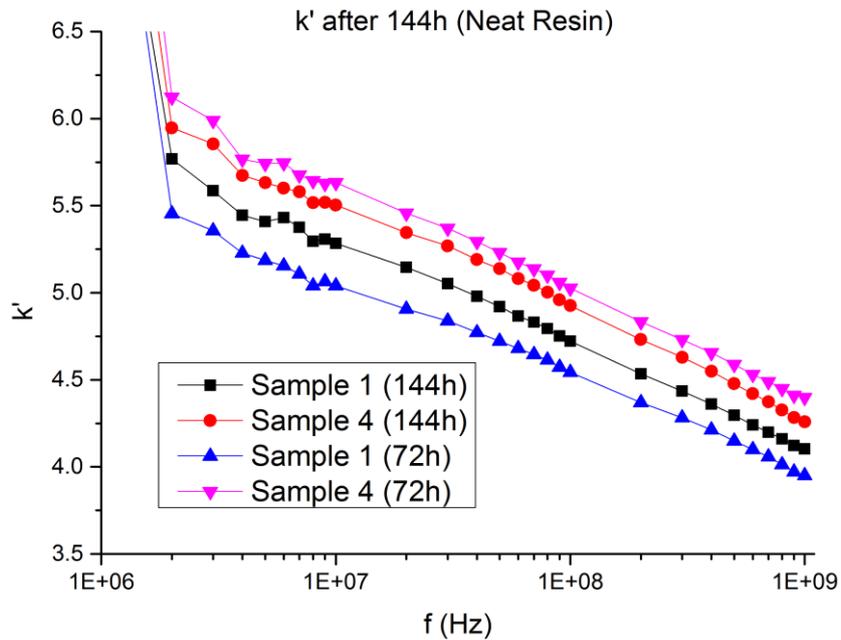


Σχήμα 24: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 72 ώρες

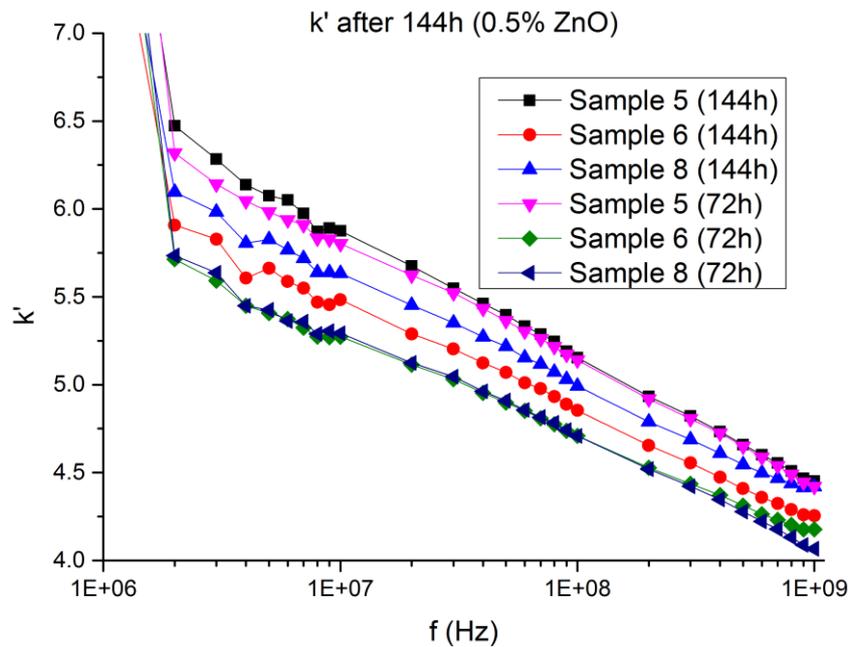


Σχήμα 25: Διηλεκτρική σταθερά για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 72 ώρες

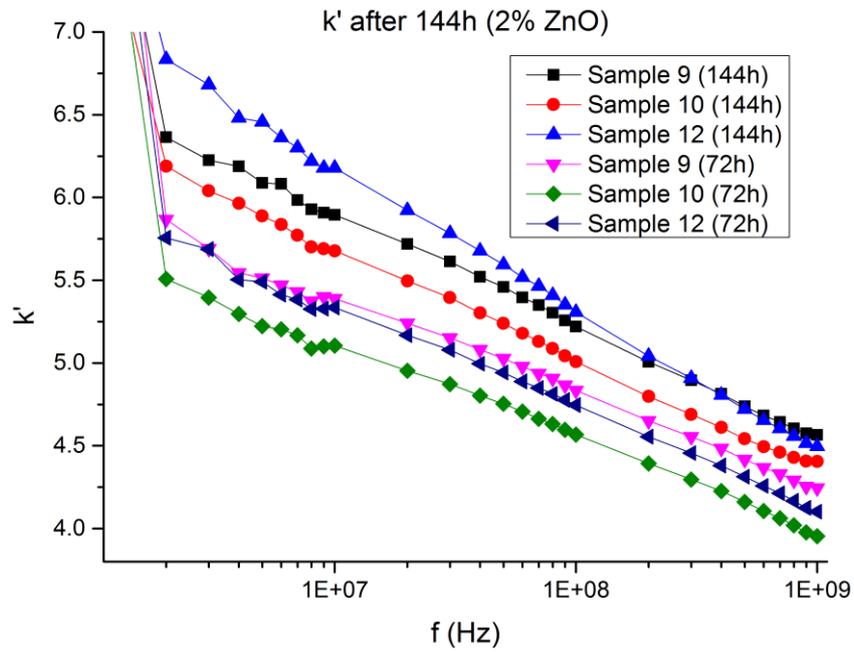
Μετά από 144 ώρες γήρανσης



Σχήμα 26: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 144 ώρες

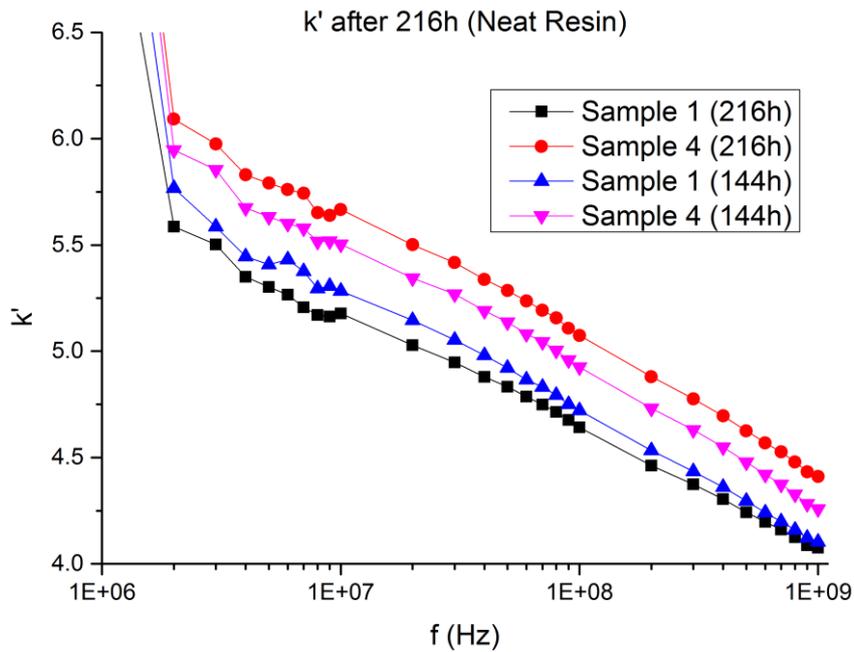


Σχήμα 27: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες

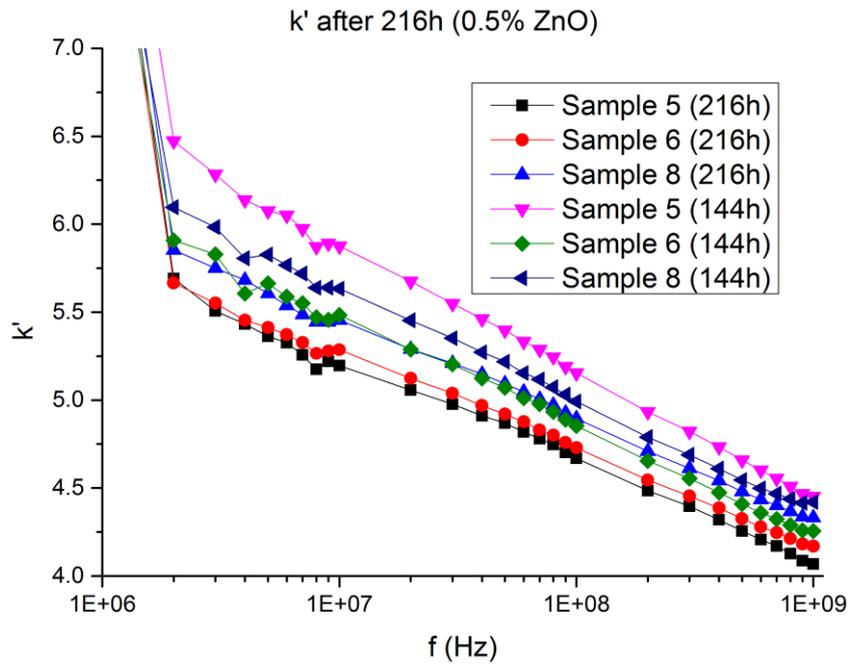


Σχήμα 28: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων με 2% ZnO μετά από 144 ώρες

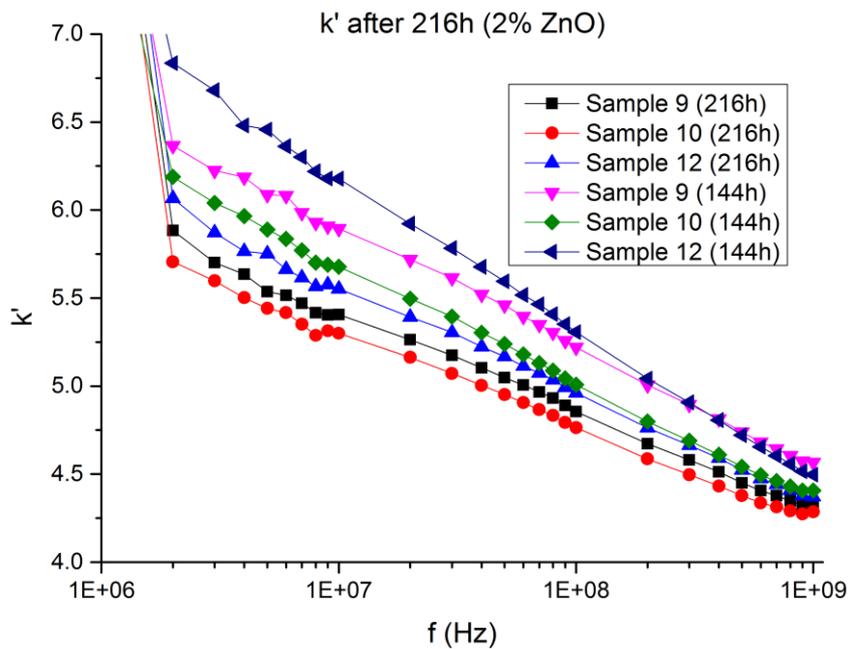
Μετά από 216 ώρες γήρανσης



Σχήμα 29: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 216 ώρες



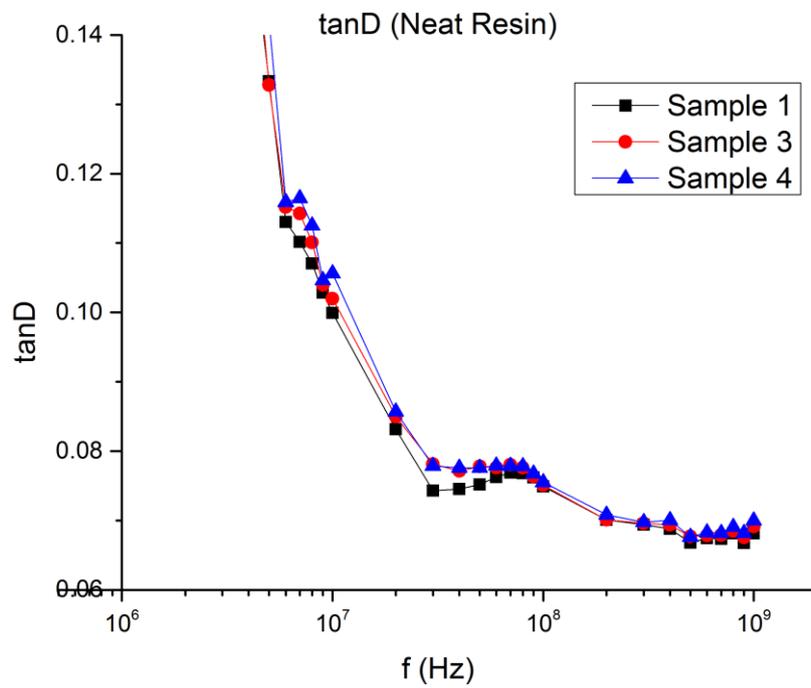
Σχήμα 30: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες



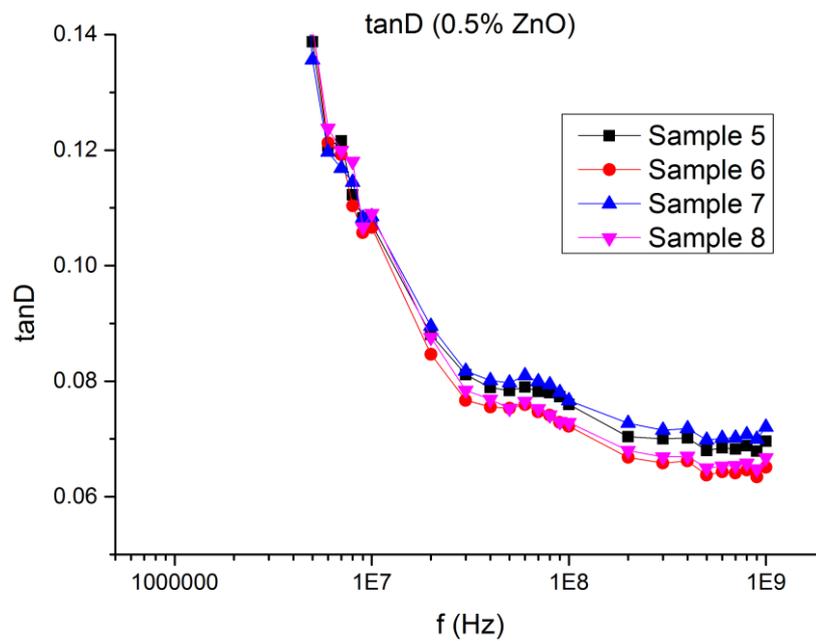
Σχήμα 31: Διηλεκτρική σταθερά δοκιμίων 2% ZnO μετά από 216 ώρες

4.2.2 Εφαπτομένη απωλειών

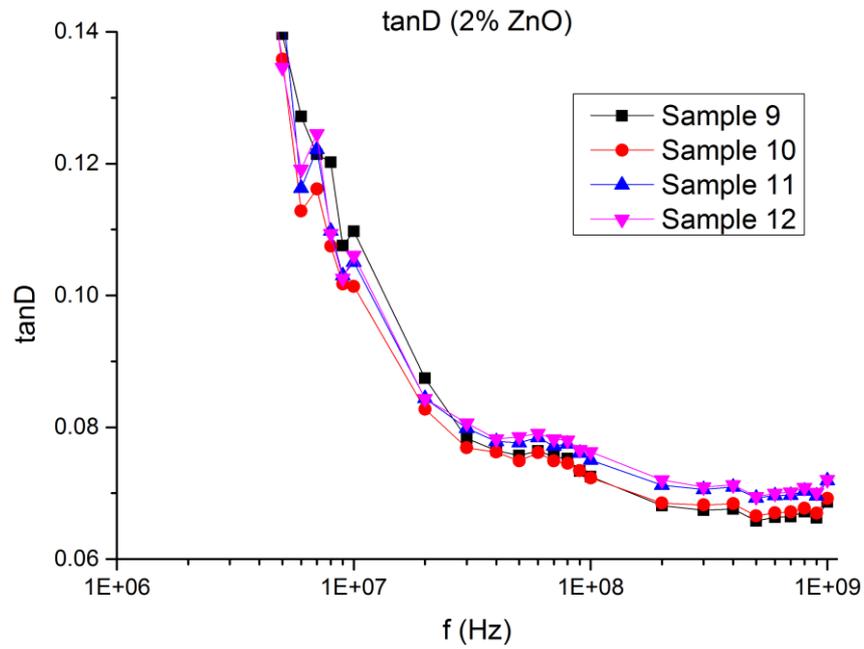
Πριν τη γήρανση



Σχήμα 32: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης

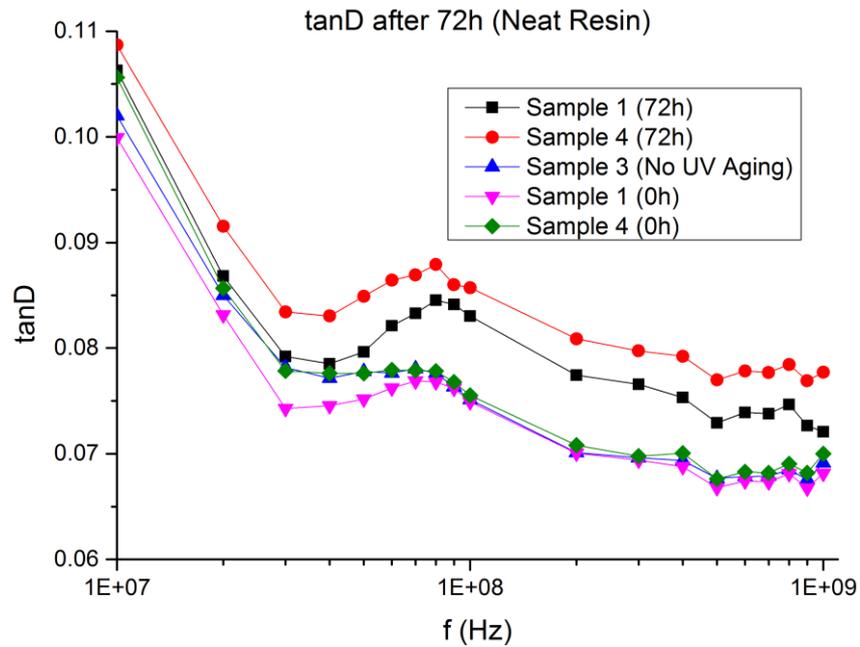


Σχήμα 33: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια με 0,5% ZnO

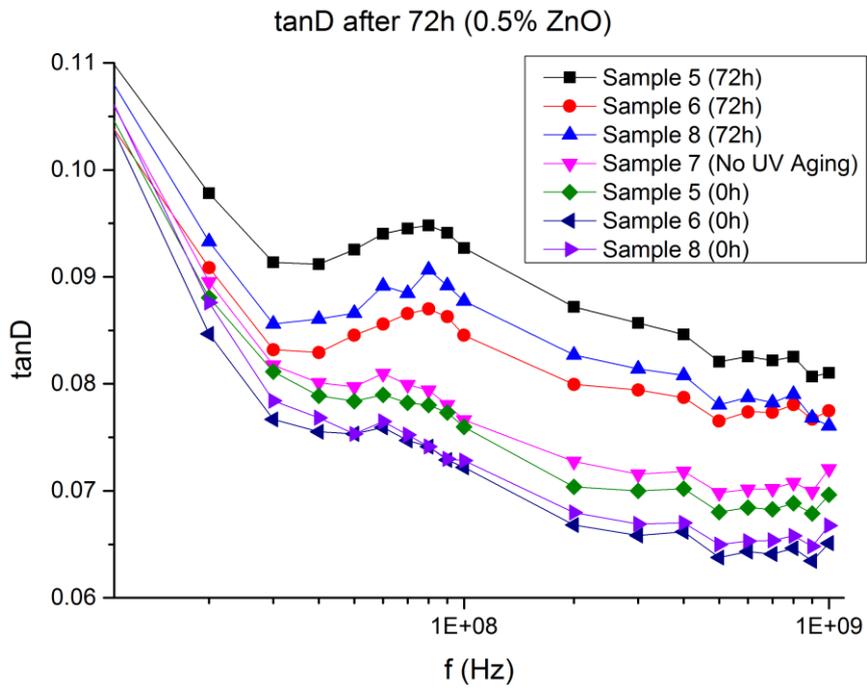


Σχήμα 34: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια με 2% ZnO πριν τη γήρανση

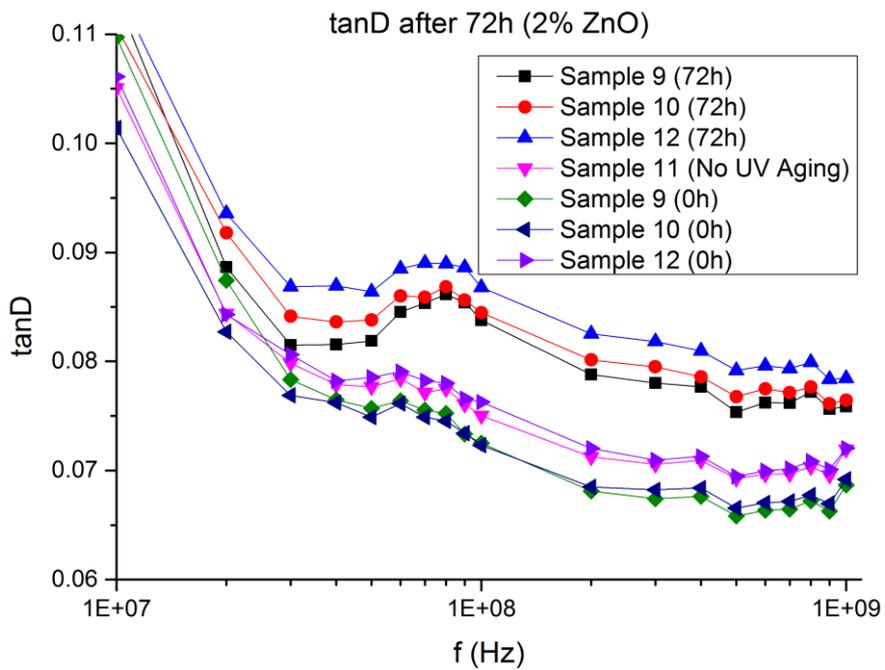
Μετά από 72 ώρες γήρανσης



Σχήμα 35: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια σκέτης ρητίνης μετά από 72 ώρες

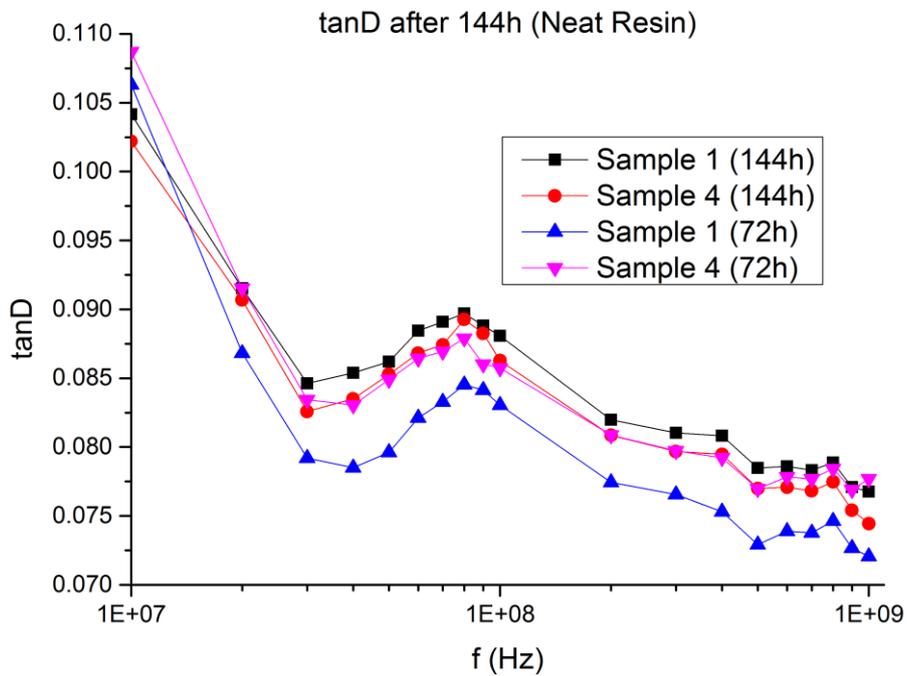


Σχήμα 36: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια 0,5% ZnO μετά από 72 ώρες

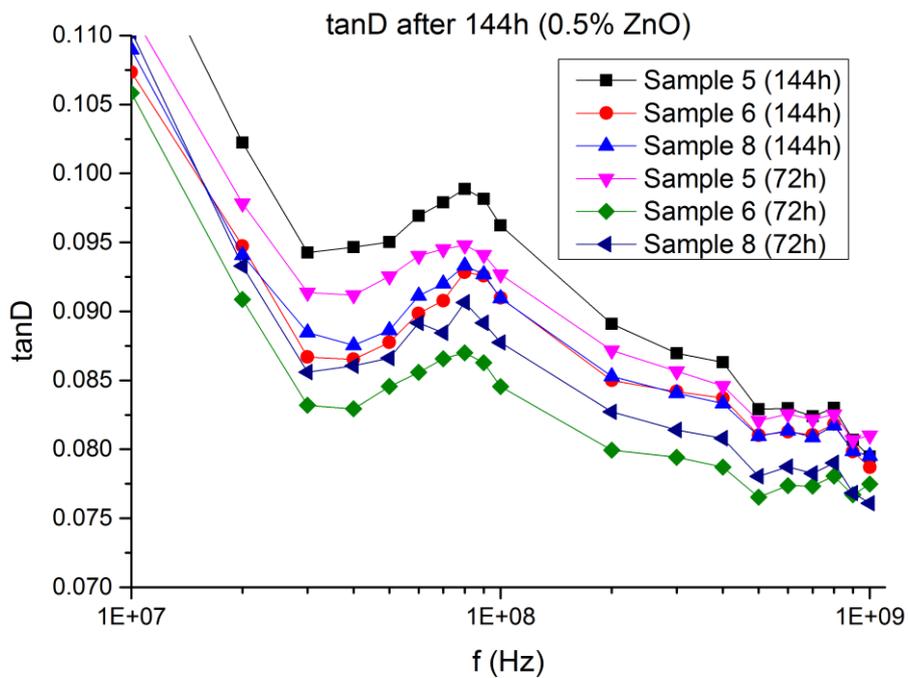


Σχήμα 37: Εφαπτομένη απωλειών για τα δοκίμια 2% ZnO μετά από 72 ώρες

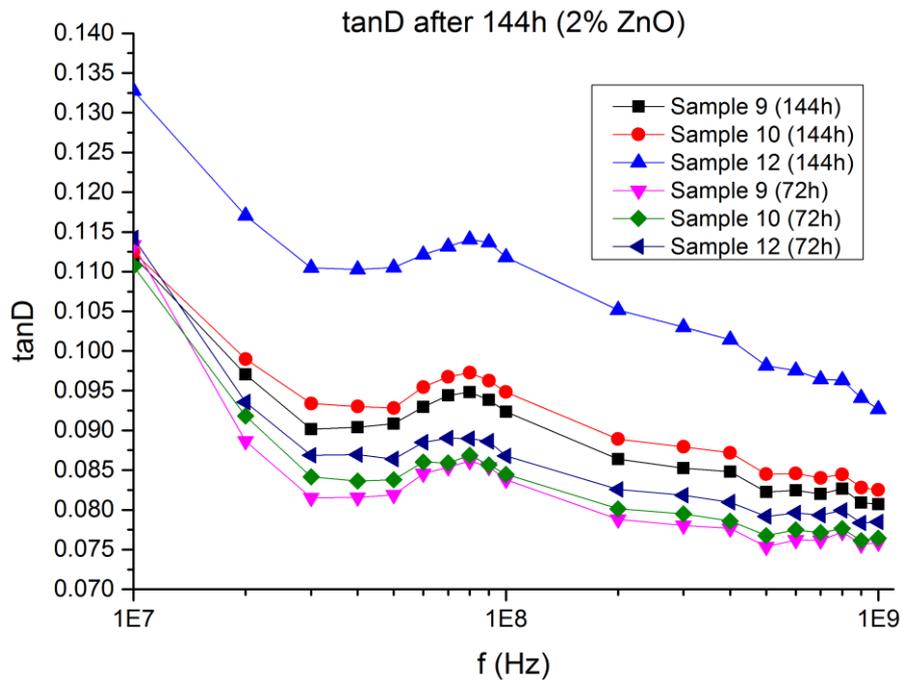
Μετά από 144 ώρες γήρανσης



Σχήμα 38: Εφαπτομένη απολειών δοκιμών σκέτης ρητίνης μετά από 144 ώρες

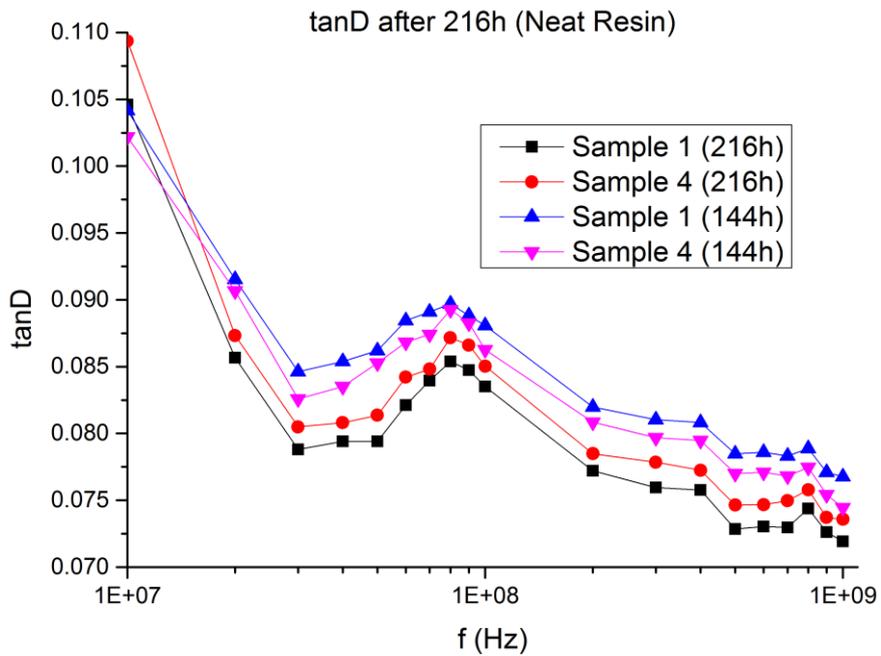


Σχήμα 39: Εφαπτομένη απολειών δοκιμών 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες

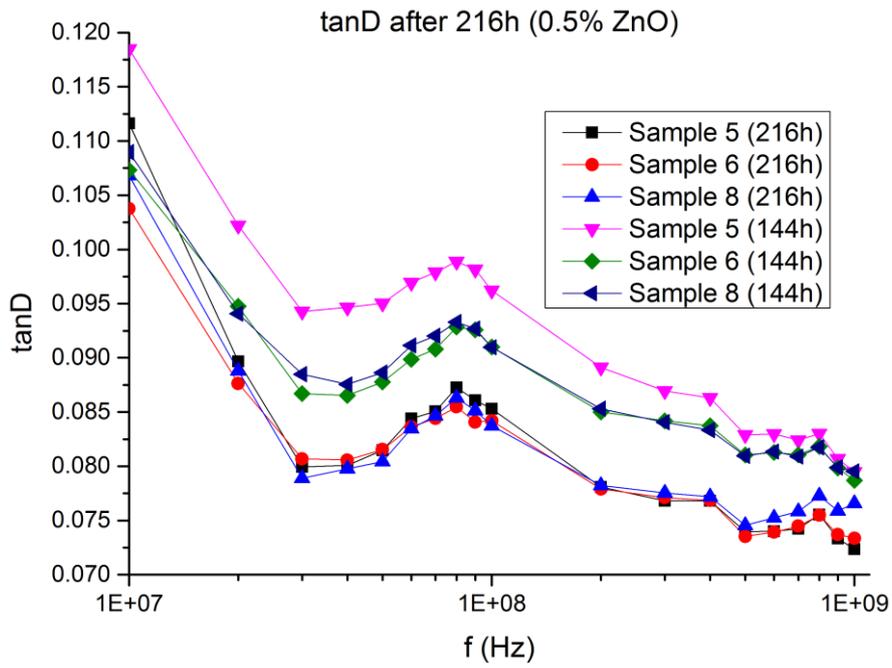


Σχήμα 40: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων 2% ZnO μετά από 144 ώρες

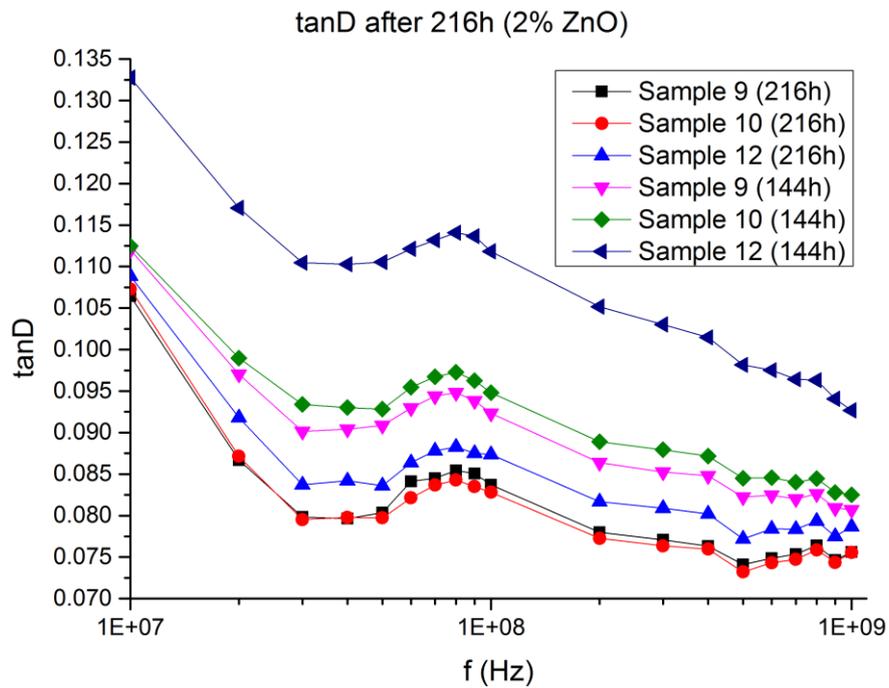
Μετά από 216 ώρες γήρανσης



Σχήμα 41: Εφαπτομένη απωλειών δοκιμίων σκέτης ρητίνης μετά από 216 ώρες



Σχήμα 42: Εφαπτομένη απολειών δοκιμίων με 0,5 % ZnO μετά από 216 ώρες



Σχήμα 43: Εφαπτομένη απολειών δοκιμίων με 2% ZnO μετά από 216 ώρες

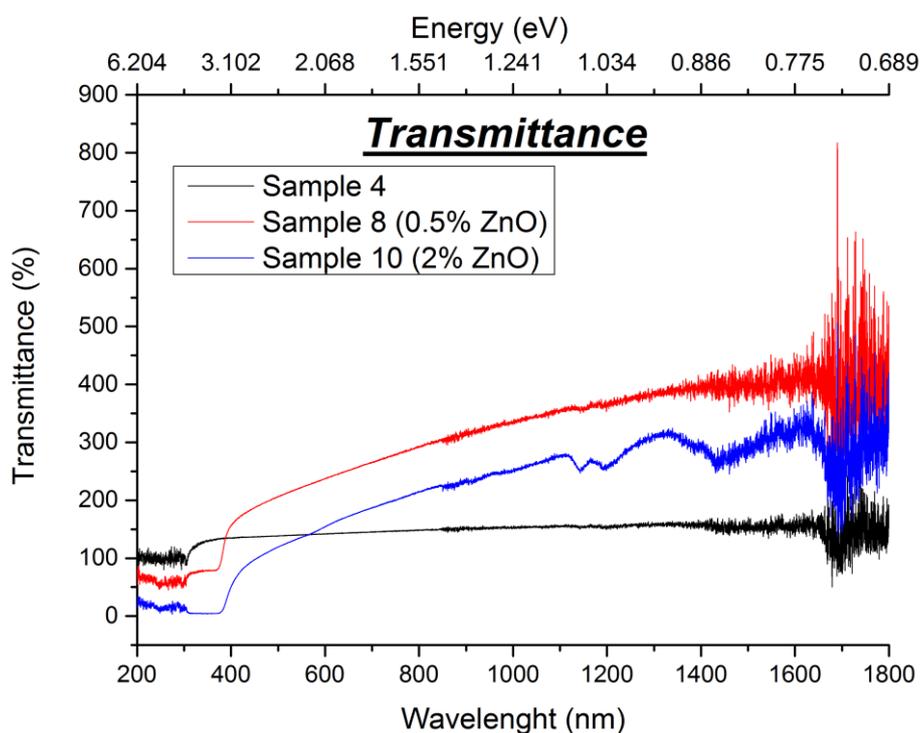
4.3 Διαγράμματα φασματοφωτομετρίας

Τα διαγράμματα διαπερατότητας και ανάκλασης, που ακολουθούν, πραγματοποιούνται με βάση το Δοκίμιο 3 και εκφράζονται ως επί τοις εκατό ποσοστό της ακτινοβολίας που το διαπερνά. Δεν απαιτείται επεξεργασία των μετρήσεων, γιατί το όργανο λαμβάνει κατευθείαν τις επιθυμητές μετρήσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ερευνάται η τιμή του ενεργειακού διακένου, καθώς και η ικανότητα του οξειδίου του ψευδαργύρου να προστατεύει από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Επειδή οι τετράδες δοκιμών εμφανίζουν φάσματα με αμελητέες διαφορές, επιλέγονται τα Δοκίμια 4, 8 και 10 για τη σύγκριση με βάση το ποσοστό πρόσμιξης.

4.3.1 Διαπερατότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

4.3.1.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τους κύκλους γήρανσης

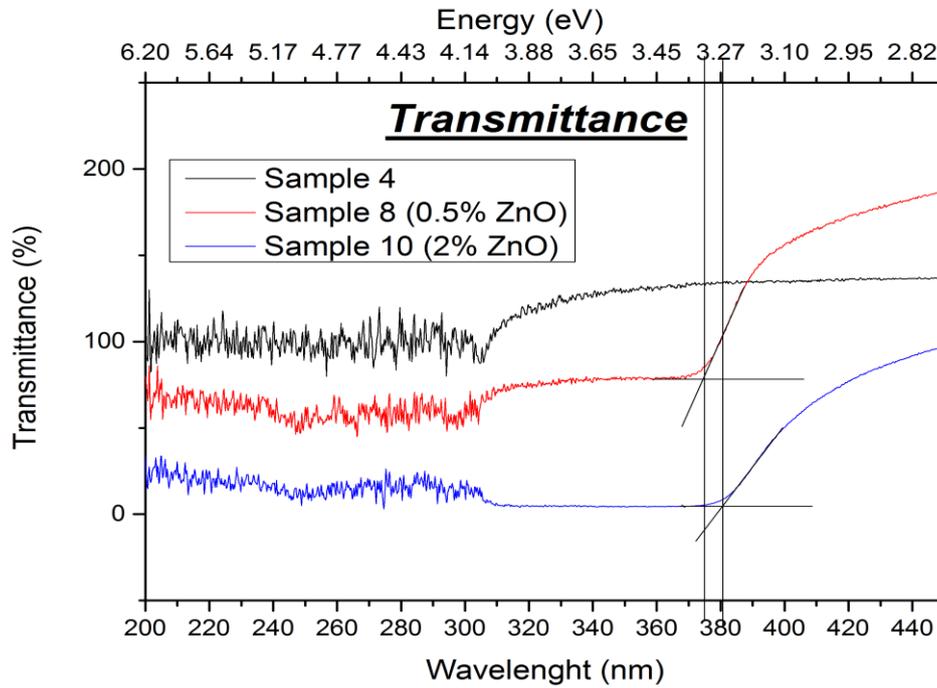
Πριν τη γήρανση



Σχήμα 44: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμών πριν τη γήρανση

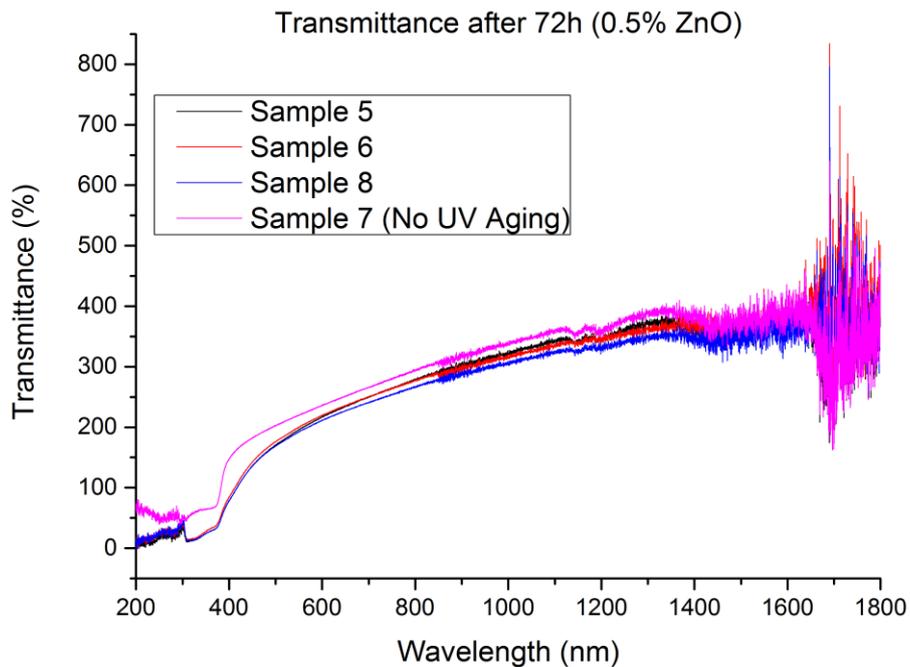
Το Σχήμα 45 παρουσιάζει το Σχήμα 44 για μικρότερο εύρος μήκους κύματος, ώστε να προσδιορισθεί το ενεργειακό διάκενο. Για το Δοκίμιο 8, που περιέχει 0,5% οξείδιο του ψευδαργύρου, το ενεργειακό διάκενο είναι στα 374,95 nm (ή 3,31 eV) ενώ για το

δοκίμιο 10, που περιέχει 2% οξείδιο του ψευδαργύρου, το ενεργειακό διάκενο είναι στα 380,72 nm (ή 3,26 eV).

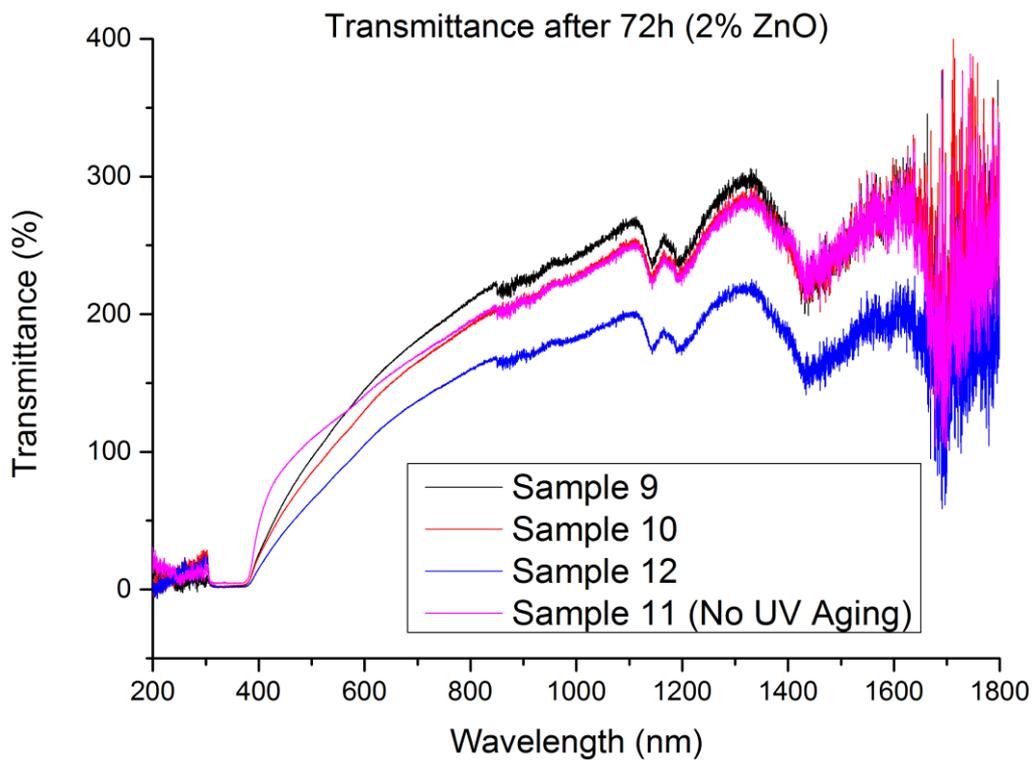


Σχήμα 45: Μεγέθυνση του Σχήματος 44 και υπολογισμός ενεργειακού διακένου

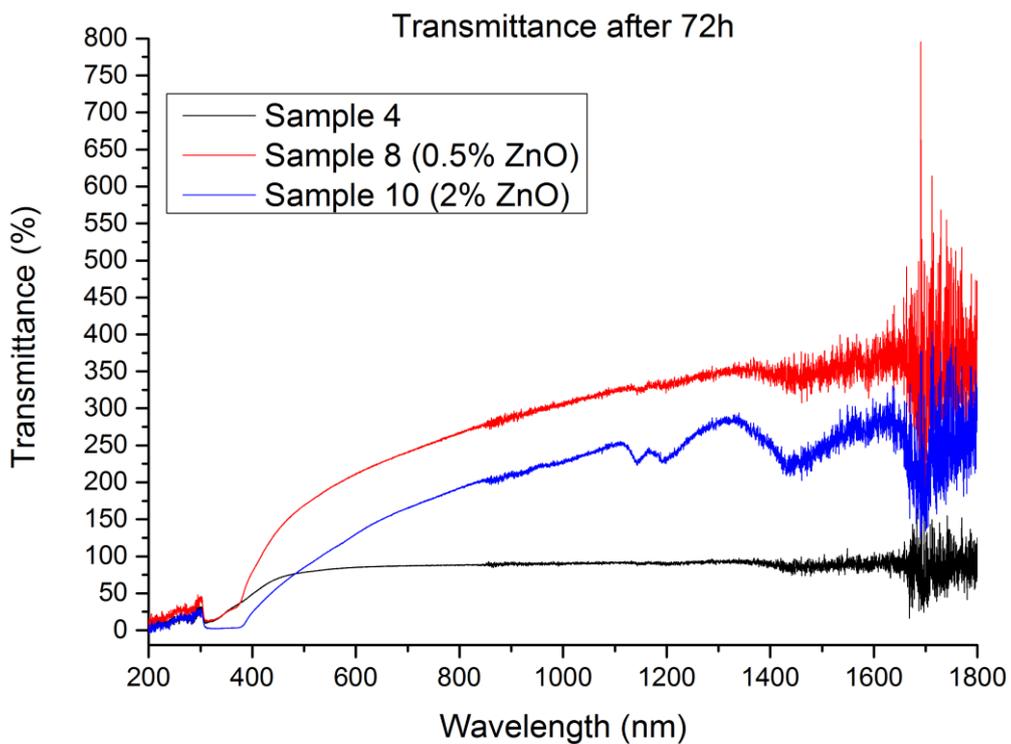
Μετά από 72 ώρες γήρανσης



Σχήμα 46: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από γήρανση 72 ωρών

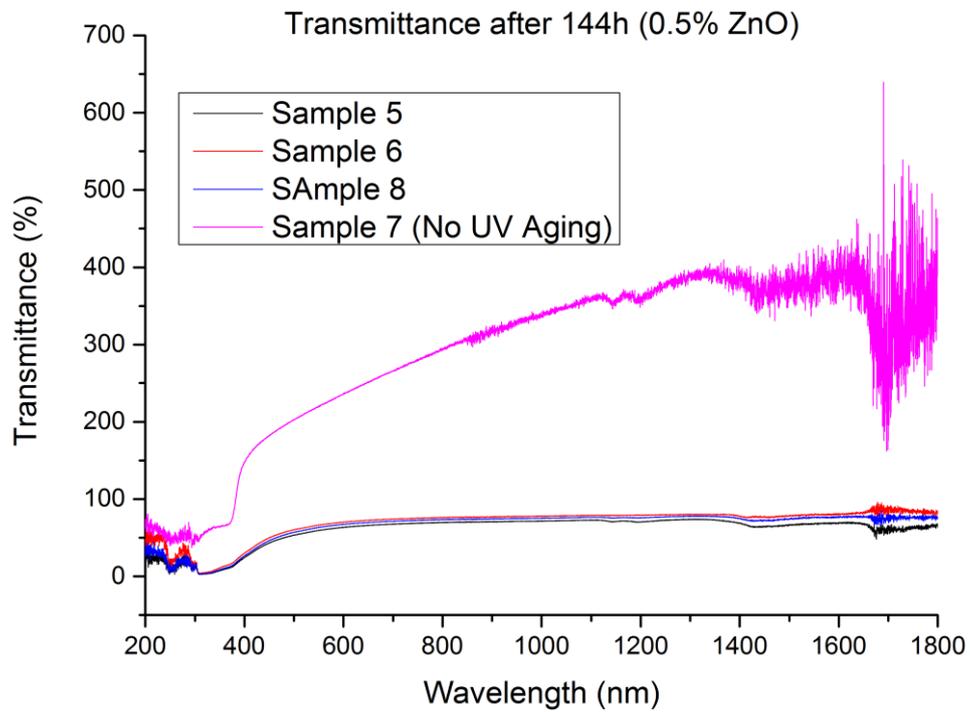


Σχήμα 47: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από γήρανση 72 ωρών

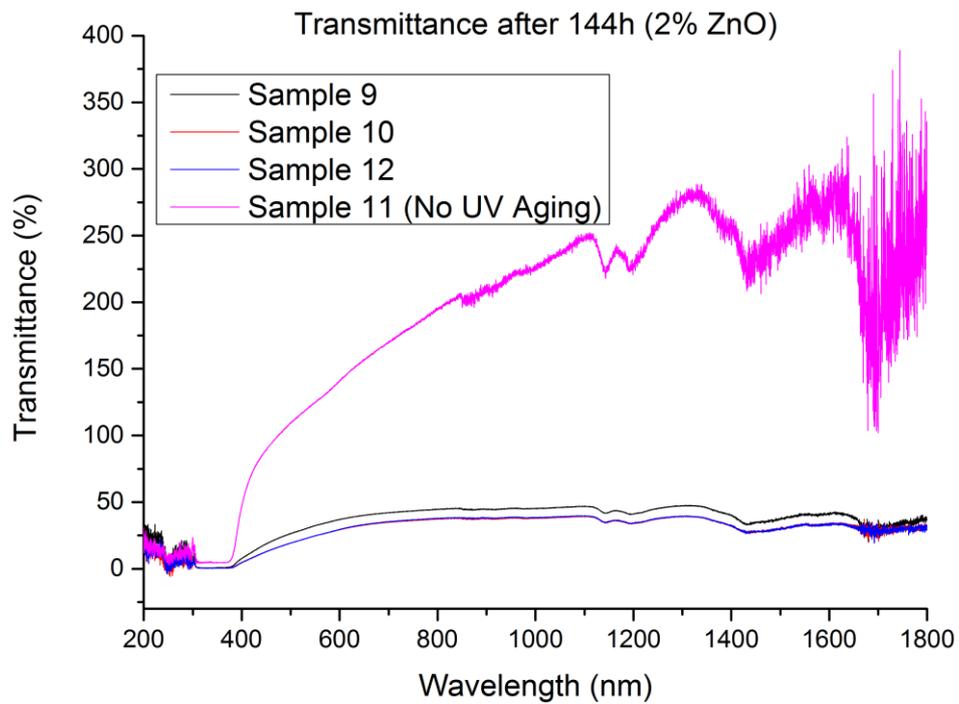


Σχήμα 48: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από γήρανση 72 ωρών

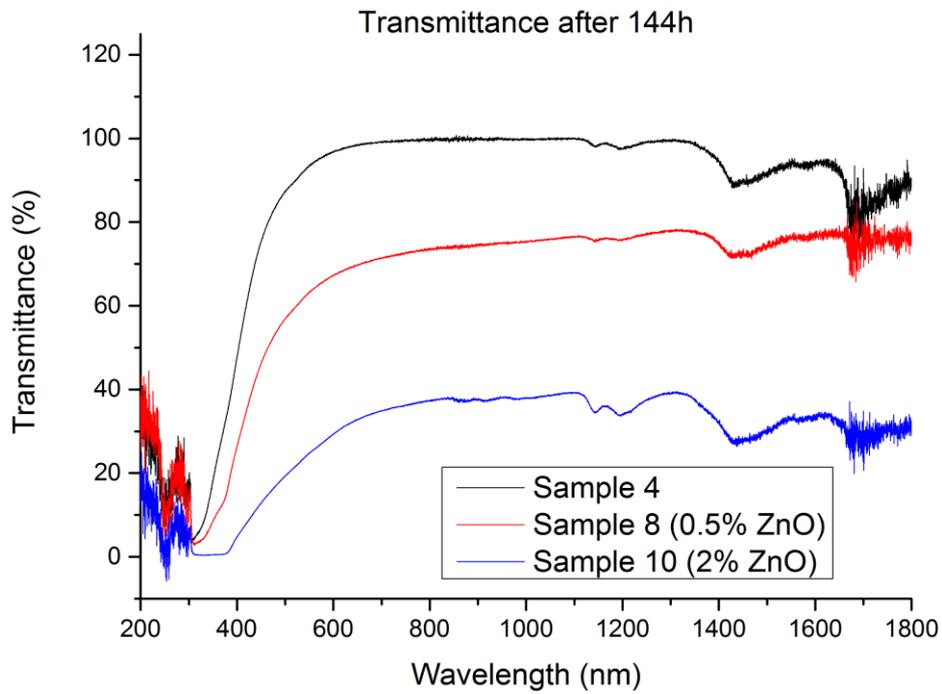
Μετά από 144 ώρες γήρανσης



Σχήμα 49: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες γήρανσης

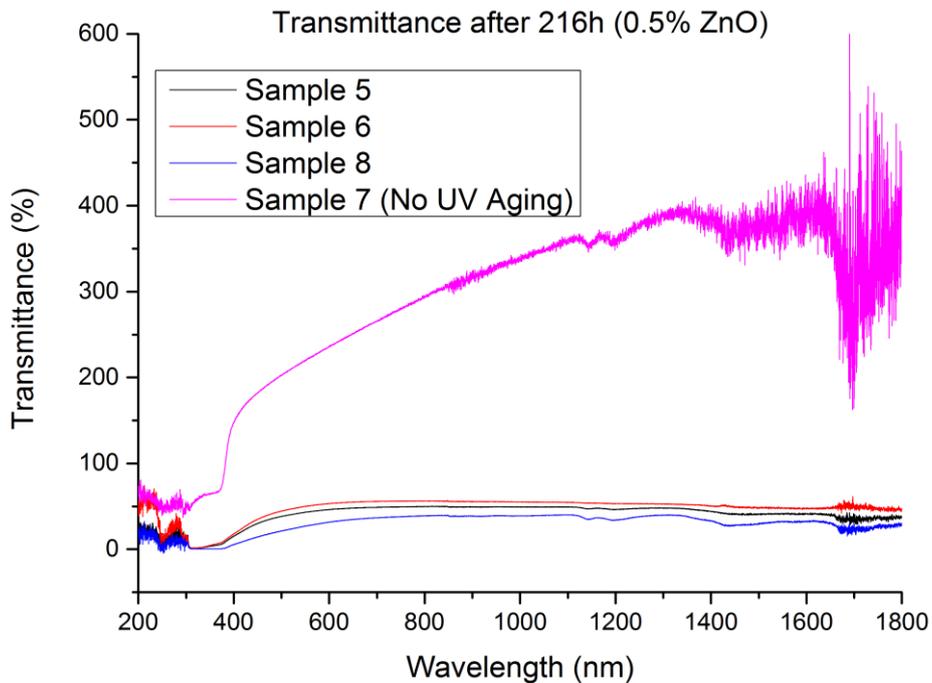


Σχήμα 50: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 144 ώρες γήρανσης

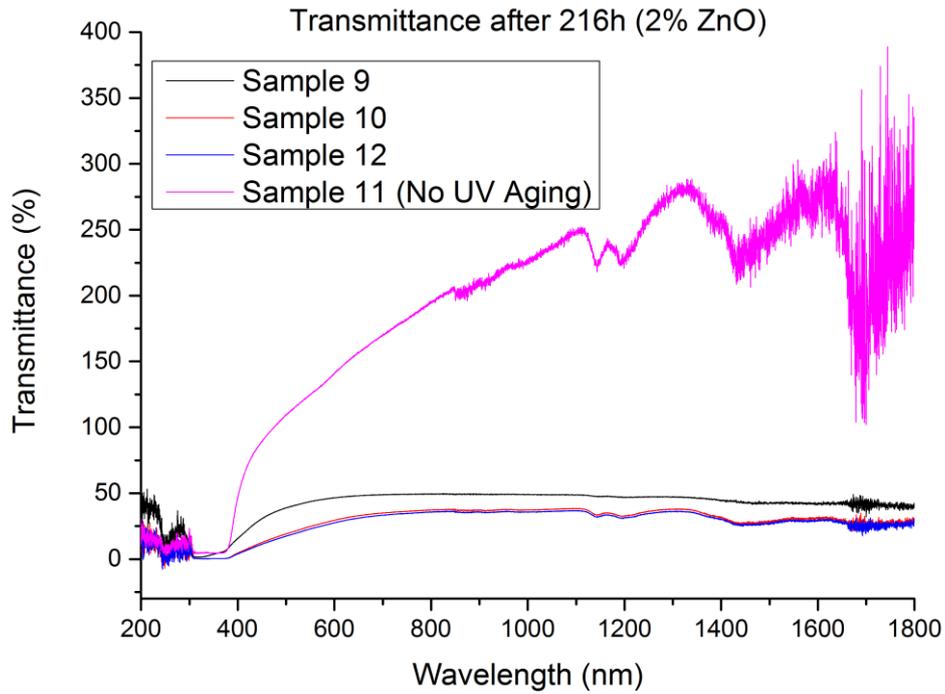


Σχήμα 51: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 144 ώρες γήρανσης

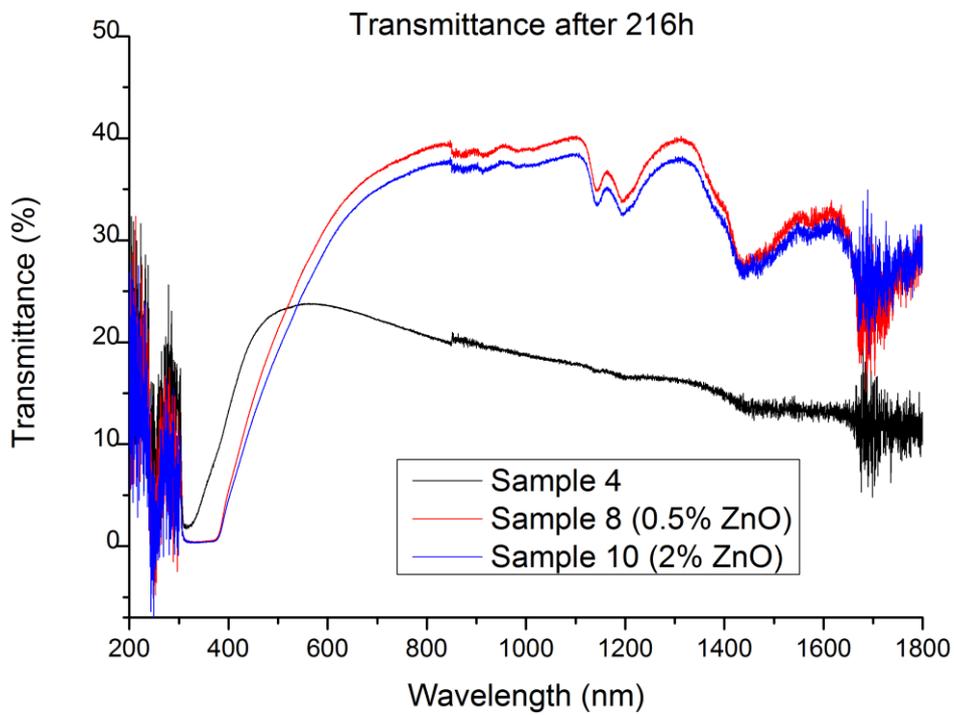
Μετά από 216 ώρες γήρανσης



Σχήμα 52: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες γήρανσης

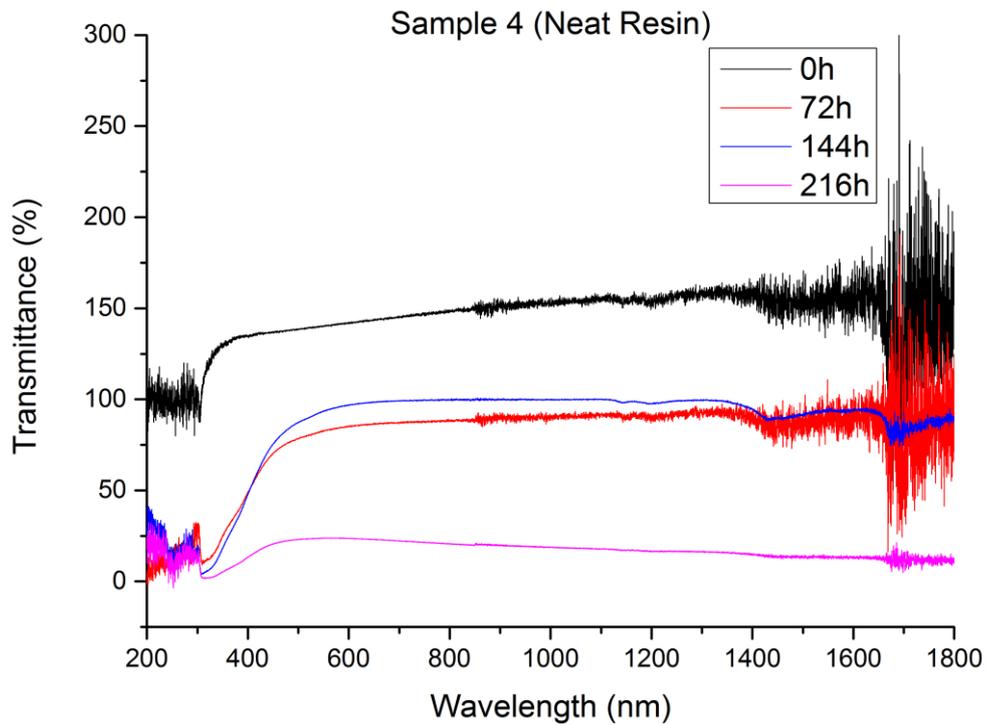


Σχήμα 53: Διαπερατότητα για τα δοκίμια με 2% ZnO μετά από 216 ώρες γήρανσης

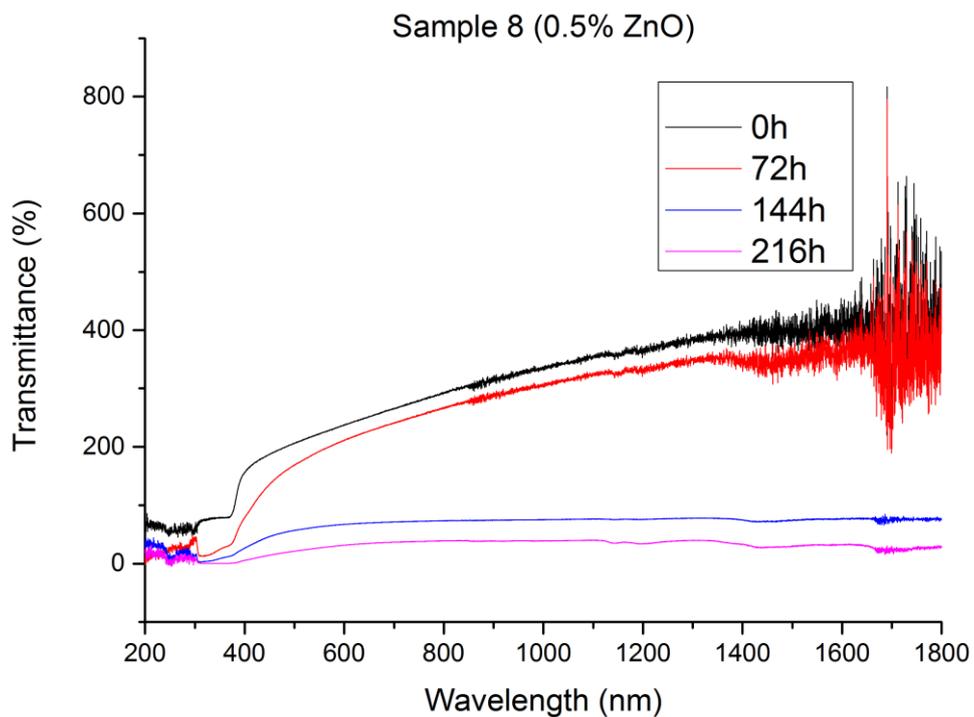


Σχήμα 54: Διαπερατότητα για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 216 ώρες γήρανσης

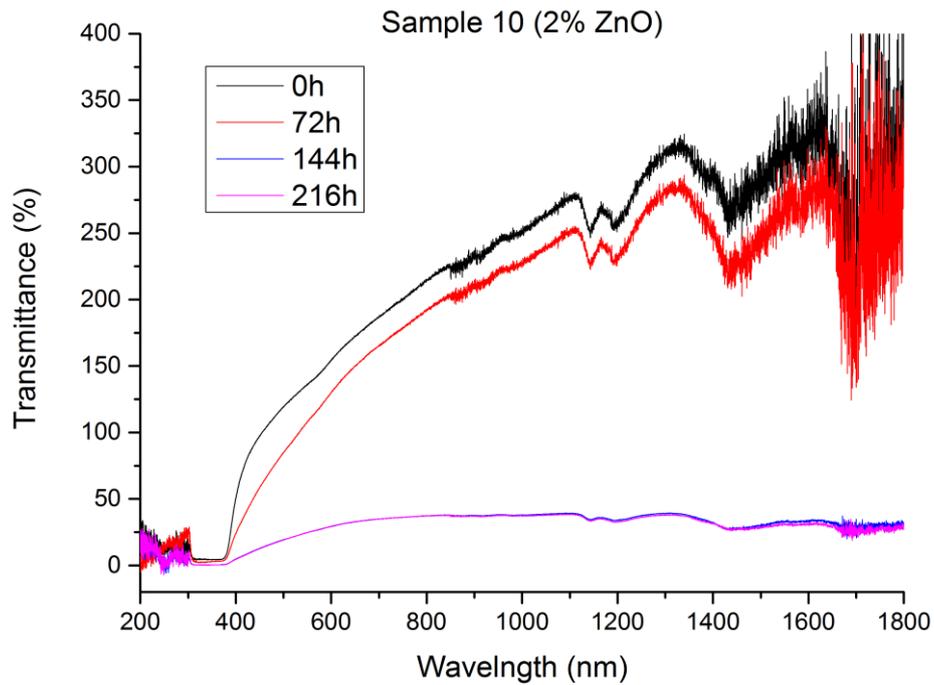
4.3.1.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ψευδαργύρου



Σχήμα 55: Διαπερατότητα Δοκιμίου 4 (Σκέτη ρητίνη) σε όλους τους κύκλους γήρανσης



Σχήμα 56: Διαπερατότητα Δοκιμίου 8 (Ρητίνη και 0,5% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης

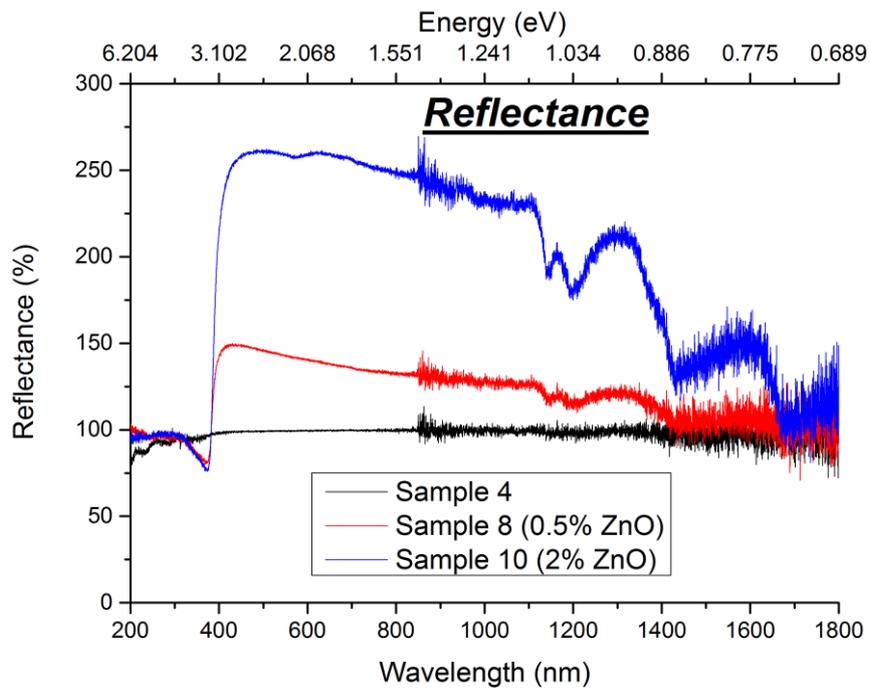


Σχήμα 57: Διαπερατότητα Δοκιμίου 10 (Ρητίνη και 2% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης

4.3.2 Ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

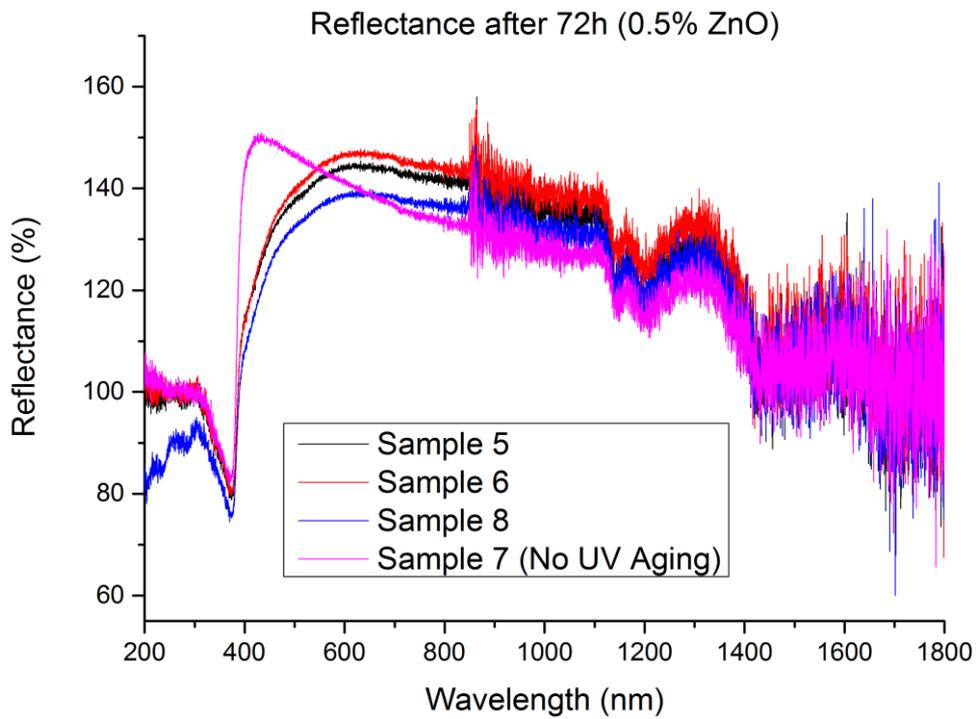
4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τους κύκλους γήρανσης

Πριν τη γήρανση

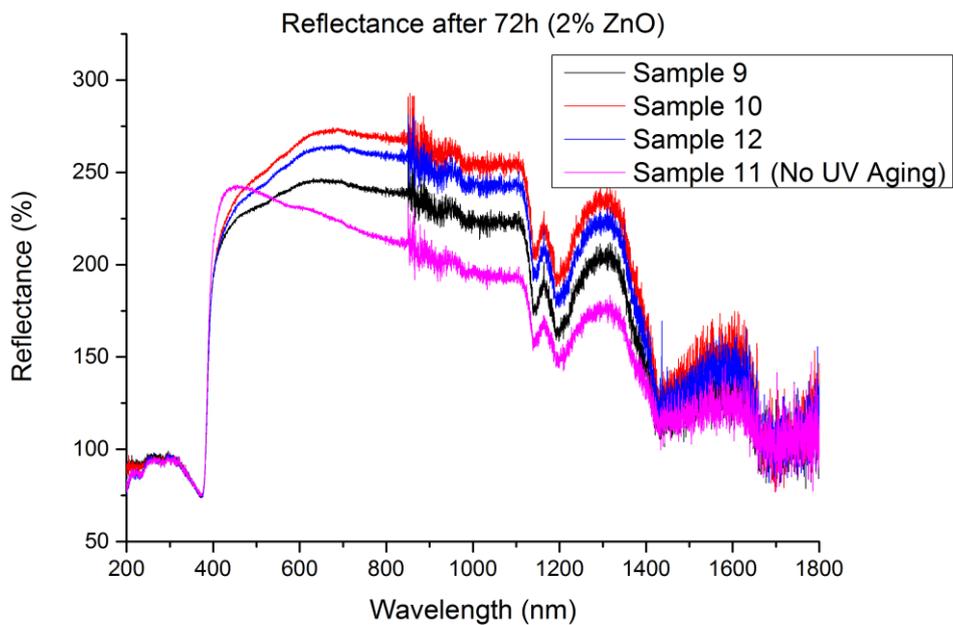


Σχήμα 58: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων πριν τη γήρανση

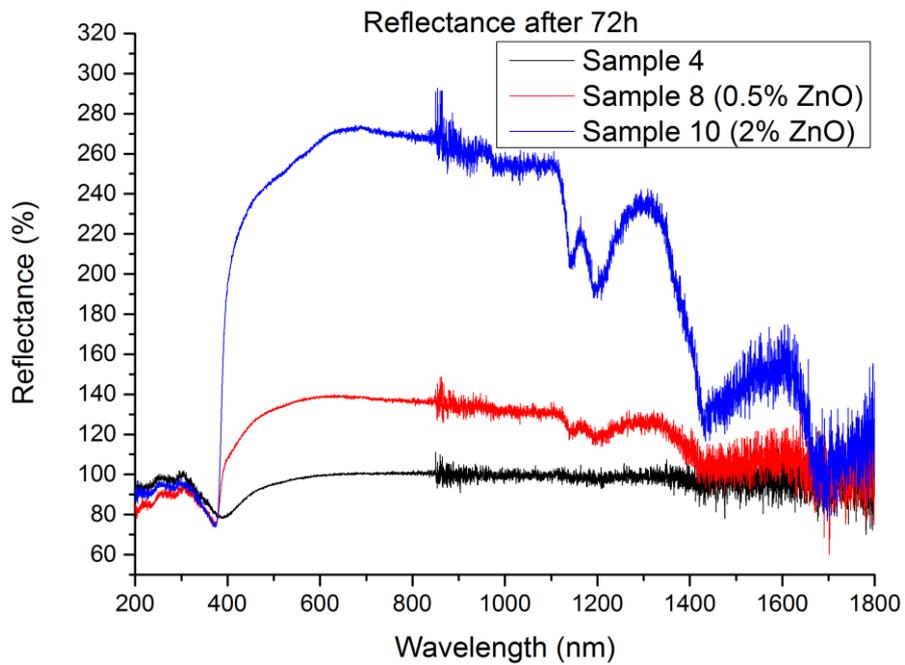
Μετά από 72 ώρες γήρανσης



Σχήμα 59: Ανάκλαση δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά τις 72 ώρες

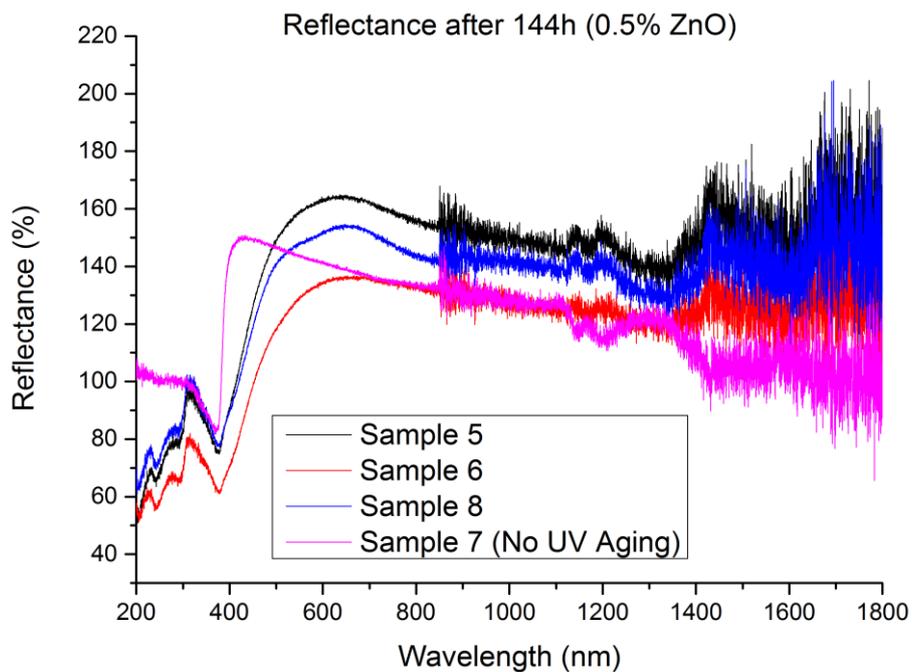


Σχήμα 60: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 72 ώρες

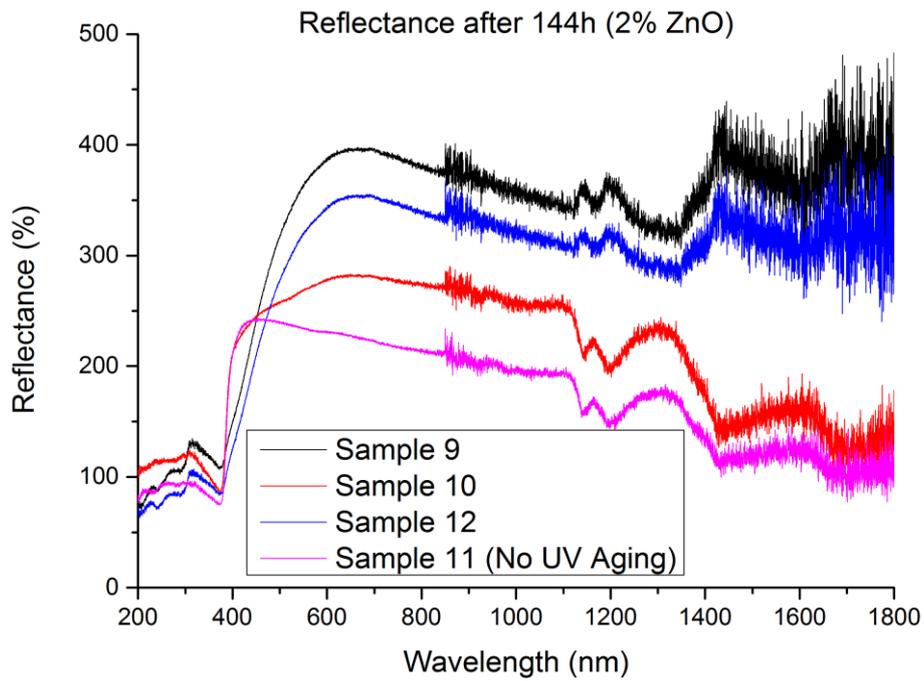


Σχήμα 61: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά τις 72 ώρες

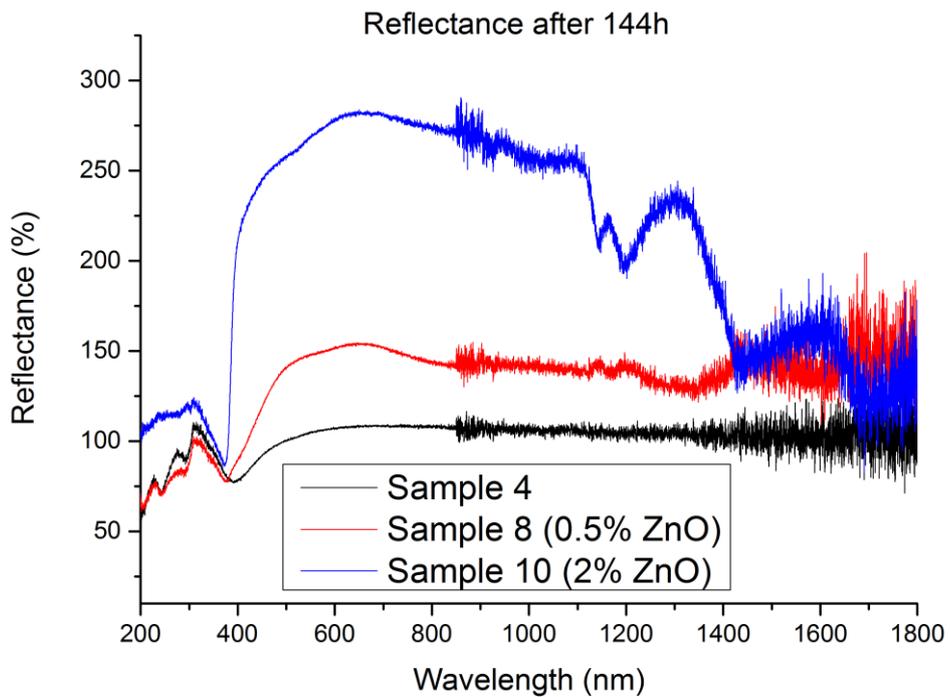
Μετά από 144 ώρες γήρανσης



Σχήμα 62: Ανάκλαση των δοκιμίων με 0,5% ZnO μετά από 144 ώρες

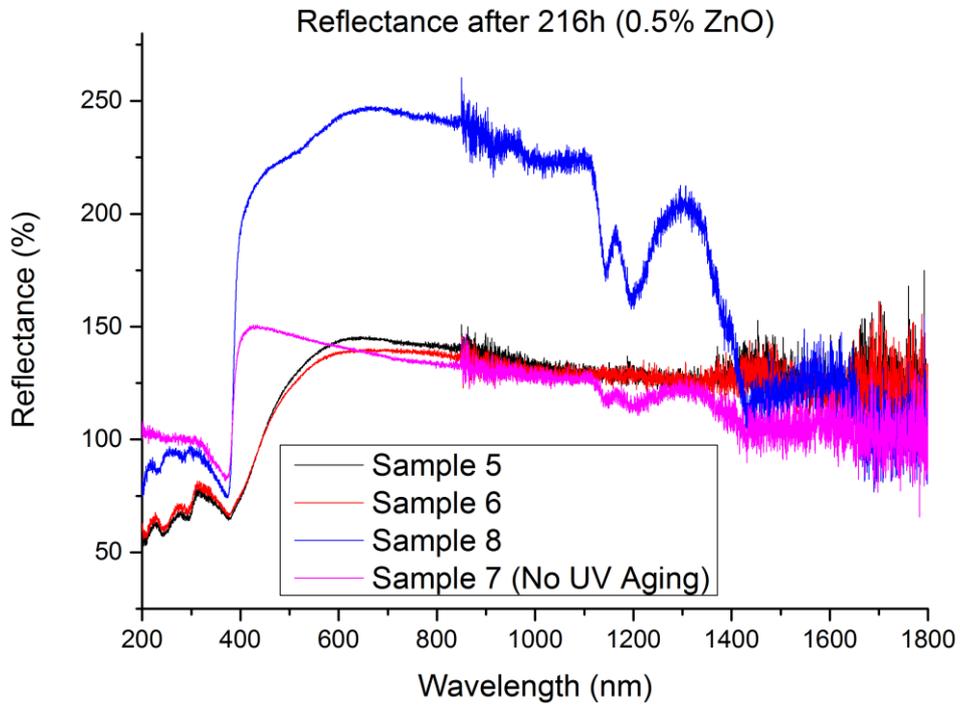


Σχήμα 63: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 144 ώρες

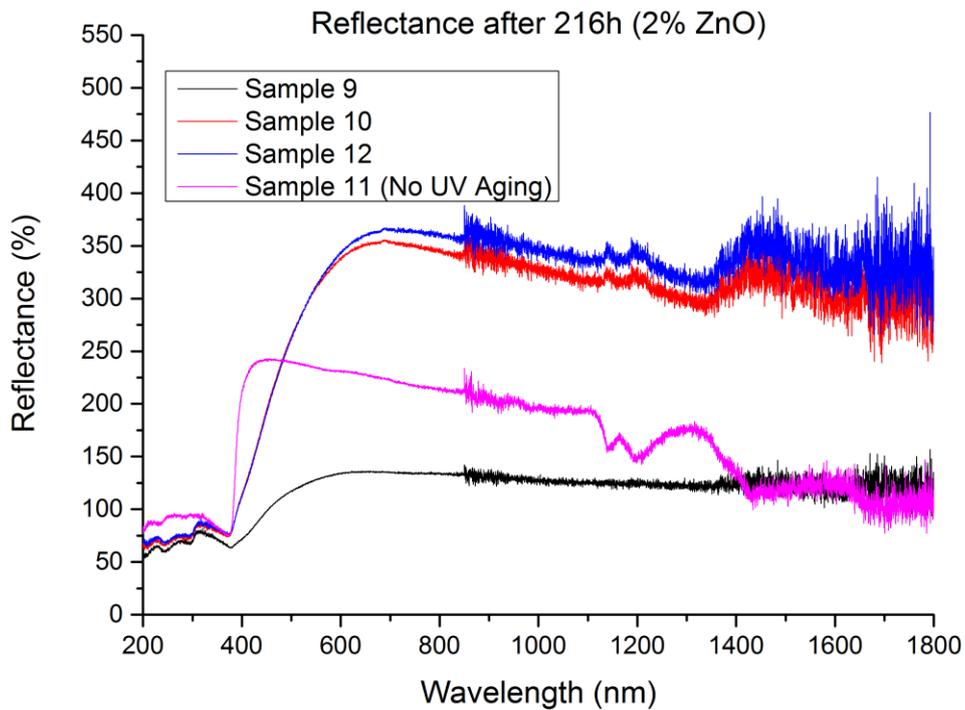


Σχήμα 64: Ανάκλαση για όλους τους τύπους δοκιμίων μετά από 144 ώρες

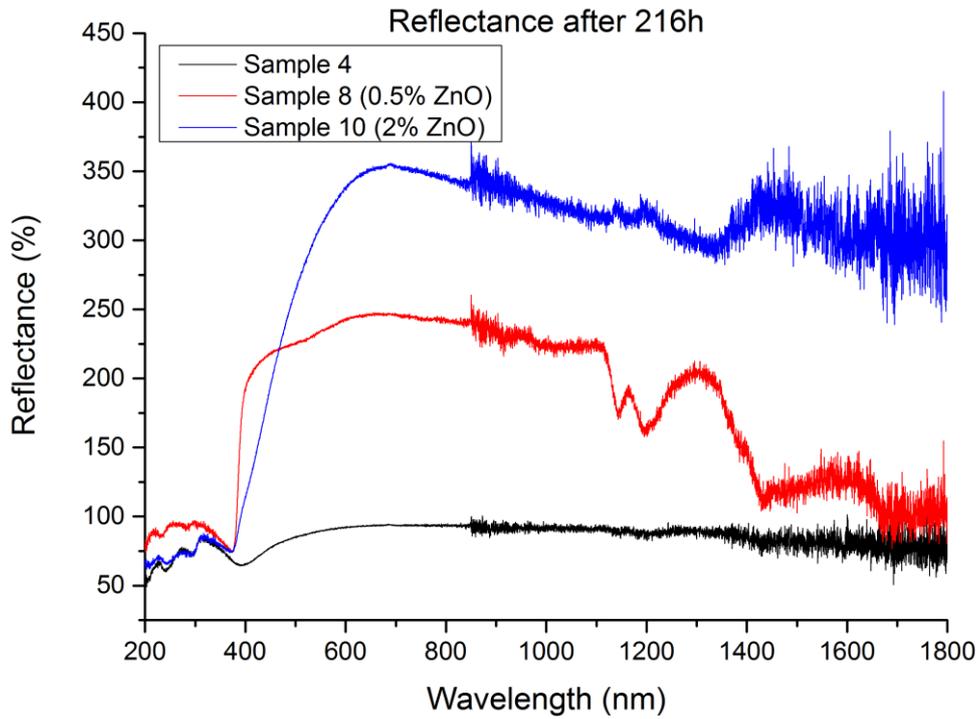
Μετά από 216 ώρες γήρανσης



Σχήμα 65: Ανάκλαση δοκιμίων 0,5% ZnO μετά από 216 ώρες

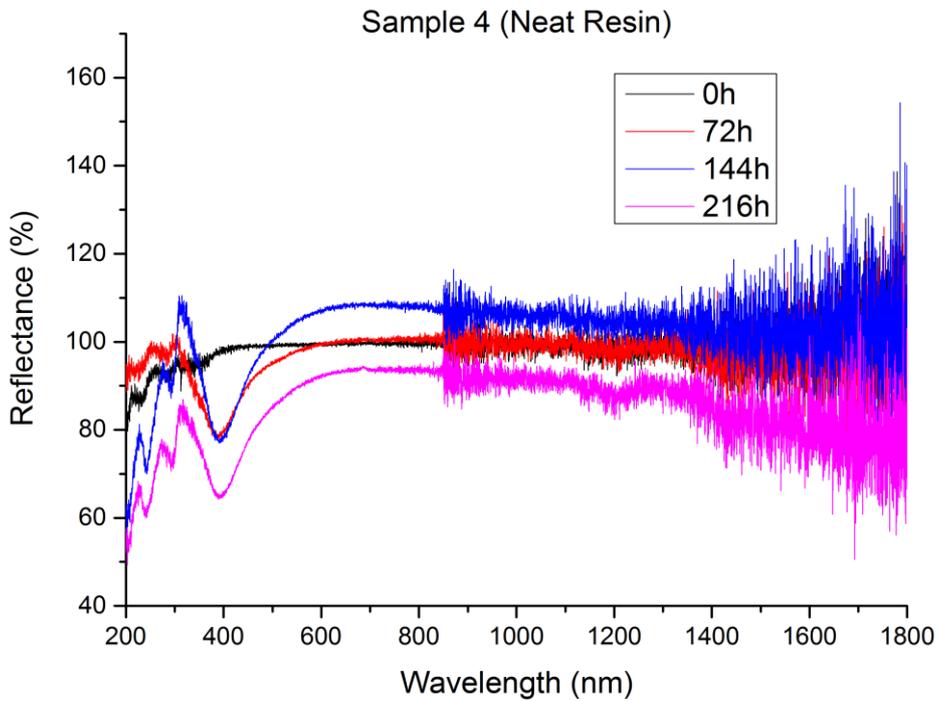


Σχήμα 66: Ανάκλαση δοκιμίων 2% ZnO μετά από 216 ώρες

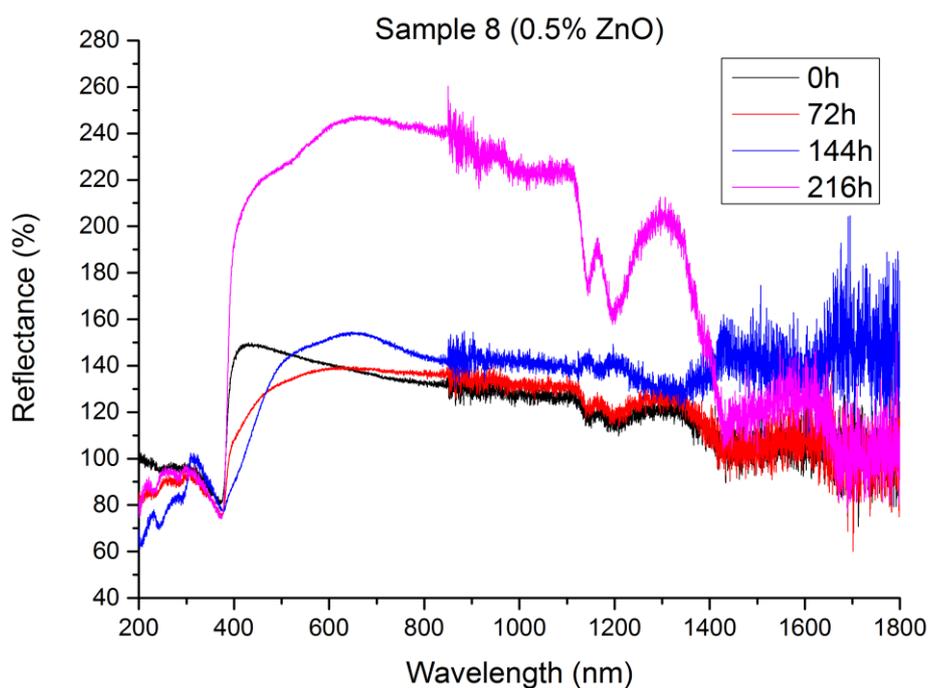


Σχήμα 67: Ανάκλαση όλων των τύπων δοκιμίων μετά από 216 ώρες

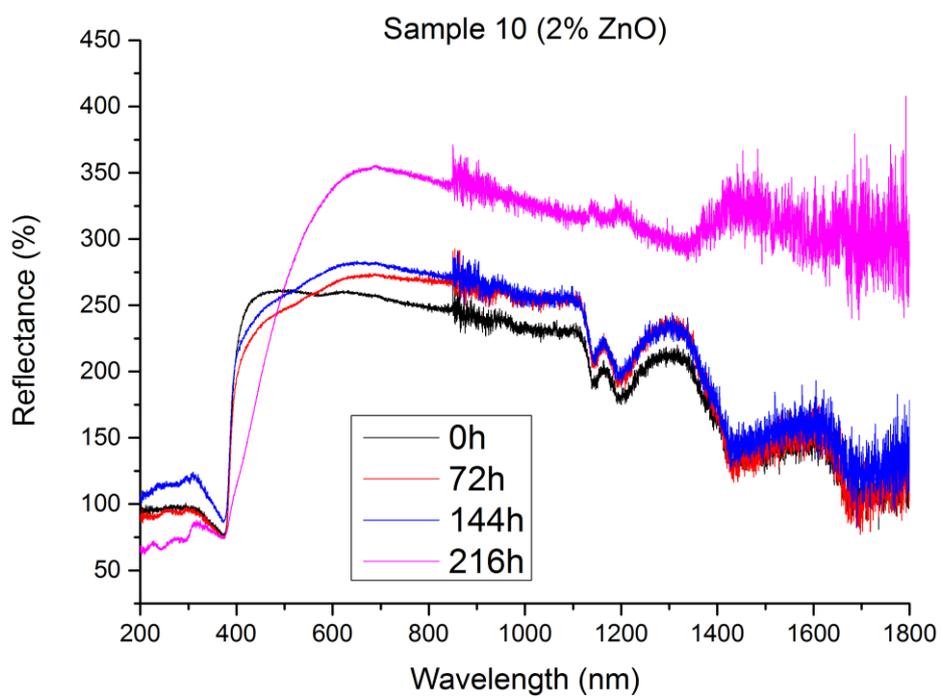
4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ψευδαργύρου



Σχήμα 68: Ανάκλαση Δοκιμίου 4 (Σκέτη Ρητίνη) σε όλους τους κύκλους γήρανσης



Σχήμα 69: Ανάκλαση Δοκιμίου 8 (Ρητίνη και 0,5% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης



Σχήμα 70: Ανάκλαση Δοκιμίου 10 (Ρητίνη και 2% ZnO) σε όλους τους κύκλους γήρανσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα σημαντικό κλάδο της επιστήμης των υλικών, ο οποίος ερευνάται συστηματικά τα τελευταία χρόνια, καθώς υπάρχει η ανάγκη για την ανακάλυψη νέων υλικών με άριστες ιδιότητες και αυξημένη απόδοση. Οι άριστες ιδιότητες δε συνυπάρχουν όλες μαζί σε κάθε σύνθετο υλικό, αλλά εξαρτώνται από το πεδίο εφαρμογής τους. Ορισμένες από αυτές είναι η υψηλή αντοχή, το μικρό βάρος, η αντίσταση στη διάβρωση και το χαμηλό κόστος. Τα σύνθετα υλικά απαρτίζονται συνήθως από δύο υλικά, αλλά είναι εφικτή η ανάμειξη περισσότερων των δύο συστατικών, αν κριθεί σκόπιμο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Μεταξύ της μήτρας και της φάσης ενίσχυσης υπάρχει πάντα μία διαχωριστική επιφάνεια, η οποία συμβάλλει στον καθορισμό των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών.

Κατά το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής παρήχθησαν σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης με πληρωτικό μέσο νανολουλούδια οξειδίου του ψευδαργύρου. Το οξείδιο του ψευδαργύρου επιλέγεται, γιατί είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο ενεργειακό διάκενο 3,37 eV και πολύ καλές οπτικές ιδιότητες. Τα παραγόμενα δοκίμια αποτελούνται από σκέτη ρητίνη, από ρητίνη με 0,5% οξείδιο του ψευδαργύρου και από ρητίνη με 2% οξείδιο του ψευδαργύρου. Επίσης, τα δοκίμια υποβλήθησαν σε κύκλους περιβαλλοντικής γήρανσης. Ζητούμενο της πειραματικής διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των διηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων.

Όσον αφορά τις διηλεκτρικές μετρήσεις στις υψηλές συχνότητες (1 MHz – 1 GHz) με βάση τα διαγράμματα του Κεφαλαίου 4 συμπεραίνεται ότι:

- Η διηλεκτρική σταθερά για τα Δοκίμια 5 – 8 (0,5% ZnO) μειώνεται συγκριτικά με τα Δοκίμια 1 – 4 (Σκέτη ρητίνη) και αυξάνεται λίγο για τα Δοκίμια 9 – 12 (2% ZnO) πάλι συγκριτικά με τα Δοκίμια 1 – 4.
- Η διηλεκτρική σταθερά για τα Δοκίμια 1 – 4 δεν εμφανίζει ενιαία συμπεριφορά. Για τα Δοκίμια 5 – 8 και 9 – 12 στις 72 ώρες γήρανσης παρατηρείται αμελητέα αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς. Για το λόγο αυτό θεωρείται η τιμή της σταθερή. Στις 144 ώρες αυξάνεται ξεκάθαρα η διηλεκτρική σταθερά και έπειτα στις 216 ώρες υπάρχει μείωση. Εκεί η

διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με την αρχική της κατάσταση είναι ελαφρώς αυξημένη.

- Η διηλεκτρική σταθερά μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας σε όλα τα διαγράμματα. Αυτό συμβαίνει λόγω ύπαρξης φαινομένων χαλάρωσης, δηλαδή μείωση της πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Η εφαπτομένη απωλειών μεταβάλλεται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ψευδαργύρου.
- Η εφαπτομένη απωλειών μετά τις 72 ώρες γήρανσης είναι λίγο αυξημένη. Στις 144 ώρες η αύξηση της είναι πολύ μεγάλη για όλα τα δοκίμια και ειδικά για τα Δοκίμια 9, 10 και 12. Εν συνεχεία, η εφαπτομένη απωλειών μειώνεται σημαντικά και επανέρχεται περίπου στην τιμή που είχε πριν τη γήρανση.

Όσον αφορά τις μετρήσεις φασματοφωτομετρίας με βάση τα διαγράμματα του Κεφαλαίου 4 συμπεραίνεται ότι:

- Τα δοκίμια με οξείδιο του ψευδαργύρου έχουν ενεργειακό διάκενο περίπου στα 3,3 eV.
- Η αύξηση της περιεκτικότητας σε οξείδιο του ψευδαργύρου και συγκεκριμένα από 0,5% σε 2% μειώνει τη διαπερατότητα σε όλο το φάσμα μέτρησης. Ειδικά στα μήκη κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας η διαπερατότητα για τα Δοκίμια με 2% ZnO τείνει σε πολύ χαμηλές τιμές, ακόμα και κοντά στο μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει την ικανοποιητική απορρόφηση της επιβλαβούς ακτινοβολίας από το οξείδιο του ψευδαργύρου.
- Μετά τις 72 ώρες δεν παρατηρείται μεταβολή της διαπερατότητας αλλά μεγάλη μείωση καταγράφεται μετά τις 144 ώρες. Τότε, τα φάσματα των δοκιμίων με οξείδιο του ψευδαργύρου πέφτουν για πρώτη και τελευταία φορά κάτω από το φάσμα της σκέτης ρητίνης. Στις 216 ώρες παρατηρείται ουσιαστικά μία μικρή ακόμα μείωση και τα δύο φάσματα με το οξείδιο του ψευδαργύρου έρχονται πολύ κοντά.
- Η ανάκλαση αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού του οξειδίου του ψευδαργύρου.
- Η ανάκλαση παρουσιάζει μία σταθερή περίπου μορφή μέχρι τις 144 ώρες, όπου δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στα ποσοστά της. Εν συνεχεία,

παρατηρείται μία ξεκάθαρη αύξηση της ανάκλασης για τα φάσματα των δοκιμίων, που περιέχουν οξείδιο του ψευδαργύρου.

Οποσδήποτε η πειραματική διαδικασία επιδέχεται περιθώρια βελτίωσης. Αρχικά, όλα τα παραγόμενα δοκίμια πρέπει να έχουν μικρό πάχος για να μπορούν να μετρηθούν στα όργανα διηλεκτρικών μετρήσεων. Ακόμα, καλό θα ήταν η παρασκευή των δοκιμίων να πραγματοποιείται σε κλειστά καλούπια, ώστε οι επιφάνειες τους να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο παράλληλες και να μην παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις πάχους. Αυτό θα επιτρέψει τη μέτρηση των δοκιμίων στις βιομηχανικές συχνότητες (20 Hz - 1 MHz), γεγονός που θα δώσει μία ολοκληρωμένη εικόνα για τα διηλεκτρικά μεγέθη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ. Παπανικολάου και Δ. Μουζάκης, «Σύνθετα Υλικά», Αθήνα, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007
- [2] Κ. Δέρβος και Π. Βασιλείου, «Εισαγωγή στα Υλικά – Σημειώσεις 2^{ου} Εξαμήνου Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών», Αθήνα, εκδόσεις ΕΜΠ, 2002
- [3] F. Campbell, “Structural Composite Materials”, ASM International, 2010
- [4] Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, «Σύνθετα υλικά (Composites)» [Online], διαθέσιμο σε:
http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
- [5] D. Chung, “Composite Materials. Science and Applications”, Springer, 2010
- [6] Ε. Μητσούλης, «Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά», Αθήνα, εκδόσεις ΕΜΠ, 1998
- [7] K. Chawla, “Composite Materials. Science and Engineering”, Springer, 1998
- [8] Π. Πίσσης και Κ. Ράπτης, “Κεραμικά – Διηλεκτρικά”, Αθήνα, εκδόσεις ΕΜΠ, 2003
- [9] Ε. Μανωλακάκη, «Ηλεκτρικές Ιδιότητες Σύνθετων Πολυμερικών Υλικών με Αγωγή Κοκκώδη Πρόσθετα», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2002
- [10] S. Chmela, “Photo degradation of Polymers”, in *Polyfriend Advanced Bio-friendly Polymers*, Bratislava, Slovakia, 2013
- [11] J. White, “Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect”, *C. R. Chimie*, vol. 9, pp. 1396-1408, 2006
- [12] A. L. Andrady et al., “Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials”, *Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology*, vol. 46, pp. 96-103, 1998
- [13] J. Rabek, “Polymer Degradation Mechanisms and experimental methods”, *Springer*, Stocholm, 1994

- [14] E. Yousif and R. Haddad, “Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review”, *SpringerPlus*, vol. 2, no. 398, 2013
- [15] C. Klingshirn, “ZnO: Material, Physics and Applications”, *ChemPhysChem*, vol. 8, pp. 782–803, 2007
- [16] China Chemical Exchange Group, “Zinc Oxide. The products” [Online], διαθέσιμο σε: (<http://cn-zinc-oxide.com/product.htm>)
- [17] A. Umar and Y. Hahn, “Metal Oxide Nanostructures and Their Applications”, *American Scientific Publishers*, vol. 5, pp. 1–36, 2010
- [18] M. Khuili et al., “DFT Study of Physical Properties of Wurtzite, Zinc blende, and Rocksalt Phases of Zinc oxide using GGA and TB-mBJ Potential”, in *3rd International Renewable Sustainable Energy Conference*, Marrakech & Ouarzazate, Morocco, 2015
- [19] Ü. Özgür et al., “A comprehensive review of ZnO materials and devices”, *J. Appl. Phys.*, vol. 98, 2005
- [20] Z. Fan and J. Lu, “Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 5, pp. 1561–1573, 2005
- [21] V. Svetlichnyi et al., “ZnO nanoparticles obtained by pulsed laser ablation and their composite with cotton fabric: Preparation and study of antibacterial activity”, *Applied Surface Science*, vol. 372, pp. 20–29, 2016
- [22] H. Madan et al., “Facile green fabrication of nanostructure ZnO plates, bullets, flower, prismatic tip, closed pine cone: Their antibacterial, antioxidant, photoluminescent and photocatalytic properties”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 152, pp. 404–416, 2016
- [23] Κ. Δέρβος, «Φωτοβολταϊκά συστήματα. Από τη θεωρία στην πράξη», Αθήνα, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2013
- [24] Y. Zhang et al., “Enhancement of NH₃ sensing performance in flower-like ZnO nanostructures and their growth mechanism”, *Applied Surface Science*, vol. 357, pp. 31–36, 2015
- [25] J. Salla et al., “Improvement of UV resistance of wood surfaces by using ZnO nanoparticles”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 97, pp. 592-596, 2012

- [26] J. Fan, T. Li and H. Heng, “Hydrothermal growth and optical properties of ZnO Nanoflowers”, *Materials Research Express*, vol. 1, 2014
- [27] D. Rihtnesberg et al., “ZnO nanorods/nanoflowers and their applications”, in *4th IEEE International NanoElectronics Conference*, Taiwan, 2011
- [28] R. Kumar et al., “Zinc Oxide Nanostructures for NO₂ Gas–Sensor Applications: A Review”, *Nano-Micro Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 97–120, 2015
- [29] C. Dervos et al., “The energetically confined traps on a semiconductor surface as a potent energy harvester: case study for the ZnO nano-flowers”, *Mater. Res. Express*, vol. 2, 2015
- [30] R. Vinod et al., “Enhanced UV emission from ZnO nanoflowers synthesized by the hydrothermal process”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 45, 2012
- [31] K. Ding et al., “Preparation and Optical Properties of Transparent Epoxy Composites Containing ZnO Nanoparticles”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 126, pp. 734–739, 2012
- [32] S. Moussa et al., “Elaboration, structural and optical investigations of ZnO/epoxy nanocomposites”, *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 130, no. 152, 2015
- [33] W. Yang et al., “Effect of Particle Size and Dispersion on Dielectric Properties in ZnO/Epoxy Resin Composites”, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 13, no. 3, pp. 116-120, 2012
- [34] Εταιρεία Neotex, «Τεχνικό φυλλάδιο Epoxol 2874» [Online], διαθέσιμο σε: (<http://www.neotex.gr/inst/neotex/gallery//products/pdf/Epoxol%202874%20gr.pdf>)
- [35] Εταιρεία Neotex [Online], διαθέσιμο σε: (<http://www.neotex.gr/default.aspx?lang=el-GR&page=8&categ=11&prodid=91>)
- [36] Ι. Μέργος, “Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον”, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2007
- [37] Κ. Δέρβος, “Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων”, Αθήνα, εκδόσεις ΕΜΠ, 2011
- [38] W. Callister, “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Αθήνα, εκδόσεις Τζιόλα, 2004
- [39] Agilent Technologies (21 Οκτωβρίου 2004), “Agilent 4287A RF LCR Meter 1 MHz - 3 GHz Data Sheet” [Online], διαθέσιμο σε:

- <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-5758E.pdf?id=1000072674:epsg:dow>)
- [40] Keysight Technologies (31 Ιουλίου 2014), “Product Fact Sheet Keysight 4287A RF LCR Meter” [Online], διαθέσιμο σε: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-4777EN.pdf?id=2218770>)
- [41] Keysight Technologies, “16453A Dielectric Material Test Fixture” [Online], διαθέσιμο σε: (<http://www.keysight.com/en/pd-1000000508%3Aepsg%3Apropn-16453A/dielectric-material-test-fixture?nid=-536902475.536879638&cc=FR&lc=fre>)
- [42] Εταιρεία Jasco, “V-770 UV-Visible/NIR Spectrophotometer” [Online], διαθέσιμο σε: (<http://www.jascoinc.com/spectroscopy/v-770-uv-vis-spectrophotometer>)
- [43] Jasco Corporation, “ISV-922/ISN-923/ISN-901i 60 mm Integrating Sphere Hardware/Function Manual”, Japan, 2015
- [44] Εταιρεία Q-Lab, “QUV® Accelerated Weathering Testers” [Online], διαθέσιμο σε: (<https://www.q-lab.com/documents/public/7783bc36-3484-4f92-941d-69df0121f862.pdf>)