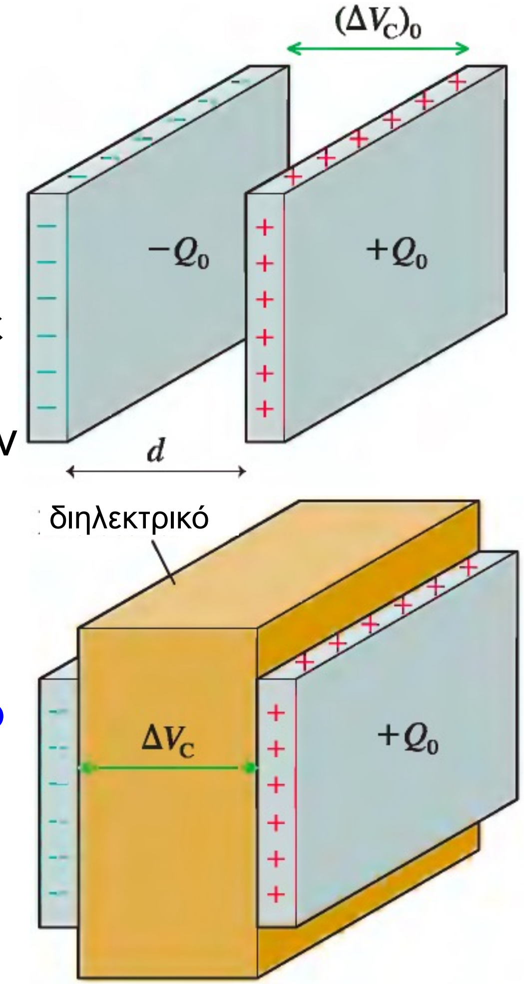
Διηλεκτρικά

Διηλεκτρικά υλικά

Θεωρούμε έναν επίπεδο πυκνωτή.

Ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή υπάρχει κενό

Ο πυκνωτής παρουσιάζει χωρητικότητα $C_0 = \frac{Q_0}{(\Delta V_C)_0}$



Συχνά ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή παρεμβάλουμε κάποιο μονωτικό υλικό, όπως χαρτί, πλαστικό, γυαλί, λάδι, το οποίο δεν επιτρέπει φορτία να διαπεράσουν την απόσταση των δύο οπλισμών.

Θεωρούμε ότι το υλικό γεμίζει πλήρως την περιοχή ανάμεσα στους οπλισμούς και έχει πάχος *d*

- Μονωτικό υλικό σε ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται **διηλεκτρικό**
- Η παρουσία του μονωτικού υλικού δεν μεταβάλει το φορτίο Q_o στους οπλισμούς του πυκνωτή.
- Μέτρηση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των οπλισμών του πυκνωτή δείχνει ότι η διαφορά δυναμικού έχει μειωθεί $\Delta V < \Delta V_0$
- Από τον ορισμό της χωρητικότητας: $C = \frac{Q_0}{\Delta V}$ και $\Delta V < \Delta V_0$ έχουμε ότι: $C_{\delta\iota\eta\lambda.} > C_0$
- Η παρουσία του διηλεκτρικού αυξάνει την χωρητικότητα

Διηλεκτρικά υλικά

Η διαπίστωση αυτή αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές.

- Εξήγηση του φαινομένου:

  Όταν διηλεκτρικό υλικό εισαχθεί στην περιοχή ανάμεσα στου οπλισμούς ενός πυκνωτή, η χωρητικότητα αυξάνει: $C = k_e C_0$

  Η σταθερά k_e είναι χαρακτηριστική του υλικού και ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά

  Για όλα τα διηλεκτρικά υλικά, η διηλεκτρική σταθερά είναι $k_e > 1$

  Η διηλεκτρική αντοχή κάθε υλικού είναι το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου στο οποίο έχουμε εκκένωση και φορτία αρχίζουν να άγουν μέσω του υλικού το οποίο χάνει τις μονωτικές του ιδιότητες.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά	Διηλεκτρική αντοχή ($10^6\,V/m$)
Αέρας	1.00059	3
Χαρτί	3.7	16
Γυαλί	4-6	9
Νερό	80	-

Διηλεκτρικά υλικά

Η αύξηση της χωρητικότητας μπορεί να εξηγηθεί από μοριακή θεώρηση του υλικού: Η διηλεκτρική σταθερά αποτελεί την διηλεκτρική απόκριση του υλικού σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

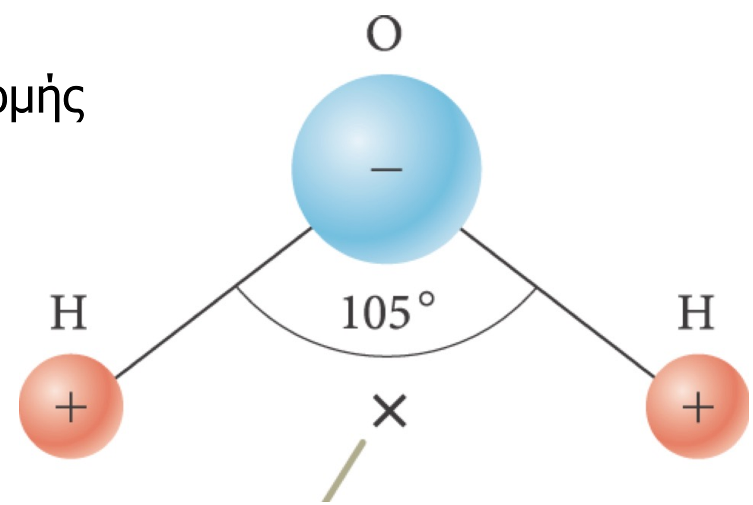
- Όταν η μέση θέση των θετικών φορτίων ενός μορίου και η μέση θέση των αρνητικών φορτίων του μορίου δεν ταυτίζονται και το μόριο είναι πολωμένο
- Μόρια στα οποία η πόλωση αυτή είναι μόνιμη ονομάζονται πολικά μόρια

- Στο μόριο του νερού, το κέντρο της κατανομής του αρνητικού φορτίου βρίσκεται κοντά στο άτομο του Οξυγόνου

  Στο σημείο X βρίσκεται το κέντρο της κατανομής του θετικού φορτίου

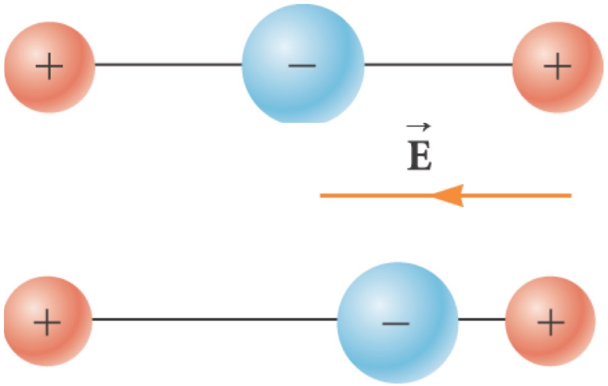
  Οι μέσες θέσεις του θετικού φορτίου και του αρνητικού φορτίου συμπεριφέρονται ως σημειακά φορτία

  - Μοντελοποίηση πολικών μορίων ως ηλεκτρικά δίπολα



το κέντρο της κατανομής θετικού φορτίου, βρίσκεται στο σημείο X

Επαγόμενη πόλωση (σε μη πολικά μόρια)



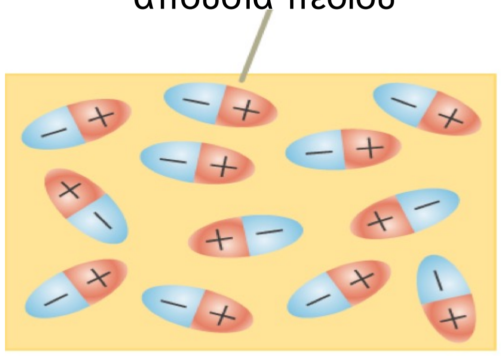
Ένα γραμμικά συμμετρικό μόριο δεν έχει μόνιμη πόλωση

Αν το μόριο εισαχθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο τότε επάγεται πόλωση

Η επαγόμενη πόλωση κυριαρχεί ως διαδικασία στα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στους πυκνωτές ως διηλεκτρικά

Διηλεκτρικά υλικά – Εξέταση σε Ατομικό Επίπεδο

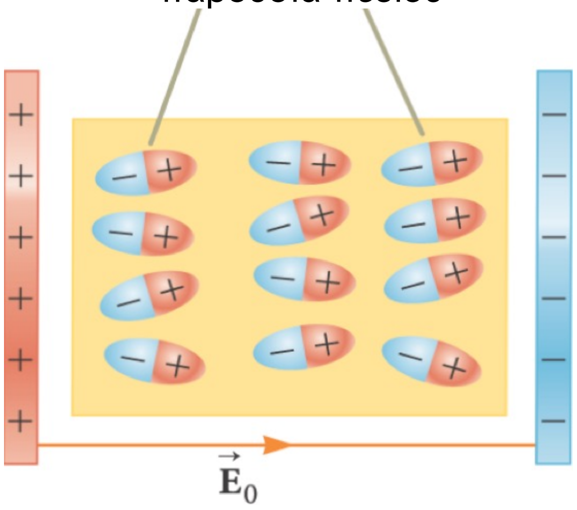
Έστω ότι το μόρια του διηλεκτρικού υλικού είναι πολικά. Όταν δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο έχουν τυχαίο προσανατολισμό.



Εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο .

Αν τα μόρια του διηλεκτρικού υλικού είναι μή πολικά τότε το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί διαχωρισμό των φορτίων

Τα μόρια συμπεριφέρονται σαν να ήταν πολικά μόρια. Αναπτύσσεται ροπή στα μόρια και αυτά ευθυγραμμίζονται μερικώς με το ηλεκτρικό πεδίο



Ο βαθμός ευθυγράμμισης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το μέτρο του πεδίου

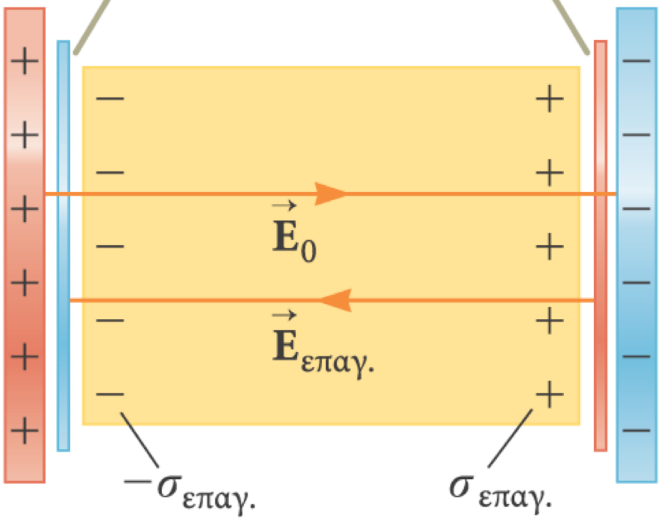
Γενικά ο βαθμός ευθυγράμμισης αυξάνεται όταν μειώνεται η θερμοκρασία και όταν αυξάνεται το μέτρο του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου

Διηλεκτρικά υλικά – Εξέταση σε Ατομικό Επίπεδο

Η τελική επίδραση στο διηλεκτρικό είναι η ανάπτυξη ενός επαγόμενου επιφανειακού φορτίου

Τα φορτισμένα άκρα του διηλεκτρικού υλικού δρουν ως ένα δεύτερο ζεύγος οπλισμών, δημιουργώντας ένα επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο που έχει κατεύθυνση αντίθετη εκείνης του αρχικού ηλεκτρικού πεδίου

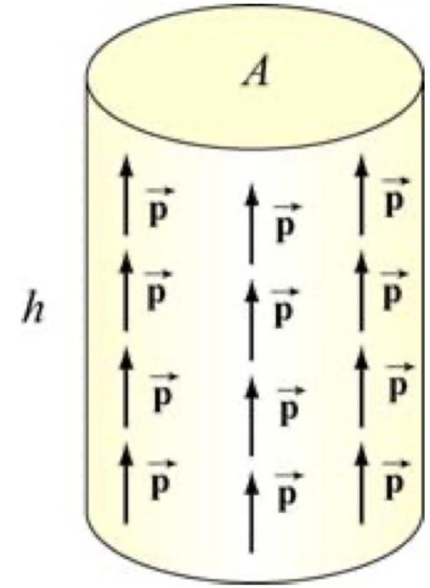
Μοντελοποιούμε τα φορτισμένα άκρα του διηλεκτρικού ως ένα επιπλέον ζεύγος παράλληλων οπλισμών που δημιουργούν επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}_{\varepsilon\pi\alpha\gamma.}$ με κατεύθυνση αντίθετη του $\vec{E}_0$



Πόλωση

Είδαμε ότι τα διηλεκτρικά υλικά αποτελούνται από πολλά μόνιμα ή επαγόμενα ηλεκτρικά δίπολα

Για να καταλάβουμε τη συμπεριφορά αυτή θα πρέπει να εξετάσουμε το μέσο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από πολλά μικρά προσανατολισμένα ηλεκτρικά δίπολα.



Υποθέστε ότι έχουμε ένα κομμάτι υλικού στη μορφή ενός κυλίνδρου με εμβαδό βάσης *A* και ύψος *h*.

Υποθέτουμε ότι ο κύλινδρος αποτελείται από *N* ηλεκτρικά δίπολα, διπολικής ροπής $\vec{p}$ που εκτείνονται ομοιόμορφα στο χώρο που καταλαμβάνει ο κύλινδρος.

Υποθέτουμε ότι όλες οι ηλεκτρικές διπολικές ροπές των ηλεκτρικών διπόλων είναι προσανατολισμένες παράλληλα με τον άξονα του κυλίνδρου.

Πόλωση

Κάθε δίπολο δημιουργεί το δικό του ηλεκτρικό πεδίο, και στην απουσία ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, θα πρέπει να βρούμε το μέσο ηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται από τα προσανατολισμένα δίπολα.

- Θεωρούμε το διάνυσμα πόλωσης $\vec{P}$ το οποίο είναι το διάνυσμα της συνισταμένης διπολικής ροπής ανά μονάδα όγκου:

$$\vec{P} = \frac{1}{Όγκος}\sum_{i=1}^{N}\vec{p}_i$$

- Για την περίπτωση του κυλίνδρου, όπου όλα τα δίπολα είναι τέλεια προσανατολισμένα, $\vec{P}$, θα δίνεται από τη σχέση:

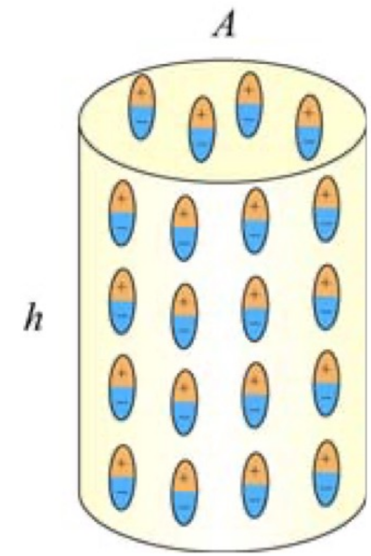
$$P = \frac{Np}{hA}$$

  και η διεύθυνση είναι παράλληλη προς τα προσανατολισμένα δίπολα

Πόλωση – Δημιουργία φορτίου

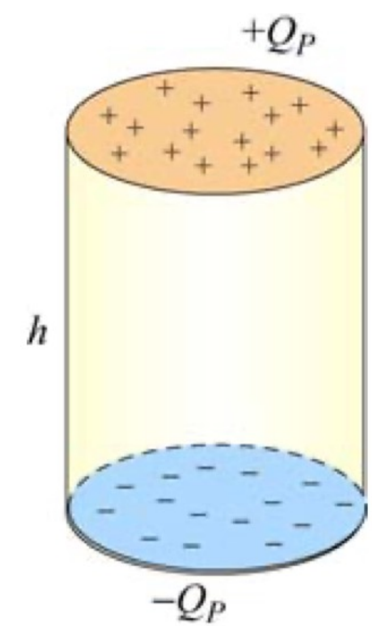
Θα πρέπει να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν τα προσανατολισμένα αυτά δίπολα

Μπορούμε να υπολογίσουμε το πεδίο αυτό αν θεωρήσουμε ότι η κατάσταση των διπόλων του σχήματος μοιάζει με την κατάσταση στην οποία όλα τα ± φορτία που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά δίπολα στο εσωτερικό του κυλίνδρου αντικαθίστανται από δύο φορτία +Q και –Q στις δύο βάσεις του κυλίνδρου



Αυτή η ισοδυναμία των δύο κατανομών μπορεί να γίνει κατανοητή αν παρατηρήσουμε ότι στο εσωτερικό του κυλίνδρου το θετικό φορτίο ενός διπόλου αναιρείται από το αρνητικό φορτίο του αμέσως επόμενου διπόλου.

Η μόνη περιοχή στην οποία δεν υπάρχει αυτή η αναίρεση φορτίων διπόλων είναι κοντά στις βάσεις του κυλίνδρου όπου δεν υπάρχουν γειτονικά δίπολα στην πάνω ή κάτω πλευρά.



Το εσωτερικό του κυλίνδρου εμφανίζεται αφόρτιστο κατά μέση τιμή (αθροίζοντας πολλά δίπολα) ενώ οι δύο βάσεις εμφανίζονται φορτισμένες με $+Q_P$ (η πάνω βάση) και $–Q_p$ (η κάτω βάση)

Πόλωση – Υπολογισμός του ισοδύναμου φορτίου

Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου φορτίου Q_P μπορούμε να ακολουθήσουμε τα ακόλουθα βήματα

Θεωρούμε την ηλεκτρική διπολική ροπή P_Q που δημιουργεί το φορτίο Q_P

$$P_Q = Q_P h$$

Αυτή η διπολική ροπή θα πρέπει να είναι ισοδυναμεί με την ολική διπολική ροπή που δημιουργούν όλα τα δίπολα στο εσωτερικό του κυλίνδρου:

$$P_Q = Np$$

Επομένως: $P_Q = Np = Q_P h \Rightarrow \boxed{Q_P = \frac{Np}{h}}$

Πόλωση – Υπολογισμός του ισοδύναμου πεδίου

Ξέροντας το φορτίο μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί αυτό το φορτίο

Παρατηρούμε ότι το ισοδύναμο φορτίο κατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μοιάζει με την κατανομή φορτίου ενός επίπεδου πυκνωτή με επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σ_p

$$\sigma_P = \frac{Q_P}{A} = \frac{Np}{hA} \Rightarrow \boxed{\sigma_P = P}$$ επιφανειακή πυκνότητα φορτίου = πόλωση

Να σημειωθεί ότι οι μονάδες μέτρησης της πόλωσης στο σύστημα *SI* ($C \cdot m/m^3$) είναι ίδιες με αυτές της επιφανειακής πυκνότητας φορτίου

Εν γένει, αν το διάνυσμα της πόλωσης δημιουργεί γωνία θ με το διάνυσμα $\hat{n}$, που είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια με φορά προς τα έξω, η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα είναι:

$$\boxed{\sigma_P = P \cdot \hat{n} = P\cos\theta}$$

το μέσο ηλεκτρικό πεδίο των διπόλων είναι αντίθετο στη διεύθυνση των διπολων

Άρα το ισοδύναμο ηλεκτρικό πεδίο θα είναι: $\boxed{E_P = \dfrac{P}{\varepsilon_0}}$

Αλλά η διεύθυνση του πεδίου είναι αντίθετη της πόλωσης: $\boxed{\vec{E}_P = -\dfrac{\vec{P}}{\varepsilon_0}}$

Αποτέλεσμα εισαγωγής διηλεκτρικού σε σύστημα

Υποθέτουμε ότι τα άτομα του υλικού που εισάγουμε στο σύστημα έχουν μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή.

Ο προσανατολισμός των διπόλων αυτών απουσία ηλεκτρικού πεδίου είναι τυχαίος, και επομένως $\vec{P} = \vec{0}$.

Σαν αποτέλεσμα το μέσο ηλεκτρικό πεδίο θα είναι $\vec{E}_P = \vec{0}$.

Όταν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, $\vec{E}_0$, τότε τα δίπολα προσανατολίζονται εξαιτίας της ροπής $\vec{\tau} = \vec{p}\times\vec{E}_0$

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια συνισταμένη πόλωση $\vec{P}//\vec{E}_0$ και επομένως ένα μέσο ηλεκτρικό πεδίο, $\vec{E}_P$, το οποίο είναι στην αντίθετη κατεύθυνση με το $\vec{E}_0$, και σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται: $\vec{E} = \vec{E}_P + \vec{E}_0$

Θα έχουμε επομένως: $\vec{E} = \vec{E}_P + \vec{E}_0 \Rightarrow \ \vec{E} = \vec{E}_0 - \dfrac{\vec{P}}{e_0}$

Η πόλωση είναι συνήθως όχι μόνο παράλληλη προς το $\vec{E}$ αλλά και γραμμικά ανάλογη με το $\vec{E}_0$ κάτι που είναι αναμενόμενο γιατί διαφορετικά απουσία πεδίου δεν θα υπήρχε προσανατολισμός των διπόλων αλλά ούτε και πόλωση.

Διηλεκτρική σταθερά

Εκφράζουμε την γραμμική σχέση της πόλωσης $\vec{P}$ και του ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}$ ως:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E}$$

Η σταθερά χ_e ονομάζεται ηλεκτρική επιδεκτικότητα

Υλικά που υπακούν στη προηγούμενη σχέση ονομάζονται γραμμικά διηλεκτρικά

Αντικατάσταση του πεδίου $\vec{E}$ από την σχέση: $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{P}/\varepsilon_0$ θα δώσει:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \Rightarrow \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0} = \chi_e \vec{E} \Rightarrow \vec{E}_0 - \vec{E} = \chi_e \vec{E} \Rightarrow \boxed{\vec{E}_0 = (1+\chi_e)\vec{E} \Rightarrow \vec{E}_0 = \kappa_e \vec{E}}$$

όπου $\kappa_e = (1+\chi_e)$ η διηλεκτρική σταθερά.

Παρατηρούμε ότι η διηλεκτρική σταθερά είναι πάντοτε μεγαλύτερη της 1 επειδή $\chi_e > 0$

Αυτό σημαίνει ότι: $\dfrac{E_0}{E} = \kappa_e \Rightarrow \dfrac{E_0}{k_e} < E_0$

Επομένως η ύπαρξη του διηλεκτρικού έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του ηλεκτρικού πεδίου

Η περίπτωση των μη πολικών μορίων δουλεύει ανάλογα με τα προηγούμενα με τη διαφορά ότι τα μόρια δεν είναι προσανοατολισμένα αρχικά

Διηλεκτρικά σε πυκνωτή χωρίς μπαταρία

Μια μπαταρία με διαφορά δυναμικού $|\Delta V_0|$ στους πόλους της συνδέεται αρχικά σε έναν πυκνωτή χωρητικότητας C_0 προσδίδοντάς του φορτίο $Q_0 = C_0|\Delta V_0|$. Κατόπιν η μπαταρία αποσυνδέεται από τον πυκνωτή αφήνοντας τον πυκνωτή φορτισμένο με φορτίο Q_0.

Εισάγουμε κατόπιν ένα διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή, ενώ διατηρούμε σταθερό το φορτίο.

Μετράμε το δυναμικό στα άκρα του πυκνωτή και βρίσκουμε ότι έχει ελαττωθεί κατά ένα παράγοντα $\kappa_e \Rightarrow |\Delta V| = \dfrac{|\Delta V_0|}{\kappa_e}$

Η μείωση της διαφοράς δυναμικού δηλώνει ότι η χωρητικότητα έχει αλλάξει:

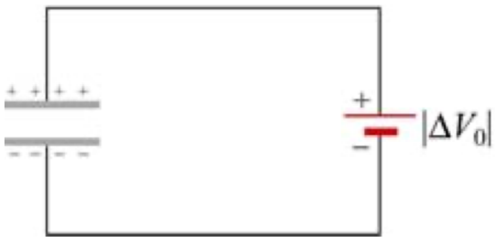
$$C = \frac{Q_0}{|\Delta V|} = \frac{Q_0}{|\Delta V_0|/\kappa_e} \Rightarrow C = \kappa_e C_0$$ αύξηση της χωρητικότητας κατά κ_e

Το ηλεκτρικό πεδίο στο διηλεκτρικό είναι τώρα: $E = \dfrac{|\Delta V|}{d} = \dfrac{|\Delta V_0|/\kappa_e}{d} = \dfrac{1}{\kappa_e}\left(\dfrac{|\Delta V_0|}{d}\right)$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{\kappa_e} E_0$$ ελάττωση του ηλεκτρικού πεδίου κατά κ_e

Διηλεκτρικά σε πυκνωτή με μπαταρία

Θεωρούμε την περίπτωση, όπως και προηγουμένως, με τον πυκνωτή να φορτίζεται με την βοήθεια της μπαταρίας με φορτίο $Q_0 = C_0|\Delta V_0|$



Στην περίπτωση αυτή η μπαταρία δεν αποσυνδέεται από τον πυκνωτή και εισάγουμε το διηλεκτρικό υλικό ενώ διατηρείται σταθερή η διαφορά δυναμικού $|\Delta V_0|$.

Πειραματικά βρέθηκε (πρώτα από τον Faraday) ότι το φορτίο στους οπλισμούς του πυκνωτή αυξάνει κατά έναν παράγοντα: $\mathrm{Q} = \kappa_e Q_0$

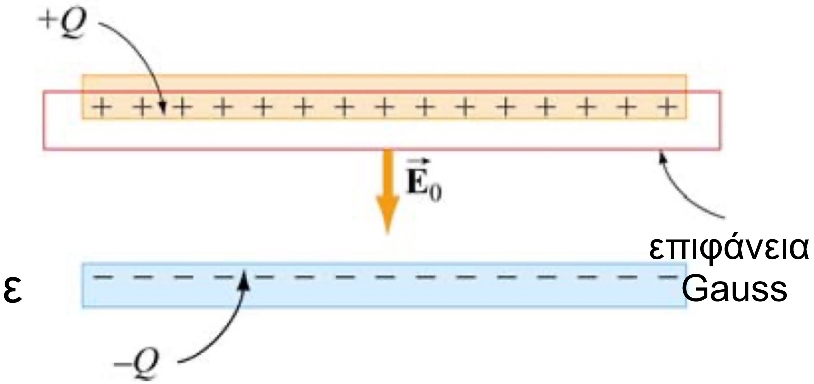
Στην περίπτωση αυτή, η χωρητικότητα του πυκνωτή γίνεται:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa_e Q_0}{V_0} \Rightarrow C = \kappa_e C_0$$ αύξηση της χωρητικότητας κατά κ_e

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση, αλλά τώρα αντί να μειωθεί το δυναμικό στα άκρα του πυκνωτή αυξάνεται το φορτίο του

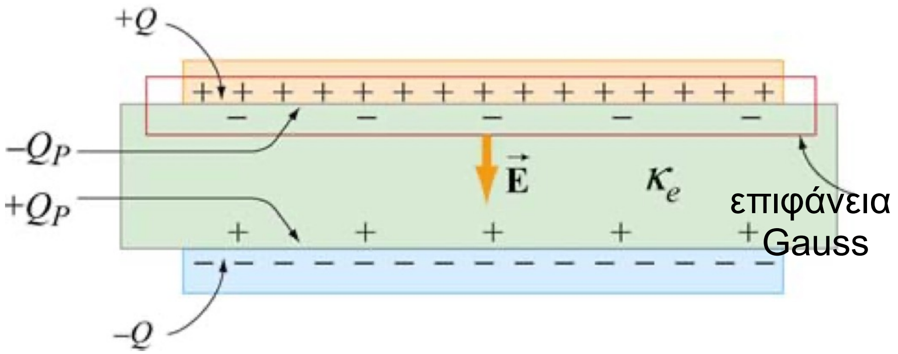
Νόμος Gauss για διηλεκτρικά

Θεωρούμε έναν επίπεδο πυκνωτή με τους οπλισμούς του φορτισμένους με φορτίο Q και βρισκόμενους σε δυναμικό $|\Delta V_0|$



Εφαρμόζοντας τον νόμο του Gauss υπολογίζουμε το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του πυκνωτή αρχικά για την περίπτωση μη παρουσίας διηλεκτρικού υλικού

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = E_0 A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



Καθώς εισάγουμε το διηλεκτρικό, επάγεται αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο Q_P στην επιφάνεια του διηλεκτρικού. Σαν αποτέλεσμα το φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια Gauss ελαττώνεται σε: $Q - Q_P$

Εφαρμογή του νόμου του Gauss στην περίπτωση αυτή:

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = EA = \frac{Q - Q_P}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow E = \frac{Q - Q_P}{A\varepsilon_0}$$

Νόμος Gauss για διηλεκτρικά

Η παρουσία του διηλεκτρικού έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του αρχικού πεδίου E_0 κατά έναν παράγοντα κ_e

Επομένως: $E = \frac{E_0}{\kappa_e} = \frac{Q}{\kappa_e \varepsilon_0 A} = \frac{Q - Q_P}{A\varepsilon_0} \Rightarrow \frac{Q}{\kappa_e} = Q - Q_P$

$$\Rightarrow Q_P = Q - \frac{Q}{\kappa_e} \Rightarrow Q_P = Q\left(1 - \frac{1}{\kappa_e}\right)$$

Η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα είναι: $\sigma_P = \sigma\left(1 - \frac{1}{\kappa_e}\right)$

Στο όριο που $\kappa_e \to 1$ θα πάρουμε $\sigma_P \to 0$ και $Q_P \to 0$ που είναι η περίπτωση μη παρουσίας διηλεκτρικού

Αντικαθιστώντας στον νόμο του Gauss τη σχέση για το φορτίο έχουμε:

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = E_0 A = \frac{Q - Q_P}{\varepsilon_0} \Rightarrow \oint\!\!\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\kappa_e \varepsilon_0} \Rightarrow \oint\!\!\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon}$$

νόμος Gauss για διηλεκτρικά

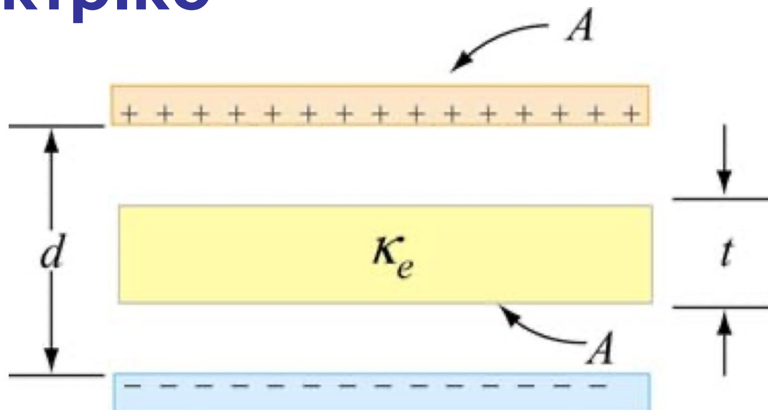
Ο όρος $\varepsilon = \kappa_e \varepsilon_0$ ονομάζεται διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού

Ο νόμος Gauss γραφεί επίσης ως: $\Rightarrow \oint\!\!\!\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$

όπου: $\vec{D} = \varepsilon_0 \kappa \vec{E}$ διάνυσμα ηλεκτρικής μετατόπισης

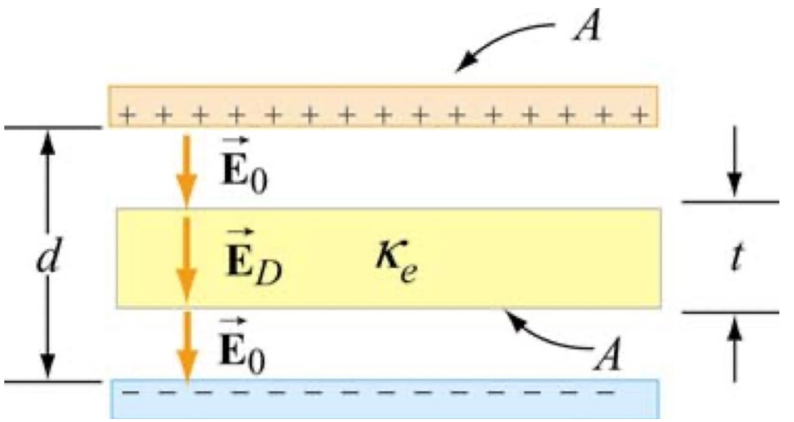
Χωρητικότητα πυκνωτή με διηλεκτρικό

Θεωρήστε ένα μη αγώγιμο κομμάτι υλικού, πάχους *t*, εμβαδού επιφάνειας *A* και διηλεκτρικής σταθεράς κ_e. Το υλικό εισάγεται ανάμεσα στους οπλισμούς ενός επίπεδου πυκνωτή, εμβαδού επιφάνειας *A*, απόστασης *d* και φορτίου *Q*.



Το διηλεκτρικό υλικό δεν βρίσκεται αναγκαστικά στο ενδιάμεσο της απόστασης των δύο οπλισμών. Θα υπολογίσουμε την χωρητικότητα του πυκνωτή

- Υπολογίζουμε αρχικά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή.
- Απουσία διηλεκτρικού το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στους οπλισμούς είναι: $E_0 = \dfrac{Q}{\varepsilon_0 A}$
- Παρουσία του διηλεκτρικού το ηλεκτρικό πεδίο, όπως είδαμε, ελαττώνεται: $E_D = \dfrac{E_0}{\kappa_e}$

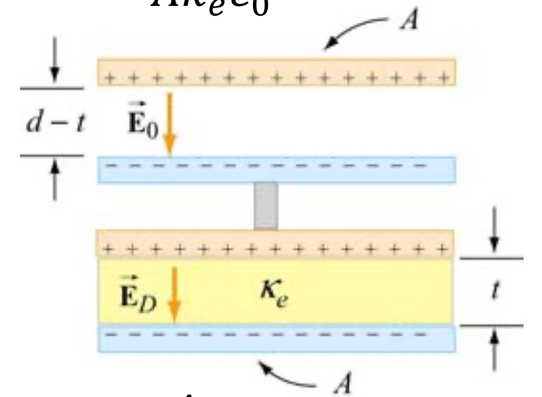


Χωρητικότητα πυκνωτή με διηλεκτρικό

- Υπολογίζουμε το δυναμικό ολοκληρώνοντας το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος μιας κατακόρυφης γραμμής από τον πάνω οπλισμό στον κάτω:

$$\Delta V = -\int_{+}^{-} E dl = -\Delta V_0 - \Delta V_D = E_0(d-t) - E_D t = -\frac{Q}{A\varepsilon_0}(d-t) - \frac{Q}{A\kappa_e\varepsilon_0} t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta V = -\frac{Q}{A\varepsilon_0}\left[d - t\left(1 - \frac{1}{\kappa_e}\right)\right]$$



- Όπου $\Delta V_D = E_D t$ είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο επιφανειών του διηλεκτρικού.

- Από την σχέση του δυναμικού και το φορτίο βρίσκουμε την χωρητικότητα:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{A\varepsilon_0}{\left[d - t\left(1 - \frac{1}{\kappa_e}\right)\right]}$$

(α) Για $t \to 0$, καταλήγουμε: $C \to \frac{\varepsilon_0 A}{d} = C_0$

(β) Για $\kappa_e \to 1$, καταλήγουμε: $C \to \frac{\varepsilon_0 A}{d} = C_0$

(γ) Για $t \to d$, καταλήγουμε: $C \to \frac{\kappa_e \varepsilon_0 A}{d} = \kappa_e C_0$

- Η διάταξη μοιάζει με αυτή δύο πυκνωτών συνδεδεμένοι σε σειρά:
- Χρησιμοποιώντας τη σχέση της συνδεσμολογίας σε σειρά: $\frac{1}{C} = \frac{d-t}{e_0 A} + \frac{t}{k_e e_0 A}$