

**Τ.Ε.Ι. ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

«ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ»

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 6:

*“ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΥΨΗΛΩΝ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ”*

Α.ΚΑΝΑΠΙΤΣΑΣ
Καθηγητής

ΛΑΜΙΑ 2013

Μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς των υλικών υπό την επίδραση ac πεδίου υψηλών συχνοτήτων.

Εργαστηριακός εξοπλισμός: διάταξη διηλεκτρικής φασματοσκοπίας (Agilent E4991A).

Εισαγωγή

Διεργασίες χαλάρωσης παρατηρούνται σε πολλές κατηγορίες υλικών, όπως οι ύαλοι, τα πολυμερή, τα κεραμικά, οι υγροί κρύσταλλοι, τα σύνθετα υλικά, υλικά με ανισοτροπία και υλικά με αταξία δομής (disordered solids). Ο όρος χαλάρωση (αποκατάσταση) υποδηλώνει την επιστροφή ενός συστήματος σε ισορροπία και συχνά αναφέρεται ως η χρονικά εξαρτώμενη επιστροφή στην ισορροπία μετά την μεταβολή των επιρροών που δρούσαν στο σύστημα. Η μεταβαλλόμενη επιρροή στο πείραμα της άσκησης είναι το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Στην περίπτωση αγωγών οι ευκίνητοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου (π.χ. τα ηλεκτρόνια στα μέταλλα, τα ιόντα στους ηλεκτρολύτες) παρακολουθούν την εναλλαγή του πεδίου συνεισφέροντας στο φαινόμενο της αγωγιμότητας. Η κατάσταση διαφοροποιείται στους μονωτές ή τα διηλεκτρικά. Ένα υλικό που μπορεί να πολωθεί υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται διηλεκτρικό. Τοποθετώντας ένα διηλεκτρικό στο εσωτερικό ηλεκτρικού πεδίου, τα θετικά φορτία ωθούνται προς την κατεύθυνση του πεδίου, ενώ τα αρνητικά προς την αντίθετη. Προκύπτει συνεπώς ένας διαχωρισμός θετικών και αρνητικών φορτίων σε κάθε στοιχειώδη όγκο του υλικού, ενώ το διηλεκτρικό παραμένει συνολικά ουδέτερο. Το φαινόμενο ονομάζεται πόλωση και αίρεται με την αφαίρεση του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς τα φορτία επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις. Είναι προφανές πως εάν το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι χρονικά εξαρτώμενο, τότε και η προκύπτουσα πόλωση είναι και αυτή με την σειρά της χρονικά μεταβαλλόμενη.

Θεωρία

Η απόκριση ενός διηλεκτρικού σε εφαρμοζόμενο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων στις οποίες περιλαμβάνονται: το πλάτος και η συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου, η θερμοκρασία και η μοριακή δομή του υλικού. Σε κάθε αναστροφή του πεδίου, τα δίπολα προσπαθούν να προσανατολιστούν παράλληλα με αυτό. Η διαδικασία αυτή απαιτεί έναν πεπερασμένο χρόνο, που ονομάζεται χρόνος χαλάρωσης. Σε συνθήκες στατικού ηλεκτρικού πεδίου το χαρακτηριστικό μέγεθος που αντιπροσωπεύει το διηλεκτρικό υλικό είναι η γνωστή διηλεκτρική σταθερά. Σε συνθήκες εναλλασσόμενου πεδίου η διηλεκτρική σταθερά γενικεύεται στην μιγαδική ηλεκτρική διαπερατότητα, ποσότητα που εξαρτάται από την συχνότητα του πεδίου και δίνεται από την σχέση:

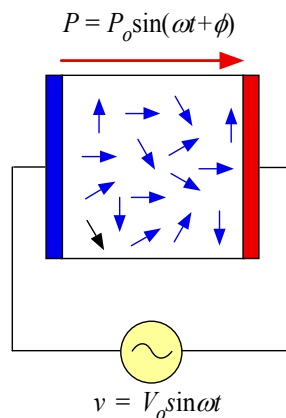
$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1)$$

όπου ε' και ε'' το πραγματικό και φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας που συνδέονται μεταξύ τους ως εξής:

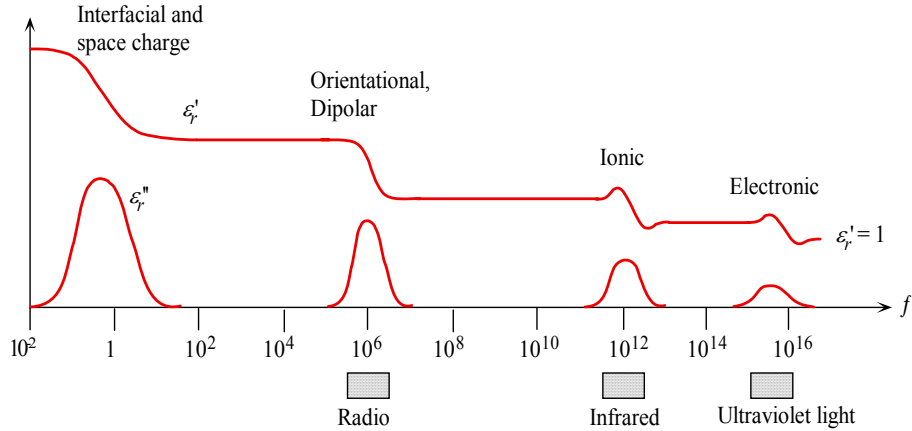
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

όπου $\tan \delta$ η εφαπτομένη ή παράγοντας των απωλειών σχετίζεται με την διαχεόμενη στο υλικό ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης.

Η συνηθέστερη πειραματική μέθοδος με την οποία μελετάται η χρονικά εξαρτώμενη απόκριση, διηλεκτρικού υλικού, σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται Διηλεκτρική Φασματοσκοπία. Το υπό εξέταση δοκίμιο τοποθετείται στο εσωτερικό πυκνωτή (διηλεκτρικό κελί) γνωστής γεωμετρίας, στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται το εναλλασσόμενο πεδίο, Σχήμα 1. Τα μόνιμα και τα επαγόμενα δίπολα του υλικού προσπαθούν να προσανατολισθούν σύμφωνα με την διεύθυνση του πεδίου. Αν η συχνότητα εναλλαγής είναι πολύ μικρή (δηλ. ο χρόνος άσκησης του πεδίου πολύ μεγάλος) τότε τα πάσης φύσεως δίπολα έχουν την δυνατότητα να ευθυγραμμισθούν με το πεδίο. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη πόλωση του υλικού, στην οποία αντιστοιχεί και η στατική τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητας ($\varepsilon' = \varepsilon_s$). Όσο αυξάνεται η συχνότητα του πεδίου τα ηλεκτρικά δίπολα δυσκολεύονται να παρακολουθήσουν την κίνησή του με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα διηλεκτρικής χαλάρωσης. Σε αυτήν την περίπτωση η πόλωση όσο και η ηλεκτρική διαπερατότητα παίρνουν μικρότερες τιμές, Σχήμα 2. Κάθε διεργασία χαλάρωσης εμφανίζεται σε διαφορετική περιοχή συχνοτήτων, έτσι το φάσμα χαλαρώσεων ενός υλικού μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία διεργασίες, Σχήμα 2. Στο εύρος συχνοτήτων κάθε διεργασίας χαλάρωσης το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας παρουσιάζει μία μετάβαση από υψηλές σε χαμηλές τιμές η τιμή του ε' στο κάτω άκρο του εύρους των συχνοτήτων αντιστοιχεί στην στατική τιμή της διαπερατότητας ($\varepsilon' = \varepsilon_s$) για την συγκεκριμένη διεργασία, ενώ η τιμή της διαπερατότητας στο άνω άκρο των συχνοτήτων αντιστοιχεί στην οπτική τιμή ή τιμή υψηλών συχνοτήτων ($\varepsilon' = \varepsilon_\infty$).



Σχήμα 1: Διηλεκτρικό υλικό υπό την επίδραση εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών διηλεκτρικών χαλαρώσεων που παρατηρούνται σε στερεό μονωτικό υλικό.

Οι διηλεκτρικές χαλαρώσεις περιγράφονται μαθηματικά μέσω των εξισώσεων διασποράς του Debye. Σύμφωνα με αυτές η μιγαδική έκφραση της διαπερατότητας δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (3)$$

ενώ το πραγματικό και φανταστικό μέρος από τις εκφράσεις:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (5)$$

όπου ε_s , ε_∞ , τ και ω η στατική τιμή της διαπερατότητας, η τιμή της διαπερατότητας στις υψηλές συχνότητες, ο χρόνος χαλάρωσης και η κυκλική συχνότητα του πεδίου αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις Debye περιγράφουν την πλέον απλή διεργασία με έναν χρόνο χαλάρωσης, αγνοούν αλληλεπιδράσεις διπόλων και μοριακού περιβάλλοντος και η ισχύς τους περιορίζεται σε πολικά αέρια και ρευστά. Με κατάλληλη τροποποίηση προκύπτουν εκφράσεις όπως οι Cole-Cole, Cole-Davidson, Havriliak-Negami κ.α, οι οποίες εμπεριέχουν κατανομή χρόνων χαλάρωσης και είναι σε θέση να περιγράψουν διεργασίες σε στερεά διηλεκτρικά.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται ότι σε σταθερή συχνότητα οι πιο αργές διεργασίες εμφανίζονται σε χαμηλές συχνότητες. Σε ισόχρονες συνθήκες (σταθερή συχνότητα) και με ανεξάρτητη μεταβλητή την θερμοκρασία, οι πιο αργές διεργασίες μετακινούνται στην περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, σε ένα πολυμερές η διεργασία που

καταγράφεται στην υψηλότερη θερμοκρασία συνήθως σχετίζεται με την υαλώδη μετάπτωση και τις κινήσεις μεγάλων τμημάτων της κύριας αλυσίδας, η διεργασία στην αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία με κινήσεις πλευρικών πολικών ομάδων κτλ.

Πειραματικό μέρος

1. Μετρήστε το πάχος του υπό εξέταση δοκιμίου και τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων του διηλεκτρικού κελιού.
2. Τοποθετείστε το διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα στους οπλισμούς του διηλεκτρικού κελιού. Το κελί μετρήσεων πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό του φούρνου.
3. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και για όσες συχνότητες σας υποδείξει ο επιβλέπων μετρήστε την χωρητικότητα (C) και τον παράγοντα απωλειών (D) που ταυτίζεται με την εφαιτομένη των απωλειών ($\tan \delta = D$).
4. Το πραγματικό και φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0(1+D^2)} \quad (6)$$

και

$$\varepsilon'' = \frac{C \cdot D}{C_0(1+D^2)} = \varepsilon' D \quad (7)$$

αντίστοιχα. Όπου C και D είναι οι μετρούμενες τιμές της χωρητικότητας και του παράγοντα απωλειών, ενώ C_0 είναι η χωρητικότητα του κελιού στο κενό (απουσία διηλεκτρικού).

5. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και για όσες συχνότητες σας υποδείξει ο επιβλέπων μετρήστε την ηλεκτρική διαπερατότητα (ε' , ε''), την εφαιτομένη διηλεκτρικών απωλειών ($\tan \delta$) και την αγωγιμότητα εναλλασόμενου (σ).

Υπολογισμοί/Ερωτήσεις

1. Υπολογίστε την χωρητικότητα στο κενό του πυκνωτή που χρησιμοποιήσατε.
2. Υπολογίστε το πραγματικό και φανταστικό μέρος της ηλεκτρικής διαπερατότητας για κάθε ζεύγος τιμών C και D που καταγράψατε. Καταχωρείστε τις τιμές C, D, ε' και ε'' σε κατάλληλο πίνακα.
3. Κατασκευάστε διαγράμματα του τύπου $\varepsilon' = f(\log f)$ και $\varepsilon'' = f(\log f)$ για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.
4. Κατασκευάστε διαγράμματα του τύπου $\varepsilon' = f(T)$ και $\varepsilon'' = f(T)$ όπου T η θερμοκρασία, για όλες τις συχνότητες που μετρήσατε. Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.

Βιβλιογραφία

1. Αρχές της Φυσικής Στερεάς Καταστάσεως, Robert Levy, Εκδόσεις Γ. Α. Πνευματικού.
2. Εισαγωγή στην Φυσική Στερεάς Καταστάσεως, C. Kittel, Εκδόσεις Γ. Α. Πνευματικού.
3. The Solid State, H. M. Rosenberg, Oxford University Press, 3rd edition.
4. Electronic Properties of Materials, Rolf E. Hummel, Springer, 3rd edition, 2001.
5. Electrical Properties of Materials, L. Solymar and D. Walsh, Oxford University Press, 6th edition, 1997.
6. Principles of electronic materials and devices, S. O. Kasap, 2002.

ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΕΩΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ AGILENT E4991A DRS (High frequency Dielectric Spectroscopy)

- 1) Τοποθετούμε το υπό μελέτη δοκίμιο μεταξύ των οπλισμών της κυψελίδας των μετρήσεων και αφού πρώτα έχουμε καθαρίσει αυτή με ακετόνη. Στη συνέχεια σφίγγουμε τον κοχλία που βρίσκεται πάνω από τον οπλισμό του πυκνωτή όσο χρειαστεί έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε καλή ηλεκτρική επαφή μεταξύ του δοκιμίου και του οπλισμού του πυκνωτή.
- 2) Τοποθετούμε την κυψελίδα στο εσωτερικό του φούρνου
- 3) Τρέχουμε τη συντόμευση E4991A από τον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με τη διάταξη ώστε να ανοίξει το software χειρισμού της.
- 4) Εκτελούμε την διαδικασία CALIBRATION (open, short, load)
- 5) SAVE PRESET FILE
- 6) LOAD PRESET FILE
- 7) Utility -> MATERIAL OPTION MENU
- 8) Επιλέγουμε PERMITTIVITY
- 9) Εισαγούμε το πάχος του δείγματος THICKNESS
- 10) TRIGGER -> SINGLE

Μετρούμενα μεγέθη

| | |
|---|----------------------------------|
| [Z] | απόλυτη τιμή της εμπέδισης |
| [Y] | απόλυτη τιμή της επιδεκτικότητας |
| L | αυτεπαγωγή |
| C | χωρητικότητα |
| R | αντίσταση |
| G | αγωγιμότητα |
| <u>Δευτερεύουσες – Έμμεσες παράμετροι</u> | |
| D | συντελεστής απωλειών |
| Q | συντελεστής ποιότητας |
| RS | ισοδύναμη αντίσταση σειράς |
| Rp | ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση |
| X | αντίδραση |
| B | επιδεκτικότητα |
| θ | γωνία φάσης |