

# POLARIZARE ELECTRICA SI DIELECTRICI

## ① Dipolul electric

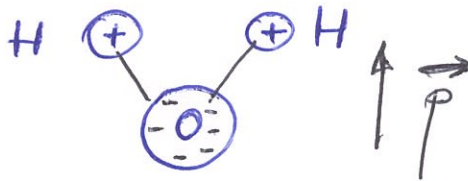
Este un sistem fizic constituit din doua sarcini punctiforme egale in valoare absoluta dar de semn opus separate de distanta  $d$



→ reprezinta un concept fizic important deoarece multe sisteme fizice, de la molecule la antene TV pot fi descrise in mod simplificat prin dipoli.

Ora separare spatiala a unor sarcini electrice de semn opus egale in valoare absoluta conduce la un dipol.

ex Molecula polara de apa



reprezentare simplificata



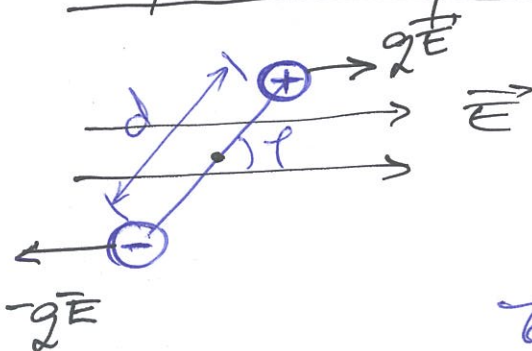
→ Centrul de greutate al sarcinii pozitive difera de centrul de greutate al sarcinii negative

Momentul dipolului  $\vec{p}$  este orientat din spre sarcina negativa spre cea pozitiva

$$p = qd$$
$$[p]_S = C \cdot m$$

moment electric dipolar

## Dipol in camp electric $\vec{E}$ extern



tie:  $\vec{E}$  - uniform

⇒ cuplu de rotatie  
deci forta neta este zero

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 2qEd \sin \varphi$$

$$\boxed{\tau = qEd \sin \varphi} = pE \sin \varphi$$

Se poate afla ca in forma vectoriala

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

Energia potentiala a dipolului in camp  $\vec{E}$

daca dipolul in camp se roteste cu unghiul  $d\varphi$  lucrul mecanic efectuat de camp va fi:

$$dL = \tau d\varphi$$

Intucet cuplul este in sensul descresterii unghiului

$$\Rightarrow \tau = -pE \sin \varphi$$

$$\Rightarrow dL = -pE \sin \varphi d\varphi$$

Pt o rotatie intre  $\varphi_1$  si  $\varphi_2 \Rightarrow$

$$L_{12} = -pE \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = pE \cos \varphi_2 - pE \cos \varphi_1 \Rightarrow$$

MSI  $L_{12} = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2}$

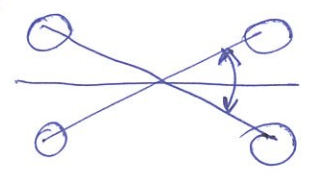
$$\Rightarrow E_p = -pE \cos \varphi = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

energia potentiala a dipolului in camp electric

obs

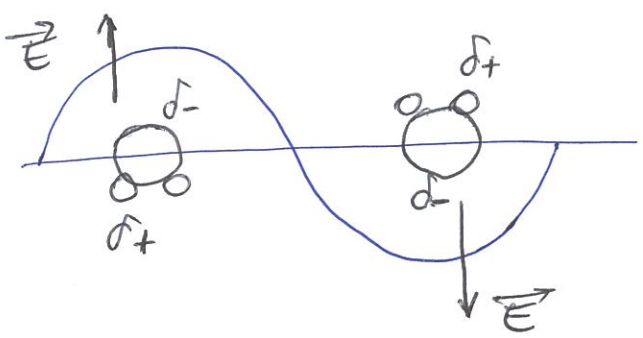
- $E_p$  are un minim cand  $\cos \varphi_2 = 1 \Rightarrow \varphi = 0 \Rightarrow$  axa dipolului aliniata cu campul.

- Daca un dipol este scos din echilibru, el va oscila in jurul pozitiei de echilibru



# Aplicatie: Incalzirea alimentelor in cuptorul cu microunde

Microundele produse de catre sursa magnetron sunt directionale si absorbite de catre moleculele de apa din alimente. Molecula de  $H_2O$  se comporta ca un dipol electric. In prezenta componentei  $\vec{E}$  a campului de microunde, dipolul se va orienta pe directia campului. Datorita  $\vec{E} = \vec{E}(t)$  oscilata continuu la frecventa de 2,45 GHz moleculele de apa se rotesc continuu urmind directia campului extern. In timpul acestor rotatii moleculele de apa sunt in interactiune continua intre ele si de exemplu prin ciocniri moleculare o parte din energia lor cinetica se va transforma sub forma de caldura => incalzirea locala a alimentelor



pozitii ale dipolului de  $H_2O$  care minimizeaza energia potentiala in camp.

## 2 CAPACITATE ELECTRICA SI DIELECTRICI

La fel cum un resort elastic poate stoca energie mecanica sub forma de energie potentiala elastica, un capacitor sau condensator este un dispozitiv care stocheaza energie potentiala electrica si sursele electrice. Energia stocata intr-un condensator este stocata de catre campul electric. Aceasta reprezinta unul dintre fundamentale teoriei undelor electromagnetice.

### a) Condensator electric

Orice doi conductori separati de catre un izolator (sau vid) reprezinta un condensator.





## Dielectrici

In general, condensatorii între armături au un material (în locul vidului) izolator numit dielectric. Acesta are următoarele funcționalități:

- (1) rezolvă problema mecanică a menținerii plăcilor la o distanță foarte mică între ele
- (2) crește capacitatea electrică
- (3) crește valoarea diferenței de potențial care poate fi aplicată între plăci  $\Leftrightarrow$  tensiunea de străpunșere crește.

Obs: Străpunșere electrică (breakdown)

Orice material izolator aflat într-un câmp electric exten intens, prin fenomene de ionizare locală devine local conductor

Creșterea capacității electrice prin utilizarea dielectricilor este dată de

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

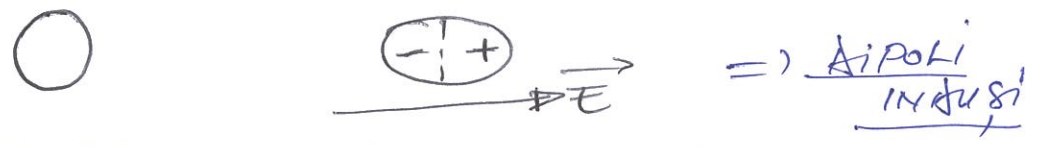
= CONSTANTA DIELECTRICĂ  
 $\Leftrightarrow$  permisivitate relativă  
constantă de material

Material	$\epsilon_r$	Câmp $\vec{E}$ străpunșere [V/m]
vid	1	
aer	1,00059	$3 \cdot 10^6$
teflon	2,1	} $10^7$
mica	3-6	
sticlă	5-10	
SrTiO <sub>3</sub>	<u>310</u>	$\sim 10^8 - 10^9$ V/m
MgO		$\rightarrow 10^9$ V/m (monocristale)

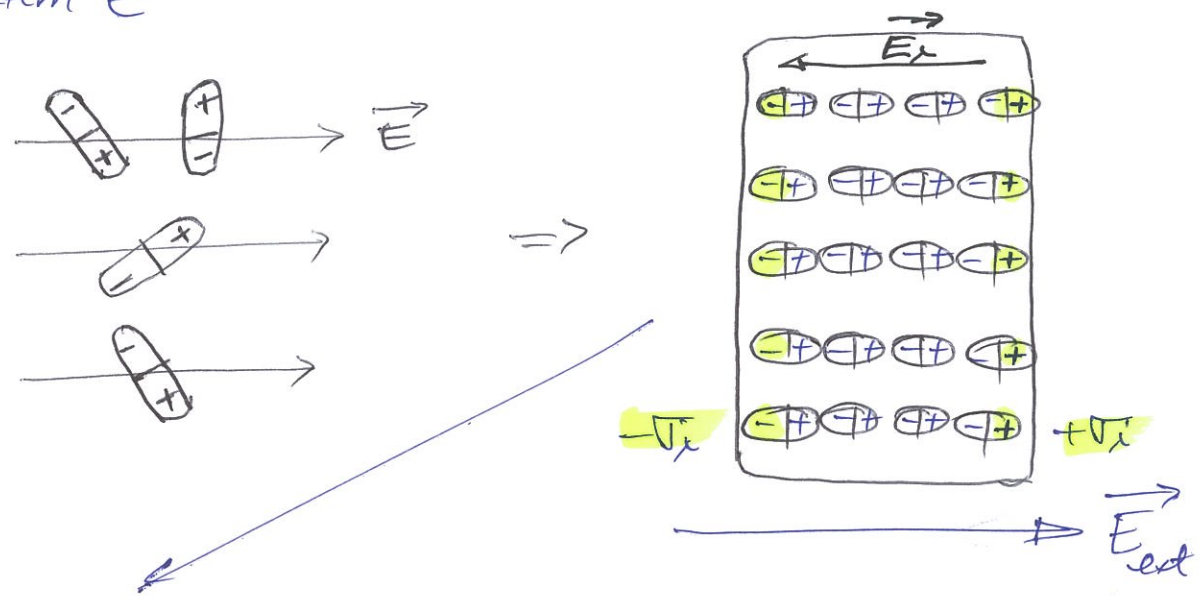
## Polarizare

Într-un material conductor dacă se aplică un câmp electric extern  $\vec{E}$  sarcinile mobile se distribuie în mod simplu; electronii se deplasează în sens invers câmpului ( $\vec{F}_e = -e\vec{E}$ ). Într-un material izolator nu avem însă sarcini mobile.

Trebuie însă să analizăm redistribuirea sarcinii la nivel molecular. În prezența unui câmp electric moleculele nepolare devin polare, prin separarea lejeră a centrului de greutate a sarcinilor pozitive și negative



Apoi, moleculele polare tind să se alinieze cu câmpul extern  $\vec{E}$



Aceasta conduce la sarcini ale suprafeței de densitate  $-\sigma_x, +\sigma_x$  care nu sunt libere să se deplaseze ( $\Rightarrow$  sarcini legate), în ~~total~~ <sup>total</sup> sarcina totală este compensată.

Această redistribuire a sarcinilor se numește polonizare

Sarcina indusă  $\pm\sigma_x$  va crea un câmp electric suplimentar  $\vec{E}_i$  care se opune câmpului extern  $\vec{E}_{ext}$ , astfel încât în dielectric câmpul rezultat:

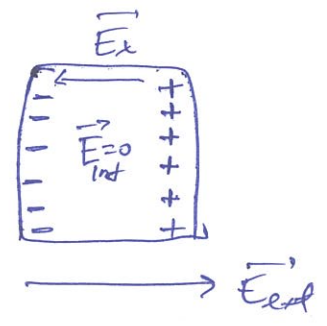
$$\vec{E}_d = \vec{E}_{ext} - \vec{E}_x$$

care este total zero întrucât sarcinile în dielectric nu pot să se miște liber ca într-un metal, unde prin redistribuirea sarcinii pe suprafețe se ajunge la  $\vec{E}_{int} = 0$

ob:

METAL

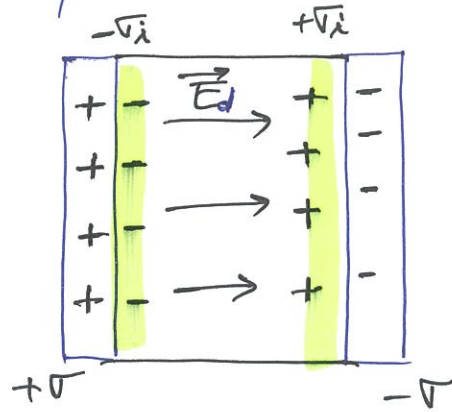
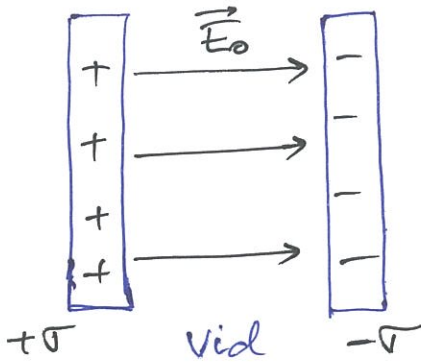
$$\vec{E}_{int} = \vec{E}_{ext} - \vec{E}_x = 0$$



Tinutul cont de fenomenul de polarizare:

-7

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$



$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$E_d = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$

$$\Rightarrow \boxed{\sigma_i = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right)}$$

Dacă  $\epsilon_r$  este  $\neq$  mare  $\sigma_i \rightarrow \sigma \Rightarrow E_d \rightarrow 0$

Câmpul electric total în dielectric se poate scrie:

$$E_d = \frac{E_0}{\epsilon_r} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$\boxed{\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r}$$

permisivitatea absolută a dielectricului

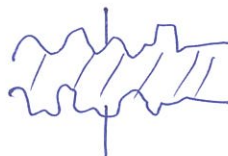
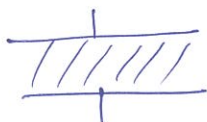
$\Rightarrow$  Capacitatea condensatorului plan devine:

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

crește de  $\epsilon_r$  ori!

Obs! Capacități mari se pot obține folosind dielectrici cu  $\epsilon_r$  mare separând plăci de arie  $A$  la distanțe de separare mici.

În condensatori de capacități mari, arie  $A$  poate fi  $\propto$  rîndul ei crescută foarte mult folosind materiale granulate sau poroase care conduc la o suprafață efectivă crescută.



# Legea lui Gauss in dielectrici

Are aceeași formă ca  $\vec{A}$  în vid cu două precizări:

(1)  $\vec{E}$  se înlocuiește cu  $\epsilon_r \vec{E}$

(2)  $Q_{ind}$  se înlocuiește cu  $Q_{ind-liberă}$  care include doar sarcina liberă continuă în suprafața gaussiană

$$\Rightarrow \oint \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{ind-liberă}}{\epsilon_0} \quad (\Rightarrow)$$

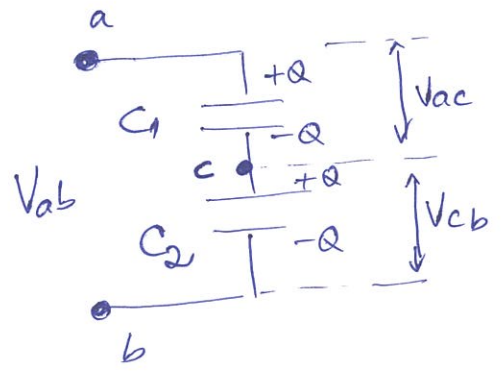
$$\boxed{\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}' = \frac{Q_{ind-liberă}}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{Q_{ind-liberă}}{\epsilon}}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

(sau se înlocuiește pur și simplu  $\epsilon_0$  cu  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ )

# Condensatori în serie și paralel

Serie:



- Sarcina este aceeași pe amândoi
- tensiunea se redistribuie

$$V_{ac} = V_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$V_{cb} = V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$V_{ab} = V_1 + V_2 \Rightarrow$$

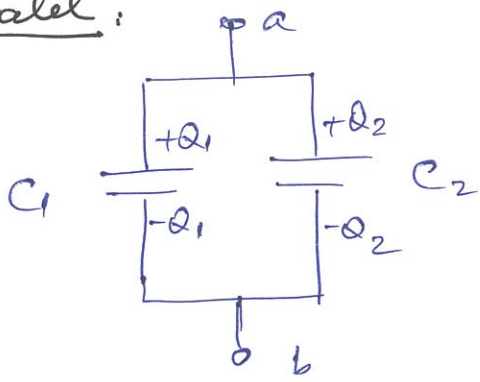
$$\frac{Q}{C} = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}}$$

pt. n condensatori în serie



Paralel:



- tensiunea este aceeași
- sarcina este diferită (se redistribuie)

$$Q_1 = C_1 V_{ab}$$

$$Q_2 = C_2 V_{ab}$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$\Rightarrow C_1 V_{ab} = (C_1 + C_2) V_{ab}$$

$$C = C_1 + C_2$$

$$\Rightarrow \boxed{C = \sum_i C_i}$$

Energia stocată într-un condensator

Energia potențială electrică stocată într-un condensator este egală cu lucrul mecanic necesar încărcării sale, adică separării sarcinii \$+Q\$ și \$-Q\$ pe armăturile sale.

Când condensatorul este total încărcat sarcina pe armăturile sale este \$Q\$ iar tensiunea \$V\$ este egală.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Dacă o etapă intermediară în timpul încărcării \$v = \frac{q}{C}\$

Lucrul mecanic necesar transferului unei cantități infinitesimale de sarcină \$dq\$ va fi

$$dL = v dq = \frac{q dq}{C}$$

Poi în algebră

$$\Rightarrow L = \int_0^Q dL = \int_0^Q \frac{q dq}{C} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} C U^2$$

$$\Rightarrow \boxed{E_p = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{Q^2}{2C}}$$

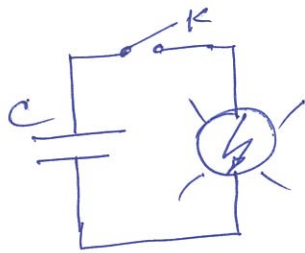
Reamintim analogia mecanică cu sistemul resort / masă unde energia potențială elastică are expresia:

$$E_p^m = \frac{1}{2} k x^2 \quad \Rightarrow \quad C \longleftrightarrow \frac{1}{k}$$

$$Q \longrightarrow x$$

Ob: Condensatorii au proprietatea de a magazina / elibera energie electrică.

Aplicatie: Blitz-ul aparatului foto



Energia magazinată în condensator este "descărcată" la închiderea intercomutatorului K prin lampa de probă mare și fibru de energie luminoasă.

### Energia câmpului electric

Dacă luăm ca model simplu condensatorul plan vom putea scrie energia electrică:

$$E_p = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{A}{d} U^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 E^2 d^2 A}{d}$$

$$U = E d$$

Se poate defini densitatea de energie ca fiind energia raportată la unitatea de ~~suprafață~~ volum.

$$w_E = \frac{E_p}{A d} = \frac{E_p}{\text{Vol}}$$

$$\Rightarrow w_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

Această formulă, dedusă pentru cazul simplu al condensatorului plan este valabilă pentru orice configurație de câmp electric în vid. Ea reprezintă o densitate de energie a câmpului electric (energia stocată în câmp electric), vezi unde electromagnetice mai încolo.

Într-un mediu dielectric ( $\epsilon_r$ )

$$w = \epsilon \frac{E^2}{2}; \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

# Fenomenul de străpungeră dielectrică

Apare în situația în care câmpul electric extern  $\vec{E}$  aplicat unui dielectric depășește o valoare critică  $E_s$ .

În această situație electronii pot fi smulși din moleculele constitutive ale materialului și, după accelerarea de către câmpul  $\vec{E}$  pot ciocni altele molecule, eliberând alți electroni, fenomenul continuându-se în avalanșă. Această avalanșă de electroni accelerați formează un arc electric (descărcare).

Un exemplu spectaculos de străpungeră dielectrică este al electricei este fulgerul.

Străpungera dielectrică limitează tensiunea maximă de utilizare (încărcare) a unui capacitor.

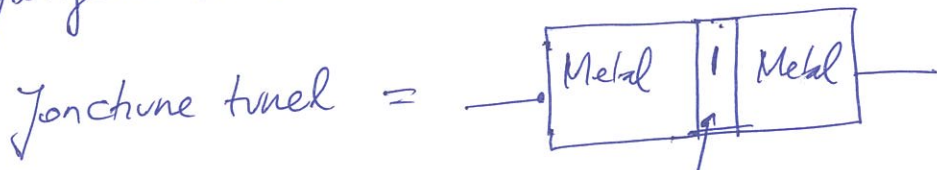
Fenomenul de străpungeră este un fenomen ireversibil.

Rezistența dielectricului la străpungeră depinde de materialul din care este constituit și este descrisă de valoarea câmpului critic de străpungeră

Material	$\epsilon_r$	$E_s$ [V/m]
aer uscat	1	$3 \cdot 10^6$
polycarbonat	2,8	$3 \cdot 10^7$
poliester	3,3	$6 \cdot 10^7$
sticlă pirex	4,7	$1 \cdot 10^8$

(\*) Pentru fabricarea tranzistorilor de dimensiuni nano se folosesc materiale cu constantă dielectrică mare.

Observație: Câmpurile electrice intense se pot obține dacă distanța de separare este foarte mică. (ex. jonchione tunel au o distanță de separare  $d \approx 1 \text{ nm} \approx 10^{-9} \text{ m} \Rightarrow$  o tensiune de polarizare de 1 V produce un câmp de  $E = \frac{U}{d} = 10^9 \text{ V/m}$  care poate să fie peste valoarea tensiunii de străpungeră a dielectricului)



Jonchione tunel = Metal | Izolant subțire (1 nm) | Metal  
Electronii traversează izolantul prin efect tunel cuantic (vezi cursuri mec. cuantică mai încolo)

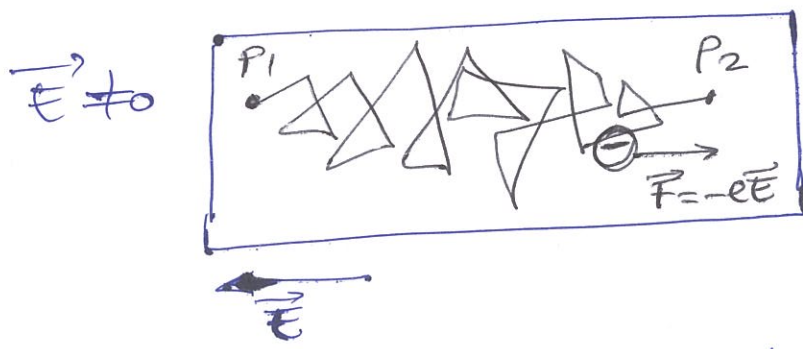
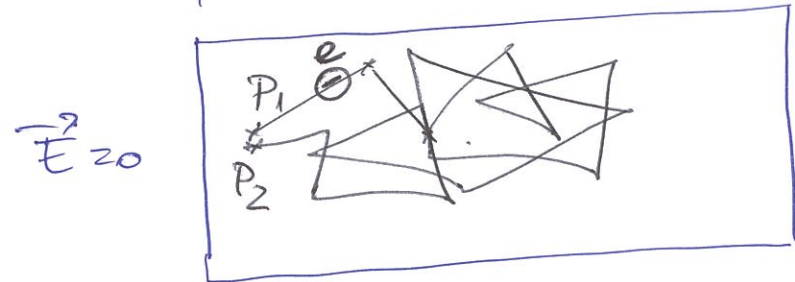
# ELECTRODINAMICĂ

Până acum am studiat interacțiunea sarcinilor electrice în repaus (statice), ceea ce reprezintă obiectul de studiu al electrostaticii. Scopul acestui curs este de a studia sarcinile electrice în mișcare. Un curent electric constă în sarcini în mișcare dintr-o regiune în alta. Dacă aceste sarcini urmează o buclă închisă vorbim de circuit electric.

## 1) Curent electric

→ este o deplasare a sarcinii electrice dintr-o regiune spațială în alta urmând o traiectorie într-un material conductor.

În condiții electrostatice, câmpul electric  $\vec{E}$  în interiorul unui conductor este zero, astfel că este curentul net va fi zero. Totuși, în metalele cunoscute (Cu, Al, ...) electronii liberi se mișcă haotic urmând traiectorii aleatoare în toate direcțiile cu viteze foarte mari ( $\sim 10^6$  m/s). Din cauza caracterului haotic, practic electronii nu migrează în conductor  $\Rightarrow \vec{I} = 0$



Într-un câmp extern  $\vec{E}$  mișcarea electronilor rămâne aproape haotică însă sub influența forței electrice  $\vec{F} = -e\vec{E}$

Se produce o deplasare netă a sarcinii electrice cu o viteză mult mai mică decât viteza electronilor între ciocnirile succesive, numită viteza de drift  $\vec{V}_d$

$$\boxed{V_d \approx 10^{-4} \text{ m/s}} \quad !!!$$

# Directia curentului electric

In functie de materialul conductor, sarcinile electrice care poarta curentul pot fi negative sau pozitive.  
( $e^-$ ) (ioni)

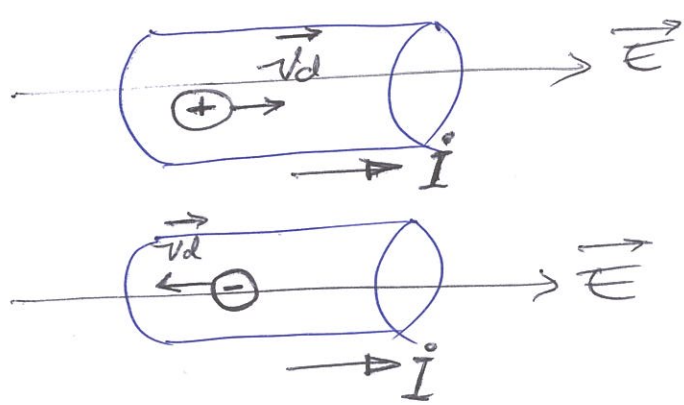
sau ambele.

- In metale: sarcinile sunt electronii deci negative
- In gaze ionizate sau solutii ionice avem atat sarcini pozitive cat si negative
- In semiconductori (Si, Ge, GaAs...) conductia are loc partial prin electroni si partial prin goluri (vacante de electroni)  $\neq$  decurs in care lipsesc electroni)

In toate situatiile, sarcinile se vor deplasa sub actiunea fortei electrice:

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad \text{datorata campului electric } \vec{E}$$

- =>
- sarcinile pozitive:  $q > 0$  se deplaseaza in sensul campului  $\vec{E}$
  - sarcinile negative:  $q < 0$  se deplaseaza in sens invers campului  $\vec{E}$



Conventie: Directia curentului electric este cea a sarcinilor pozitive in campul  $\vec{E}$

=> electronii se deplaseaza in sens invers sensului curentului intr-un conductor metalic.

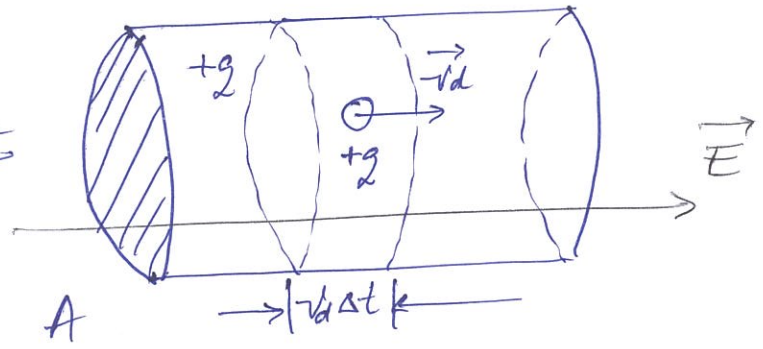
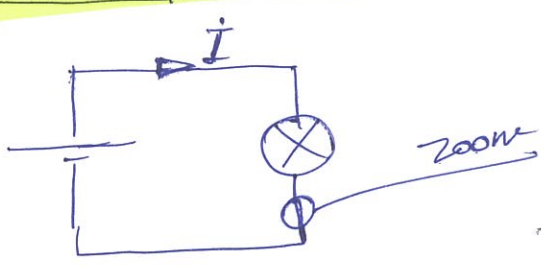
Definim curentul electric prin aria transversală  $A$  a conductorului ca și sarcina netă care traversează această secțiune transversală pe unitatea de timp:

$$\boxed{I = \frac{dQ}{dt}} \quad [I]_{SI} = \frac{C}{A} = A \quad \text{Ampère}$$

Multipli și submultipli:

- în circuite de putere (motoare) :  $n$  sute de A
- în radio TV, electronică convențională : mA →  $\mu$ A
- în circuitele din calculatoare, microprocesoare  $n$  A → pA.

### Teoria fenomenologică a conductivității electrice.



pt simplificare considerăm o sarcină  $+q$  care se deplasează pe direcția  $\vec{E}$  cu viteza  $\vec{v}_d$

Presupunem că în conductorul de secțiune  $A$  avem o densitate de purtători de sarcină  $n$  (concentrație) pe unitatea de volum

toate sarcinile se deplasează cu aceeași viteză  $v_d$  și cu aceeași sarcină  $q$

$$\Rightarrow dQ = q (n A v_d dt)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \Rightarrow \quad I = n q v_d A \quad \Rightarrow$$

Definim densitatea de curent  $J = \frac{I}{A}$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{j} = n q \vec{v}_d}$$

$$[j]_S = \frac{A}{m^2}$$

Obs : Vectorial

$$\boxed{\vec{j} = n q \vec{v}_d}$$

$q > 0 \Rightarrow \vec{j} \parallel \vec{v}_d$  au aceeași orientare cu  $\vec{E}$   
 $q < 0 \Rightarrow \vec{j} \nparallel \vec{v}_d$  au orientări diferite  
 dar  $\vec{j}$  are aceeași orientare cu  $\vec{E}$

$\Rightarrow$  Indiferent de semnul sarcinii electrice  $\vec{i}$  și  $\vec{j}$  au aceeași orientare cu  $\vec{E}$ .

Pt. conductori complezi cu diverse tipuri de sarcini care participă la conducere avem:

- sarcini :  $q_1, q_2, \dots, q_n$
- viteze de drift :  $v_{d1}, v_{d2}, \dots, v_{dn}$
- concentrații :  $n_1, n_2, \dots$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{j} = \sum_i n_i q_i \vec{v}_{di}}$$

Microscopic : Folosim următorul model simplificat:

- (1) Electronii sunt tratați ca și particule materiale de masă  $m_e$ , neglijând efectele cuantice
- (2) Fiecare atom are în metal mai mulți electroni slabi legați care se pot deplasa liber în metal. Acești electroni liberi se vor ciocni repetitiv în mișcarea lor cu ionii rețelei cristaline. În absența câmpului extern aceste ciocniri conduc la traiectorii haotice aleatorii care implică un curent electric ~~global~~ net nul. (statistic deplasarea netă a sarcinii este zero).
- (3) În prezența câmpului electric, sarcinile au o mișcare netă cu viteza de drift  $\vec{v}_d$ .

Intervalul mediu dintre două ciocniri succesive este numit tiimp liber mediu iar distanța parcursă în acest timp se numește parcurs liber mediu.

Dintre două ciocniri aplicăm considerentele mecanicii clasice:

- presupunem că la  $t=0$   $\vec{E}=0 \Rightarrow$  viteza electronilor va fi zero  $\vec{v}_0=0$
- cuplând câmpul  $\vec{E}$ , electronii vor fi accelerați de o forță  $\vec{F}=q\vec{E}$  care determină o accelerație  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q\vec{E}}{m}$

Du intervalul de timp dintre 2 ciocniri, aplicăm legea vitezei  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$  care în valoare medie

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_0 \rangle + a t$$

$$\uparrow \quad \quad \uparrow$$

$$v_d = a t = \frac{qE t}{m} \quad \Bigg\} \Rightarrow$$

Deci  $j = n q v_d$

$j = n \frac{q^2 \tau}{m} E$

Constanta  $\sigma = n \frac{q^2 \tau}{m}$

se numește CONDUCTIVITATE ELECTRICA

și descrie "răspunsul" sistemului la aplicarea câmpului electric  $j \propto E$  prin  $\sigma$ .

(Cu cât  $\sigma$  este mai mare cu atât la un  $\vec{E}$  dat  $j$  va fi mai mare)



Inversul conductibilității electrice se numește

REZISTIVITATE ELECTRICĂ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2 \tau}$$

Obs :  $\mu = \frac{q \cdot \tau}{m}$  se numește mobilitate electrică

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma = n \mu q \\ \vec{j} = \sigma \vec{E} \end{cases}$$

Relația :  $\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$

definește LEGEA lui OHM (forma microscopică)

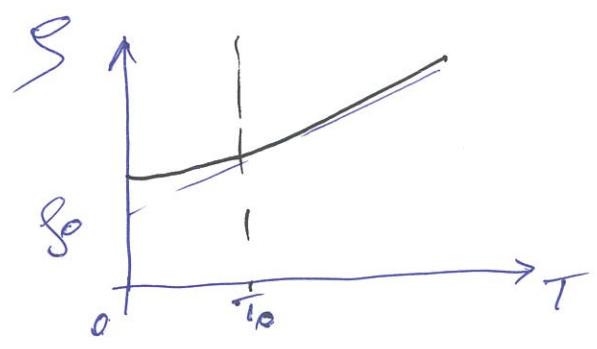
Dependența conductivității / rezistivității cu temperatura

METALE

Într-un cristal ideal fără defecte structurale electronii teoretic ar trebui să nu sufere nici o ciocnire cu ioni din nodurile rețelei, dacă acesta din urmă ar fi perfect. Ousă, la o temperatură finită ioni din nodurile rețelei vibrează cu o amplitudine proporțională cu temperatura. Probabilitatea ciocnirilor va crește odată cu creșterea T.  $\Rightarrow$  timpul liber mediu scade  $\tau \downarrow$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{n q^2 \tau}{m}$$

scade deci  $\sigma(T) = \frac{1}{\rho(T)}$  crește



$$\sigma = \sigma_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$\sigma_0$  valoare de referință la temperatura  $T_0$

$\alpha$  = coeficient de variație a rezistivității cu temperatura

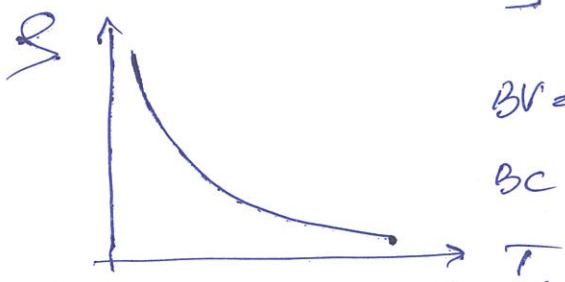
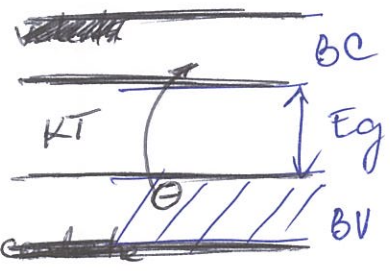
$$[\alpha]_{T_0} = ^\circ C^{-1}$$

Material	$\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Al	0,0039
Cu	0,00393
Ag	0,0038

• SEMICONDUCTORI

Într-un semiconductor, densitatea de purtători (concentrația) crește odată cu creșterea temperaturii

$\Rightarrow \sigma = n \frac{e^2 \tau}{m}$  crește cu T  
 $\Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma}$  scade cu T

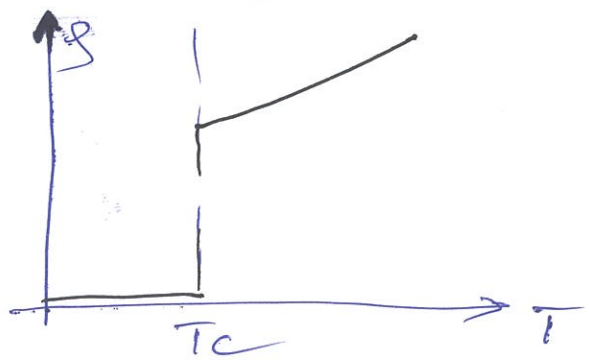


BV = sondă valență  
 BC = sondă conducție

Variația rezistenței unui semiconductor în funcție de temperatură poate fi folosită ca și senzor de temperatură (după calibrare).  $\Rightarrow$  TERMISTOR

• SUPRACONDUCTOR

Există o clasă specială de materiale care răcite sub o anumită temperatură critică își pierd complet rezistența electrică  $\rho \rightarrow 0 \Rightarrow \sigma \rightarrow \infty$



Kamerlingh Onnes : Hg sub 4,2K devine supraconductor

- Există materiale supraconductoare
- metalice ( $T_c$  joase)
- oxidice ( $T_c$  ridicate)

ex:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$  (>1987;  $T_c \approx 80\text{K}$ )  
 record  $T_c = 138\text{K}$

! vezi mai încolo în curs alte propr. interesante ale supraconductivilor.

IZOLATORI Concentratia de purtatori in BC este nula si  $E_g$

Observatie

Datorita lucrului mecanic efectuat de catre fortele campului electric  $\vec{E}$  intre ciocniri electronii castiga energie cinetica. Aceasta energie este partial transferata prin ciocniri inelastice cu atomii materialului conductor. Aceasta conduce la o crestere a energiei interne a materialului si implicit a temperaturii  $\implies$  efect Joule. Caldura disipata va fi proportionala cu curentul care traverseaza conductorul si cu rezistivitatea acestuia (nr. de ciocniri)...

Rezistenta electrica, Legea lui Ohm macroscopica

Am vazut ca la scara microscopica, legea lui Ohm se scrie:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

dependenta liniara de  $E$  a densitatu de curent.

$$[\sigma]_{SI} = \frac{A/m^2}{V/m} = \left(\frac{V}{A} m\right)^{-1} = (\Omega m)^{-1}$$

$$\rho = \frac{V}{A} = \text{Ohm}$$

$$[\rho]_{SI} = \left[\frac{1}{\sigma}\right]_{SI} = \Omega m$$

Conductori

Metale	$\rho (\Omega m)$
Ag	$1.47 \cdot 10^{-8}$
Cu	$1.72 \cdot 10^{-8}$
Al	$2.75 \cdot 10^{-8}$
steel	$20 \cdot 10^{-8}$

Aliaje	$\rho (\Omega m)$
constantan	$49 \cdot 10^{-8}$
Cu <sub>60</sub> Ni <sub>40</sub>	

Semiconductori

- C grafit
- Si
- Ge

$\rho (\Omega m)$
$3 \cdot 10^5$
<del>2300</del>
$0.160$

Izolatori

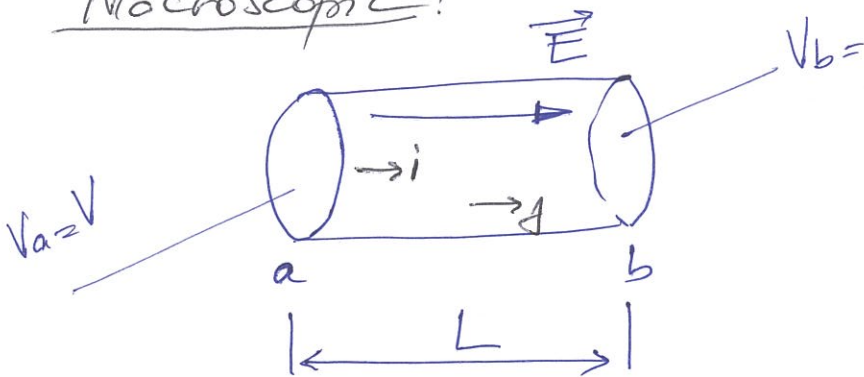
- sticla
- lemn
- cuartz

$10^{10} - 10^{14}$
$10^8 - 10^{11}$
$75 \cdot 10^{16}$

Un material care verifică legea lui Ohm se numește conductor Ohmic sau conductor liniar.  
 Pt. un astfel de material, la o temperatură  $T$  dată,  $\rho$  este constant și nu depinde de  $\vec{E}$ .

Materialele care nu verifică o dependență liniară  $\rho(E)$  se numesc conductori non-ohmici sau neliniari (ex. diode, jonctiuni tunel, ...). = dispozitive electronice neliniare.

Macroscopic:



$$V_{ab} = V_a - V_b = EL$$

$$\Rightarrow E = \frac{V_{ab}}{L}$$

$$j = \sigma E = \frac{1}{\rho} E \Rightarrow \frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{V}{L} \Rightarrow$$

$$I = \frac{V}{\frac{\rho L}{A}}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$\text{cu } R = \frac{\rho L}{A}$$

forma macroscopică a legii lui Ohm pt un conductor liniar

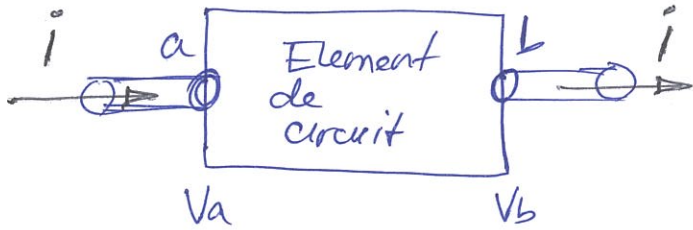
relația rezistivitate rezistență pt un conductor metalic de rezistivitate  $\rho$  lungime  $L$  secțiune  $A$

Obs: Ecuația  $R = \frac{V}{I}$

definieste rezistența electrică  $[R]_{SI} = \Omega$

a oricărui conductor, fie dacă verifică fie dacă nu verifică legea lui Ohm.  
 Doar dacă  $R$  nu depinde de  $V$  această ecuație se numește legea lui Ohm.

# ENERGIA ȘI PUTEREA în circuite electrice



$$P = \frac{d}{dt} (\underbrace{dq}_{\text{Variabilă energie}} V_{ab})$$

Variabilă energie  
potentiale prin  
achinez  $V_{ab}$  asupra  
 $dq$

⇒ Puterea electrică:

$$P = V_{ab} i$$

defineste viteza cu care  
energia electrică intră sau  
iese dintr-un element de  
circuit electric

$$[P]_{SI} = V \cdot A = (\text{Watt}) = W$$

În cazul în care elementul de circuit este o rezistență pură:

$$P = V_{ab} \cdot \frac{V_{ab}}{R} = \frac{V_{ab}^2}{R} = R i^2$$

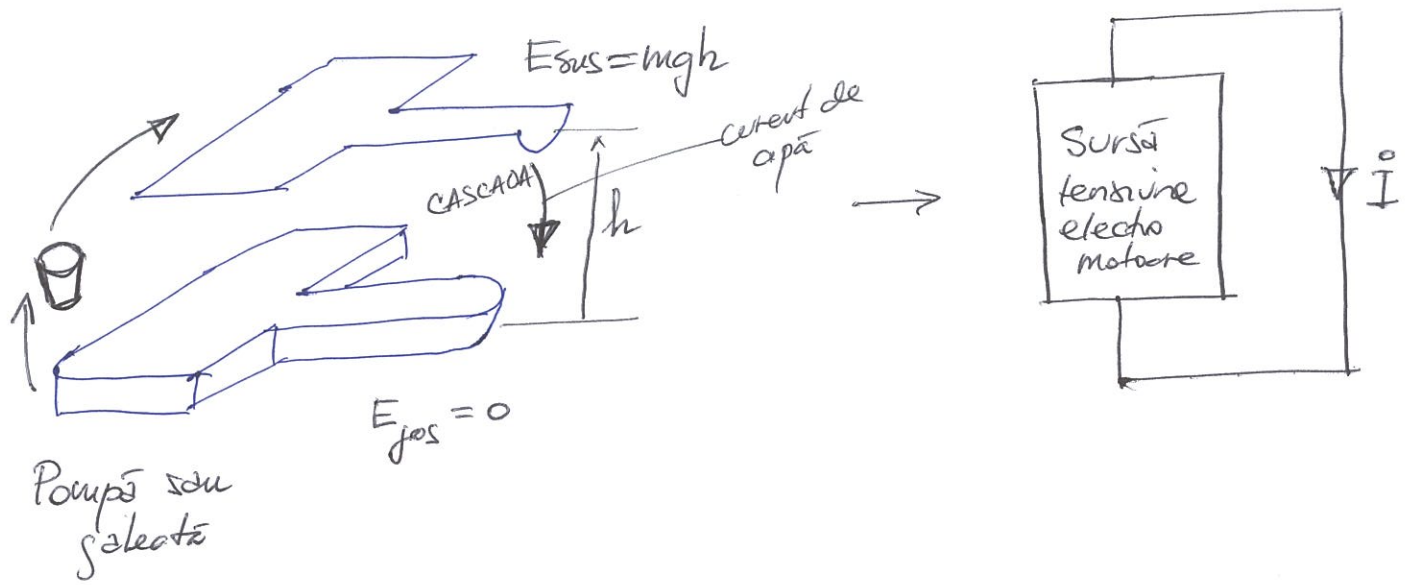
Au văzut înainte că această energie se disipează sub  
formă de căldură datorită coliziunilor electronice  
cu ionii din rețeaua cristalină care vibrează la  
o temperatură  $T$  finită ⇒ efet joule  
ca urmare a acestui efect de creștere a  
energiei interne a materialului conductor,  
temperatura acestuia crește.

OK. Au văzut la analogia electrică a oscilatorului  
armonic amortizat că rezistența electrică joacă rolul  
mărei în mecanică (~~în~~ mărime a mărții) ⇒  
 $R$  se opune deplasării sarcinii electrice = "mărime  
electrică"....

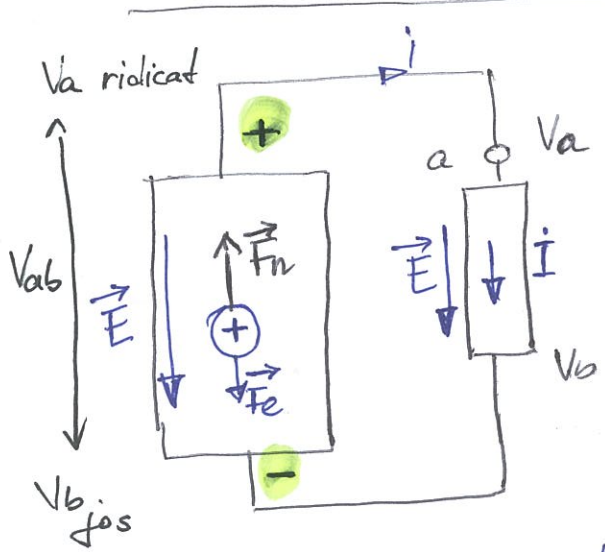
# TENSIUNE ELECTROMOTOARE și CIRCUITE ELECTRICE

Pentru ca într-un conductor să circule un curent staționar el trebuie să fie parte dintr-un circuit electric complet.

Acest circuit necesită undeva în bucla un dispozitiv care să acționeze analog unei pompe de apă într-un circuit de fantană orizontală și care să furnizeze purtătorilor de sarcină energia potențială necesară, odată ce aceasta a fost pierdută  
=> sursă de tensiune electromotoare.



## Sursa de tensiune ideală



$$E = V_{ab} = IR$$

În interiorul sursei câmpul electric  $\vec{E}$  acționează cu o forță  $\vec{F}_e$  asupra unei sarcini  $+q$  în sensul lui  $\vec{E}$  deci în sens invers curentului.

=> o forță suplimentară  $\vec{F}_n$  de natură non-electrostatică este necesară

pt. a ridica sarcina la potențialul superior  $V_a$  de la cel inferior  $V_b$ . Natura forței neelectrostatice  $\vec{F}_n$  depinde de tipul sursei.

Intr-un generator,  $\vec{F}_m$  rezultă din forțele câmpului magnetic exercitate asupra sarcinilor in mișcare. Intr-o baterie sau pila de combustibil ea este asociată proceselor de difuzie datorită variației concentrației electrolitului rezultată din reacții chimice.

Sursa reală. Rezistență internă

Cazul descris mai sus este un caz ideal. In realitate, sarcinile care se mișcă într-o sursă de tensiune întâmpină o rezistență numită rezistență internă a sursei.

$$\Rightarrow \boxed{V_{ab} = \mathcal{E} - i r_2}$$

tensiunea la borne      cădere de tensiune pe rezistența internă



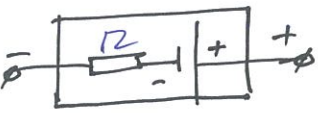


Curentul într-un circuit de rezistență exterioră  $R$  alimentat la o sursă de tensiune electromotoare  $\mathcal{E}$  se va scrie:

$$V_{ab} = IR \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E} - Ir_2 = IR$$

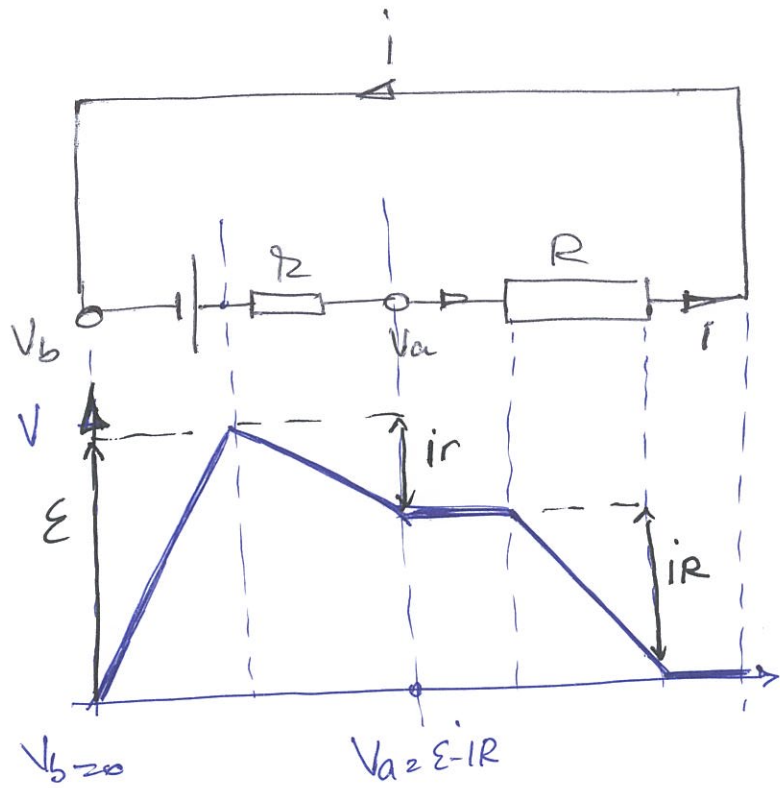
$$\Rightarrow \boxed{I = \frac{\mathcal{E}}{R + r_2}}$$

Obs: o baterie nu este o sursă de curent. Cu cât  $R$  crește  $I$  scade pt. aceeași valoare  $\mathcal{E}$ .

Simboluri in circuite electrice

-  conductor electric cu  $R = 0$
-  rezistor ( $R \neq 0$ )
-  sursă de tensiune electromotoare cu rezistență internă  $r_2$
-  voltmetru
-  ampermetru.

# Energie potențială / potential în circuite electrice



Obs: Sarcină electrică în câmp electric se deplasează întotdeauna în sensul descreșterii energiei potențiale electrice:

$$E_p = qV$$

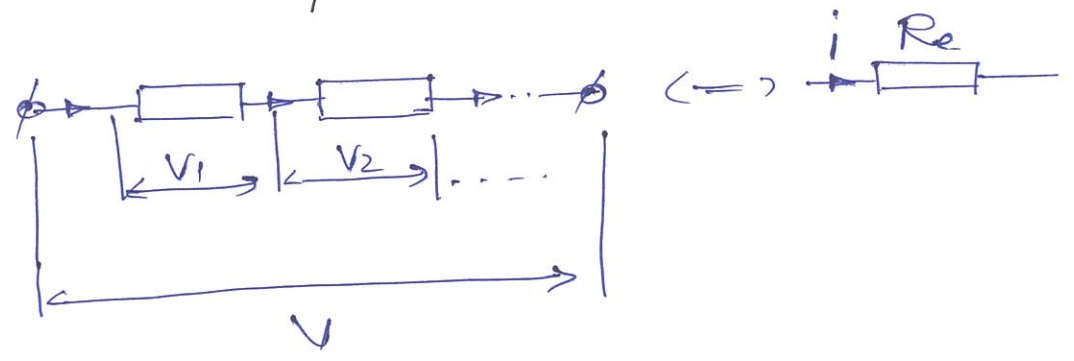
- $\left. \begin{array}{l} q > 0 \\ q < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$  deplasare de la  $V_{\text{ridicată}} = V_{\text{fii}}$  (la  $V_{-}$ )
- $\left. \begin{array}{l} q > 0 \\ q < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$  deplasare de la  $V_{-}$  la  $V_{+}$



CIRCUITE DE CURENTI ELECTRICI

① Rezistori in serie si paralel

serie:

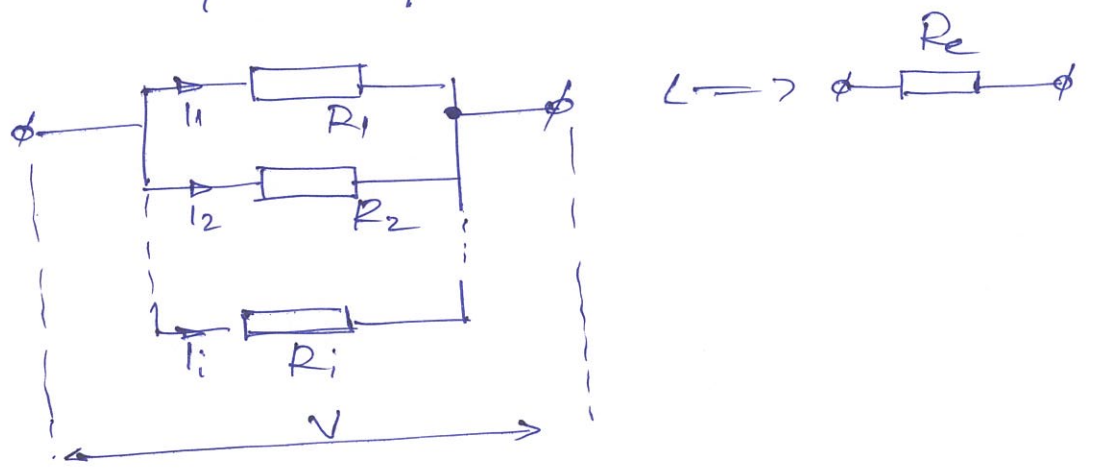


Curentul este același  
tensiunea se redistribuie prin  $R_i$

$$V = V_1 + V_2 + \dots = \sum_i V_i$$

$$R_e = \frac{V}{I} = \frac{\sum_i V_i}{I} = \sum_i R_i$$

paralel:



$V$  - același  
Curentul se redistribuie  $\Rightarrow I = \sum_i I_i$

$$\Rightarrow \sum_i \frac{V}{R_i} = V \sum_i \frac{1}{R_i} = \frac{V}{R_e} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{R_e} = \sum_i \frac{1}{R_i}}$$

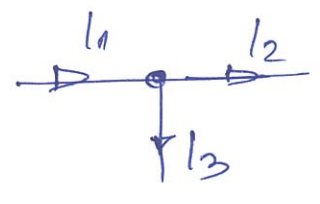
② Teoremele (legile) lui Kirchhoff

Aici punct de vedere fizic sunt consecințele unor legi de conservare:

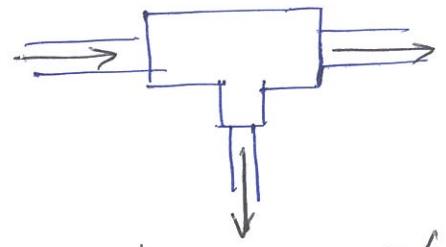
# ① Legea I a lui Kirchhoff

→ consecință a conservării sarcinii electrice (într-un nod de circuit).

$$\sum I = 0$$



⟷



cât intră = cât iese

⇒ Suma algebrică a curenților într-un nod de circuit este egală cu zero.

Convenție

- (+) curenți care intră
- (-) curenți care ies

$$i = \frac{dq}{dt}; \quad \sum I = 0 \Rightarrow \sum Q_i = 0$$

# ② Legea II a lui Kirchhoff

→ consecință a conservării energiei electrice.

Câmpul electric fiind un câmp conservativ, lucrul mecanic pe o buclă închisă este egal cu zero.

$$\sum_{\text{buclă închisă}} V_i = 0$$

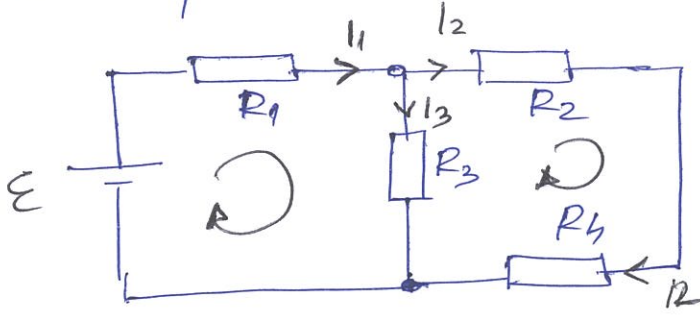
suma algebrică a tuturor diferențelor de potențial (incluzând sursele de tensiune) este egală cu zero.

Convenție de semn: Definind un sens arbitrar de parcurgere al buclei

→ pt. un rezistor când parcurgem bucla în sensul curenților! căderea de tensiune se consideră NEGATIVĂ deoarece ne deplasăm în sensul descrescării potențialului

→ pt. sursa de tensiune electromotoare

când parcurgem bucla de la (-) la (+)  $\mathcal{E}$  se  
consideră pozitiv.



$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E} - R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0 \\ -R_2 I_2 - R_4 I_2 + R_3 I_3 = 0 \end{array} \right.$$