



ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ενότητα 11: ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

ΛΙΤΣΑΡΔΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΤΗΜΜΥ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Διηλεκτρικά

- i. Διηλεκτρική σταθερά
- ii. Πόλωση και διηλεκτρική μετατόπιση
- iii. Μηχανισμοί πόλωσης
- iv. Γωνία απωλειών
- v. Μιγαδική διηλεκτρική σταθερά
- vi. Διηλεκτρική αντοχή
- vii. Διηλεκτρικά υλικά



Σκοποί ενότητας

- Να εξοικειωθούν οι φοιτητές με τα βασικά φυσικά μεγέθη που απαιτούνται για τη μελέτη των διηλεκτρικών.
- Να είναι σε θέση οι φοιτητές να κατανοούν τη διάκριση μεταξύ ιδανικών και μη διηλεκτρικών.
- Να μπορούν οι φοιτητές να περιγράψουν τους μηχανισμούς πόλωσης.
- Να μπορούν οι φοιτητές να ορίζουν τη γωνία απωλειών και τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά.



ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΥΛΗ

Ανάλογα με τη φύση των φορέων

- **Ηλεκτρονική αγωγή:** οι φορείς είναι ηλεκτρόνια.
- **Ιοντική ή ηλεκτρολυτική αγωγή:** οι φορείς είναι ιόντα. Η ροή του ρεύματος στα υγρά συνοδεύεται από φαινόμενα ηλεκτρόλυσης. Στα στερεά συμβαίνουν παρόμοια χημικά και θερμοδυναμικά φαινόμενα (στερεοί ηλεκτρολύτες)
- **Ηλεκτροφορητική αγωγή:** οι φορείς είναι φορτισμένα συσσωματώματα μορίων (ηλεκτροφόρηση).



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

- Διηλεκτρικά: υλικά που διατηρούν το ηλ.πεδίο, αποθηκεύουν ηλεκτρικό φορτίο (μονωτικά: διηλεκτρικά που παρεμποδίζουν τη ροή φορτίων)
- Απόκριση σε ηλεκτρικό πεδίο: ηλεκτρική πόλωση
 - dc πεδίο : πόλωση (αναπτύσσονται ηλ.δίπολα)
 - ac πεδίο : ταλάντωση διπόλων



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Χωρητικότητα

$$C = Q/V$$

$C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$ για πυκνωτή με διηλεκτρικό

- Διηλεκτρική σταθερά του κενού

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 1/36\pi \cdot 10^{-9} \text{ F/m} \quad (\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2)$$

- Διηλεκτρική σταθερά ϵ_r (k)

$$\epsilon_r = 1 + \chi$$

χ : ηλεκτρική επιδεκτικότητα

- Ενέργεια που αποθηκεύεται

$$E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$

Material	Min.	Max.
Air	1	1
Amber	2.6	2.7
Asbestos fiber	3.1	4.8
Bakelite	5	22
Barium Titanate	100	1250
Beeswax	2.4	2.8
Cambric	4	4
Carbon Tetrachloride	2.17	2.17
Celluloid	4	4
Cellulose Acetate	2.9	4.5
Durite	4.7	5.1
Ebonite	2.7	2.7
Epoxy Resin	3.4	3.7
Ethyl Alcohol	6.5	25
Fiber	5	5
Formica	3.6	6
Glass	3.8	14.5
Glass Pyrex	4.6	5
Gutta Percha	2.4	2.6
Isolantite	6.1	6.1
Kevlar	3.5	4.5
Lucite	2.5	2.5
Mica	4	9
Micarta	3.2	5.5
Mycalex	7.3	9.3
Neoprene	4	6.7

Material	Min.	Max.
Nylon	3.4	22.4
Paper	1.5	3
Paraffin	2	3
Plexiglass	2.6	3.5
Polycarbonate	2.9	3.2
Polyethylene	2.5	2.5
Polyimide	3.4	3.5
Polystyrene	2.4	3
Porcelain	5	6.5
Quartz	5	5
Rubber	2	4
Ruby Mica	5.4	5.4
Selenium	6	6
Shellac	2.9	3.9
Silicone	3.2	4.7
Slate	7	7
Soil dry	2.4	2.9
Steatite	5.2	6.3
Styrofoam	1.03	1.03
Teflon	2.1	2.1
Titanium Dioxide	100	100
Vaseline	2.16	2.16
Vinylite	2.7	7.5
Water distilled	34	78
Waxes, Mineral	2.2	2.3
Wood dry	1.4	2.9



ΑΓΩΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

- η (χαμηλή) αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

- στα στερεά

- Αγωγιμότητα όγκου
- Αγωγιμότητα επιφάνειας

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}$$

- στα υγρά

- Ιοντική αγωγή
- Ηλεκτροφορητική αγωγή στα κολλοειδή
(κολλοειδές= ετερογενές μίγμα με μικροσκοπικά σωματίδια)

- στα αέρια

- ιονισμός



ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ (1)

- Στοιχειώδης διπολική ροπή

$$\underline{p} = q \cdot \underline{\Delta x} = a \cdot \underline{\mathcal{E}}$$

a : πολωσιμότητα

- Πόλωση: αριθμός ηλεκτρικών διπολικών ροπών στη μονάδα του όγκου

$$\bar{P} = \frac{\sum \bar{p}}{V} = N \cdot a \cdot \bar{\mathcal{E}} \quad \text{Cb/m}^2$$

- Απόκριση του υλικού σε πεδίο E :

$$\bar{P} = N \cdot a \cdot \bar{\mathcal{E}}$$



ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ (2)

- Ηλεκτρική επιδεκτικότητα χ :

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi \bar{\mathcal{E}}$$

- Διηλεκτρική σταθερά (σχετική) ϵ_r

$$\epsilon_r = 1 + \chi$$

- Γραμμικά διηλεκτρικά:

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi \bar{\mathcal{E}} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \bar{\mathcal{E}}$$

- Ηλεκτρική μετατόπιση D (περιλαμβάνει το πεδίο και την απόκριση του υλικού):

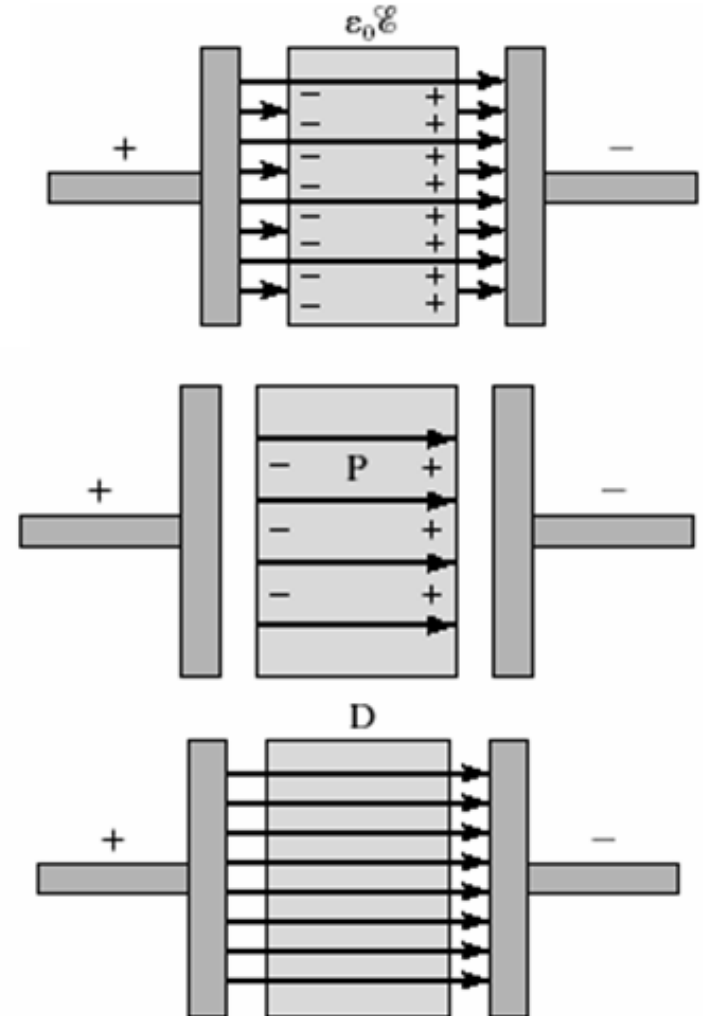
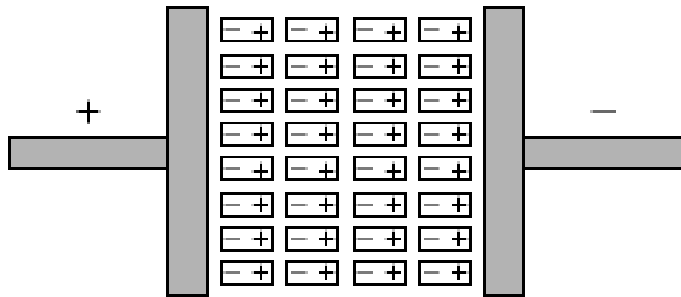
$$\bar{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \bar{\mathcal{E}} = \epsilon_0 (1 + \chi) \bar{\mathcal{E}} = \epsilon_0 \bar{\mathcal{E}} + \bar{P}$$



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ

- Ηλεκτρική μετατόπιση \mathbf{D} (περιλαμβάνει το πεδίο και την απόκριση του υλικού).

$$\bar{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \epsilon_r \bar{\mathbf{E}} = \epsilon_0 \bar{\mathbf{E}} + \bar{\mathbf{P}}$$

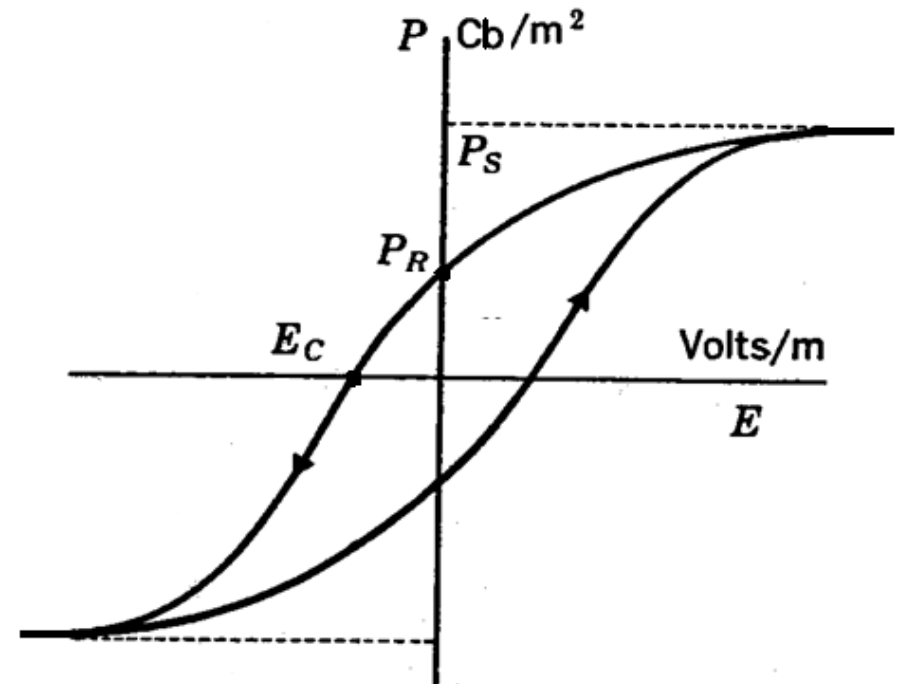


ΣΙΔΗΡΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

- Στα μη-γραμμικά διηλεκτρικά η πολωσιμότητα δεν είναι μονότιμη, ούτε είναι βαθμωτό μέγεθος

α: πολωσιμότητα

- Η πόλωση P εμφανίζει υστέρηση σε σχέση με το πεδίο E (επειδή κατά την περιστροφή των διπόλων προς τη διεύθυνση του πεδίου υπάρχουν φράγματα ενέργειας)



ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΛΩΣΗΣ

- Σε "ιδανικό διηλεκτρικό" (δεν εξετάζουμε ροή φορτίων).

Ηλεκτρονιακή (σε ΟΛΑ τα υλικά)

& ιοντική (σε ιοντικά στερεά)

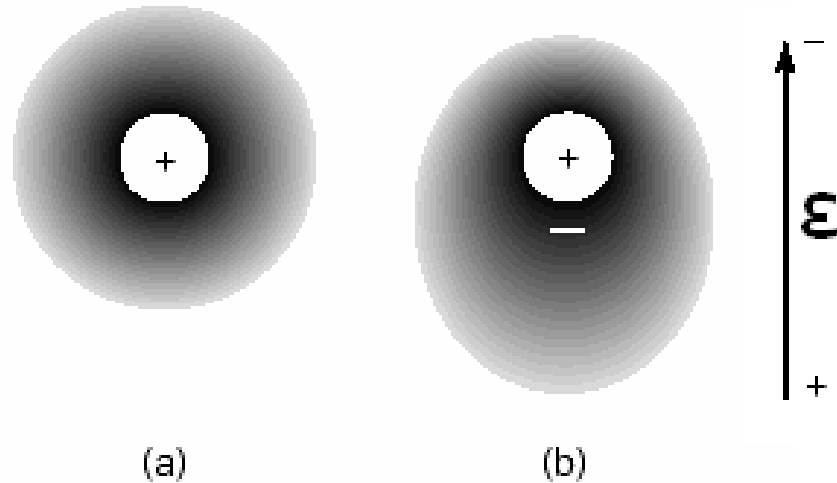
& προσανατολισμού (σε πολικά μόρια - υπάρχουν μόνιμα ηλεκτρικά δίπολα)

- Σε μη ιδανικό διηλεκτρικό (υπάρχει ροή φορτίων)

+ φορτίων χώρου



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑΚΗ ΠΟΛΩΣΗ

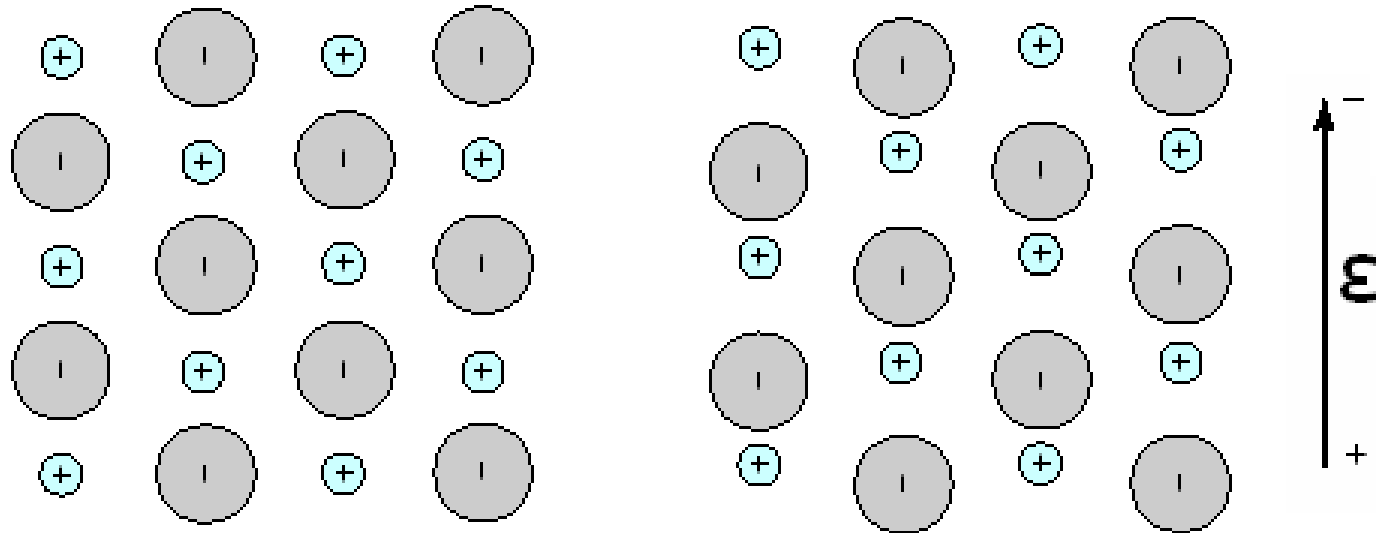


Μετακίνηση των κέντρων θετικών και αρνητικών φορτίων στο άτομο - μετατόπιση του ηλεκτρονιακού "νέφους" ως προς τον πυρήνα.

- Διπολική ροπή $p=q \cdot a$, σε κάθε άτομο



ΙΟΝΤΙΚΗ ΠΟΛΩΣΗ

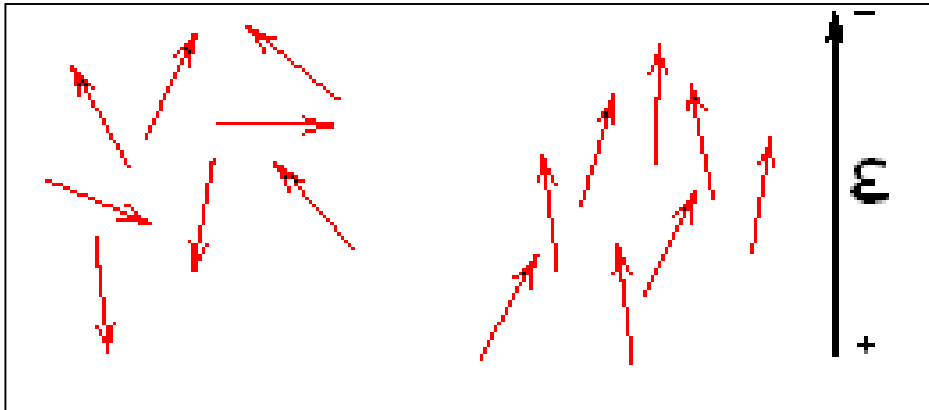


Σε ιοντικά στερεά, σχετική μετατόπιση ανιόντων και κατιόντων.

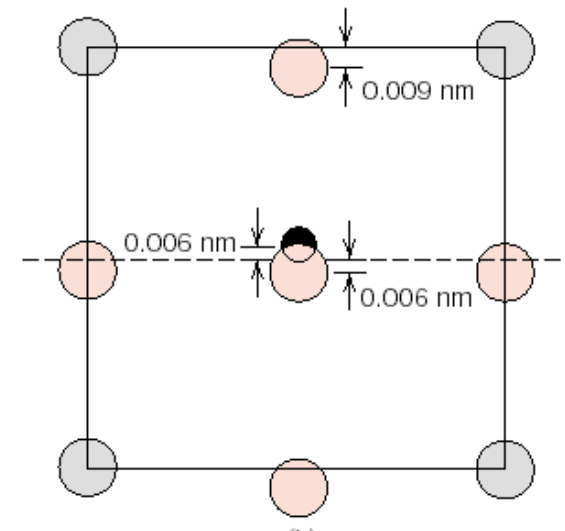
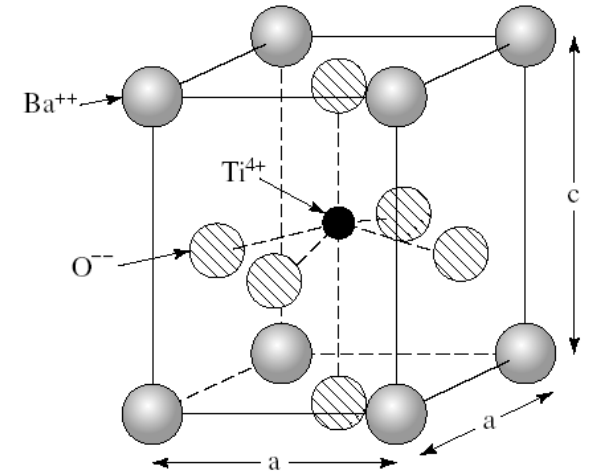
- Διπολική ροπή $p=q \cdot a$
π.χ. NaCl



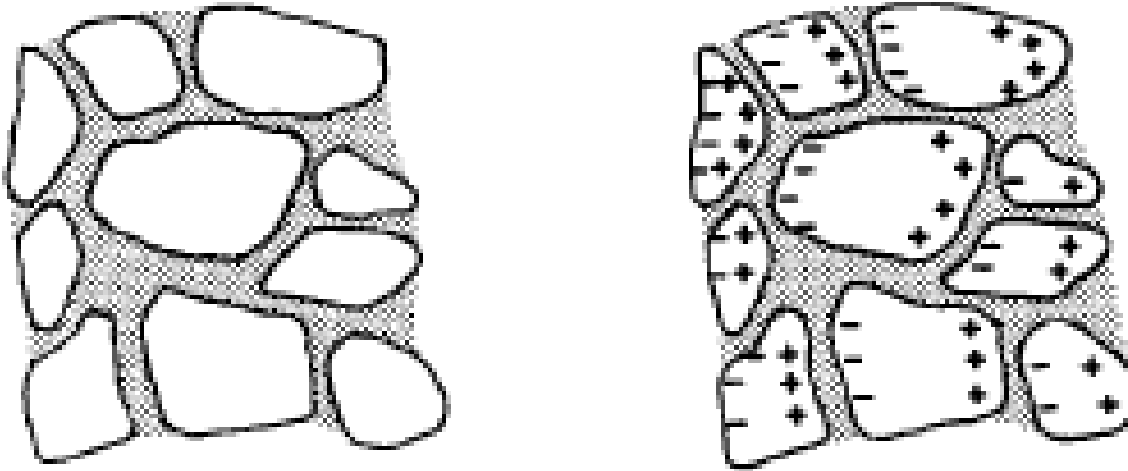
ΜΟΡΙΑΚΗ ΠΟΛΩΣΗ (ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ)



- Υπάρχουν μόνιμα ατομικά δίπολα.
- Ιοντική δομή χωρίς κέντροσυμμετρίας π.χ. BaTiO_3



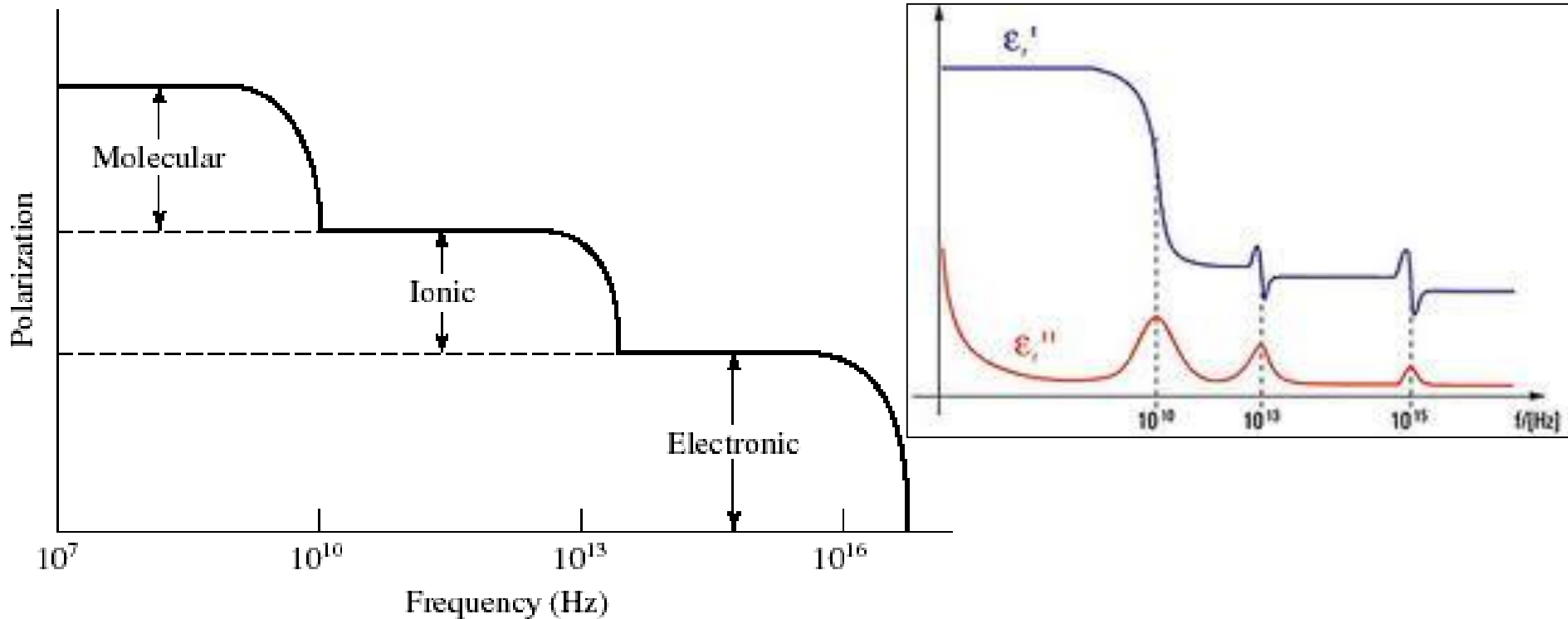
ΠΟΛΩΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΧΩΡΟΥ



Μετακίνηση αντίθετων φορτίων μέχρι κάποιο φράγμα δυναμικού (στα όρια των κόκκων ή των φάσεων).



ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ



Τα δίπολα, επαγόμενα ή μόνιμα, μπορούν να παρακολουθούν τη μεταβολή του πεδίου μέχρι κάποια συχνότητα.



ΓΩΝΙΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

- Ιδανικό διηλεκτρικό:

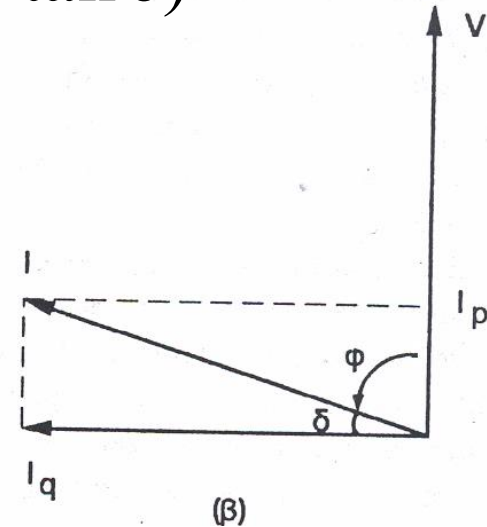
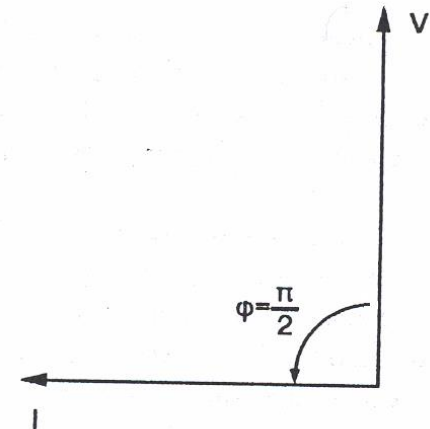
$$I = j I_q = j V \omega C$$

- Διηλεκτρικό με απώλειες:

$$I = I_p + j I_q = j I_q \left(1 - j \frac{I_p}{I_q} \right) = j I_q (1 - j \tan \delta) \quad (\alpha)$$

δ : γωνία απωλειών

$$\tan \delta = I_p / I_q = P_p / P_q$$



ΜΙΓΑΔΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

- Χωρητικότητα : $C = L \varepsilon_0 \varepsilon_r$
όπου L : ενεργό μήκος ($L=S/d$)

$$I = j V \omega L \varepsilon_0 \varepsilon'_r$$

$$I_q = j V \omega L \varepsilon_0 \varepsilon'_r (1 - j \tan \delta)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r (1 - j \tan \delta)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j \varepsilon''_r$$

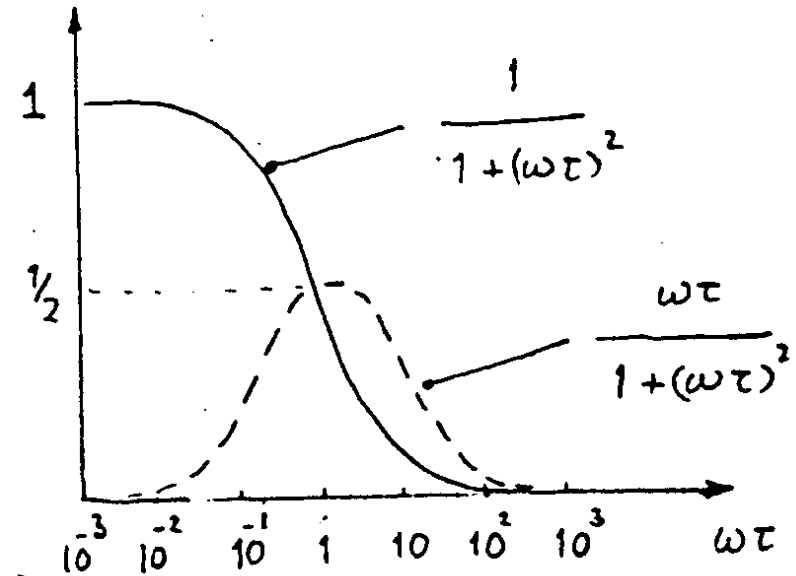
$$\varepsilon''_r = \varepsilon'_r \tan \delta \cong \varepsilon_r \tan \delta$$



ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

- Σχέσεις Debye

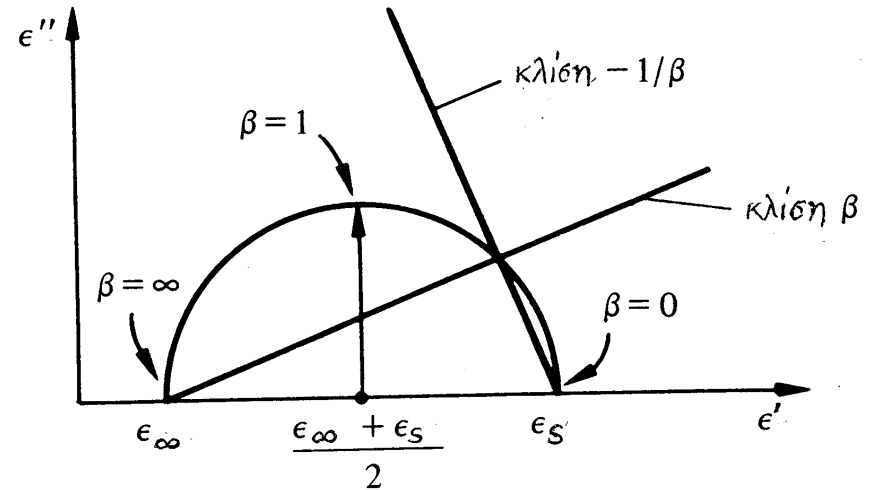
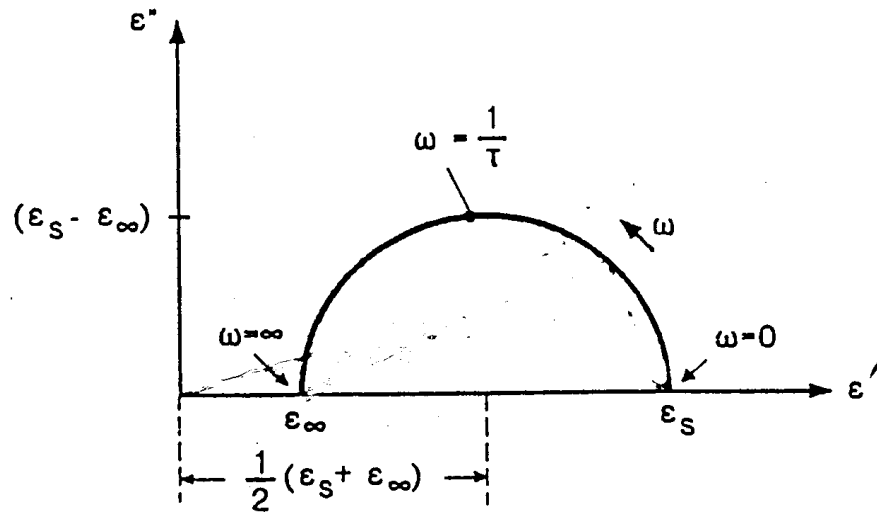
τ : χρόνος επαναφοράς
(εξαρτάται από τη θερμοκρασία)



$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\varepsilon^*) &= \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} = \varepsilon' \\ \operatorname{Im}(\varepsilon^*) &= \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} = \varepsilon'' \end{aligned} \right\} \varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ COLE-COLE : $\epsilon'(f)$ vs $\epsilon''(f)$



$$\beta = -\frac{\epsilon_S + 2}{\epsilon_\infty + 2} \cdot \omega \tau$$

- Προσδιορισμός του χρόνου επαναφοράς (τ) από το διάγραμμα.
- Φασματοσκοπία εμπέδησης.



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (1)

- Διάσπαση αερίων
(ιονισμός – χιονοστιβάδα)

Εκκένωση:

- Τόξου (χαμηλή τάση-υψηλό ρεύμα)
 - Σπινθήρα (υψηλή τάση)
 - Αίγλης (χαμηλή πίεση)
 - Κορόνα (τοπική διάσπαση)
- Διάσπαση υγρών
 - Φυσαλίδες, εγκλείσματα



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (2)

- Διάσπαση στερεών (μόνιμη βλάβη)
 - Θερμική (τοπική αύξηση θερμοκρασίας)
 - Ηλεκτρομηχανική
 - Ηλεκτροχημική
 - Ηλεκτρονική
 - Διεπιφανειακή

 - Εξωτερική / υπερπήδηση



ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

	Φυσικά	Τεχνητά
Αέρια	Αέρας	N_2 , αδρανή, οξειδία (CO_2 , SO_2), ηλεκτραρνητικά αέρια (CCl_4 , SF_6) Υδρογονάνθρακες, φρέον (CFC)
Υγρά	Ορυκτέλαια	Ασκαρέλ (PCB !) Έλαια σιλικόνης
Στερεά	<ul style="list-style-type: none">• Αμίαντος, μίκα• Φυσ.ρητίνες (ήλεκτρον)• Φυτ.ίνες (ξύλο, χαρτί, βαμβάκι)	Κεραμικά Ύαλοι Οργανικά πολυμερή



ΥΓΡΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

- Μόνωση + απαγωγή θερμότητας
- Χαρακτηριστικά:
 - Υψηλή διηλεκτρική αντοχή και αντίσταση όγκου.
 - Υψηλή θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα.
 - Χαμηλή πυκνότητα, διαλυτότητα, ιξώδες.
 - Χημική σταθερότητα.
 - Μη-εύφλεκτα, μη-τοξικά.



ΥΓΡΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Ορυκτέλαια	Γενική χρήση	-50 ~ 110 °C
CFC (Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες)	Γενική χρήση	-50 ~ 200 °C
PCB (ασκαρέλ)	Μ/Σ ΥΤ	-50 ~ 110 °C
Έλαια σιλικόνης	Μ/Σ ΥΤ	-95 ~ 210 °C
Υδρογονάνθρακες	Καλώδια, πυκνωτές	-50 ~ 110 °C
Οργανικοί εστέρες	Ηλεκτρονικές συσκευές	-50 ~ 110 °C



ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

- Αμίαντος (!)
- Μίκα
- Πορσελάνες
 - Εφυάλωση
 - Πηλού (καολινίτης)
 - Τάλκη (μαγνησιοπυριτικά)
- Αλουμίνα
- Γυαλιά Si
 - Na, Pb, B
 - quartz



ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Οργανικά πολυμερή: $\epsilon \sim 2-4$, $\epsilon\phi\delta \sim 10^{-4} - 10^{-3}$

	Θερμοπλαστικά	Θερμοπηκτικά (θερμοσκληρυνόμενα)
Ελαστομερή	Καουτσούκ [σιλικόνες]	Βουλκανισμένο καουτσούκ
Πλαστικά	Πολυαιθυλένιο Πολυπροπυλένιο Πολυαμίδιο Φθοριούχα Πολυστυρένιο Πολυβινυλοχλωρίδιο Ακρυλικά	ρητίνες - εποξικές - πολυεστερικές - πολυουρεθάνης - φορμαλδεΰδης



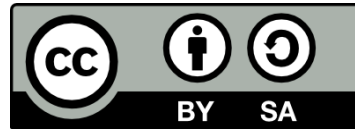
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.
«Ηλεκτρολογικά Υλικά. Διηλεκτρικά». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://opencourses.auth.gr/courses/OCRS492/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

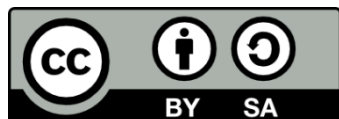
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Τονοζλής Γεώργιος
Θεσσαλονίκη, 03/06/2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

