

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Τμήματος ΗΜΜΥ α  
Ακαδ. Έτος 2023-2024

## ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΥΛΙΚΩΝ

### Διάλεξη 11

### Διηλεκτρικές ιδιότητες

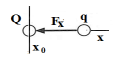
1

### Διηλεκτρικές Ιδιότητες Υλικών

<p><b>Περίληψη διάλεξης</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Μονωτές</li> <li>• Πυκνωτής με παράλληλες πλάκες</li> <li>• Πόλωση</li> <li>• Επιφανειακά φορτία</li> <li>• Διηλεκτρική σταθερά</li> <li>• Πολωσιμότητα</li> <li>• Τύποι πόλωσης</li> <li>• Εξάρτηση από τη συχνότητα</li> <li>• Απώλειες ενέργειας</li> <li>• Διάσπαση</li> <li>• Σιδηροηλεκτρισμός</li> <li>• Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο</li> <li>• Εφαρμογές</li> </ul>	<p><b>Πεδιακά μεγέθη</b></p> <p>Q: Φορτίο (C)</p> <p>E: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου ή ηλεκτρικό πεδίο (V/m)</p> <p>φ: Ηλεκτρικό βαθμωτό δυναμικό (V)</p> <p>P: Πόλωση (C/m<sup>2</sup>)</p> <p>D: Διηλεκτρική μετατόπιση ή πυκνότητα ηλεκτρικής ροής (C/m<sup>2</sup>)</p> <p>ε<sub>r</sub>: Ηλεκτρική σχετική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά</p> <p>σ: Επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στις πλάκες πυκνωτή (C/m<sup>2</sup>)</p> <p>ρ<sub>v</sub>: Χωρική πυκνότητα φορτίου (C/m<sup>3</sup>)</p>
---	--

**Ορισμός πεδιακών μεγεθών: ένταση ηλεκτρικού πεδίου - δυναμικό**

$$F_x = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0(x-x_0)^2}$$



Ενταση Ηλ.Πεδ. E : η δύναμη που ασκείται στη μονάδα θετικού φορτίου  $F_x = qE_x$

Δυναμικό V μεταξύ δύο σημείων A(x<sub>0</sub>) και B(x) = το έργο που καταναλώνεται όταν η μονάδα θετικού φορτίου κινείται από το A στο B:

$$V = - \int_{x_0}^x E_x dx$$

Δυναμική ενέργεια U = q · V (eV)

2

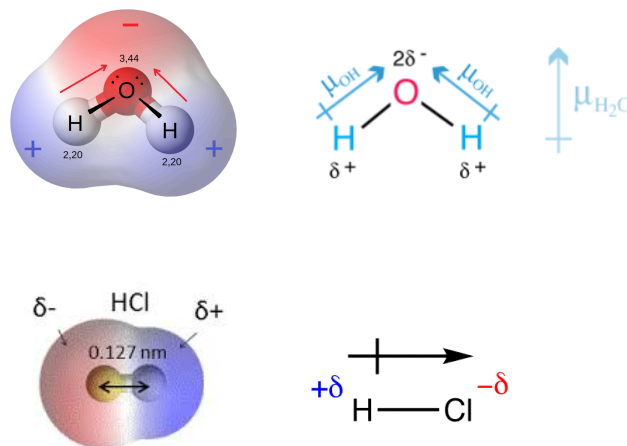
**Διηλεκτρικά ή μονωτές**

- Τα ηλεκτρικά πεδία που αναπτύσσονται στο εσωτερικό τους διατηρούνται για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα  
Κατά την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου στα υλικά αυτά δημιουργούνται ηλεκτροστατικά δίπολα που προσανατολίζονται κατάλληλα ως προς το πεδίο (διεργασία/μηχανισμός πόλωσης)
- Μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης
- Αποθηκεύουν ενέργεια/φορτίο
- Απομόνωση αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα ή αγωγών που βρίσκονται σε διαφορετική τάση:  
Η χαμηλή αγωγιμότητα των διηλεκτρικών δεν επιτρέπει τη μεταφορά των φορτίων από τη μία πλάκα του σπλινομού του πυκνωτή στην άλλη μέσω του διηλεκτρικού

**Χαρακτηρίζονται με βάση τρεις συντελεστές:**

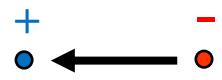
- **Διηλεκτρική σταθερά**, εξαρτάται από τον τύπο δεσμών, την κρυσταλλική δομή, τη σύσταση των φάσεων και τις δομικές ατέλειες του υλικού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα.  
οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν την αντίδραση των επαγόμενων ή των μόνιμων ηλεκτρικών διπόλων σε συνεχές ή εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο.
- **Συντελεστής απώλειας**: Αν η πόλωση καθυστερεί σχετικά με το εφαρμοζόμενο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, προκαλείται απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, σε μορφή θερμότητας και είναι ανάλογη με το γινόμενο της διηλεκτρικής σταθεράς επί την εφαπτόμενη της γωνίας υστερήσης (δηλαδή το συντελεστή απώλειας).
- **Διηλεκτρική αντοχή**: Το ηλεκτρικό πεδίο (υψηλή τάση) στο οποίο ένας μονωτής διασπάται (καταστρέφεται)  
Σχεδόν το 40% των βλαβών σε γεννήτριες σχετίζονται με αστοχίες των μονωτικών υλικών της γεννήτριας.

3

**Μόνιμη διπολική ροπή**

4

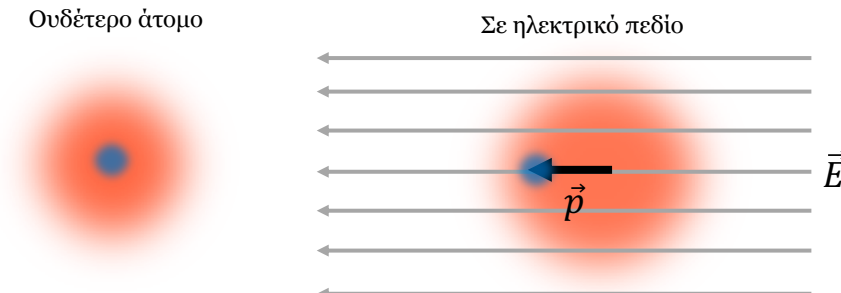
**Επαγόμενη διπολική ροπή**



Μεταξύ δύο σημειακών φορτίων  
 $\vec{p} = q\vec{d}$  διπολική ροπή

$$V_{dipole} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos\theta}{r^2} \quad V_{coulomb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

Ουδέτερο άτομο



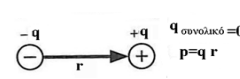
Σε ηλεκτρικό πεδίο

$$\vec{p} = a\vec{E} \quad a: \text{ηλεκτρονική πολωσιμότητα}$$

5

**Πόλωση της ύλης**  
 Η πόλωση προκύπτει από τις μετατοπίσεις ηλεκτρικών φορτίων στα μονωτικά υλικά παρουσία ηλεκτρικού πεδίου (στοιχειώδεις μετακινήσεις ηλεκτρονίων σθένους, ιόντων ή πολικών μορίων δημιουργούν ηλεκτρικά δίπολα)

Ηλεκτρική διπολική ροπή  $\mathbf{p}$  μιας κατανομής φορτίων (ένα σύνολο φορτίων)



Η πόλωση  $\mathbf{P}$  ορίζεται ως η συνολική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου (σε Cb/m<sup>3</sup>)

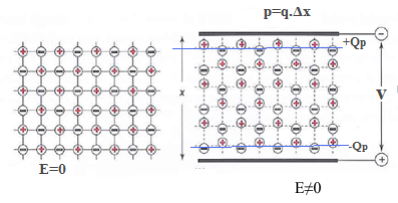
$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{p}_{συνολική}}{V} = \frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_N}{V}$$

Αν  $P_{μέση}$  είναι μέση διπολική ροπή ανά μόριο με  $N$  μόρια στη μονάδα όγκου :  $\mathbf{P} = N\mathbf{P}_{μέση}$

Η πόλωση ισούται με την επιφανειακή πυκνότητα φορτίου (δεσμευμένα φορτία)  
 επειδή ένα πολωμένο υλικό θα έχει επιφανειακό φορτίο στα δύο άκρα :  $\sigma_p = Q_p/A$

Εξάρτηση της  $\mathbf{P}$  από το  $\mathbf{E}$ : ορισμός ηλεκτρικής επιδεκτικότητας  $\chi$   
 Η ηλεκτρική επιδεκτικότητα  $\chi$  μετράει το ποσό της πολώσεως που παράγει ένα ορισμένο πεδίο.

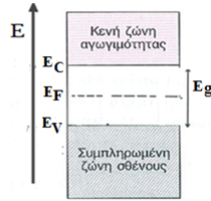
(SI)  $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$



6

**Μονωτικές Ιδιότητες**

Μονωτές : Υλικά χωρίς αρκετούς ελεύθερους φορείς  
 Υπάρχουν ηλεκτρικά δίπολα (π.χ. NaCl)  
 Εφαρμογή πεδίου : Προσανατολισμός διπόλων = πόλωση  
 Αλλαγή ιδιοτήτων: Πλήθος εφαρμογών



Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μονωτή (ιδανικού)  
 Μεγάλο ενεργειακό χάσμα ( $E_g > 4 \text{ eV}$ )

Συνήθως συγκέντρωση ηλεκτρονίων  $n_i < 10^6 \text{ m}^{-3}$   
 λόγω επίδρασης ακτινοβολιών υψηλής ενέργειας  
 κοσμικές ή υπεριώδεις ακτινοβολία

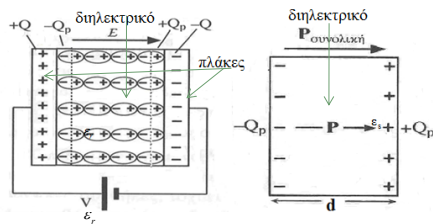
(ρεύματα της τάξης nA σε τάση μερικές εκατοντάδες V)

Υλικό	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
<b>Κεραμικά</b>	
Αλουμίνα	$[10^{10}, 10^{12}]$
Πορσελάνη	$[10^{10}, 10^{12}]$
Γυαλιά νατρίου-ασβεστίου	$10^{10}$
Γυαλιά πυρτίτις ( $\text{SiO}_2$ )	$10^{17}$
Μίκα	$[10^{11}, 10^{15}]$
<b>Πολυμερή</b>	
Φαινόλη-φορμαλδεΐδη	$[10^9, 10^{10}]$
Νάυλον 6,6	$[10^9, 10^{12}]$
Πολυμεθύλ-μετακρυλικό	$10^{12}$
Πολυαιθυλένιο	$[10^{13}, 10^{17}]$
Πολυστυρένιο	$10^{14}$
Πολυτετραφθορααιθυλένιο	$10^{16}$

7

**Σχετική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά: Ορισμός Πυκνωτής με παράλληλες πλάκες**

Υποθέσεις: Όλες οι δυναμικές γραμμές είναι ανάμεσα στις πλάκες. Ομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου



Απεικόνιση των δεσμευμένων φορτίων πόλωσης  $Q_p$  στις επιφάνειες του διηλεκτρικού ανάμεσα στις πλάκες πυκνωτή (συνολικό φορτίο κυρίου σώματος = 0)

Μπορούμε να αναπαράστησουμε ολόκληρο το διηλεκτρικό συναρτήσει των επιφανειακών φορτίων πόλωσης  $Q_p$  και  $-Q_p$

Συνολικό φορτίο στις πλάκες:  $Q = Q_0 + Q_p$

Τα φορτία πόλωσης  $+Q_p$  και  $-Q_p$  είναι δεσμευμένα στα μόρια και δεν μπορούν να κινηθούν στο εσωτερικό του διηλεκτρικού ή στην επιφάνειά του  
**Τα φορτία αυτά ονομάζονται επιφανειακά φορτία πόλωσης**

$$P = \frac{\text{συνολική}}{V} = \frac{Q_p \cdot d}{A \cdot d} = \frac{Q_p}{A} = \sigma_p$$

$$Q = Q_0 + P \cdot A$$

χωρητικότητα πυκνωτή  $C = \frac{Q(Cb)}{V(V)} = \text{Farad}$

δίχως διηλεκτρικό:  $C_0 = \frac{Q_0}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$

με διηλεκτρικό:  $C = \frac{Q}{V} = \epsilon_r \frac{A}{d}$

$\epsilon_0, \epsilon_s$  διαπερατότητα του κενού και του διηλεκτρικού αντίστοιχα

**Η πόλωση του διηλεκτρικού διαφοροποιεί την  $\epsilon_s$  από την  $\epsilon_0$**

Σχετική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_0}$$

Η χωρητικότητα αυξάνει κατά  $\epsilon_r$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_r C_0$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 55.2 \text{ Me/(V*m)}$$

$$E_{\text{stored}} = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} V Q$$

8

**Σχετική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά: Ορισμός**  
**Πυκνωτής με παράλληλες πλάκες**

$P = \epsilon_0(1 - \epsilon_r)E$

Σύνδεση της διηλεκτρικής σταθεράς με πεδιακά μεγέθη:

Η Διηλεκτρική μετατόπιση,  $D$ , ή πυκνότητα ηλεκτρικής ροής της πλάκας επιφάνειας  $A$ , είναι ίση με την επιφανειακή πυκνότητα φορτίου  $Q$  της πλάκας

$D = \sigma = Q/A$

$D = \epsilon_0 E + P \Rightarrow E = \frac{1}{\epsilon_0} (D - P)$

$P = \epsilon_0 \chi E \Rightarrow$   
 $D = (1 + \chi) \epsilon_0 E$  (SI)  
 όπου  $P$  είναι η πόλωση ( $P = Q_p/A$ ),  
 $\chi$  είναι η ηλεκτρική επιδεκτικότητα μία σταθερά του υλικού

Η διηλεκτρική σταθερά ορίζεται ως:  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 1 + \chi$

$P = \epsilon_0(1 - \epsilon_r)E$

Μικρότερη αγωγιμότητα υλικού, μεγαλύτερη πολικότητα, μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ .

Table 9.1. DC dielectric constants of some materials

Potassium tantalate niobate	6000
Barium titanate (BaTiO <sub>3</sub> )	4000
Potassium Niobate (KNbO <sub>3</sub> )	700
Rochelle salt (NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> · 4H <sub>2</sub> O)	170
Water	81.1
Acetone	20
Silicon	11.8
GaAs	10.9
Marble	8.5
Soda-lime-glass	6.9
Porcelain	6.0
Epoxy	4.0
Fused silica	4.0
Nylon 6,6	4.0
PVC	3.5
Ice	3.0
Amber	2.8
Polyethylene	2.3
Paraffin	2.0
Air	1.000576

Διαπερατότητα κενού  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 55.2 \text{ Me/(V}^2\text{m)}$

9

**Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  με τις διεργασίες πόλωσης του υλικού (την πολωσιμότητα  $\alpha$ ) σε μικροσκοπική κλίμακα**

Πολωσιμότητα,  $\alpha$ : εκφράζει το πόσο εύκολη είναι η πόλωση του διηλεκτρικού

Πολωσιμότητα:  $\alpha = \frac{\bar{P}}{E_{\text{εσωτερικό}}} \Rightarrow P_{\text{συνολική}} = N \bar{p}$  όπου  $\bar{p}$  είναι η μέση διπολική ροπή,  $N$  δίπολα στη μονάδα όγκου

$E_{\text{εσωτερικό}}$  είναι η ένταση του επαγόμενου πεδίου στο διηλεκτρικό,  $E_{\text{εσωτερικό}} = E + E_1$   
 $E_1$  είναι το τοπικό πεδίο λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ γειτονικών διπόλων

Υπολογισμός εσωτερικού πεδίου στο διηλεκτρικό:  $E_{\text{εσωτερικό}} = E + \frac{P}{3\epsilon_0}$

$P_{\text{συνολική}} = N \alpha E_{\text{εσωτερικό}} = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E$ , εξίσωση Clausius

Η  $P_{\text{συνολική}}$  εξαρτάται από τους μηχανισμούς πόλωσης του υλικού:  $P_{\text{συνολική}} = P_c + P_M + P_0$   
 όπου  $P_c, P_M, P_0$  είναι η ηλεκτρονική πόλωση, μοριακή πόλωση, πόλωση προσανατολισμού

Συνεπώς για την πολωσιμότητα  $\alpha$  θα ισχύει:  $\alpha_{\text{συνολική}} = \alpha_c + \alpha_M + \alpha_0$

Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$  και  $\alpha$ :  $\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N \alpha}{3 \epsilon_0}$  Σχέση Clausius

ή  $\frac{M \epsilon_r - 1}{\rho \epsilon_r + 2} = \frac{N_A \alpha}{3 \epsilon_0}$

με  $N = (\rho N_A) / M$ ,  $\rho$ : πυκνότητα,  $M$  μοριακό βάρος

10

Μηχανισμοί πόλωσης διηλεκτρικών παρουσία ηλεκτρικού πεδίου

**Φύση της πόλωσης – είδη πόλωσης**

- Προσανατολισμού  $\alpha_p$ : επαναπροσανατολισμός μονίμων διπόλων με το πεδίο στα πολικά υλικά
- Μοριακή ή ιοντική  $\alpha_M$ : μετατοπίσεις ιόντων σε ιοντικά υλικά
- Ηλεκτρονική  $\alpha_e$ : μετατοπίσεις ηλεκτρονίων σθένους σε σχέση με το θετικό πυρήνα σε όλα τα υλικά

Γενικά: έχουμε Ελαστική παραμόρφωση

Σιδηροηλεκτρικά υλικά: Πλαστική παραμόρφωση

↑ η πόλωσήματα α αυξάνει

↓ ο χρόνος απόκρισης των διπόλων αυξάνει (βραδύτερη απόκριση)

	Προσανατολισμού	Μοριακή	Ηλεκτρονική
Πεδίο E=0			
Πεδίο E			
Συχνότητα	Ραδιοσυχνότητες (kHz - GHz)	Υπέρυθρες (THz)	Οπτικές (Phz)

T. Tate, Imperial College London

11

**Εξάρτηση από τη συχνότητα εναλλασόμενου πεδίου Μιγαδική διηλεκτρική σταθερά και διηλεκτρικές απώλειες**

Στα μη τέλεια διηλεκτρικά η διηλεκτρική σταθερά παριστάνεται από τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά

$$\epsilon^* = \epsilon_{real} - i\epsilon_{imag}$$

$\epsilon_{imag}$  ο συντελεστής απωλειών

α) Εφαρμογή ενός ac πεδίου στο διηλεκτρικό μέσο. Η πόλωση δεν είναι σε συμφωνία φάσης με το ac πεδίο. β) Εξάρτηση του  $\epsilon_{real}$  και του  $\epsilon_{imag}$  της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς ε από τη συχνότητα.

αντιστοιχεί στην ενέργεια που χάνεται στο διηλεκτρικό μέσο όταν τα δίπολα προσανατολίζονται, ενάντια στις τυχασίες συγκρούσεις, προς τη μία ή την άλλη μεριά από το πεδίο

**Απώλειες διηλεκτρικού ανά μονάδα όγκου:  $W = \omega \cdot E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{imag}$**

**ή  $W = \omega \cdot E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{real} \cdot \epsilon\phi\delta$**

$\epsilon\phi\delta = \frac{\epsilon_{imag}}{\epsilon_{real}}$

Μέγιστη απώλεια ενέργειας  $\omega = \omega_0$  ή  $\omega = 1/\tau$

Πόλωσης προσανατολισμού, διπολική πόλωση, Ιοντική πόλωση, Ηλεκτρονική πόλωση  $\epsilon_r = 1$

Ραδιοσυχνότητες, Υπέρυθρο, Υπερωώδες φως

**Απώλειες διαρροής**  
 Λόγω διαρροής ρεύματος η ηλεκτρική ενέργεια απορροφάται στο υλικό υπό μορφή θερμικής ενέργειας

12

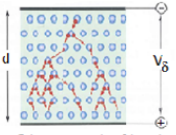
### Διηλεκτρική αντοχή - Διάσπαση διηλεκτρικού

Υψηλό E (1-15MV/m) οδηγεί σε τοπική αγωγιμότητα


**Διάσπαση στα στερεά:** δημιουργία μόνιμων αγώγιμων διαύλων

**Διηλεκτρική αντοχή:** το μέγιστο πεδίο που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μονωτικό μέσο χωρίς να προκαλέσει διηλεκτρική διάσπαση,  $Eδ = Vδ/d$

Καθορίζει τη χρησιμότητα των μονωτικών υλικών

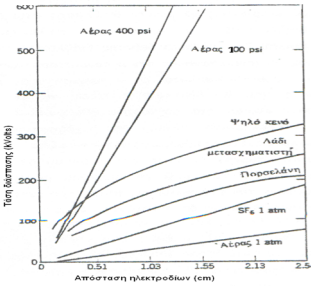


Η διάσπαση περιλαμβάνει ένα χείμαυρο από ηλεκτρόνια σαν χτύπημα κεραυνού



**Η Διηλεκτρική αντοχή εξαρτάται από:** ομοιογένεια υλικού, γεωμετρία ηλεκτροδίων, τρόπος εφαρμογής τάσης (ac, dc, pulsed), συνθήκες περιβάλλοντος

Material	Critical Field Strength (kV/cm)
Oil	200
Glass, ceramics	200...400
Mica	200...700
Oiled paper	1800
Polymers	50...900
SiO <sub>2</sub> in ICs	> 10 000
Thin films in ICs	> 1 000 000



Γραφικό διάγραμμα που δείχνει την Τηλετάση (kV) ως συνάρτηση της Απόστασης ηλεκτροδίων (cm) για διάφορα υλικά και συνθήκες: Αέρας 400 psi, Αέρας 100 psi, Ψηλό κενό, Λάδι μετασχηματιστή, Πυροσελάνη, SF<sub>6</sub> 1 atm, Αέρας 1 atm.

13

### Μηχανισμοί διάσπασης

- Ηλεκτρική διάσπαση: Υπερβολική επιτάχυνση λιγοστών ηλεκτρονίων
- Θερμική διάσπαση: υπερθέρμανση του διηλεκτρικού λόγω διηλεκτρικών απωλειών (μέχρι και διάτρηση)
- Διάσπαση αποφόρτισης (ιονισμού): ιονισμός παγιδευμένου αερίου σε πορώδη μονωτικά (διάτρηση)

**Διάσπαση υγρών :** αντιπροσωπεπτή

Ευνοείται από προσμίξεις από αιωρούμενα σωματίδια, φυσαλίδες αέρα και υγρασία

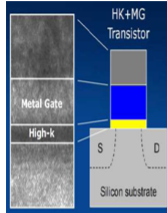
**Διάσπαση αερίων:** ο μηχανισμός εξαρτάται από είδος αερίου, πίεση και θερμοκρασία, απόσταση ηλεκτροδίων, γεωμετρία ηλεκτροδίων

Κατά τη μεταφορά ισχύος, οι τάσεις είναι αρκετά υψηλές — περίπου 20000 volt — ώστε να συμβεί κατάρρευση στους μονωτές που στηρίζουν τα καλώδια, στα μικροκικλώματα και στις συσκευές λεπτών υμενίων οι αποστάσεις μεταξύ των εξαρτημάτων είναι πολύ μικρές. Διαφορά 1 V σε μια απόσταση 1 μm δίνει ένα πεδίο με ένταση 1 MV/m.

14

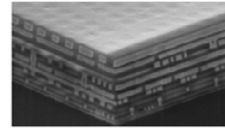
### Διηλεκτρικές ιδιότητες

Πολύ μεγάλης σημασίας στους ημιαγωγούς και τους μονωτές



Διηλεκτρικά υλικά με μεγάλο  $\epsilon_r$

intel

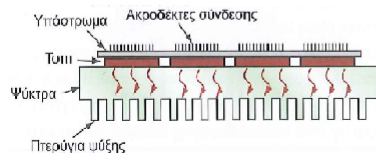


AMD

Διηλεκτρικά υλικά με μικρό  $\epsilon_r$

Απομόνωση, θωράκιση,...

Πικνωτές, πύλες τρανζίστορ,...



audiorents

Πιεζοηλεκτρισμός

(Αισθητήρες, γεννήτριες,...)