Circuiti elettrici

Corrente elettrica

Mobilità, conducibilità, Resistività

Legge di Ohm

Forza elettromotrice

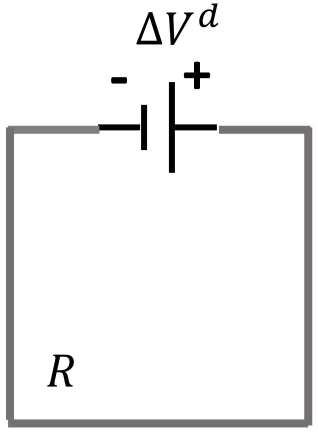
Circuiti RC in corrente continua

Transistor

Moto di una carica libera in un campo elettrico

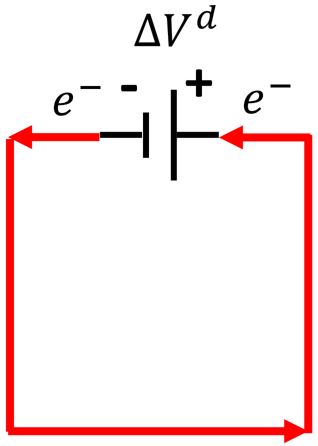
Resistenza

Supponiamo di avere realizzato un dispositivo di alimentazione che genera ai suoi capi una differenza di potenziale $\Delta V^d = V^+ - V^-$ che il dispositivo mantiene sempre costante anche in presenza di perturbazioni esterne, provvedendo, se necessario, anche ad immettere ed assorbire carica al suo interno



Cosa succederà se connettiamo i due capi del dispositivo tra loro attraverso un materiale conduttore metallico che chiameremo **resistenza (R)**?

I portatori di carica del conduttore (elettroni) si muoveranno lungo la resistenza dal capo del dispositivo a potenziale minore fino a quello a potenziale maggiore per riequilibrare la differenza di potenziale ΔV^d ed annullare, all'equilibrio, il campo elettrico interno del conduttore. In questo caso però l'equilibrio non viene mai raggiunto in quanto la differenza di potenziale ΔV^d viene tenuta costante dal dispositivo che la genera (la situazione è simile ad un tubo pieno d'acqua connesso ad un capo ad una pompa ed all'altro ad un bacino pieno, comunque sia curvato il tubo vi è un flusso d'acqua che vi transita attraverso)

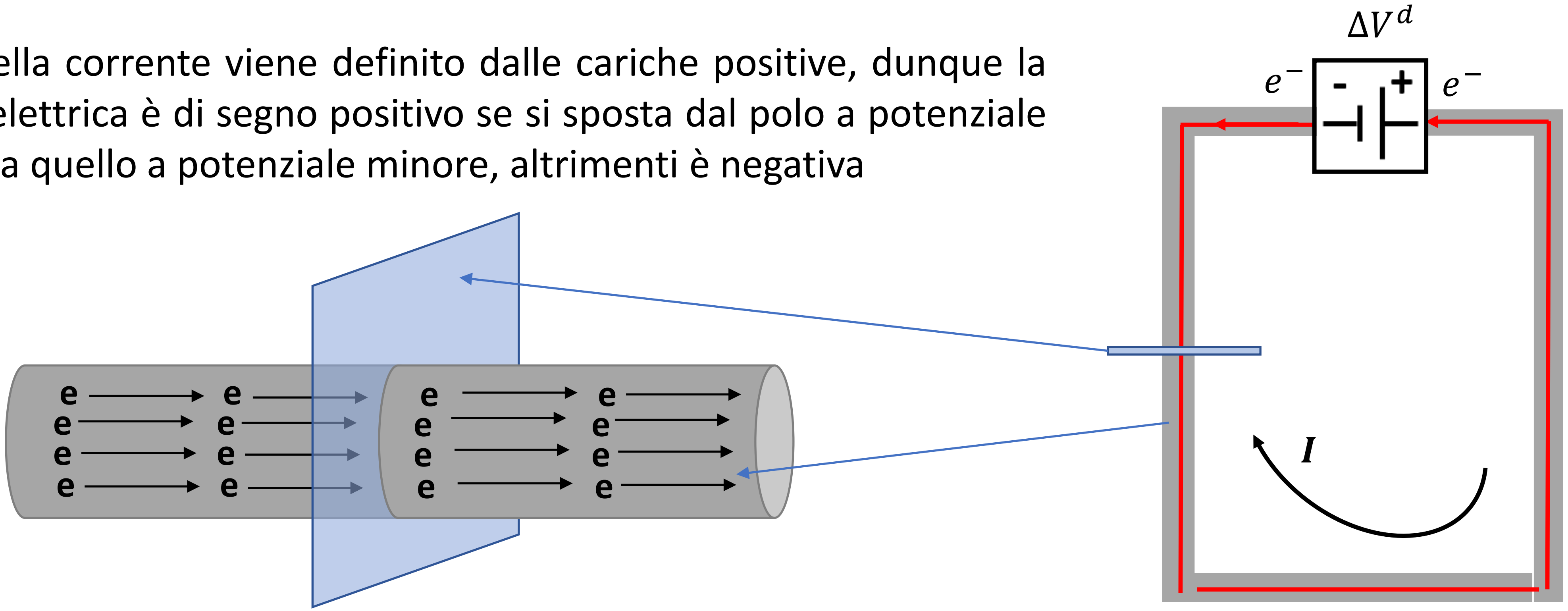


Poiché il dispositivo mantiene costante la differenza di potenziale ΔV^d ai suoi capi, ne risulta un passaggio continuo di carica attraverso la resistenza che chiameremo corrente elettrica

Corrente elettrica

La carica totale che attraversa una sezione della resistenza per unità di tempo si definisce CORRENTE ELETTRICA (I) e si misura in Amperè (A)

Il verso della corrente viene definito dalle cariche positive, dunque la corrente elettrica è di segno positivo se si sposta dal polo a potenziale maggiore a quello a potenziale minore, altrimenti è negativa

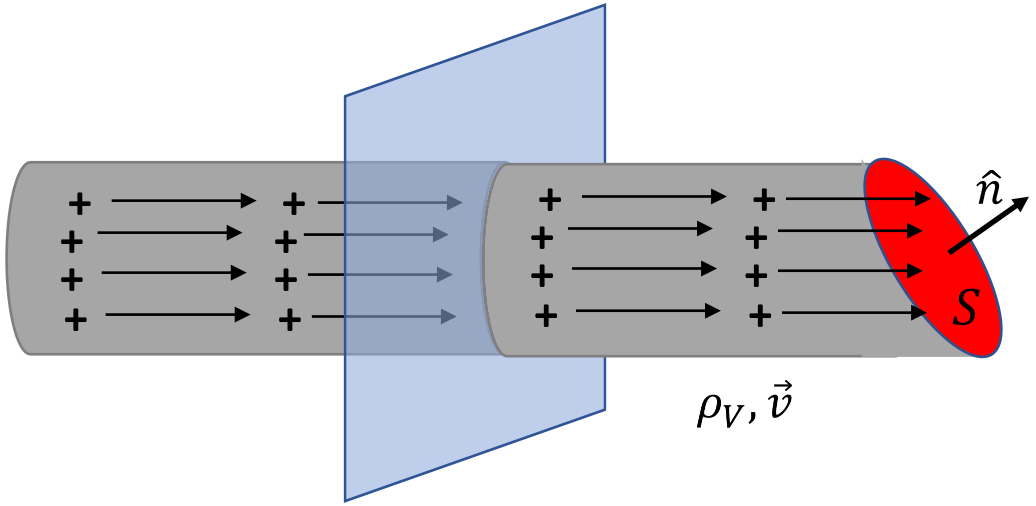


$$I \equiv \frac{dQ}{dt}$$

$$1\,A = \frac{1\,C}{1\,s}$$

$$e \cong -1.6\,10^{-19}\,C \rightarrow 1A \cong 10^{19}\,\frac{e}{s}$$

Mobilità



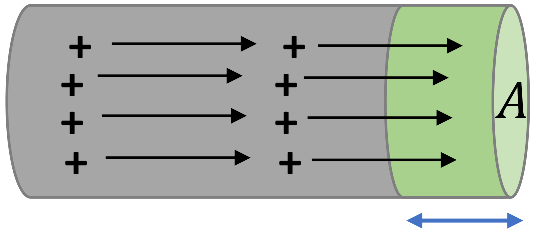
A regime, gli elettroni raggiungono una velocità costante (simile a velocità di crociera in autostrada) che viene chiamata velocità di deriva, e che è proporzionale al campo elettrico locale, attraverso un parametro INTRINSECO DEL MATERIALE che viene chiamato MOBILITA' DI CARICA. Supponendo la resistenza omogenea, il valore del campo elettrico locale si può considerare costante in tutti i punti. Pertanto il lavoro per unità di carica sarà dato da $\frac{L}{q} = \int \vec{E}.d\vec{l} = El = |\Delta V| \rightarrow \quad E = \frac{|\Delta V|}{l}$

$$\vec{v} = \mu \vec{E}$$

$\vec{v}$ velocità di deriva

μ mobilità di carica

$\vec{E}$ campo elettrico esterno



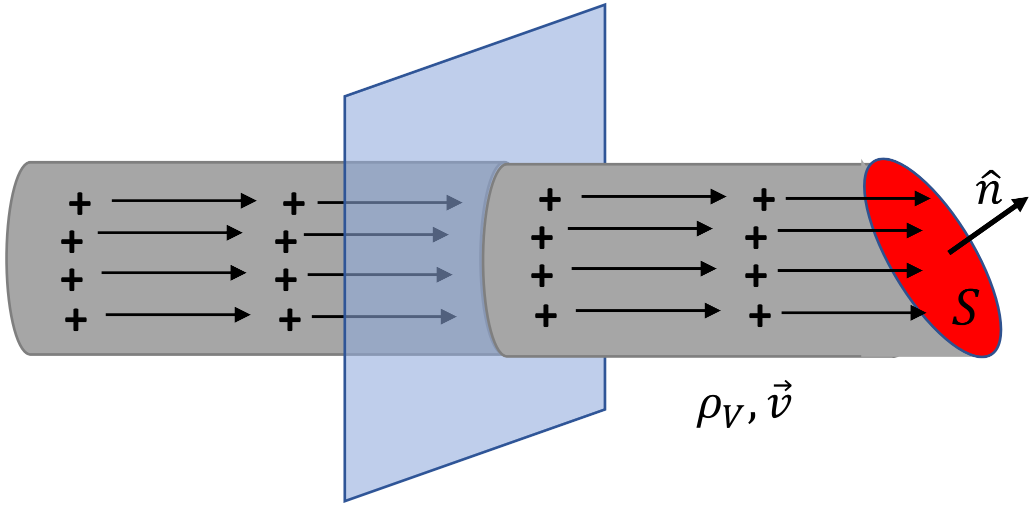
$$|\vec{v}| = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La mobilità di carica tiene conto degli effetti (polarone) sugli elettroni di conduzione dei moti dei nuclei atomici dovuti all'energia termica in un contesto strettamente quantistico (fononi), e fornisce una sintesi macroscopica di fenomeni microscopici difficilmente calcolabili, molto utile e semplice per descrivere il funzionamento di conduttori, semiconduttori e di tutti i dispositivi su di essi basati

$$[\mu]=\frac{[v]}{[E]} = \frac{[L][L]}{[t][V]} = \frac{m^2}{V\ s}$$

UNIMORE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

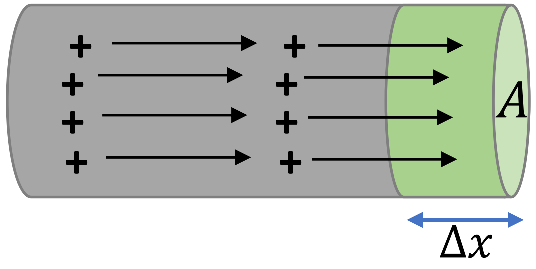
Densità di corrente



All'interno del conduttore, sotto l'azione del campo elettrico locale, gli elettroni si muovono attraverso gli orbitali delocalizzati come se si muovessero in un mezzo viscoso. La corrente elettrica è data dall'insieme del movimento di un numero elevatissimo di elettroni e si può immaginare come il movimento di un fluido costituito da un numero enorme di molecole. Nonostante la presenza di un campo elettrico locale, gli elettroni non accelerano a causa della presenza di urti (termicamente attivati) interni al conduttore che agiscono come una forza dissipativa

ρ_V numero cariche per unità di volume

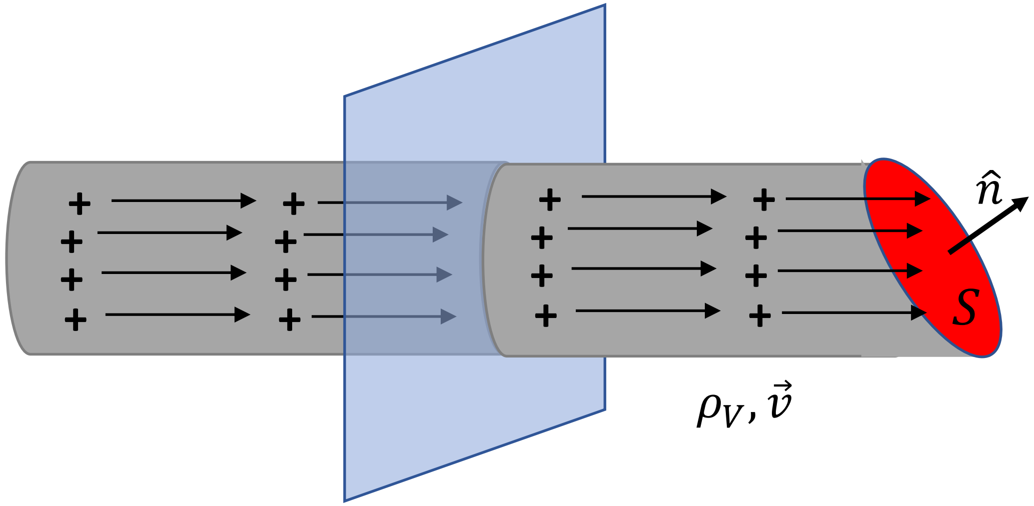
$\vec{j} = \rho_V \vec{v}$ Densità di corrente elettrica



$$|\vec{v}| = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \int_S \vec{j}.\hat{n}\, dS = \Phi_S(\vec{j})$$ Corrente elettrica: flusso della densità di corrente elettrica

Conducibilità e resistività



Attraverso la mobilità di carica si può legare la densità di carica al campo elettrico generato nel conduttore dalla differenza di potenziale applicata ai capi della resistenza

$\vec{j}$ densità di carica

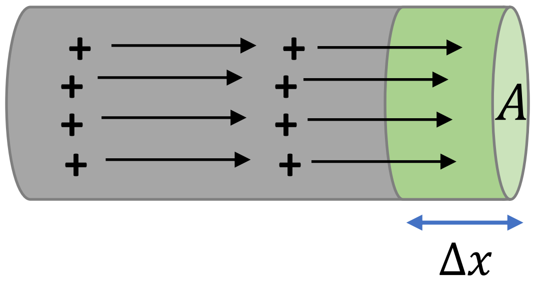
σ conducibilità elettrica

$\vec{E}$ campo elettrico esterno

$$\vec{j} = \rho_V \vec{v} = \rho_V \mu \vec{E}$$

$\boldsymbol{\rho \equiv \sigma^{-1}}$ resistività elettrica

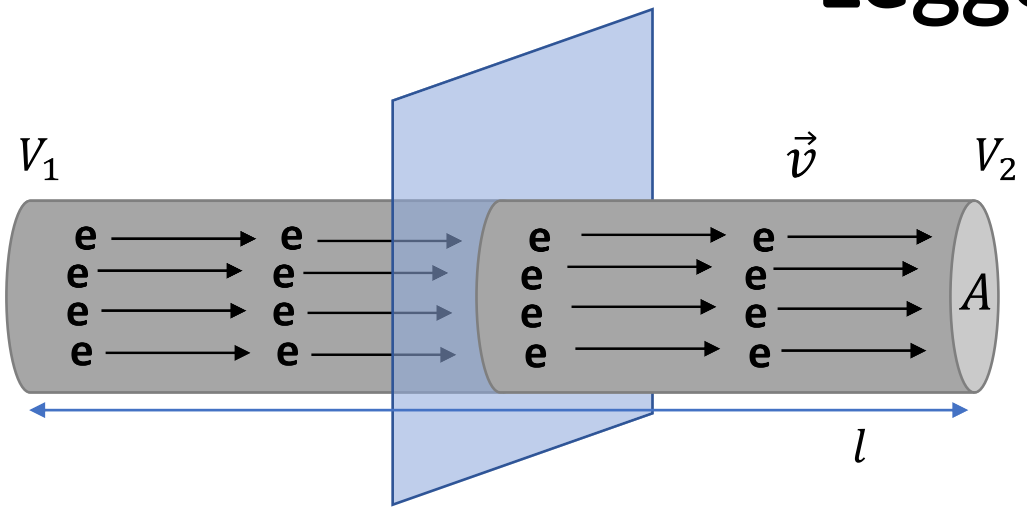
$$\sigma \equiv \rho_V \mu$$



$$|\vec{v}| = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \qquad \vec{E} = \rho \vec{j}$$

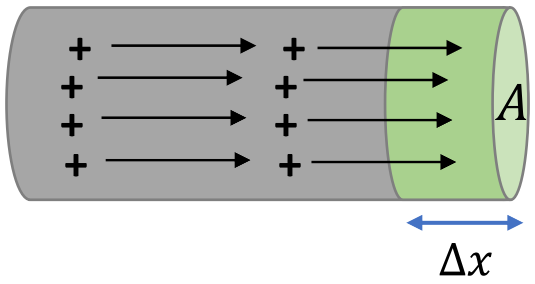
Legge di Ohm



Supponendo che il conduttore sia perfettamente omogeneo, si può considerare il campo elettrico al suo interno constante in ogni punto

$$\Delta V = \int_1^2 \vec{E}.d\vec{s} = El$$

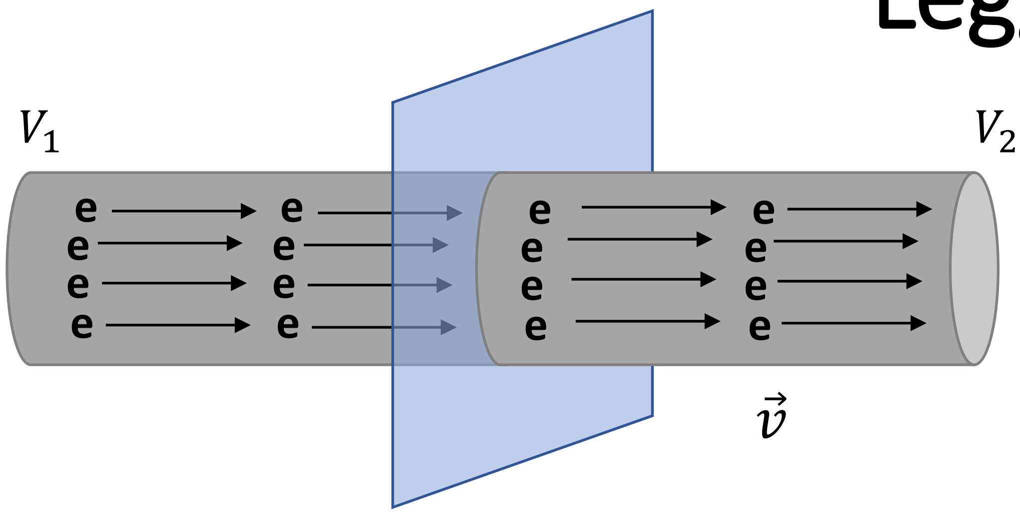
$$I = \frac{dQ}{dt} = \Phi_s(\vec{j}) = \int_s \vec{j}.\hat{n}\, dS = \int_s \sigma\vec{E}.\hat{n}\, dS = jA$$



$$|\vec{v}| = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

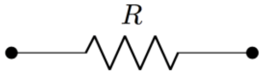
$$I = jA = \sigma EA = \sigma A\frac{\Delta V}{l} \rightarrow \quad \boldsymbol{\Delta V = \frac{\rho l}{A} I}$$

Legge di Ohm



Si definisce resistenza elettrica R la grandezza:

$$\boldsymbol{R = \frac{l}{A}\rho}$$



R dipende dalla geometria del conduttore (A, l) a dalle proprietà intrinseche del materiale conduttore (ρ)

Poiché, per definizione, il verso della corrente è sempre considerato rispetto alle cariche positive che si spostano verso regioni a potenziale inferiore, essendo $V_1 > V_2$, risulta:

$$V_1 - V_2 = RI$$

La resistenza si misura in **Ohm (Ω):**

$$1\,\Omega = \frac{1 V}{1\,A}$$

Ovvero: **la caduta di potenziale ΔV lungo una resistenza R attraversata da una corrente I è pari a**

$$\boldsymbol{\Delta V = RI}$$

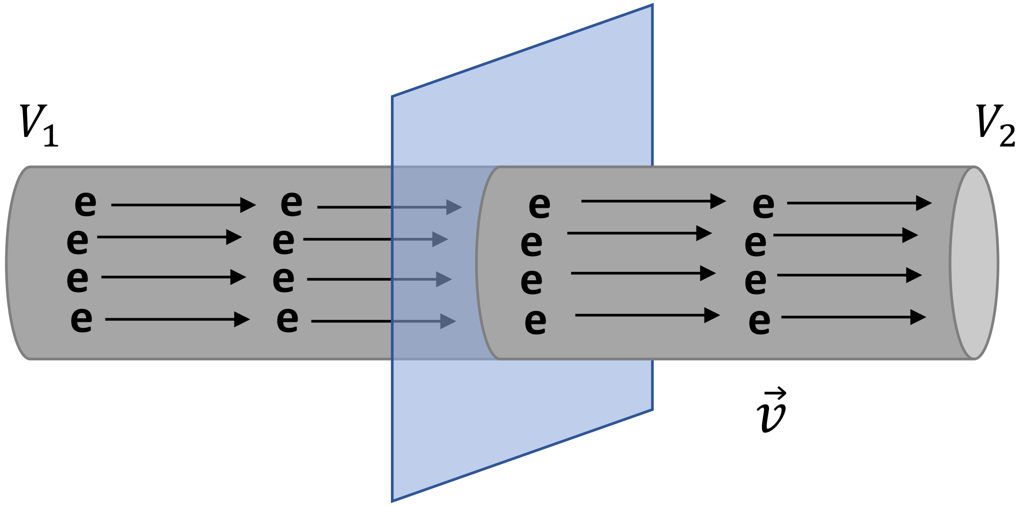
In forma microscopica:

$$\boldsymbol{\vec{E} = \rho\vec{j}}$$

Resistività e conducibilità

$$R = \frac{l}{A}\rho \rightarrow \quad \rho = R\frac{A}{l} \rightarrow \quad [\rho] = [R][L] = \Omega\, m$$

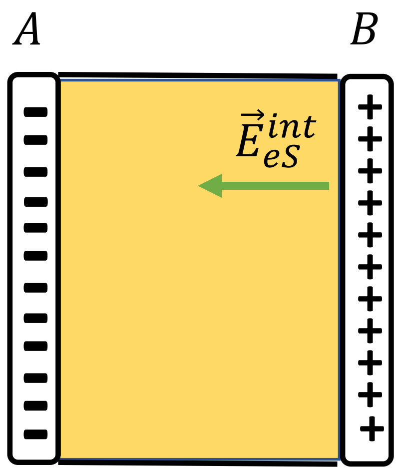
$$\sigma = \rho^{-1} \rightarrow \quad [\sigma] = \frac{1}{[R]}\frac{1}{[L]} = \frac{S}{m}$$



Simens:

$$1\, S = \frac{1}{\Omega}$$

Forza elettromotrice (f.e.m.)

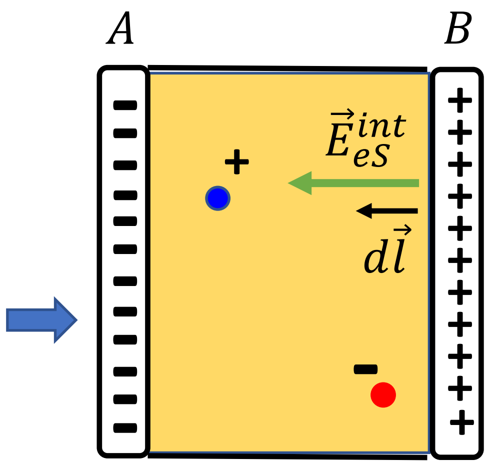


Supponiamo di avere realizzato un dispositivo capace di generare due distribuzioni di carica di segno opposto. Queste generano un campo elettrostatico all'interno del dispositivo uguale ad $\vec{E}_{eS}^{int}$.

Supponiamo ora che, differentemente da quanto avviene in un capacitore, le cariche siano potenzialmente libere di muoversi all'interno del dispositivo, il campo elettrostatico generato dalle due armature cariche tenderà a muovere le cariche positive verso il polo negativo e viceversa, fino ad annullare la carica su entrambe le armature

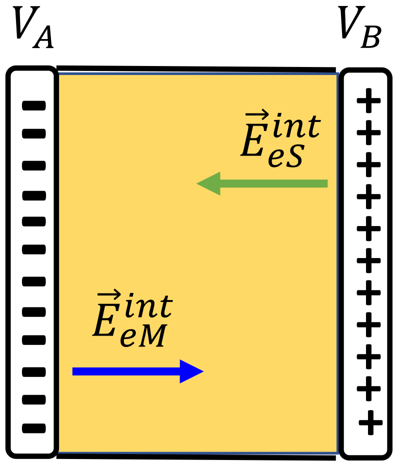
Il lavoro che fa la forza elettrostatica interna $\vec{F} = q\vec{E}_{eS}^{int}$ per spostare una carica unitaria positiva tra l'armatura positiva a quella negativa del dispositivo è in particolare pari a:

$$L_{BA}^{eS} = \int_B^A \vec{E}_{eS}^{int} \cdot d\vec{l} = V_B - V_A$$



Come possiamo mantenere separate le distribuzioni di carica opposta sulle due armature ?

Forza elettromotrice (f.e.m.)



Per mantenere separate le cariche occorre che all'interno del dispositivo vi sia una forza capace di opporsi alla forza generata sulle cariche dal campo elettrostatico $\vec{E}_{eS}^{int}$

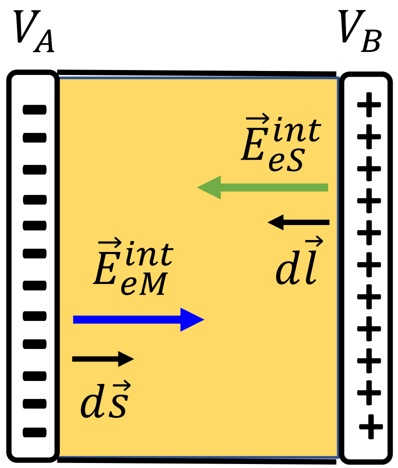
Supponiamo che questa forza, di natura differente dalla forza elettrostatica, agisca su ciascuna singola carica elementare per cui, se $\vec{E}_{eM}^{int}$ è la forza che agisce su di una carica unitaria, la forza che agisce su di una carica totale q è pari a $\vec{F} = q\vec{E}_{eM}^{int}$

Chiamiamo la forza $\vec{E}_{eM}^{int}$ agente sulla carica unitaria, CAMPO ELETTROMOTORE

Per mantenere in equilibrio e separate tra loro le due distribuzioni di cariche di segno opposto ai capi del dispositivo occorre che il campo elettromotore sia uguale e contrario al campo elettrostatico generato dalle due distribuzioni dai cariche di segno opposto stesse

$$\vec{E}_{eM}^{int} = -\vec{E}_{eS}^{int}$$

Forza elettromotrice (f.e.m.)



Il lavoro compiuto dal campo elettromotore interno al dispositivo $\vec{E}_{eM}^{int}$ per spostare una carica positiva unitaria dal polo negativo al polo positivo attraverso il dispositivo stesso è uguale a:

$$L_{AB}^{eM} = \int_A^B \vec{E}_{eM}^{int} \cdot d\vec{s} = -\int_B^A \vec{E}_{eM}^{int} \cdot d\vec{l} = \int_B^A \vec{E}_{eS}^{int} \cdot d\vec{l} = \int_B^A E_{eS}^{int} dl = V_B - V_A = \Delta V$$

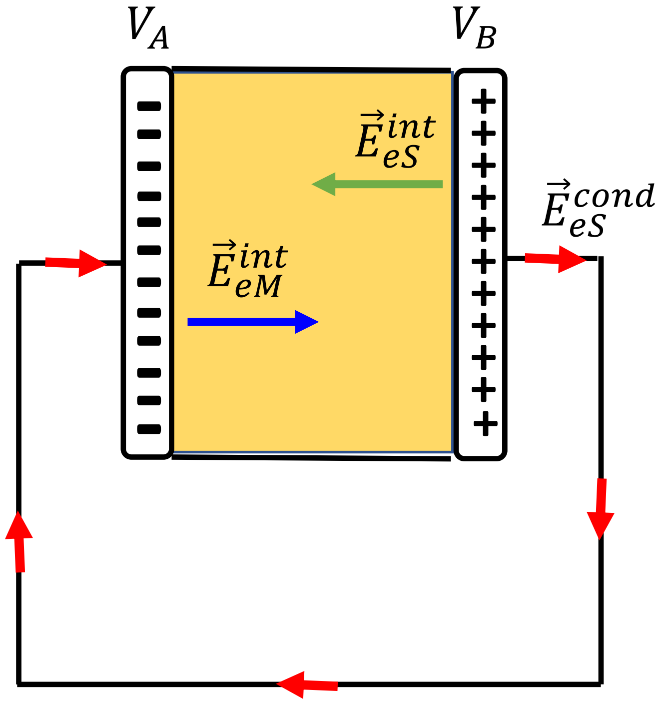
essendo

$$\vec{E}_{eM}^{int} = -\vec{E}_{eS}^{int}$$

Forza elettromotrice (f.e.m.)

Supponiamo ora di connettere i due poli del dispositivo utilizzando un filo conduttore esterno al dispositivo stesso

La differenza di potenziale tra i capi del filo conduttore genera un campo elettrico costante all'interno del filo $\vec{E}_{eS}^{cond}$ di modulo pari a $\frac{\Delta V}{l}$ che mette in movimento le cariche accumulate ad uno dei due poli verso il polo opposto



Arrivate al polo opposto, il campo elettromotore interno cercherà di mantenere l'equilibrio interno di carica in modo tale che la differenza di potenziale ai suoi capi rimanga costante e le cariche immesse e raccolte attraverso il filo vengano sempre bilanciate. Il risultato finale è un passaggio di carica all'interno del filo conduttore

Per semplificare, possiamo immaginare che vi sia un passaggio delle cariche attraverso il dispositivo in modo che vi sia una circolazione continua attraverso il circuito formato dal filo conduttore connesso al dispositivo

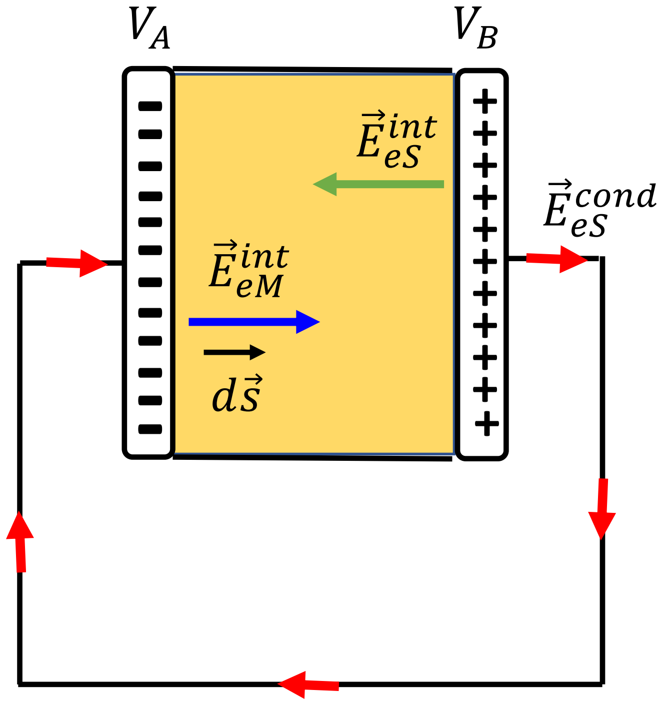
Forza elettromotrice (f.e.m.)

Calcoliamo il lavoro totale eseguito dal circuito per fare compiere ad una carica unitaria positiva un giro completo:

$$L_{tot} = L_{eS}^{int} + L_{eS}^{cond} + L_{eM}^{int} =$$

$$L_{tot} = L_{eS}^{int} + L_{eS}^{est} + L_{eM}^{int} = \int_A^B \vec{E}_{eS}^{int} \cdot d\vec{s} + \int_B^A \vec{E}_{eS}^{cond} \cdot d\vec{s} + \int_A^B \vec{E}_{eM}^{int} \cdot d\vec{s} =$$

$$= -\int_B^A \vec{E}_{eS}^{int} \cdot d\vec{s} + \int_l \frac{\Delta V}{l} ds + V_B - V_A = V_B - V_A = \Delta V$$



La circuitazione del campo elettrostatico generato dalla distribuzione di carica sulle due armature è infatti uguale a zero essendo la forza elettrostatica conservativa

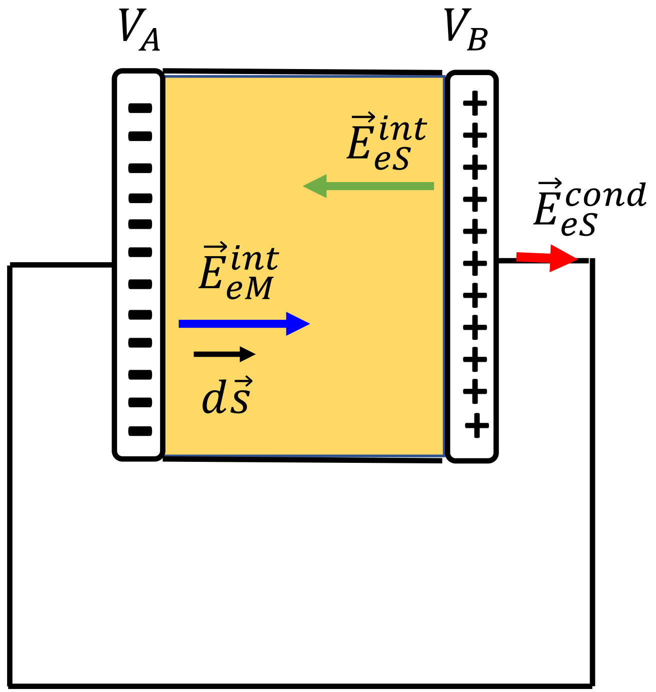
Forza elettromotrice (f.e.m.)

Il lavoro necessario per fare circolare una carica unitaria attraverso il circuito è uguale alla differenza di potenziale ΔV ai capi del dispositivo elettromotore

Il dispositivo elettromotore si comporta pertanto come un elemento non conservativo ed è necessario per fornire alle cariche l'energia sufficiente a contrastare le forze dissipative presenti all'interno del conduttore

Il concetto di campo elettromotore utilizzato per introdurre il dispositivo di alimentazione di un circuito elettrico è una semplificazione. In realtà i processi che avvengono all'interno dell'alimentatore non si posso descrivere in termini di forze.

Quello che sicuramente fa il dispositivo di alimentazione è di garantire una differenza di potenziale costante ai suoi capi e conseguentemente di garantire un bilancio completo tra le cariche in uscita ed in ingresso nel dispositivo.



L'ELEMENTO CARATTERIZZANTE DEL DISPOSITIVO DI ALIMENTAZIONE E' PERTANTO LA DIFFERENZA DI POTENZIALE AI SUOI CAPI ΔV CHE VIENE INDICATA COME FORZA ELETTROMOTRICE, in particolare la f.e.m. viene misurata a circuito aperto

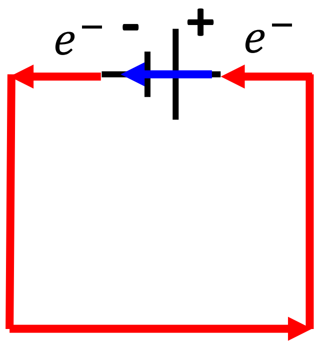
Forza elettromotrice (f.e.m.)

Se il lavoro necessario per fare circolare una carica unitaria attraverso il circuito è uguale alla differenza di potenziale ΔV ai capi del dispositivo elettromotore, il lavoro necessario per fare circolare una carica Q attraverso il circuito sarà uguale a $\mathrm{L} = \mathrm{Q}\Delta V$

La potenza istantanea dissipata all'interno del circuito sarà pertanto:

$$P \equiv \frac{dL}{dt} = I\Delta V = RI^2 = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

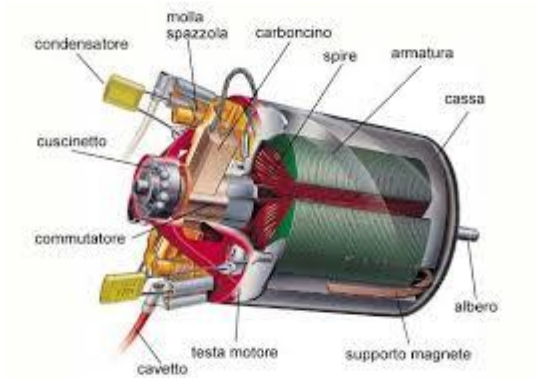
$$\Delta V = f.e.m.$$



L'alimentatore è costretto a fornire l'energia $Q\Delta V$ necessaria a controbilanciare la resistenza di carattere dissipativo (non conservativo) che gli elettroni incontrano dentro al conduttore, detto appunto resistenza. L'energia dissipata a causa della resistenza interna del conduttore è, nell'unità di tempo, pari alla potenza $P = I\Delta V$. L'energia dissipata si manifesta come energia termica (calore) emanata dal conduttore: i circuiti elettrici si scaldano, questo processo ha il nome di EFFETTO JOULE.

Forza elettromotrice (f.e.m.)

Possiamo generare una forza elettromotrice in molti modi, sfruttando interazioni chimiche, effetti foto-elettrici, termo-elettrici, elettromagnetici .... esempi di generatori di f.e.m. sono, per esempio, le batterie, le centrali che alimentano la rete elettrica, motori elettrici ...



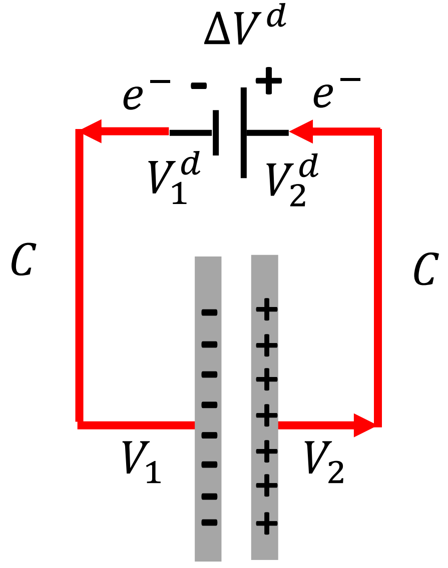
In un dispositivo ideale $fem = \Delta V$

In un dispositivo reale $fem > \Delta V$ essendoci anche processi dissipativi interni

... considereremo sempre dispostivi ideali

Condensatore

Supponiamo di connettere ad ognuno dei due capi di una f.e.m. un'armatura metallica piana conduttrice come mostrato in figura



Il circuito è aperto e pertanto all'equilibrio $I = 0$

$$\vec{E} = 0 \Rightarrow$$

$$V_1^d - V_1 = \int_C \vec{E}.d\vec{l} = 0 \rightarrow V_1 = V_1^d$$

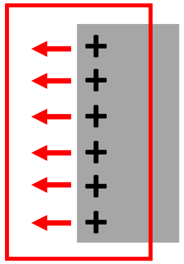
$$V_2^d - V_2 = \int_C \vec{E}.d\vec{l} = 0 \rightarrow V_2 = V_2^d$$

Le due armature metalliche sono equipotenziali

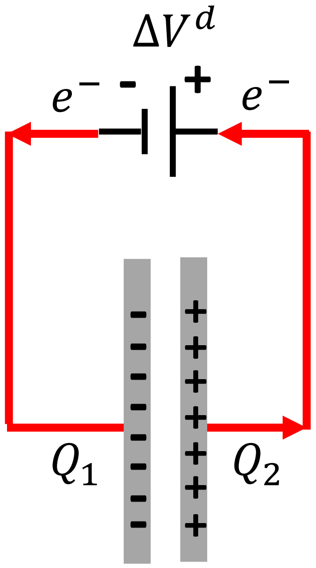
Condensatore

All'equilibrio all'interno del conduttore $\vec{E} = 0$

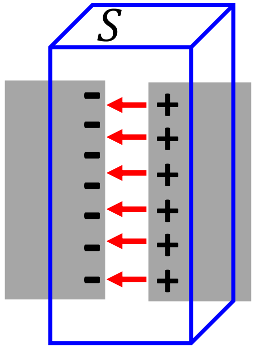
$$\oint \vec{\boldsymbol{E}} . \overrightarrow{\boldsymbol{dl}} = \boldsymbol{0}$$



l campo $\vec{E}$ è $\perp$ alla superficie e all'interno = 0



$$\boldsymbol{\Phi_S(\vec{E}) = \frac{Q}{\varepsilon_0}}$$

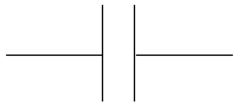


$$\boldsymbol{\Phi_S(\vec{E}) = 0}$$

$$\boldsymbol{Q = 0 \rightarrow Q_1 = -Q_2}$$

$$\boldsymbol{\Delta V = Q \frac{l}{A\varepsilon_0}}$$

$$\boldsymbol{Q = \frac{A\varepsilon_0}{l}} \Delta V^d = \boldsymbol{C} \Delta V^d$$



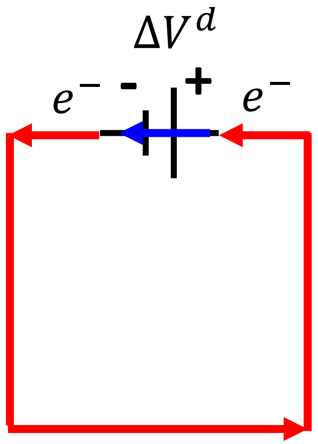
C

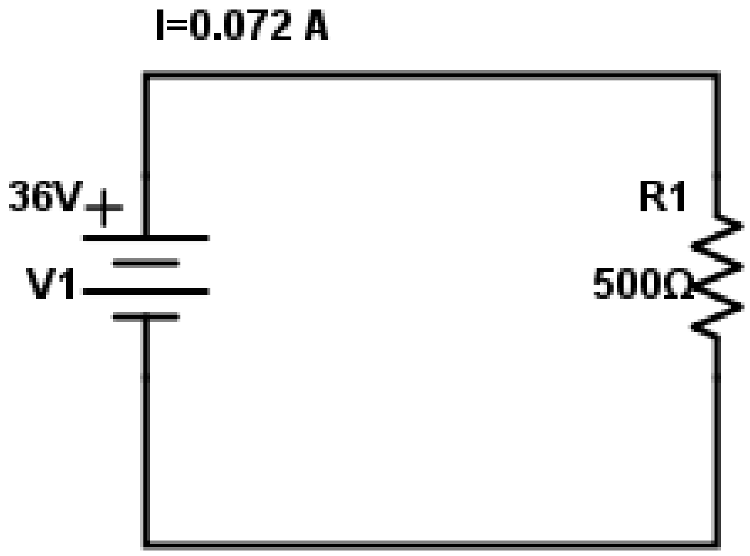
L'elemento passivo che accumula le cariche è detto condensatore ed obbedisce alla relazione:

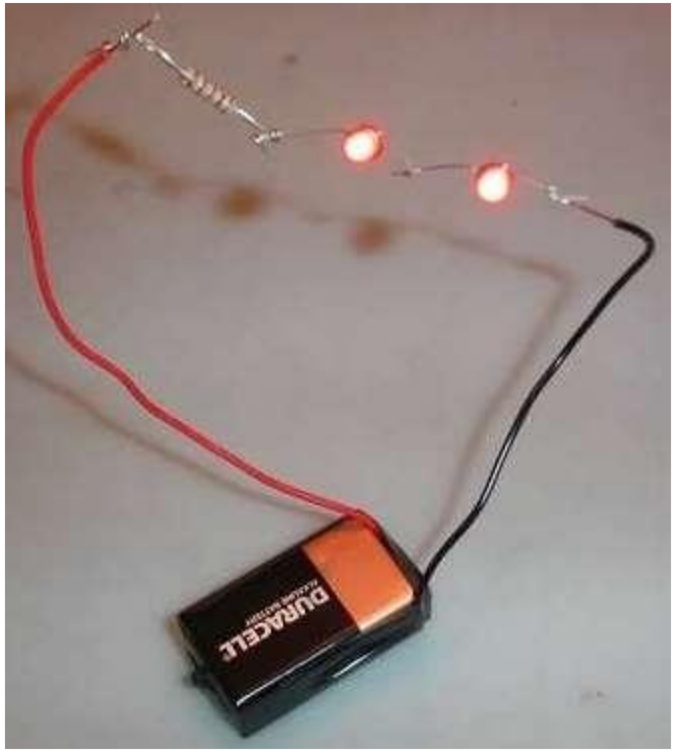
$$\boldsymbol{Q = C\Delta V}$$

C è la capacità del condensatore

Circuito resistivo

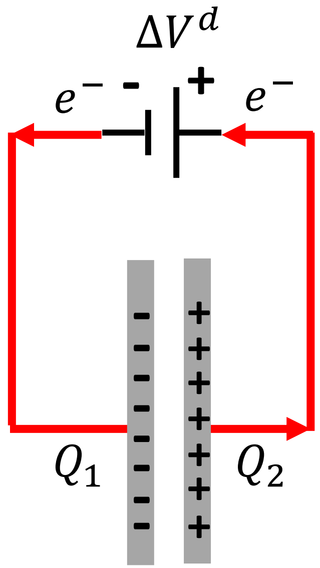


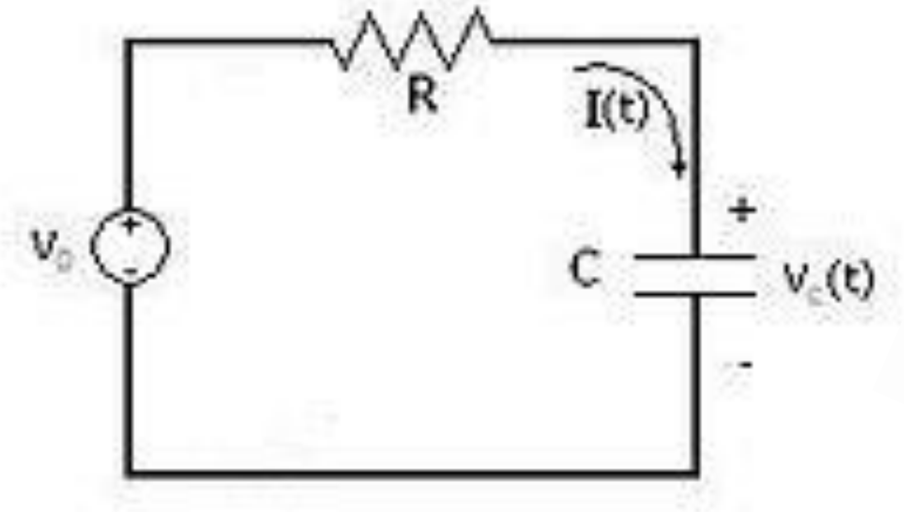


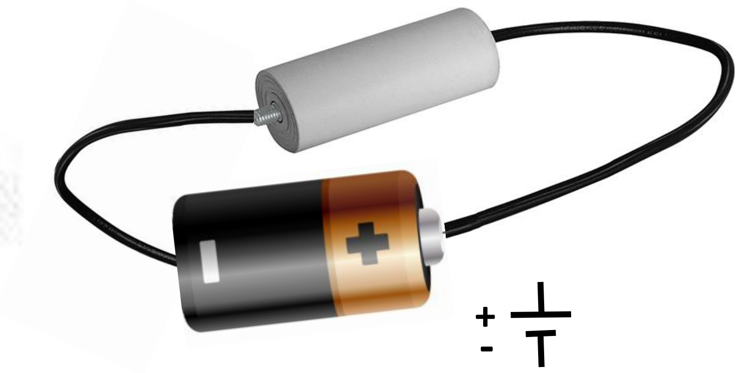


Quando connettiamo i due poli di una f.e.m. con un conduttore, un filo metallico per esempio, generiamo un passaggio di corrente attraverso la resistenza del conduttore. Questo sistema viene schematizzato come in figura. Tutta la resistenza distribuita del conduttore viene condensata nell'elemento R1, mentre la corrente I attraversa tutto il circuito (il numero di cariche in entrata ed in uscita dall'alimentatore è uguale)

Circuito RC





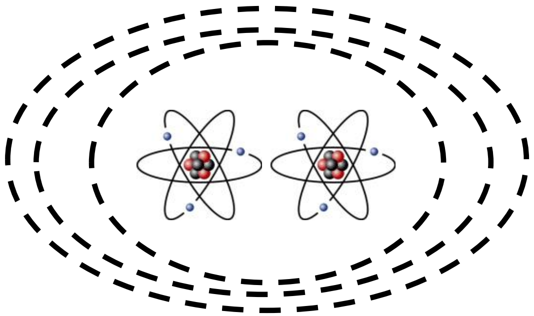


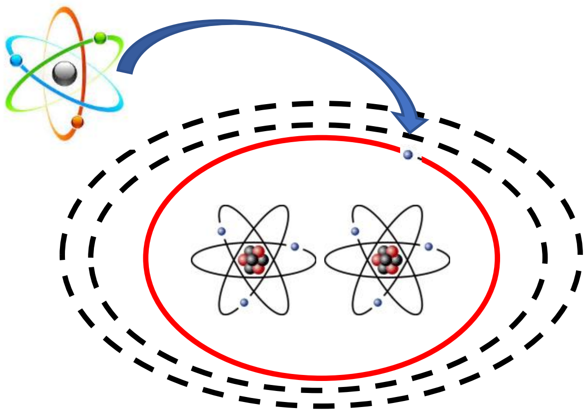
Quando connettiamo un condensatore ad una f.e.m. ci serviamo necessariamente di un conduttore per effettuare fisicamente la connessione, un filo metallico per esempio, dunque il sistema totale è dato dalla f.e.m., dal condensatore e dalla resistenza del filo metallico, come schematizzato nella figura sopra e viene denominato circuito RC

Semiconduttori n-type: transistor

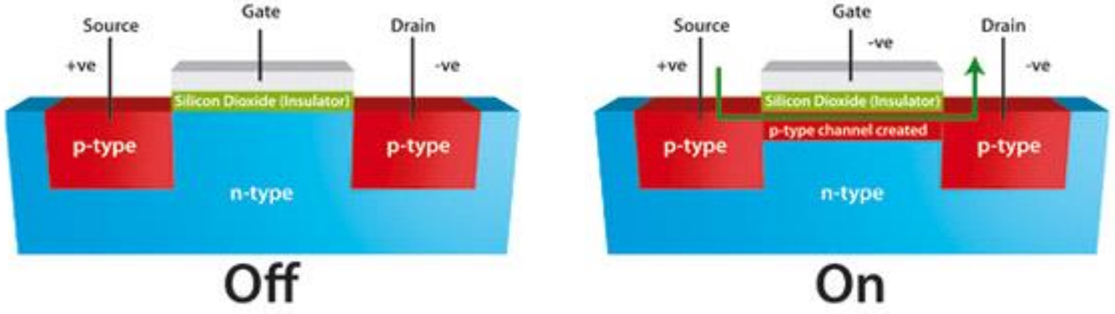
Il semiconduttore n-type è composto da un materiale che dispone di orbitali delocalizzati sostanzialmente vuoti (es. silicio cristallino), che vengono riempiti con un certo numero di cariche attraverso il processo di drogaggio con etero-atomi aventi funzione di donatori di carica. Il drogaggio genera una distribuzione di volume di cariche che sono potenzialmente capaci di generare una corrente muovendosi all'interno di orbitali delocalizzati. Le cariche che vengono assorbite al drain, sono re-iniettate al source. La d.d.p. tra drain e source è la f.e.m. La densità di volume creata è però insufficiente a generare una corrente apprezzabile sotto l'influenza del campo elettrico prodotto dalla differenza di potenziale imposta ai due elettrodi di drain e source. Per avere una corrente apprezzabile occorre aumentare la densità di carica nella regione tra drain e source. Questo viene fatto attraverso un terzo elettrodo, il gate, che è separato dalla regione di trasporto da un materiale isolante e che produce un campo elettrico trasversale di accumulo di carica

Singolo cristallo con bande delocalizzate vuote



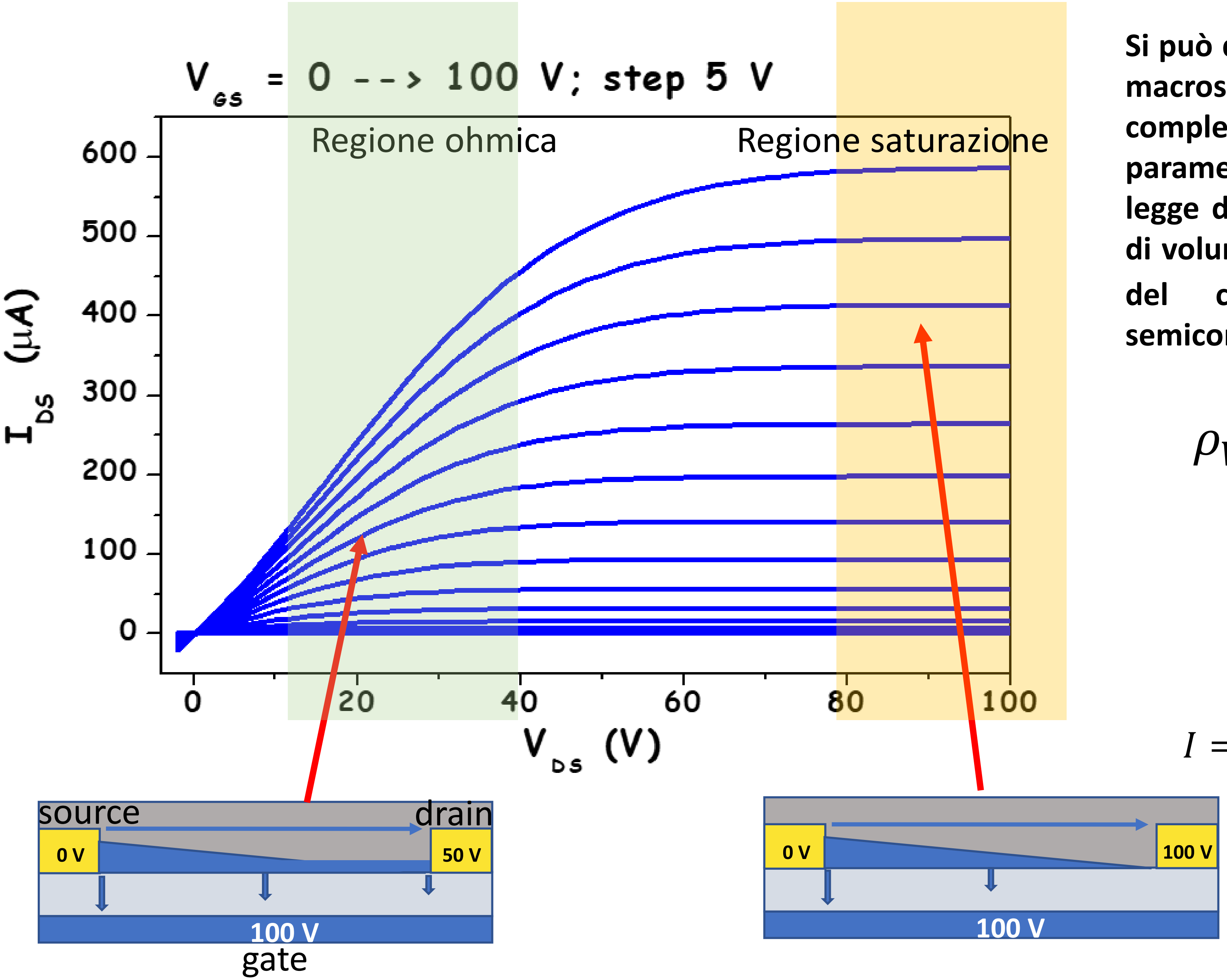


Semiconduttore n-type



Attraverso il GATE il transistor diventa un interruttore elettrico ed è alla base di tutta l'elettronica digitale

Transistor



Si può descrivere il funzionamento del transistor in modo macroscopico abbastanza semplice, racchiudendo tutta la complessità delle interazioni quanto-meccaniche nel parametro intrinseco μ (mobilità) ed utilizzando poi la legge di Ohm microscopica, considerando che la densità di volume dei portatori di carica (ρ_V) dipende dal valore del campo elettrico locale $\vec{E}$ all'interno del semiconduttore, di conseguenza anche la resistività

$$\rho_V = \rho_V\left(\vec{E}\right) \rightarrow \sigma = \rho_V \mu = \sigma\left(\vec{E}\right)$$

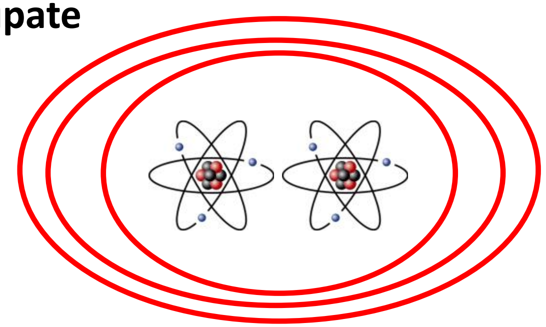
$$\rho = \sigma^{-1} = \rho\left(\vec{E}\right)$$

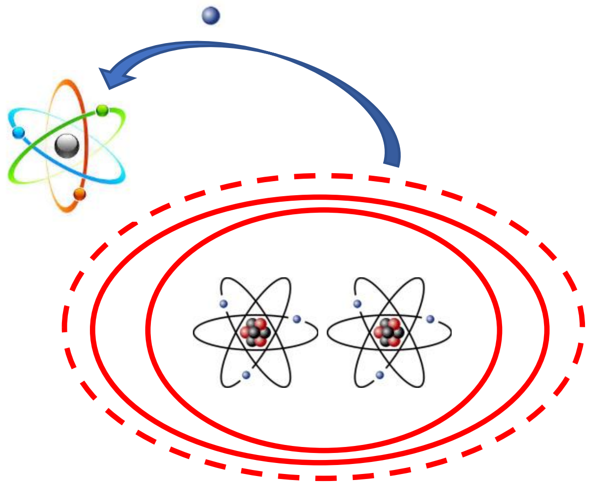
$$I = \mu \frac{CW}{l} \begin{cases} (V_g - V_t)V_d - \frac{1}{2}V_d^2 & V_d \leq V_g - V_t \\ \frac{1}{2}(V_g - V_t)^2 & V_d > V_g \end{cases}$$

Semiconduttore p-type

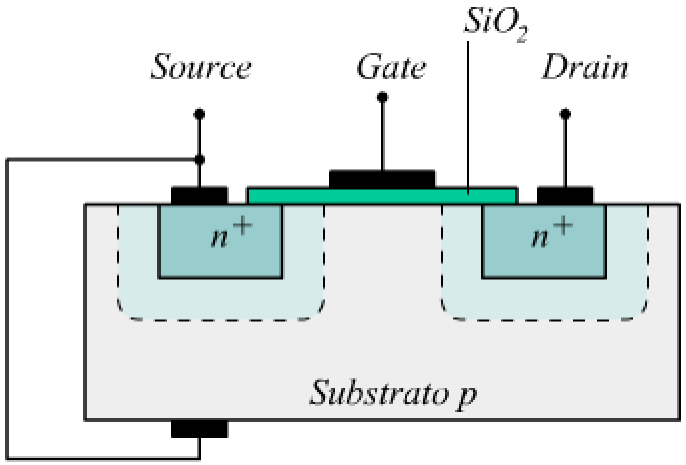
Se vengono tolti degli elettroni da un materiale con orbitali delocalizzati completamente pieni, in corrispondenza di determinati atomi attraverso l'utilizzo di etero-atomi droganti accettori, la nuvola di elettroni che resta negli orbitali delocalizzati cercherà di neutralizzare e chiudere i buchi creati. Non potendo arrivare ad una situazione di equilibrio stabile (gli elettroni sono intrappolati negli etero-atomi accettori) si forma un movimento random di carica che dà l'effetto complessivo di una spostamento delle buche da un atomo all'altro. In realtà è la nuvola elettronica che si muove. Dal punto di vista teorico è possibile schematizzare il sistema con delle particelle virtuali (quasi-particles), dette buche, a cui si può associare una massa effettiva ed una carica pari a e^+. Questo tipo di sistema si chiama semiconduttore di tipo p (p-type)

Singolo cristallo con bande delocalizzate completamente occupate





Semiconduttore p-type

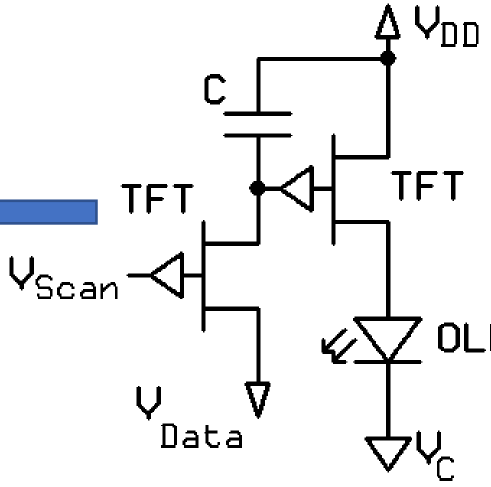


Analogamente a quanto visto per il semiconduttore n-type, si può costruire un transistor sfruttando il semiconduttore p-type a cui sarà associata un MOBILITA' DI CARICA EFFETTIVA associata alle particelle virtuali che abbiamo chiamato buche. Per il resto le caratteristiche tensione-corrente sono le stesse che per il transistor n-type

Resistenze, capacità, transistor nei dispositivi reali

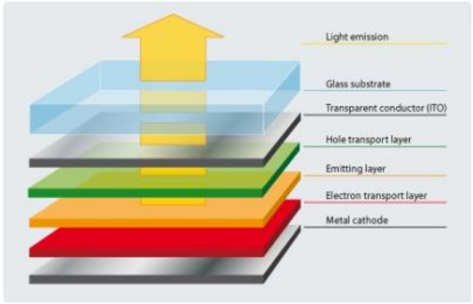
AMOLED pixel architecture

Inorganic Thin Film Transistor (TFT)

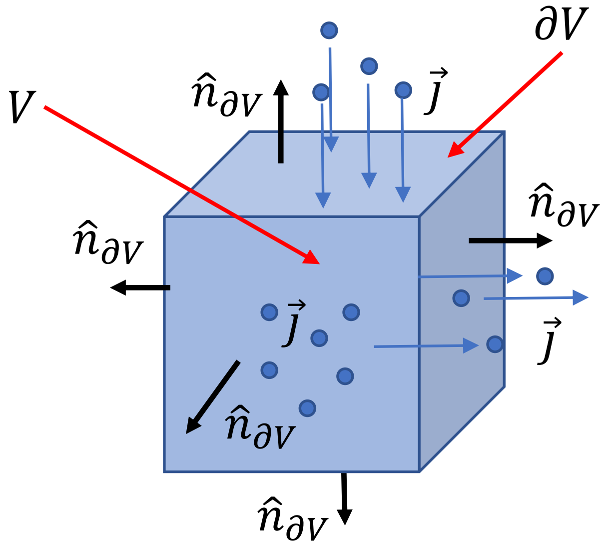


Inorganic Thin Film Transistor (TFT)

Organic Light Emitting Diode



Principio di conservazione della carica elettrica



$$\frac{dQ}{dt} + I = 0$$ Equazione di continuità in forma integrale

Indichiamo con ∂V la superficie che racchiude il volume V, la superficie ∂V è detta frontiera del volume V. L'equazione di continuità diventa:

$$\frac{dQ}{dt} + \Phi_{\partial V}(\vec{j}) = \frac{dQ}{dt} + \int_{\partial V} \vec{j} \cdot \hat{n}_{\partial V}\, d(\partial V)$$

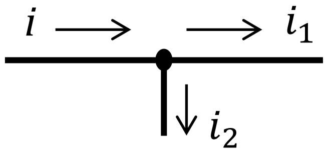
La variazione totale di carica nell'unità di tempo all'interno di un volume V deve essere in modulo uguale alla corrente che è entrata o che è uscita attraverso la superficie che delimita il volume, ovvero al flusso totale della densità di corrente $\vec{j}$ attraverso la superficie ∂V. **LA CARICA ELETTRICA NON SI GENERA AUTONOMAMENTE NE' TANTOMENO SCOMPARE NEL NULLA**

La carica persa dal volume V nell'unità di tempo $(dQ < 0)$ deve necessariamente essere uscita verso l'esterno attraverso la superficie ∂V $(\Phi_{\partial V}(\vec{j}) > 0)$ e la carica acquisita all'interno del volume V $(dQ > 0)$ nell'unità di tempo deve necessariamente essere arrivata dall'esterno attraverso la superficie ∂V $(\Phi_{\partial V}(\vec{j}) < 0)$

Leggi di Kirchhoff

Consideriamo un sistema composto da più conduttori percorsi da corrente e da una o più sorgenti di f.e.m. (generatori); tale sistema prende il nome di **rete** ed ogni conduttore prende il nome di **ramo della rete**, costituito da una disposizione in serie di elementi attivi (generatori) e passivi (resistenze), o, eventualmente, di un solo tipo di elemento.

NODO: punto di confluenza di tre o più rami



RAMO: qualunque parte del circuito compresa tra due *nodi*

Sono **positive** le correnti entranti nel nodo e **negative** quelle uscenti

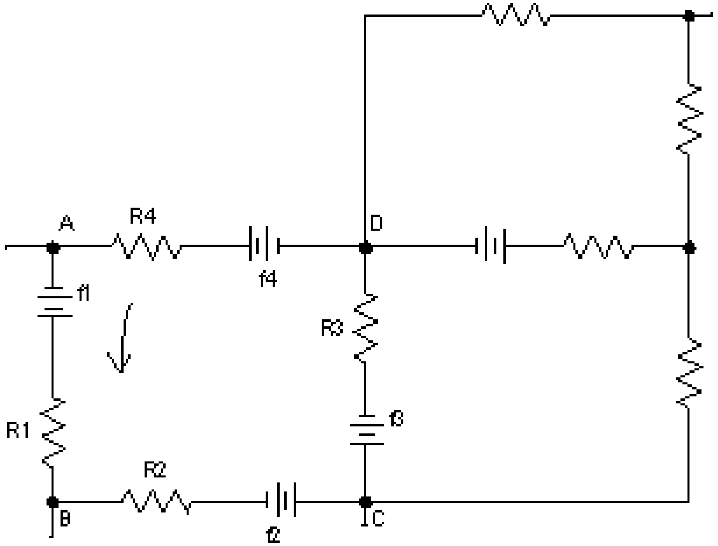
- Legge di Kirchhoff dei nodi

$$\sum_{k=1}^{N} i_k = 0$$

La somma algebrica delle intensità di corrente nei rami facenti capo allo stesso nodo è nulla (conseguenza della conservazione della carica)

Leggi di Kirchhoff

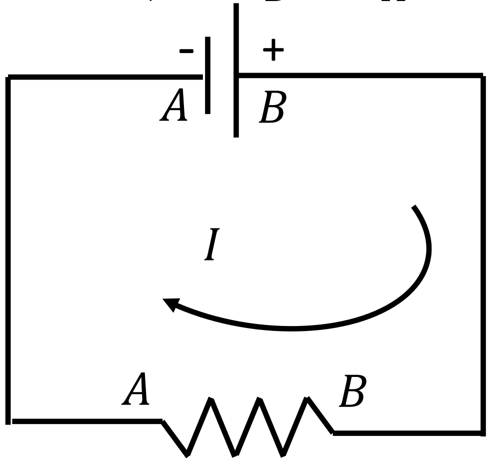
MAGLIA: qualunque parte del circuito che partendo da un *nodo*, vi ritorna percorrendo più *rami*



- Legge di Kirchhoff delle maglie

somma algebrica delle differenze di potenziale lungo una maglia (con il segno appropriato in funzione del verso di percorrenza della maglia stessa) è pari a zero

$$\xi = V_B - V_A$$



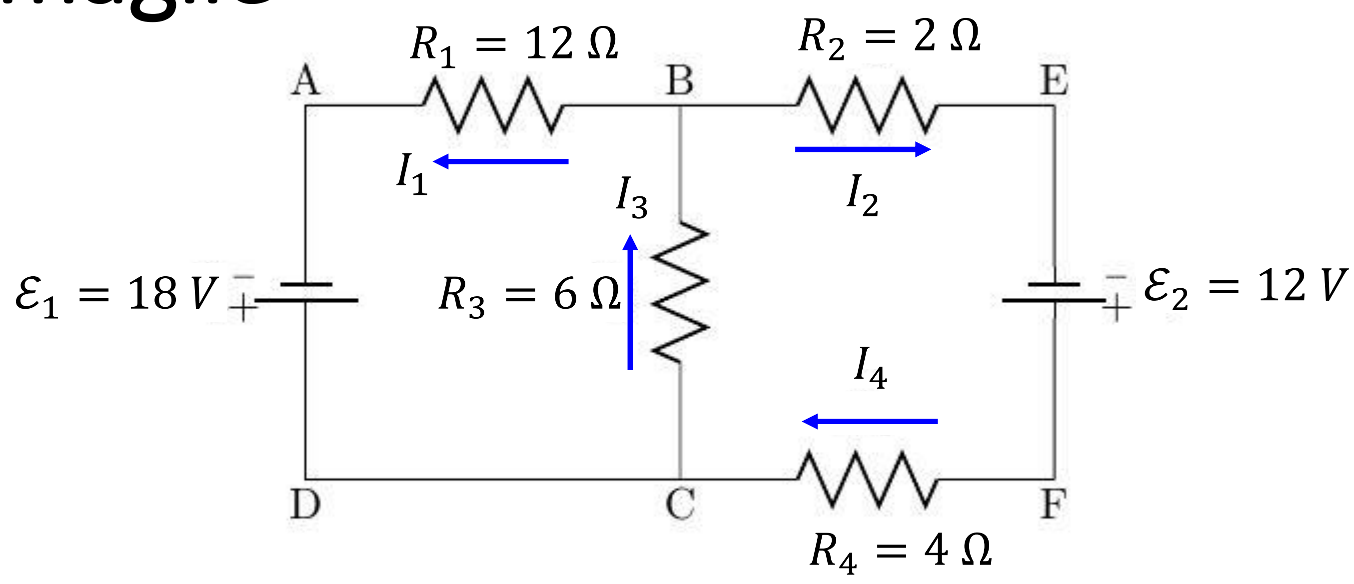
$$V_B - V_A = RI$$

Per un circuito resistivo:

$$\sum_n \xi_n - \sum_k R_k I_k = 0$$

Nel verso della corrente vi è una caduta di potenziale attraverso la resistenza

Circuito a più maglie



- Assegno un verso arbitrario alle correnti circolanti nelle maglie

- Ricordando che la corrente uscente ed entrante attraverso una fem devono essere uguali applico la legge di KK ai nodi

$$I_3 - I_1 - I_2 = 0 \qquad I_3 = I_1 + I_2$$

$$I_1 - I_3 + I_4 = 0 \qquad I_4 = I_2$$

- Percorrendo le maglie nel verso della corrente e ricordando che attraverso una resistenza vi è una caduta di potenziale, applico la legge di KK alle maglie (attraverso la fem dal meno al più cresce la tensione, dal più al meno cala)

$$\mathcal{E}_1 - R_3(I_1 + I_2) - R_1 I_1 = 0 \qquad \mathcal{E}_1 - (R_3 + R_1)I_1 - R_3 I_2 = 0$$

$$\mathcal{E}_2 - R_4 I_2 - R_3(I_1 + I_2) - R_2 I_2 = 0 \qquad \mathcal{E}_2 - (R_4 + R_3 + R_2)I_2 - R_3 I_1 = 0$$

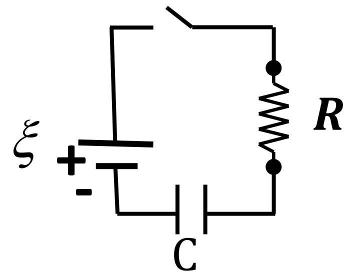
$$18 - 18\, I_1 - 6\, I_2 = 0 \qquad I_2 = 3 - 3I_1 \qquad I_2 = 0.6\ A \qquad I_3 = 1.4\ A$$

$$12 - 12\, I_2 - 6\, I_1 = 0 \qquad I_1 = 2 - 2(3 - 3I_1) \qquad I_1 = 0.8\ A \qquad I_4 = 0.6\ A$$

Carica di un condensatore

- Carica di un condensatore

Inizialmente il condensatore ha carica nulla. Quando si chiude il circuito le armature iniziano a caricarsi

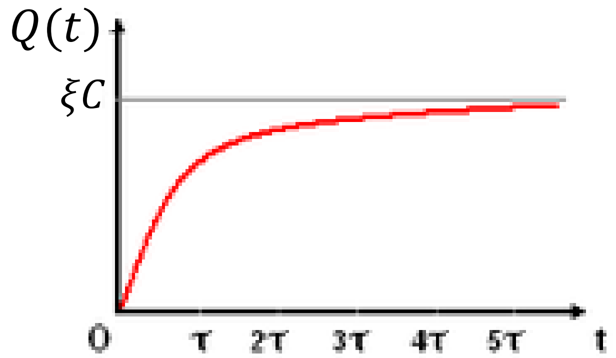


$$\xi - V_c - V_R = 0 \qquad V_R = RI \qquad \xi - V_c(t) - RI(t) = 0 \qquad I = \frac{dQ}{dt}$$

$$V_c = \frac{Q}{C} \qquad \xi - \frac{Q(t)}{C} - R\frac{dQ(t)}{dt} = 0 \qquad RC\frac{dQ(t)}{dt} = -(Q(t) - \xi C)$$

$$(Q(t) - \xi C) \equiv Q' \qquad RC\frac{dQ'(t)}{dt} = -Q' \qquad \frac{dQ'}{dt} = -\frac{Q'}{RC}$$

$$\int_{Q'_0}^{Q'} \frac{dQ'}{Q'} = -\int_0^t \frac{1}{RC}dt \qquad \ln\frac{Q'}{Q'_0} = -\frac{t}{RC} \qquad Q' = Q(t) - \xi C = Q'_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$



$$Q'_0 = -\xi C \qquad Q = \xi C\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \qquad I = \xi C\frac{1}{RC}e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{\xi}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad \tau = RC$$

Tempo caratteristico

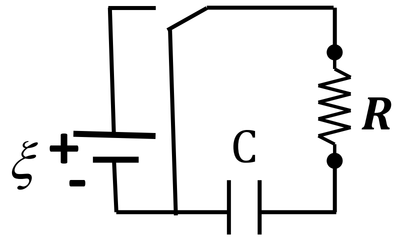
Scarica di un condensatore

- Scarica di un condensatore

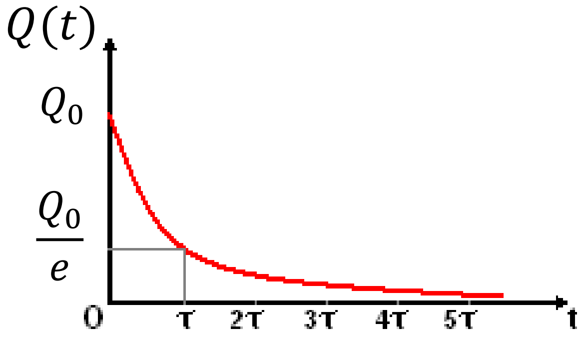
Ad un certo istante stacco la f.e.m. dal circuito e connetto la resistenza direttamente alla due armature del condensatore

Gli elettroni si spostano da un'armatura all'altra per effetto della differenza di potenziale tra le due armature che via via si scaricano:

$$V_c = V_R \qquad V_R = RI \qquad I = -\frac{dQ}{dt} \qquad V_c = \frac{Q}{C}$$

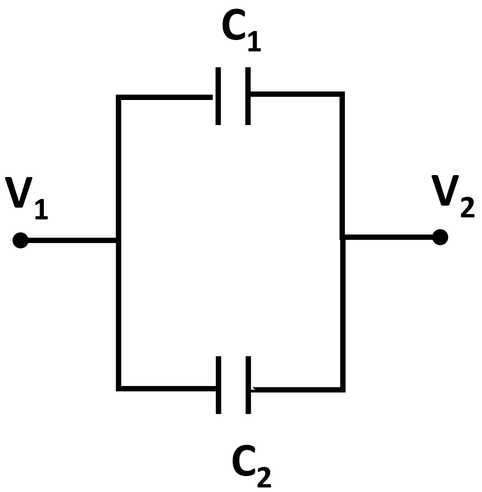


$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{RC} \qquad \int_{Q_0}^{Q} \frac{dQ}{Q} = -\int_{0}^{t} \frac{1}{RC}\,dt \qquad \ln\frac{Q}{Q_0} = -\frac{t}{RC} \qquad Q = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$



$$I = \frac{Q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} \qquad \tau = RC$$ Tempo caratteristico

Sistemi di condensatori

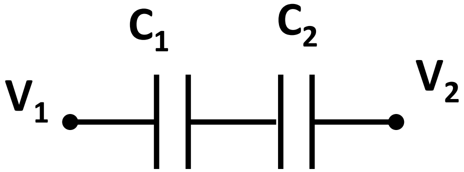


$$\Delta V = \frac{Q_1}{C_1} \qquad Q_1 = C_1 \Delta V$$

$$\Delta V = \frac{Q_2}{C_2} \qquad Q_2 = C_2 \Delta V$$

$$Q_{TOT} = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)\Delta V$$

$$C_{TOT} = C_1 + C_2$$



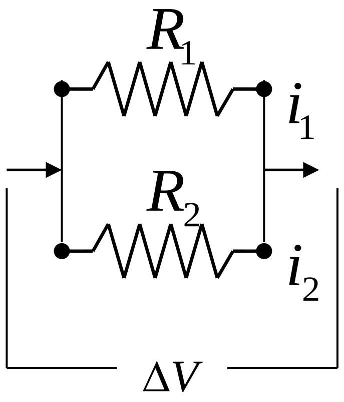
$$\Delta V = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$\Delta V = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} Q$$

$$\frac{1}{C_{TOT}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Sistemi di resistenze

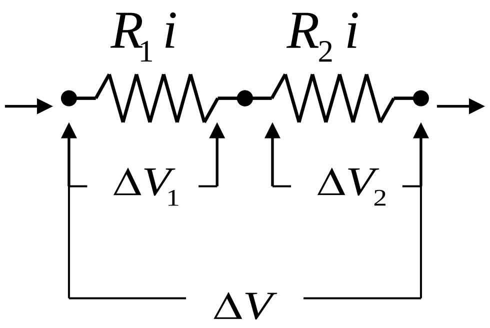


$$\Delta V = R_1 I_1$$

$$\Delta V = R_2 I_2$$

$$I_{TOT} = I_1 + I_2 = \Delta V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{R_{TOT}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



$$\Delta V = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$

$$R_{TOT} = R_1 + R_2$$

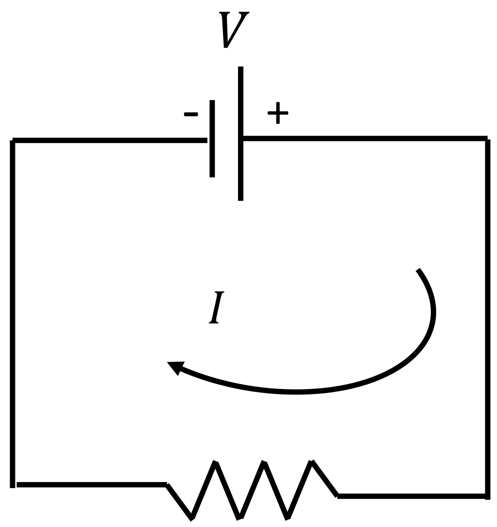
Potenza dissipata da una resistenza

$$P = \frac{dL}{dt}$$

$$V = cost. \qquad V = RI$$

$$L = QV \qquad (V = V^{+} - V^{-})$$

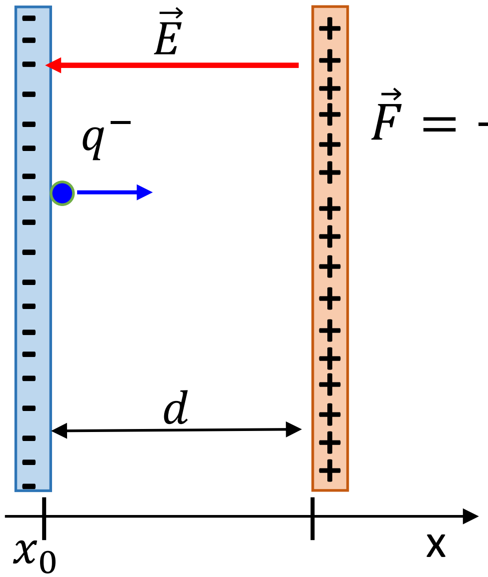
$$P = V\frac{dQ}{dt} = VI = RI^2$$



Il circuito si scalda per effetto della forza di resistenza non conservativa al moto che incontrano gli elettroni nel conduttore

Moto in un campo elettrico

Consideriamo il moto di una particella inizialmente ferma di massa m e carica q nel campo elettrico $\vec{E}$ uniforme generato dalla distribuzione di due lamine cariche piane e parallele di carica opposta:



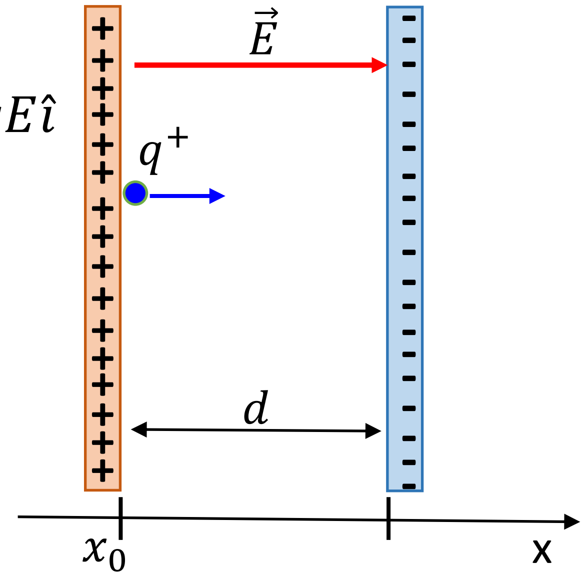
$$\vec{F} = -q(-E)\hat{\imath}$$

$$\vec{F} = q^{\pm}\vec{E}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$\vec{a}$ costante (moto uniformemente accelerato)

$$\vec{F} = qE\hat{\imath}$$

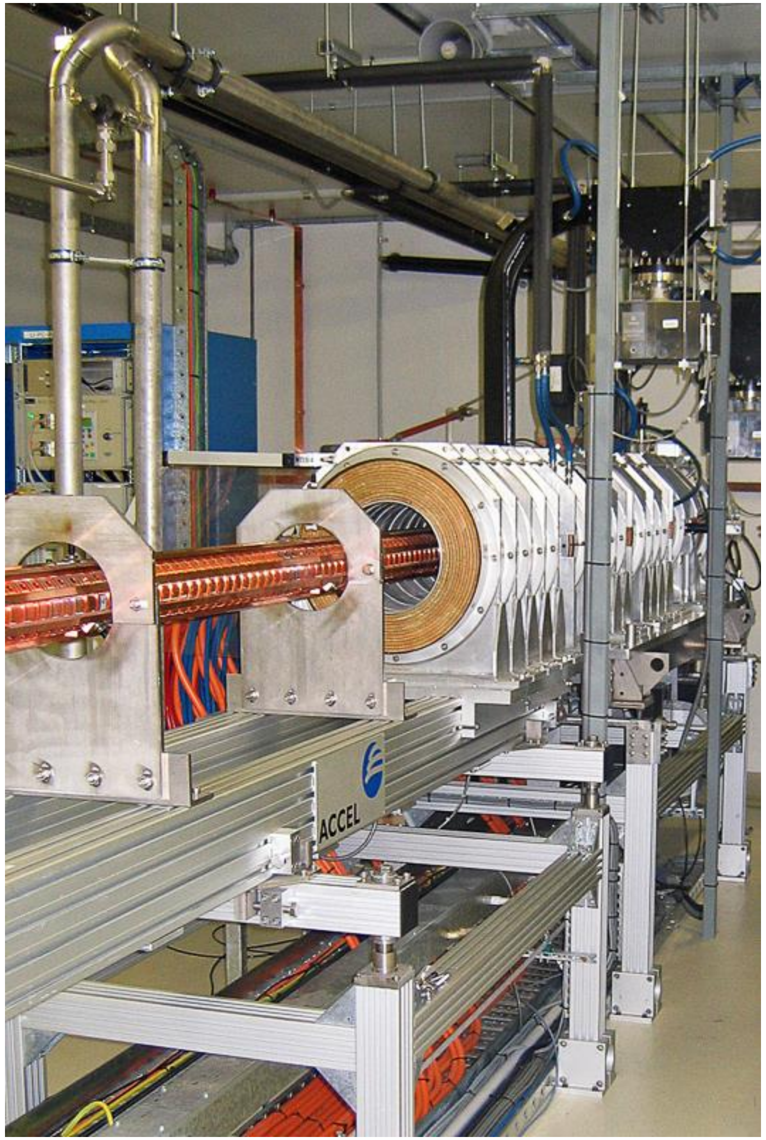


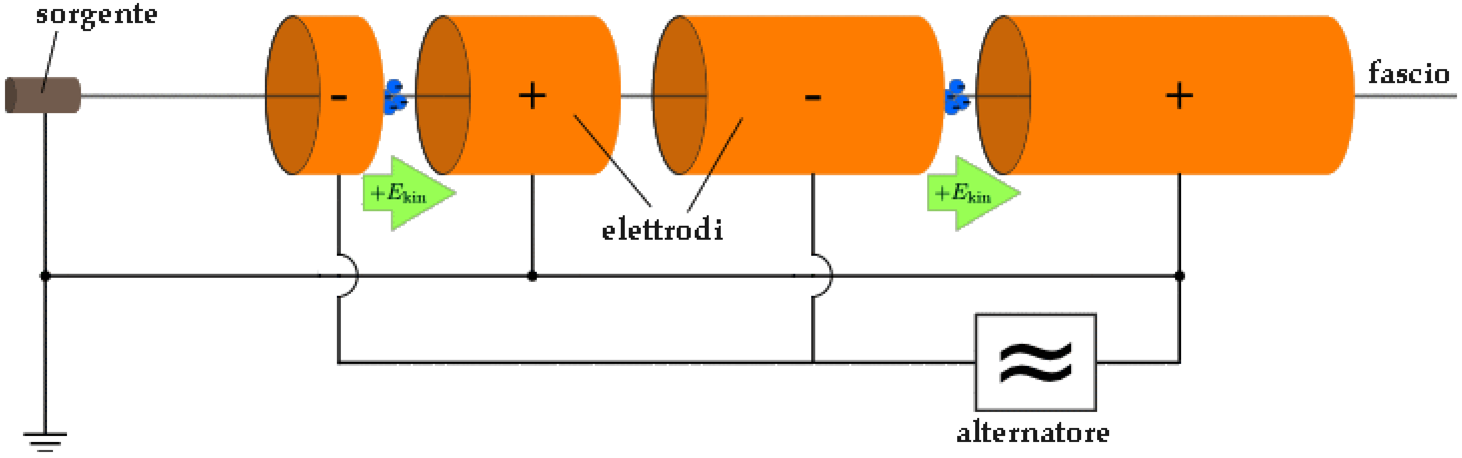
$$a = \frac{q}{m}E \qquad v_x = \frac{q}{m}E\,t + v_x^0 = \frac{q}{m}E\,t \qquad x = \frac{1}{2}\frac{q}{m}E\,t^2 + x_0 \;\rightarrow\; x - x_0 = \frac{1}{2}\frac{q}{m}E\,t^2$$

$$\frac{1}{2}\frac{q}{m}E\,t_d^2 = d \qquad t_d = \sqrt{\frac{2mEd}{q}} \qquad v_d = \frac{q}{m}E\sqrt{\frac{2md}{qE}} = \sqrt{\frac{2Eqd}{m}}$$

Il modulo della velocità finale della carica si poteva ottenere anche dalla conservazione dell'energia meccanica

LINAC

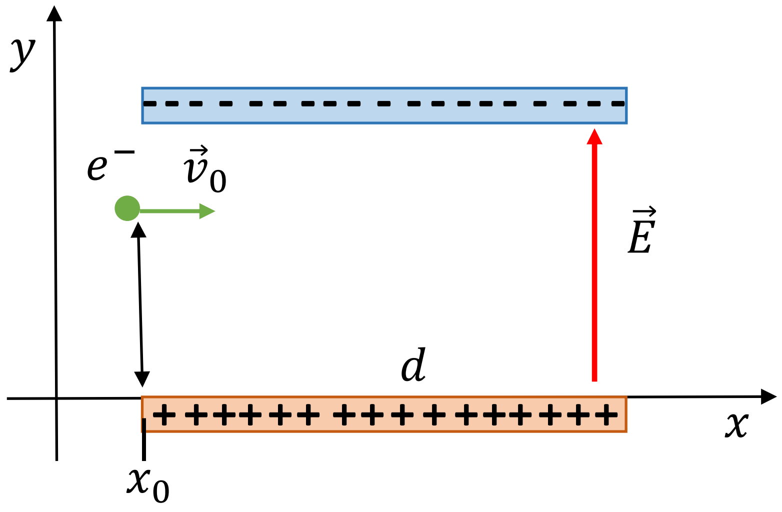




Moto in un campo elettrico

Se si immette l'elettrone con velocità iniziale perpendicolare a $\vec{E}$ ad un'altezza pari a d

La forza gravitazionale è molto inferiore a quella elettrica e si può trascurare



$F_x = 0 \qquad v_x^0 = v_0 \qquad x_0 = 0$

$F_y = -qE \qquad v_y^0 = 0 \qquad y_0 = d$

$a_x = 0 \quad v_x = v_0 \quad \Rightarrow \quad x = v_0 t + x_0 = v_0 t$

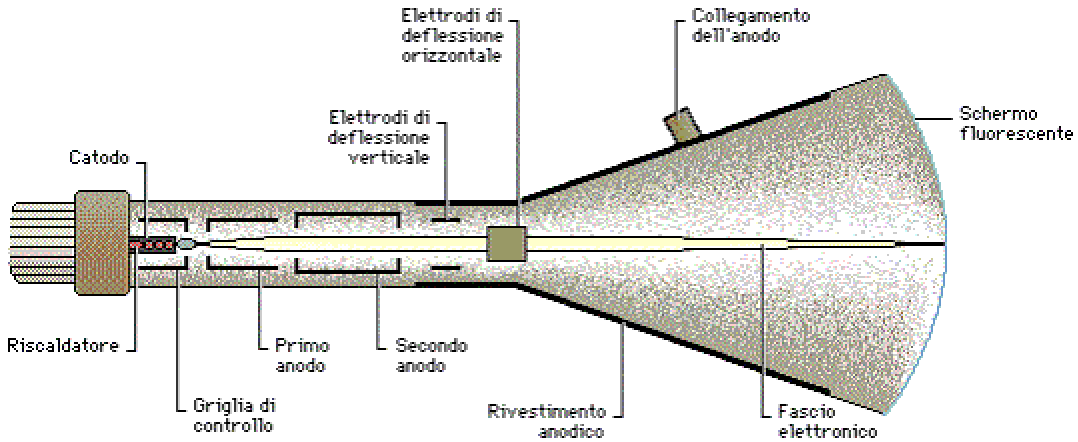
$$a_y = -\frac{qE}{m} \quad \Rightarrow \quad v_y = -\frac{qE}{m}t + v_y^0 = -\frac{qE}{m}t \quad \Rightarrow \quad y = -\frac{qE}{2m}t^2 + y_0 = -\frac{qE}{2m}t^2 + d$$

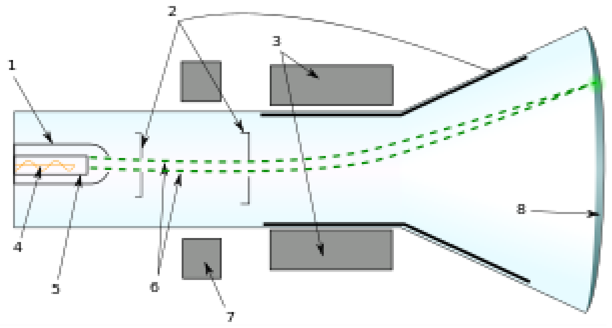
$$0 = -\frac{qE}{2m}t^2 + d \rightarrow \boldsymbol{t = \sqrt{\frac{2md}{qE}}}$$

Il tempo che impiega l'elettrone per raggiungere la seconda armatura dipende dal valore del campo $\vec{E}$, ovvero dalla differenza di potenziale applicata tra le due armature

E se si immette un protone? Cosa cambia?

Tubo catodico





Elettronvolt (eV)

Si definisce Elettronvolt (eV) l'energia cinetica acquistata da una particella avente carica pari a quella di un elettrone, accelerata dalla differenza di potenziale di 1V

Per il teorema dell'energia cinetica: $\Delta E_c = e\Delta V$ ⇒

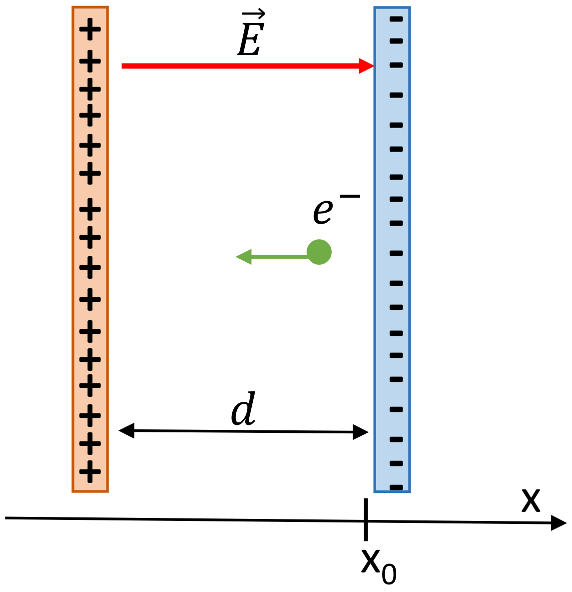
⇒ 1 eV = 1.602 10^{-19} C · 1 V = 1.602 10^{-19} J

Unità di misura dell'energia usata in fisica atomica e nucleare (eV unita' di misura di energia e non del potenziale)

L'eV è una unità di misura molto piccola se confrontata con la scala "umana", ma assolutamente appropriata a quella atomica

L'eV è l'energia tipica dei processi atomici (es. l'energia di ionizzazione dell'atomo di H è 13.6 eV)

7TeV=10^{12} eV a LHC del CERN



$$\Delta V = \int_{x_0}^{x_0 - d} -E dx = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0} \equiv 1V$$