Capitolul 3
Condensatoare electrice

3.1. Materiale dielectrice

Dielectricii sunt materiale capabile a se polariza electric temporar. Clasa materialelor dielectrice coincide aproape în totalitate cu clasa materialelor izolante.

Materialele dielectrice sunt utilizate la:

- izolarea părților conductoare ale tuturor echipamentelor electrice
- pentru umplerea spațiilor dintre armăturile condensatoarelor electrice

Din punct de vedere tehnic dielectricii sunt caracterizați prin:

- polarizabilitatea electrică temporară
- rigiditatea dielectrică
- pierderile dielectrice
- rezistivitatea electrică

a) Polarizabilitatea electrică temporară

Pentru materialele liniare expresia polarizației temporare este:

$$\overline{P_t} = \varepsilon_0 \chi_e \overline{E}$$

în care

χ_e	este susceptivitatea electrică
$\varepsilon_r = 1 + \chi_e$	este permitivitatea electrică relativă
$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	este permitivitatea electrică absolută

Materialele ale căror atomi/molecule sunt spontan nepolare se numesc ***diaelectrice***.

La aplicarea unui câmp electric exterior are loc o polarizare electrică temporară numită și *polarizare de deformare*; deplasarea electronilor în sens opus câmpului exterior se numește *polarizare electronică*. Fig. 4.01 prezintă un atom în absența câmpului exterior și altul în prezența lui când nucleul se separă într-o componentă pozitivă și alta negativă cu aspect dipolar orientat ca în figură.

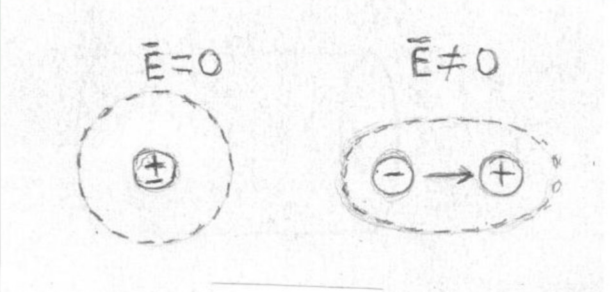


Fig.4.01

Permitivitatea relativă este poate avea o expresie analitică de tipul $\varepsilon_r = n^2$ în care n este indicele de refracție optimă a mediului și ia valori adimensionale între 1 și 2. Polarizarea este un fenomen care se desfășoară într-un timp foarte scurt, care variază între 10^{-13} și 10^{-14} secunde.

Materialele ai căror atomi/molecule au un moment dipolar spontan nenul se numesc materiale ***paraelectrice*** (gaze poliatomice CO_2, NH_3, H_2S, unele lichide etc.). Polarizația indusă la aceste materiale este o *polarizație de orientare*. Câteva caracteristici practice: permitivitatea relativă ε_r variază între $2 \ldots 15$ la solide și între $2 \ldots 100$ la lichide, iar timpul de stabilire este de ordinul 10^{-6} secunde.

În Fig. 4.02 se schițează dezorientarea dipolilor microscopici înainte de plasarea dielectricului într-un câmp electric exterior și orientarea lor după plasarea în câmp.

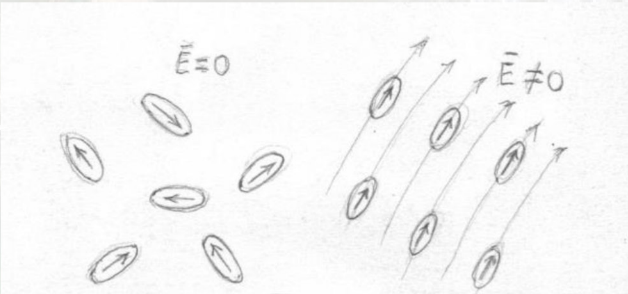


Fig.4.02

Dependența de temperatură a permitivității:

- la materialele diaelectrice nu depinde practic de temperatură
- la materialele paraelectrice în două moduri antagonice

Pe de-o parte crește mobilitatea moleculelor odată cu temperatura, de altă parte crește și agitația termică deci și abaterea de la orientare ($\varepsilon \uparrow$, $T \downarrow$)

b) Rigiditatea dielectrică

Se numeşte *rigiditate dielectrică*, notată E_d, acea valoare limită a intensităţii câmpului electric la depăşirea căreia, materialul îşi pierde calităţile electroizolante (se străpunge).

c) Pierderile dielectrice

Aceste pierderi se datorează în principal următoarelor cauze:

- caracterul imperfect de electroizolant care prezintă un curent de conducţie foarte slab care produce un efect Joule
- postefectul electric, mai ales la variaţii rapide ale câmpului electric aplicat

Densitatea de volum a pierderilor dielectrice se calculează cu formula

$$p_d = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta E^2 \ \ (\mathrm{W/m^3})$$

Mărimea notată $K = \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$ reprezintă *factorul de pierderi dielectrice* al materialului (caracterizează capacitatea prin care acesta poate absorbi energie), iar unghiul δ este definit în Fig. 4.03. Parametrul tg δ se numeşte factor de disipaţie/coeficient de pierderi dielectrice.

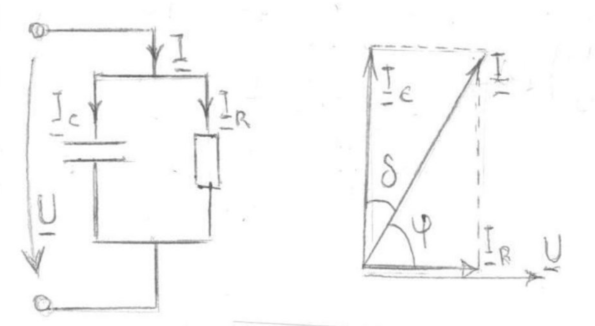


Fig.4.03

Un domeniu unde se aplică această proprietate a materialelor dielectrice este uscarea materialelor cu un conţinut ridicat de apă (industria farmaceutică şi alimentară).

d) Rezistivitatea electrică

Această proprietate de material este importantă în cazul dielectricilor. Valoarea rezistivităţii electrice ρ este de ordinul 10^3 $[\Omega\mathrm{m}]$. În afara rezistivităţii de volum, se mai defineşte rezistivitatea de suprafaţă (care se modifică sub influenţa vaporilor absorbiţi, impurităţi etc). Aceste cauze favorizează apariţia unor curenţi „de fugă”. Mărimea ρ_s depinde pronunţat şi de factorii ambientali (temperatură, presiune, umiditate).

3.2. Condensatoare electrice

a) Noțiuni introductive

Definiție: *Se numește condensator electric un ansamblu format din două conductoare omogene numite armături încărcate cu sarcini egale în valoare absolută dar de semne opuse.*

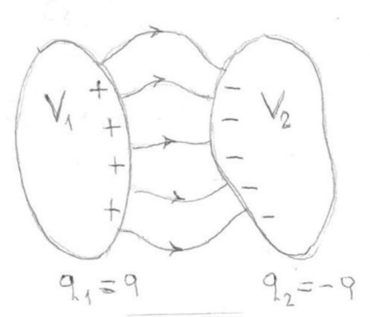


Fig4.04

Ca acest ansamblu să formeze un condensator este necesar ca toate liniile câmpului electric asociat sarcinilor electrice să ajungă de pe un conductor pe celălalt, neinfluențate de vreo cauză exterioară (teorema ariilor corespondente).

În practică această condiție nu se realizează în totalitate decât în cazul unui condensator în care distanța dintre conductoare este mult mai mică comparativ cu dimensiunile acestora. În Fig. 4.04 sunt două conductoare omogene de formă oarecare, având potențialele V_1 și V_2.

Capacitatea condensatorului este prin definiție

$$C = \frac{q_1}{u_{12}} = \frac{q_2}{u_{21}} = \frac{q}{u} > 0$$

Deși capacitatea depinde de regimul fenomenelor electrice s-a convenit ca valoarea standard a capacității să fie calculată în regim electrostatic.

Capacitatea electrică

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{V_1 - V_2}$$

este o mărime intrinsecă a condensatorului, indiferent dacă acesta este încărcat sau descărcat.

b) Teorema capacității electrostatice

În cazul în care armăturile condensatorului sunt conductoare omogene și spațiul dintre ele este ocupat de un mediu dielectric, *izotrop, nepolarizat permanent,* capacitatea condensatorului depinde numai de geometria acestuia și de proprietățile dielectricului dintre armături.

c) Clasificarea condensatoarelor

Criterii de clasificare:

- după forma armăturilor pot fi: plane, cilindrice, sferice, eliptice;
- după posibilitatea varierii capacității pot fi: fixe, variabile, ajustabile;
- după natura dielectricului: cu aer, ulei, mase ceramice etc.
- după destinație:
    - condensatoare utilizate în instalații energetice (compensarea factorului de putere, eliminarea paraziților, aprinderea motoarelor cu explozie, divizoare capacitive de tensiune)
    - condensatoare utilizate în telecomunicații pentru realizarea acordului în circuitele cu rezonanță, pentru cuplajul etajelor succesive, scurtcircuitarea rezistențelor în curent alternativ
- după clasa de precizie

Clasa	Toleranța față de valoarea marcată
I	±2%
II	± 5%
III	± 10%
IV	± 20%

3.3. Calculul capacității condensatoarelor electrice

Algoritmul de calcul al capacității unui condensator implică determinarea câmpului electric între armături în funcție de sarcina electrică a unei armături, urmată de calculul tensiunii dintre armături care rezultă tot în funcție de acea sarcină. Efectuând raportul q / U rezultă capacitatea condensatorului.

a) Capacitatea condensatorului plan

Condensatorul plan are distanța dintre armături mult mai redusă în raport cu dimensiunea armăturilor astfel încât poate fi neglijat efectul de capăt.

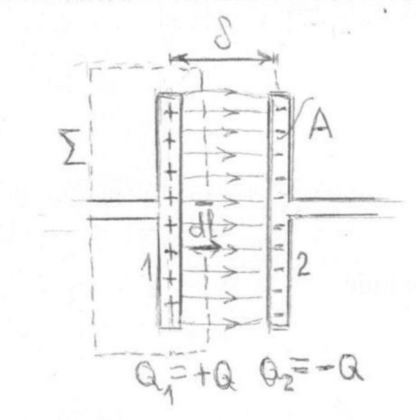


Fig.4.05

Cu notațiile din Fig. 4.05 fluxul electric este:

$$\Psi_\Sigma = \oint_\Sigma \overline{D}\,\overline{n}\,\mathrm{d}A = \oint_\Sigma D\,\mathrm{d}A = D\,A = \varepsilon\,E\,A,$$

iar sarcina electrică $q_{D_\Sigma} = Q$

Înlocuind în legea fluxului electric $\Psi_\Sigma = q_{D_\Sigma}$ rezultatele de mai sus, se obține $\varepsilon E A = Q$ astfel încât expresia modulului vectorului intensitate câmp electric este: $E = \dfrac{Q}{\varepsilon A}$.

Tensiunea dintre armături este: $U = \int_1^2 \overline{E}\,\mathrm{d}\overline{l} = E\int_1^2 \mathrm{d}l = E\,d = \dfrac{Q\,d}{\varepsilon A}$.

Capacitatea condensatorului plan rezultă:

$$C = \frac{Q}{U} = Q\frac{\varepsilon\,A}{Q\,d} = \frac{\varepsilon\,A}{d}.$$

OBS.: Forma armăturilor condensatorului plan poate avea orice configurație geometrică plană

b) Capacitatea condensatorului cilindric

Condensatorul cilindric reprezintă o configurație geometrică formată din două structuri cilindrice de rază R_1, respectiv R_2, una în interiorul celeilalte, plasate pe aceeași axa de simetrie (Fig. 4.06). Cei doi cilindrii formează armăturile condensatorului. Pentru a limita efectul de capăt se consideră lungimea armăturilor mult mai mare decât distanța dintre acestea.

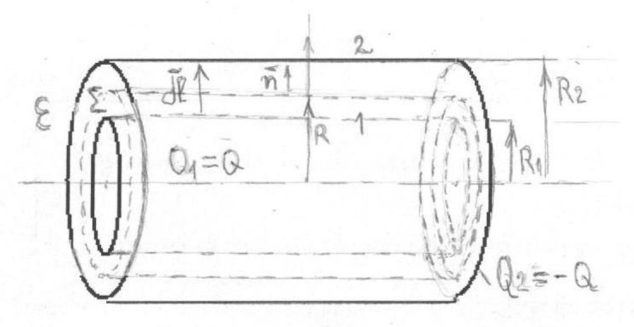


Fig.4.06

Cu notațiile din Fig. 4.06, fluxul electric este

$$\Psi_\Sigma = \oint_\Sigma \overline{D}\,\overline{n}\ \mathrm{d}A = \varepsilon E 2\pi R l,$$

iar sarcina electrică

$$q_{D_\Sigma} = Q.$$

Conform legii fluxului electric obținem expresia intensității câmpului electric

$E = \dfrac{Q}{2\pi\varepsilon R\, l}$ și tensiunea electrică la bornele condensatorului devine:

$$U = \int_{R_1}^{R_2} E\,\mathrm{d}l = \frac{Q}{2\pi\,\varepsilon\, l}\ln\frac{R_2}{R_1}.$$

Capacitatea electrică este $C = \dfrac{Q}{U} = \dfrac{2\pi\varepsilon l}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}$ (F),

iar cea specifică $C_s = \dfrac{C}{l} = \dfrac{2\pi\varepsilon}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}$ (F/m).

OBS.: Pentru configurațiile de condensatoare cilindrice care nu formează un cerc complet se va utiliza în formula de calcul în locul valorii 2π valoarea proporțională cu arcul de cerc descris de geometrie (de exemplu pentru structurile care utilizează structuri cilindrice de formă semi-cerc se va utiliza π).

c) Capacitatea condensatorului sferic

Condensatorul sferic reprezintă o configurație geometrică formată din două structuri sferice de rază R_1, respectiv R_2, una în interiorul celeilalte, având același punct de origine (Fig. 4.07). Cele două sfere formează armăturile condensatorului. Pentru această configurație geometrică nu există efect de capăt. Din motive de simetrie, acest condensator are următorii vectori omoparaleli: $\overline{D}\uparrow\uparrow\overline{E}\uparrow\uparrow\overline{n}\uparrow\uparrow \mathrm{d}\overline{l}$

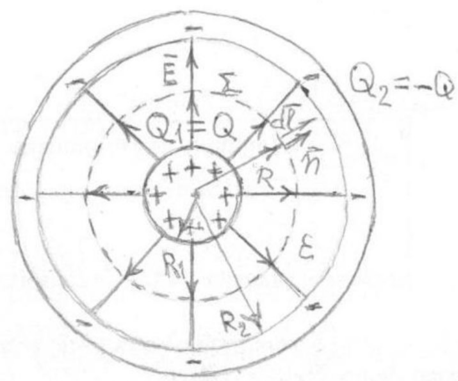


Fig.4.07

Cu notațiile din figură, fluxul electric este $\Psi_\Sigma = \oint_\Sigma \overline{D}\,\overline{n}\,\mathrm{d}A = \oint_\Sigma D\,\mathrm{d}A = 4\pi\varepsilon E\, R^2$ iar sarcina electrică $q_{D_\Sigma} = Q_1 = +Q$

Aplicând legea fluxului electric, se obține expresia intensității câmpului electric, egalând rezultatele de mai sus $\overline{E} = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon R^2}\overline{n}$

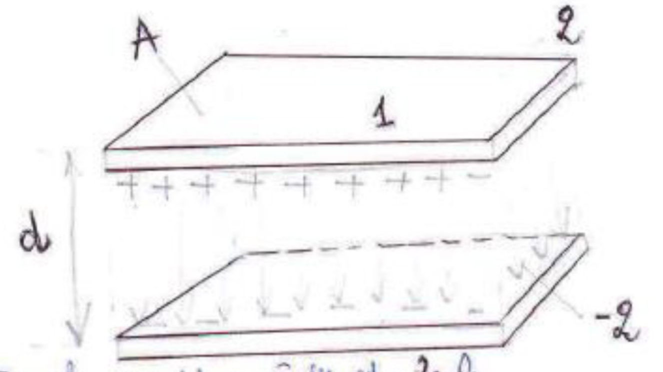
Tensiunea electrică dintre armături se obține integrând acest câmp între armăturile de raze R_1 și R_2

$$U = \int_{R_1}^{R_2} \overline{E}\,\mathrm{d}\overline{l} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\frac{1}{R^2}\mathrm{d}R = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

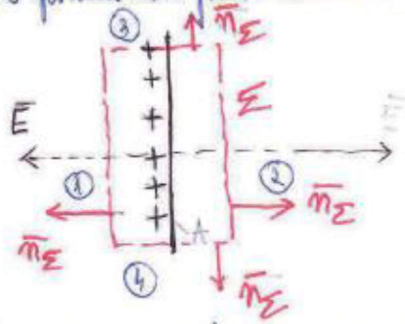
Capacitatea condensatorului sferic este

$$C = \frac{Q}{U} = Q\frac{4\pi\varepsilon}{Q}\frac{1}{\dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_2}} = \frac{4\pi\varepsilon}{\dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_2}}.$$

3 Condensatorul plan



a) $\bar{E}, \bar{D}$ pentru un plan încărcat cu ρ_s



$$\Psi_\Sigma = \int_\Sigma \bar{D}\cdot\bar{n}_\Sigma \, dA = \underset{①}{\varepsilon_0 E A} + \underset{②}{\varepsilon_0 E A} = 2\varepsilon_0 E A$$

$\bar{D} \uparrow\uparrow \bar{n}_\Sigma$

$|\bar{n}_\Sigma| = 1$

$\sphericalangle(\bar{D}$ și $\bar{n}_\Sigma) = 0$ pe ①, ②

pe 3, 4 $\sphericalangle(\bar{D}, \bar{n}_\Sigma) = 90^\circ$

$\Rightarrow \bar{D}\cdot\bar{n}_\Sigma = 0$

$$q_\Sigma = \rho_s A, \quad \Psi_\Sigma = q_\Sigma \Rightarrow 2\varepsilon_0 E \cancel{A} = \rho_s \cancel{A} \Rightarrow E = \frac{\rho_s}{2\varepsilon_0}, \quad D = \varepsilon_0 E = \frac{\rho_s}{2}$$

$$\bar{E} = E\cdot\bar{n}_\Sigma, \quad \bar{D} = D\cdot\bar{n}_\Sigma$$

b) Capacitatea C:

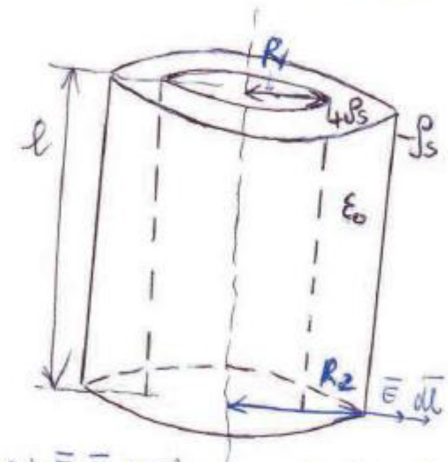
$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\int_0^d \bar{E}\, d\bar{l}} = \frac{\rho_s A}{\int_0^d E_t \, dl} = \frac{\rho_s A}{E_t \int_0^d dl} = \frac{\rho_s A}{E_t d} = \frac{\rho_s A}{\frac{\rho_s}{\cancel{2}\varepsilon_0}\cancel{2} d} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

$\bar{E} \parallel t$, $2E$

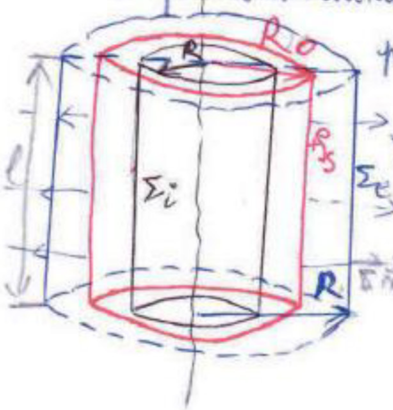
c) $W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 A U^2}{2d}$

d) $F = \frac{\partial W_e}{\partial d} = \frac{\varepsilon_0 A U^2}{2}\left(-\frac{1}{d^2}\right)$ [N]

1. Condensatorul cilindric.



a) $\bar{E}, \bar{D}$ pentru un cilindru încărcat cu ρ_s



pt $R<R_0$ $\quad \Psi_{\Sigma_i}=0,\ \bar{E}_i=0,\ \bar{D}_i=0$

pt $R>R_0$

$$\Psi_{\Sigma_e}=\int_{\Sigma_e}\underbrace{\bar{D}\cdot\bar{n}}_{\substack{\bar{D}\uparrow\uparrow\bar{n}\\ |\bar{n}|=1\\ \sphericalangle(\bar{D},\bar{n})=0}}dA=\int_{\Sigma_e}D\,dA=D\int_{\Sigma_e}dA=D\cdot 2\pi R l$$

$$Q_{\Sigma_e}=\int_{\Sigma_e}\rho_s\,dA=\int_{\Sigma_{cil\,inițial}(R=R_0)}\rho_s\,dA+\int_{\Sigma_e-\Sigma_{cil\,inițial}}0\,dA=\rho_s\,2\pi R_0\,l$$

$$\Psi_{\Sigma_e}=Q_{\Sigma_e}\Rightarrow D\cdot 2\pi R\cancel{l}=\rho_s\,2\pi R_0\cancel{l}\Rightarrow D=\rho_s\frac{R_0}{R}\qquad \bar{D}=\rho_s\frac{R_0}{R}\cdot\frac{\bar{R}}{R}\left[\frac{C}{m^2}\right]$$

$$\bar{E}=\frac{\bar{D}}{\varepsilon_0}=\rho_s\frac{R_0}{R^2}\bar{R}\cdot\frac{1}{\varepsilon_0}\left[\frac{V}{m}\right]$$

b) Capacitatea C

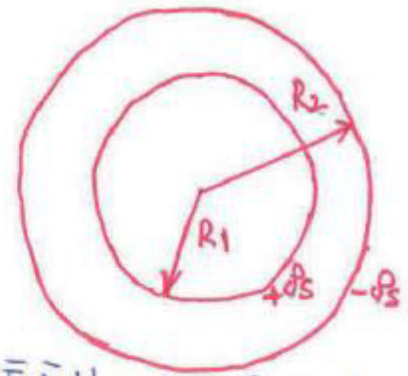
$$C=\frac{Q_{\Sigma e}}{U}=\frac{Q_{\Sigma e}}{\int_{R_1}^{R_2}\bar{E}\,d\bar{l}}=\frac{Q_{\Sigma e}}{\int_{R_1}^{R_2}\frac{D}{\varepsilon_0}dl}\overset{\bar{E}\uparrow\uparrow d\bar{l}}{=}\frac{Q_{\Sigma e}\cdot\varepsilon_0}{\int_{R_1}^{R_2}D\,dl}\overset{dl=dR}{=}\frac{\rho_s\,2\pi R_0\cdot l\cdot\varepsilon_0}{\int_{R_1}^{R_2}\rho_s\frac{R_0}{R}dR}$$

$$=\frac{2\pi\varepsilon_0\cdot l}{\int_{R_1}^{R_2}\frac{1}{R}dR}=\frac{2\pi\varepsilon_0\cdot l}{\ln\frac{R_2}{R_1}},\ \text{dc } R_1<R_0<R_2.$$

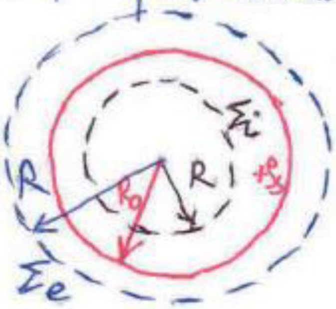
c) $$W_e=\frac{CU^2}{2}=\frac{\cancel{2}\pi\varepsilon_0\cdot l}{\ln\frac{R_2}{R_1}}\cdot\frac{U^2}{\cancel{2}}\,[J]$$

d) $$F=\frac{\partial W_e}{\partial l}=\frac{\pi\varepsilon_0U^2}{\ln\frac{R_2}{R_1}}\,[N]$$

2. Condensatorul sferic



a) $\bar{E}, \bar{D}$ pt o sferă încărcată cu ρ_s



pt $R<R_0$, $\Psi_{\Sigma i}=0$, $\bar{E}_i=0$, $\bar{D}_i=0$.

pt $R>R_0$

$$\Psi_{\Sigma e} = \oint_{\Sigma e} \bar{D}\bar{n}\cdot d\bar{A} \underset{\substack{\bar{D}\uparrow\uparrow\bar{n} \\ |\bar{n}|=1 \\ \sphericalangle(\bar{D},\bar{n})=0}}{=} \oint_{\Sigma e} D\cdot dA = D\cdot 4\pi R^2$$

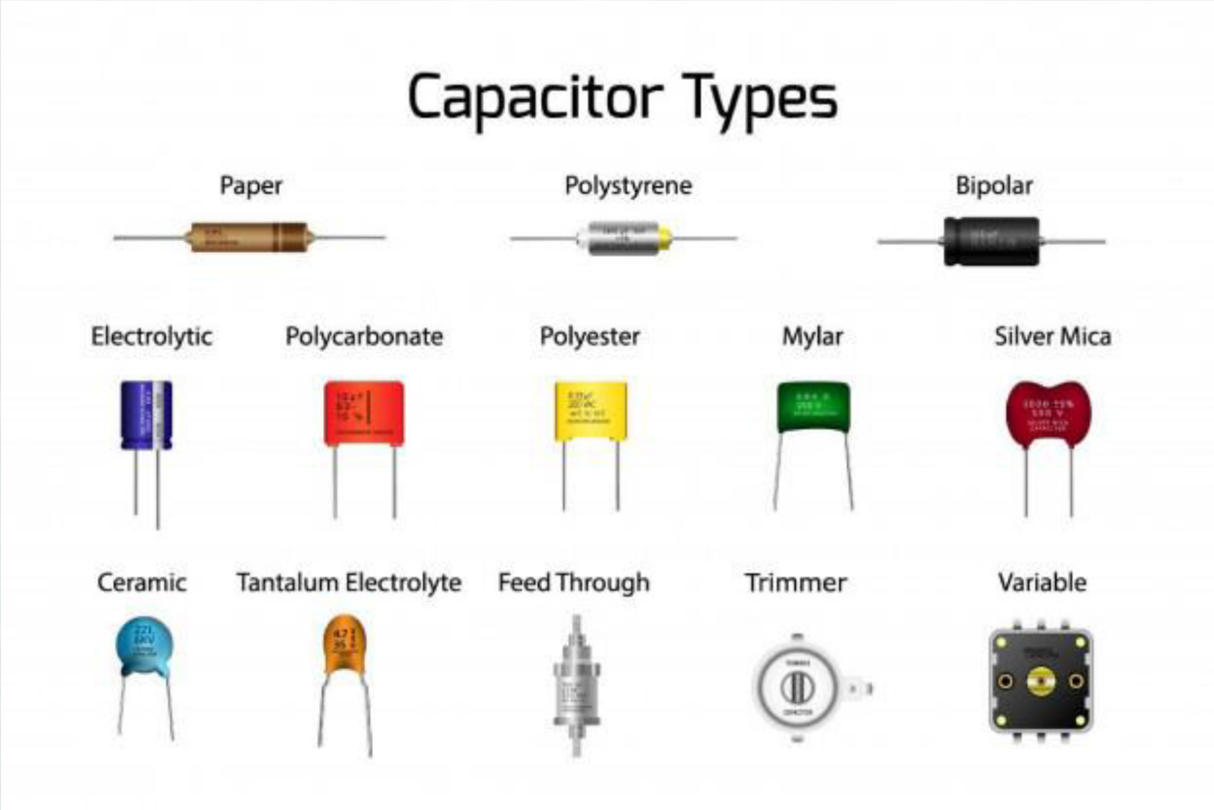
$$q_{\Sigma e} = \oint_{\Sigma e} \rho_s\cdot dA = \oint_{\Sigma \text{ sfera inițială } (R=R_0)} \rho_s\cdot dA = \rho_s\cdot 4\pi R_0^2$$

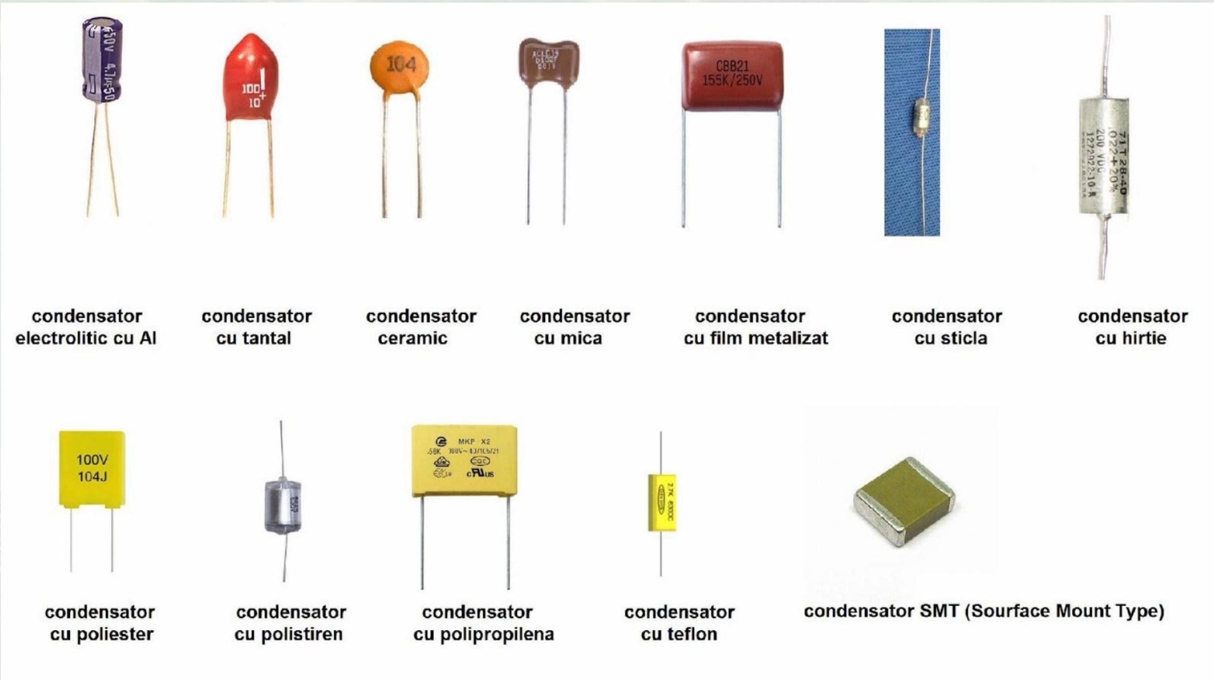
$$\Psi_{\Sigma e} = q_{\Sigma e} \Rightarrow D\cdot \cancel{4\pi} R^2 = \rho_s \cdot \cancel{4\pi} R_0^2 \Rightarrow D = \rho_s\left(\frac{R_0}{R}\right)^2, \quad \bar{D} = \rho_s\cdot\frac{R_0^2}{R^2}\cdot\frac{\bar{R}}{R}, \quad \bar{E} = \frac{\bar{D}}{\varepsilon_0}$$

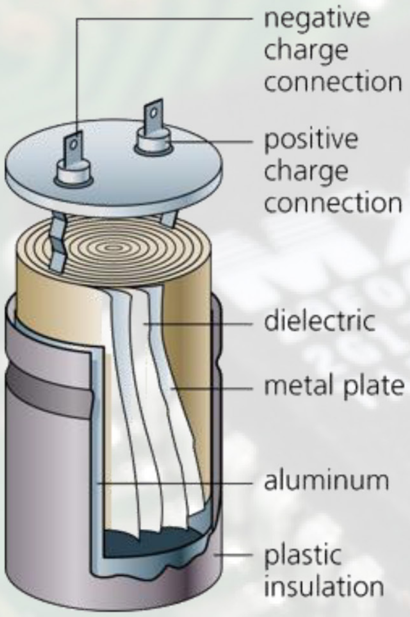
) Capacitate

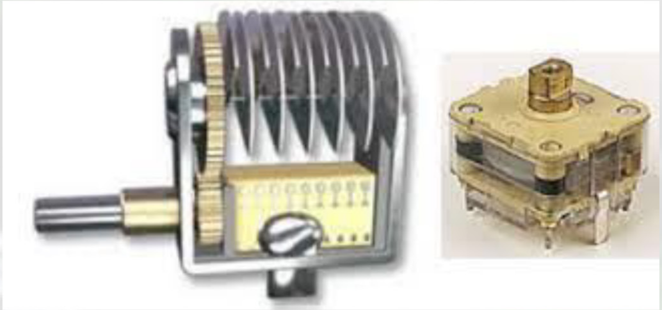
$$C = \frac{q_{\Sigma e}}{U} = \frac{q_{\Sigma e}}{\int_{R_1}^{R_2} E\, dl} = \frac{q_{\Sigma e}}{\int_{R_1}^{R_2} E\, dl} = \frac{\cancel{\rho_s}\cdot 4\pi \cancel{R_0^2}\cdot \varepsilon_0}{\int_{R_1}^{R_2} \cancel{\rho_s}\cancel{R_0^2}\frac{1}{R^2}\, dR} = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\left(-\frac{1}{R}\right)\Big|_{R_1}^{R_2}} = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)}$$

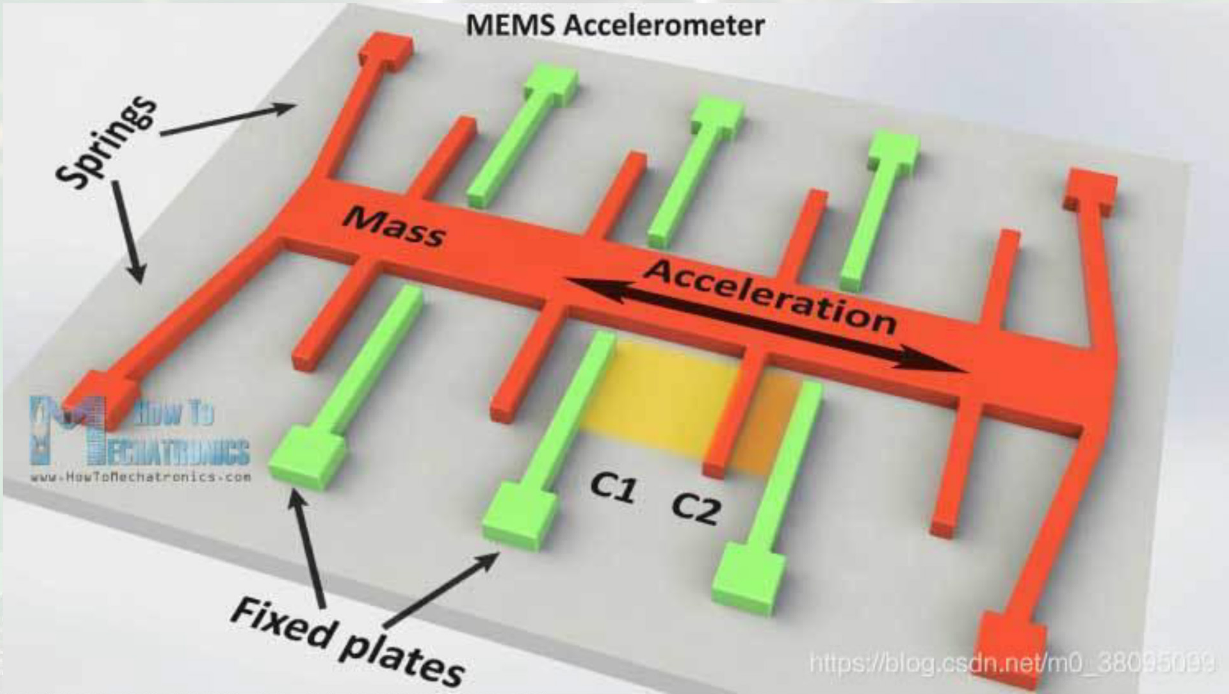
$$W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)}\frac{U^2}{2}; \quad d)\ F = \frac{\partial W_e}{\partial R} = 0$$

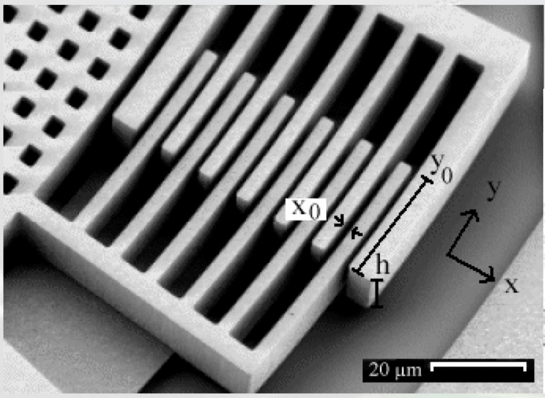

Capacitor Types
Paper
Polystyrene
Bipolar
Electrolytic
Polycarbonate
Polyester
Mylar
Silver Mica
Ceramic
Tantalum Electrolyte
Feed Through
Trimmer
Variable

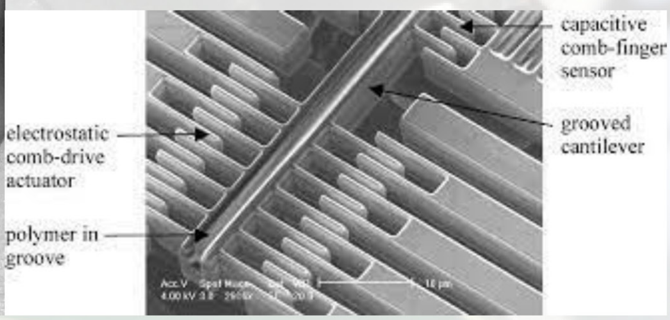

condensator electrolitic cu Al
condensator cu tantal
condensator ceramic
condensator cu mica
CBB21 155K/250V
condensator cu film metalizat
condensator cu sticla
condensator cu hirtie
100V 104J
condensator cu poliester
condensator cu polistiren
condensator cu polipropilena
condensator cu teflon
condensator SMT (Sourface Mount Type)


negative
charge
connection
positive
charge
connection
dielectric
metal plate
aluminum
plastic
insulation




MEMS Accelerometer
Springs
Mass
Acceleration
C1
C2
Fixed plates
How To
Mechatronics
www.HowToMechatronics.com
https://blog.csdn.net/m0_38095093


y_0
y
x_0
h
x
20 μm


capacitive
comb-finger
sensor
electrostatic
comb-drive
actuator
grooved
cantilever
polymer in
groove

MEMS-tunable dielectric metasurface lens