

Componenti non lineari (o non ohmici)

- Sono componenti elettronici per i quali non vale la legge di Ohm: la corrente non e' proporzionale alla tensione applicata.
- Esempi:
 - La lampadina a incandescenza
 - Le valvole termoioniche
 - Il diodo
 - Il transistor
- Questi ultimi due utilizzano dei semiconduttori

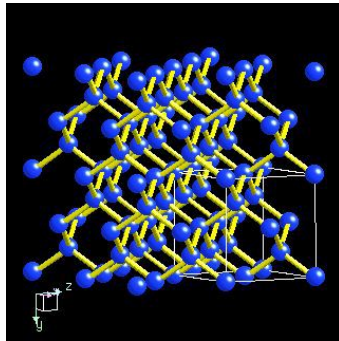
Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

- I semiconduttori sono materiali con resistività intermedia tra i metalli e gli isolanti.
 - Metallo (rame puro): $1.7 \mu\Omega \text{ cm}$
 - Semiconduttore (germanio puro): $50 \Omega \text{ cm}$
 - Buon Isolante: $10^{15} \Omega \text{ cm}$
- Questa proprietà deriva dalla loro struttura interna. Silicio e Germanio, i due semiconduttori più usati, sono atomi tetraivalenti: hanno cioè **quattro elettroni nello strato più esterno** dell'atomo (e quindi più facili da staccare dall'atomo)

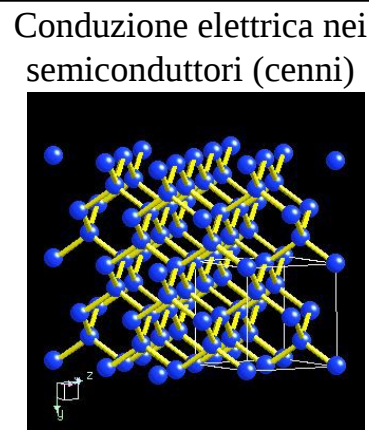


- Allo stato solido un **cristallo** di Si o Ge ha tutti gli atomi organizzati in un reticolo 3D ordinato, tenuto insieme da **legami covalenti**.
- In tale legame due atomi condividono ciascuno un elettrone di valenza, in una configurazione energeticamente conveniente, detta legame covalente.

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

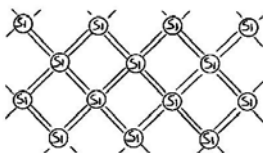


- Nel reticolo del Silicio la struttura e' tale che tutti e 4 gli elettroni di valenza sono utilizzati nei legami tra l'atomo considerato e quelli circostanti.



Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

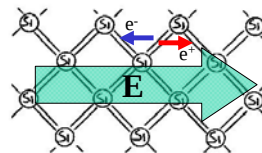
- In queste condizioni sono disponibili per condurre corrente elettrica solo gli elettroni che per **agitazione termica** si staccano dalla loro coppia di atomi di appartenenza, lasciando una lacuna.



Rappresentazione in piano

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

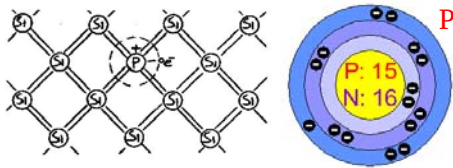
- Se sottoposti ad un campo elettrico, sia l'elettrone che la lacuna staccatisi si possono spostare nel cristallo, formando una corrente che viene detta intrinseca.



Rappresentazione in piano

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

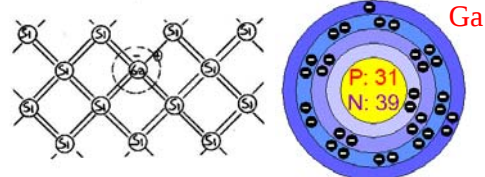
- La conducibilità del cristallo semiconduttore può essere variata introducendo delle impurezze (**drogaggio**).
- Ad esempio sostituendo atomi di Si con atomi di P, che è pentavalente. Avanza un **elettrone**, che resta debolmente legato all'atomo di origine, e facilmente disponibile per la conduzione.



Drogaggio di tipo N

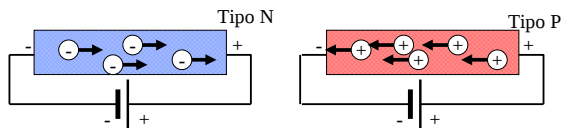
Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

- La conducibilità del cristallo semiconduttore può essere variata introducendo delle impurezze (**drogaggio**).
- Oppure sostituendo atomi di Si con atomi di Gallio, che è trivalente. Manca un elettrone, e la **lacuna** resta debolmente legata all'atomo di origine, e facilmente disponibile per la conduzione.



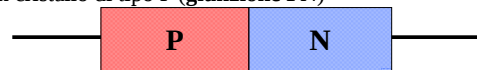
Drogaggio di tipo P

- Nei semiconduttori drogati la conducibilità è maggiore di quella dei semiconduttori puri, anche di un fattore di un centinaio, dipendendo dal drogaggio (tipicamente un atomo di drogante ogni milione di atomi del cristallo, ma le cariche vengono liberate molto più facilmente dall'agitazione termica).
- Quindi ad una certa temperatura ci sono una conduzione minoritaria, intrinseca, ed una maggioritaria dovuta al drogante.
- Nei semiconduttori di **tipo N** la conduzione maggioritaria avviene grazie agli elettroni "in più" forniti dagli atomi del drogante pentavalente (P, As, Sb).
- Nei semiconduttori di **tipo P** la conduzione maggioritaria avviene grazie alle lacune "in più" create dagli atomi del drogante trivalente (B, Ga, In).

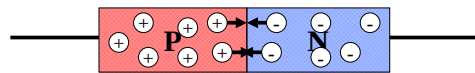


Il diodo a semiconduttore

- Viene costruito saldando insieme un cristallo di tipo N ed un cristallo di tipo P (**giunzione PN**)

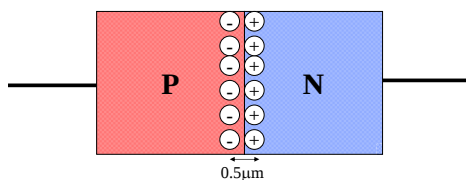


- Nella zona di tipo P c'è un eccesso di lacune, che tendono a **diffondere** dentro la zona di tipo N.
- Viceversa, nella zona di tipo N c'è un eccesso di elettroni che tendono a diffondere nella zona di tipo P.



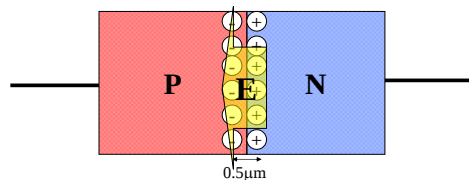
Il diodo a semiconduttore

- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perché si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico, che si oppone ad una ulteriore diffusione.



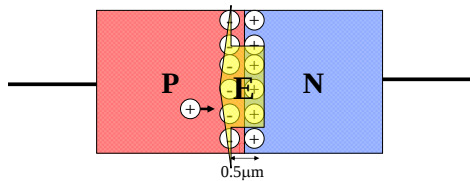
Il diodo a semiconduttore

- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perché si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico, che si oppone ad una ulteriore diffusione.



Il diodo a semiconduttore

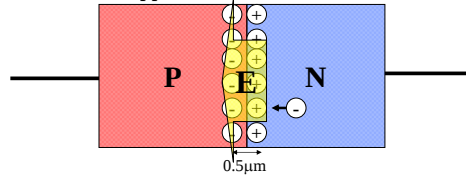
- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perché si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico, che si oppone ad una ulteriore diffusione.



- Una lacuna diretta da P a N viene ostacolata perché trova il campo elettrico avverso E.
- Una (delle poche lacune presenti in N) diretta verso P non viene ostacolata da E.

Il diodo a semiconduttore

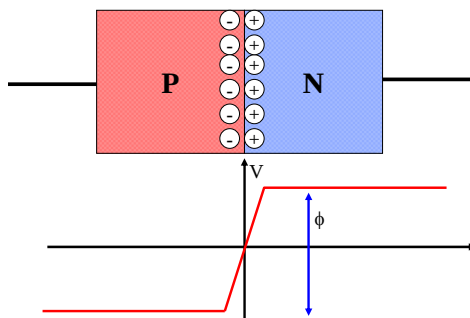
- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perché si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico che si oppone ad una ulteriore diffusione.



- Un elettrone diretto da N a P viene ostacolato, perché trova il campo elettrico E che lo frena.
- Un elettrone (dei pochi presenti in P) diretto verso N non viene ostacolato dalla presenza del campo E.

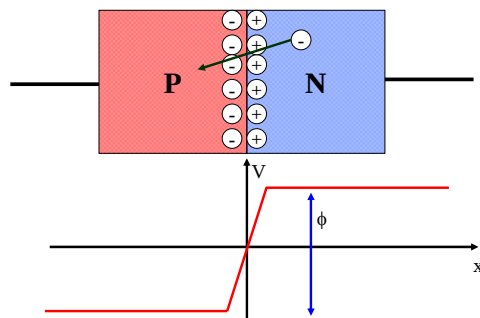
Il diodo a semiconduttore

- C'è quindi una barriera di potenziale ϕ in corrispondenza della giunzione:



Il diodo a semiconduttore

- Gli elettroni della zona N possono passare nella zona P solo se hanno una energia maggiore di ϕ



Il diodo a semiconduttore

- Il numero di elettroni con energia tra E ed E+dE e' dalla statistica di Boltzmann:

$$dN = C e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

- Quindi il numero di elettroni con energia maggiore di ϕ sarà:

$$N = \int_{\phi}^{\infty} C e^{-\frac{E}{kT}} dE = C k T e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

- Il numero totale di elettroni e' $N_T = \int_0^{\infty} C e^{-\frac{E}{kT}} dE = C k T$

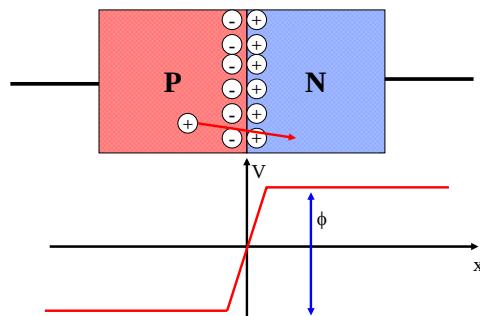
- Per cui la probabilità che un elettrone abbia energia $> \phi$ e passi il doppio strato e'

$$P = N / N_T = e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

- La corrente di elettroni I_{oNP} attraverso il doppio strato sarà proporzionale a tale probabilità.

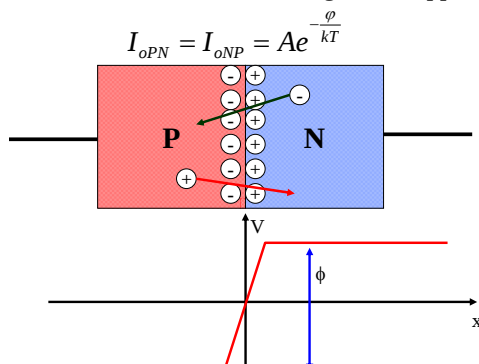
Il diodo a semiconduttore

- Ci sarà una analoga corrente di lacune da P a N



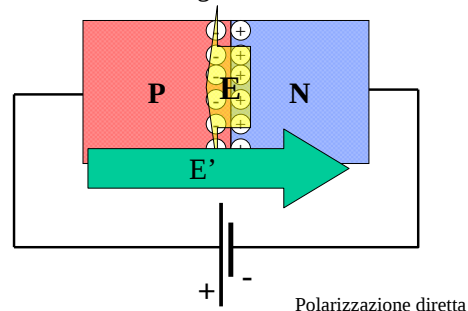
Il diodo a semiconduttore

- Le due correnti devono essere uguali ed opposte.



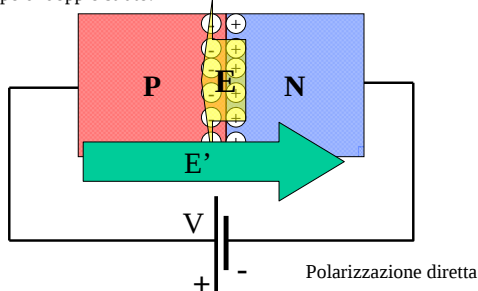
Polarizzazione diretta del diodo

- Supponiamo di applicare un campo elettrico nella giunzione tramite un generatore di tensione.



Polarizzazione diretta del diodo

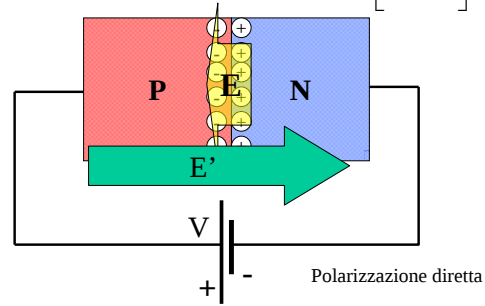
- La differenza di energia tra P ed N diventa $\phi - e|V|$, e quindi la corrente di elettroni da N a P diventa $I_{NP} = Ae^{-\frac{\phi - e|V|}{kT}}$
- La corrente (minoritaria) di elettroni da P ad N invece rimane la stessa, perché non era ostacolata dal campo di doppio strato. $I_{oPN} = Ae^{-\frac{\phi}{kT}}$



Polarizzazione diretta del diodo

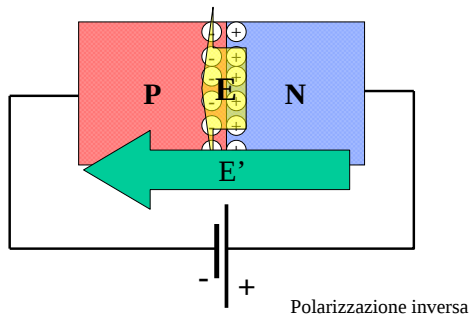
- La corrente di elettroni e' quindi:

$$I_{NP} - I_{oPN} = Ae^{-\frac{\phi - e|V|}{kT}} - Ae^{-\frac{\phi}{kT}} = -Ae^{-\frac{\phi}{kT}} \left[1 - e^{\frac{e|V|}{kT}} \right]$$



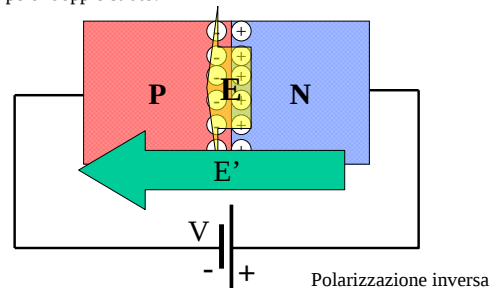
Polarizzazione inversa del diodo

- Supponiamo ora di rovesciare il generatore.



Polarizzazione inversa del diodo

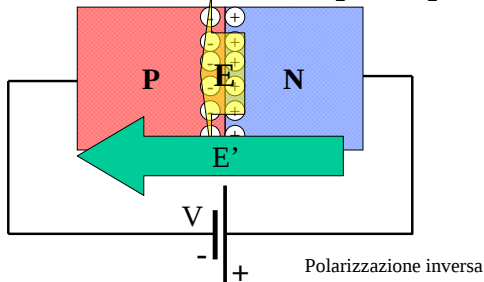
- La differenza di energia tra P ed N diventa $\phi + e|V|$, e quindi la corrente di elettroni da N a P diventa $I_{NP} = Ae^{-\frac{\phi + e|V|}{kT}}$
- La corrente (minoritaria) di elettroni da P ad N invece rimane la stessa, perché non era ostacolata dal campo di doppio strato. $I_{oPN} = Ae^{-\frac{\phi}{kT}}$



Polarizzazione inversa del diodo

- La corrente di elettroni e^- quindi:

$$I_{oPN} - I_{NP} = Ae^{-\frac{\phi}{kT}} - Ae^{-\frac{\phi+e|V|}{kT}} = I_o \left[1 - e^{-\frac{e|V|}{kT}} \right]$$



Riassumendo : la corrente elettronica e^- :

Per polarizzazione diretta:

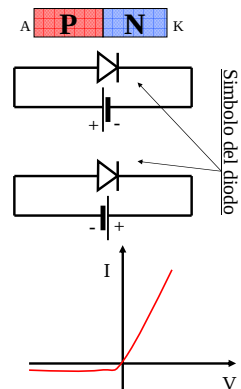
$$I_{NP} - I_{oPN} = I_o \left[1 - e^{-\frac{e|V|}{kT}} \right]$$

Per polarizzazione inversa:

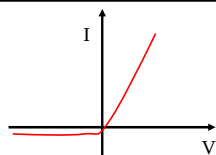
$$I_{oPN} - I_{NP} = I_o \left[1 - e^{-\frac{e|V|}{kT}} \right]$$

Quindi la corrente convenzionale e^+ :

$$I = I_o \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right]$$

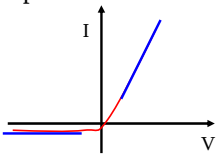


$$I = I_o \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right]$$



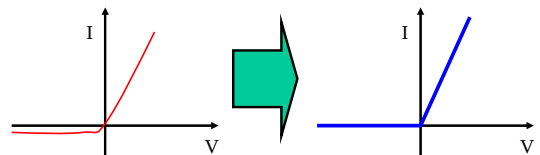
- Il diodo si comporta approssimativamente come una resistenza molto alta per polarizzazione inversa, e come una resistenza bassa per polarizzazione diretta.

$$R_{eq} = \frac{dV}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{dV}}$$



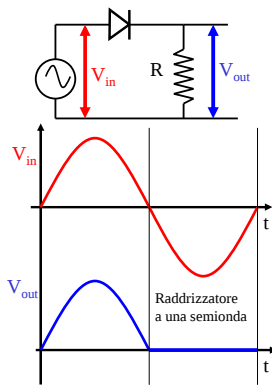
Applicazioni del diodo

- Per molte applicazioni e^- utilizzabile un modello in cui R diretta e^- R_o , e R inversa e^- infinita:

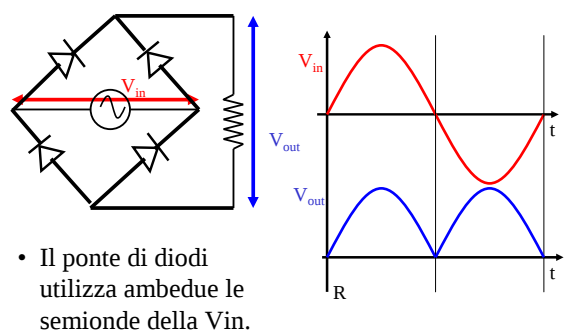


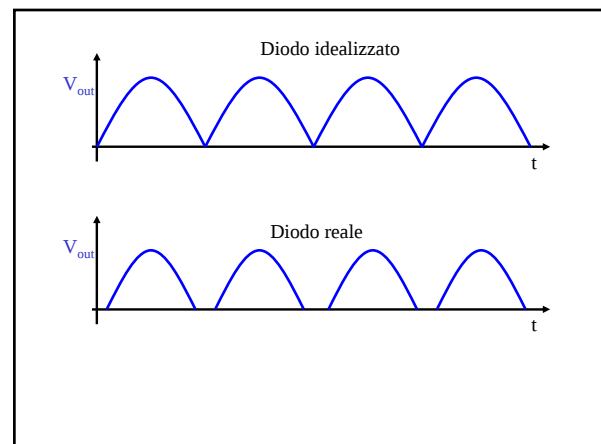
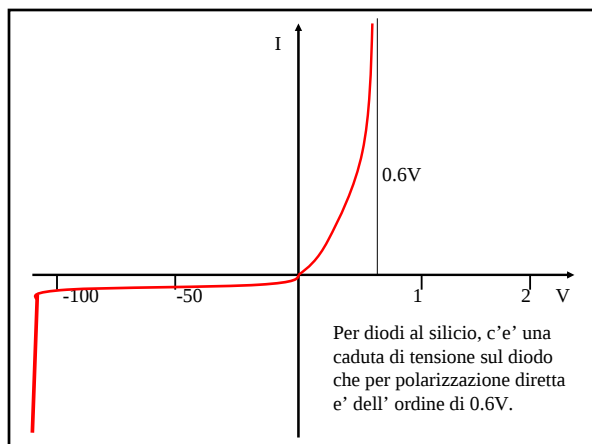
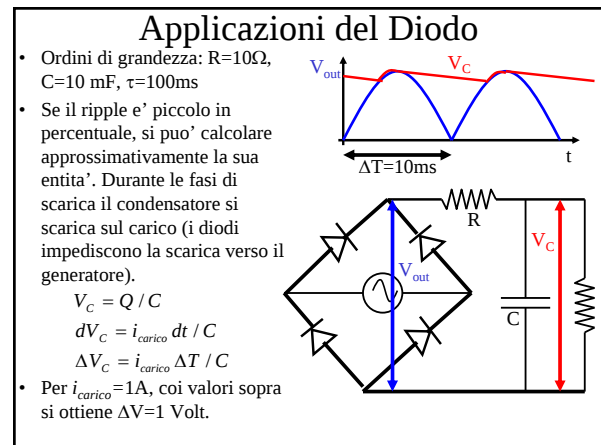
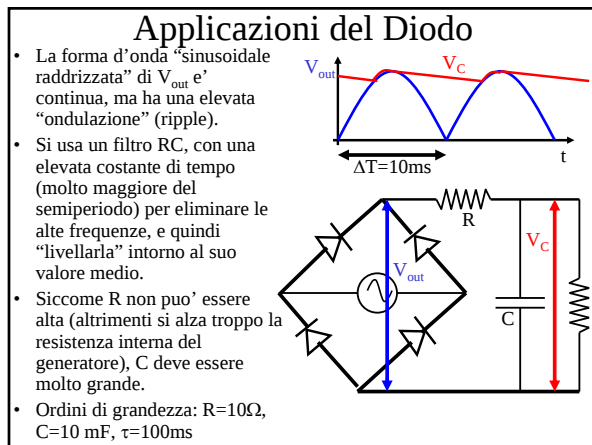
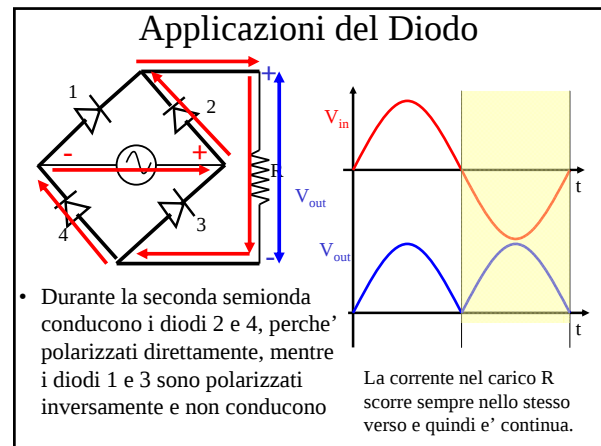
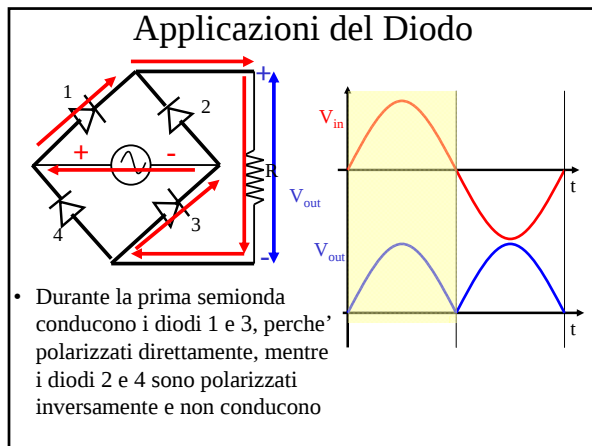
Applicazioni del Diodo

- Una delle applicazioni più comuni del diodo e^- quella di raddrizzatore, in circuiti nei quali si vuole convertire una tensione alternata in una continua.
- Questa applicazione e^- importante perché la maggior parte dei circuiti elettronici funziona in corrente continua, ma la distribuzione dell'energia elettrica avviene con corrente alternata per poter far uso dei trasformatori.



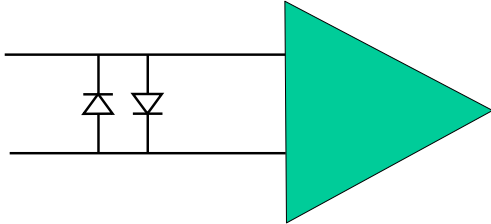
Applicazioni del Diodo





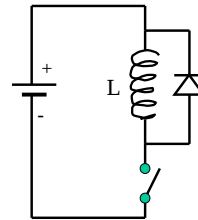
Applicazioni del Diodo

- Questo circuito limita l'escursione del segnale di ingresso ad un amplificatore a $\pm 0.6V$



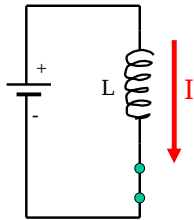
Applicazioni del Diodo

- Questo circuito impedisce la nascita di scariche tra i contatti dell'interruttore quando questo viene aperto.



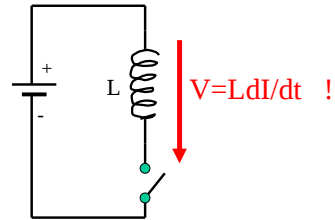
Applicazioni del Diodo

- Questo circuito impedisce la nascita di scariche tra i contatti dell'interruttore quando questo viene aperto.



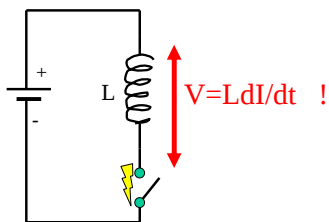
Applicazioni del Diodo

- Questo circuito impedisce la nascita di scariche tra i contatti dell'interruttore quando questo viene aperto.



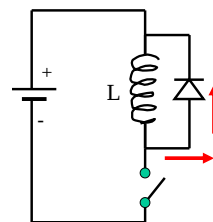
Applicazioni del Diodo

- Questo circuito impedisce la nascita di scariche tra i contatti dell'interruttore quando questo viene aperto.



Applicazioni del Diodo

- Questo circuito impedisce la nascita di scariche tra i contatti dell'interruttore quando questo viene aperto.



Esperienza di oggi, 22 Maggio 2013

- La caratteristica $V(I)$ è non lineare
- La si può visualizzare sull' oscilloscopio:
- Si deve ricordare in generale di:
- Misurare sempre i valori dei componenti scelti utilizzando il ponte d'impedenze ed il multimetro a disposizione in laboratorio. Nel caso del diodo controllare la sigla (1N4148) stampata sull' involucre ed eventualmente consultare le specifiche tecniche del costruttore.
- Nell'effettuare le connessioni ricordarsi che i terminali "ground" dei due canali dell'oscilloscopio sono connessi internamente. Quindi i 2 coccodrilli neri vanno connessi nello stesso punto tra r e diodo.
- Questo e' il motivo per cui userete un trasformatore al posto del generatore di segnali.
- Ricordarsi di far scorrere una corrente non superiore a quella consigliata dal costruttore (diodo polarizzato direttamente).
- $V/R < 10\text{mA} \dots$

Misura della caratteristica del diodo

- La caratteristica $V(I)$ è non lineare
- La si può visualizzare sull' oscilloscopio:
- Si deve ricordare in generale di:
- Misurare sempre i valori dei componenti scelti utilizzando il ponte d'impedenze ed il multimetro a disposizione in laboratorio. Nel caso del diodo controllare la sigla (1N4148) stampata sull' involucre ed eventualmente consultare le specifiche tecniche del costruttore.
- Nell'effettuare le connessioni ricordarsi che i terminali "ground" dei due canali dell'oscilloscopio sono connessi internamente. Quindi i 2 coccodrilli neri vanno connessi nello stesso punto tra r e diodo.
- Questo e' il motivo per cui userete un trasformatore al posto del generatore di segnali.
- Ricordarsi di far scorrere una corrente non superiore a quella consigliata dal costruttore (diodo polarizzato direttamente).
- $V/R < 10\text{mA} \dots$

Riassumendo : la corrente elettronica e' :

Per polarizzazione diretta:

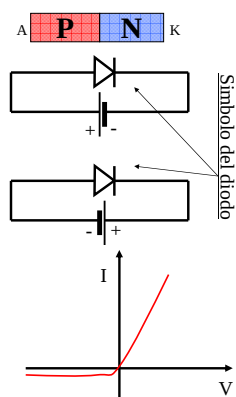
$$I_{NP} - I_{oPN} = I_o \left[1 - e^{\frac{eV}{kT}} \right]$$

Per polarizzazione inversa:

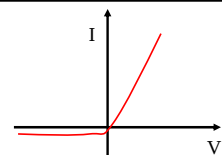
$$I_{oPN} - I_{NP} = I_o \left[1 - e^{-\frac{eV}{kT}} \right]$$

Quindi la corrente convenzionale e' :

$$I = I_o \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right]$$

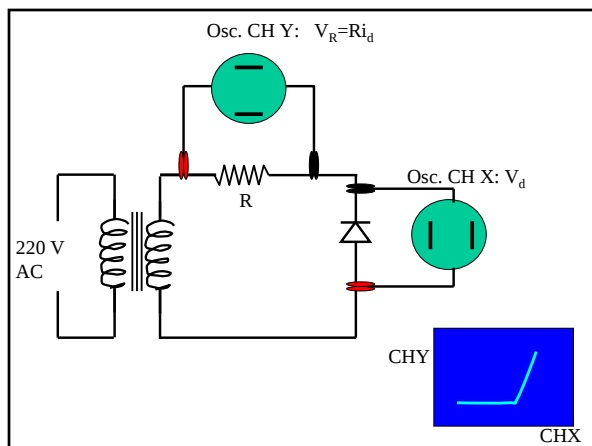
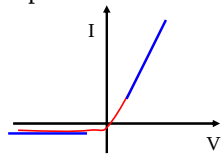


$$I = I_o \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right]$$



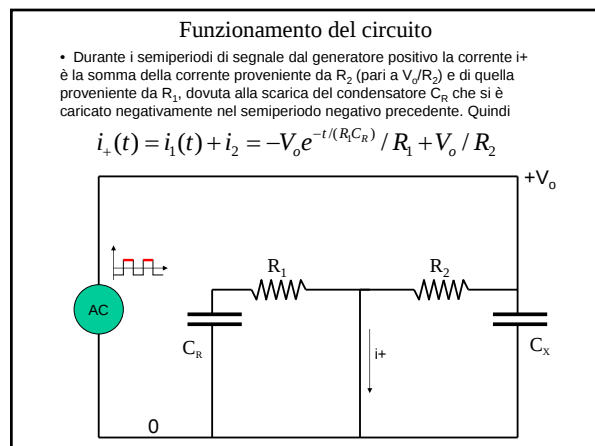
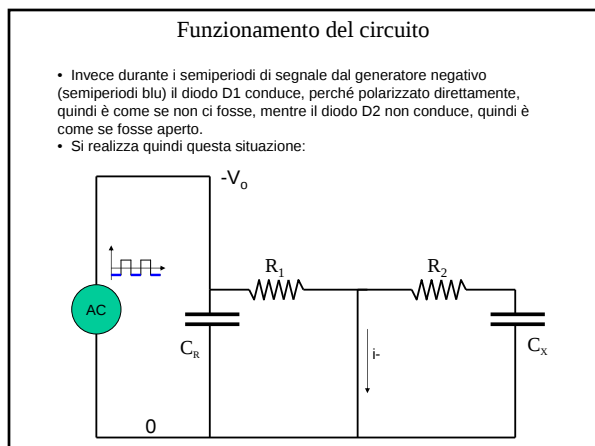
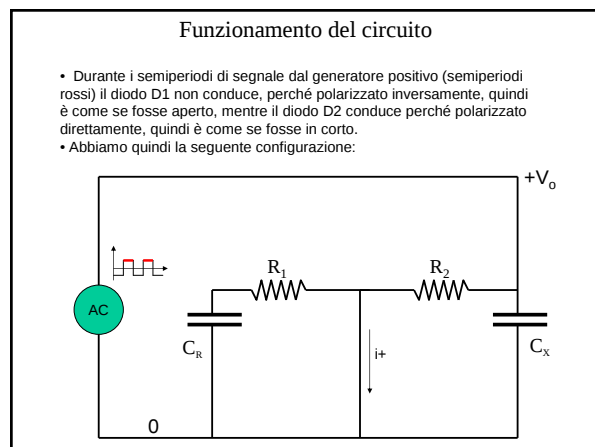
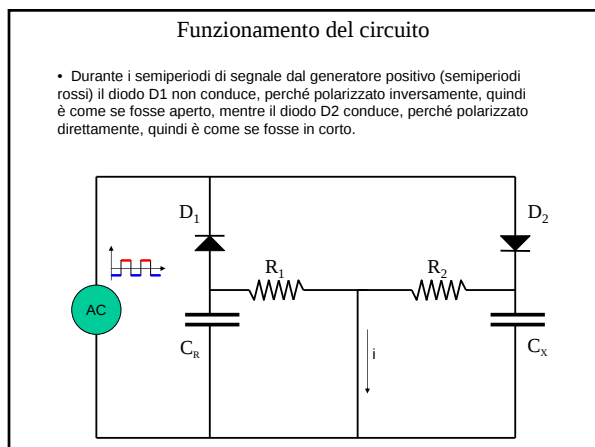
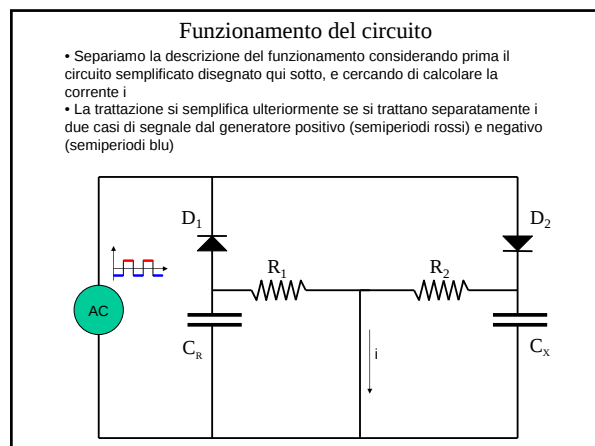
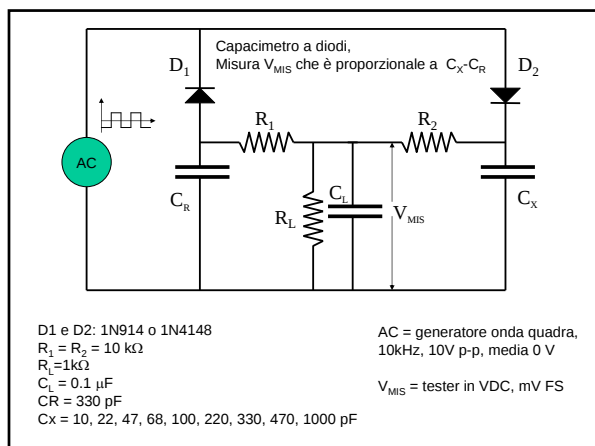
- Il diodo si comporta approssimativamente come una resistenza molto alta per polarizzazione inversa, e come una resistenza bassa per polarizzazione diretta.

$$R_{eq} = \frac{dV}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{dV}}$$



Come realizzare un capacimetro a diodi

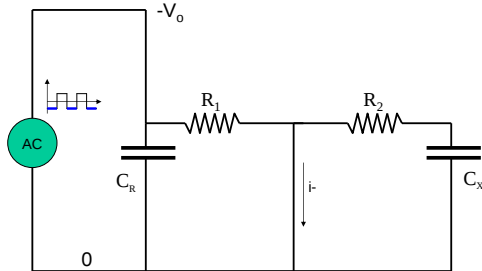
- E' un circuito a ponte che permette di confrontare un condensatore incognito C_x con un condensatore noto C_{ref} .
- Se i due condensatori sono uguali, la tensione in uscita dal circuito V_{mis} è nulla.
- Se i due condensatori sono diversi, la tensione in uscita è proporzionale a $C_{ref} - C_x$. Un po' come per il ponte di Weathstone per le resistenze.
- In questa esperienza si realizzerà il circuito e si costruirà una retta di calibrazione di V_{mis} in funzione di C_x .



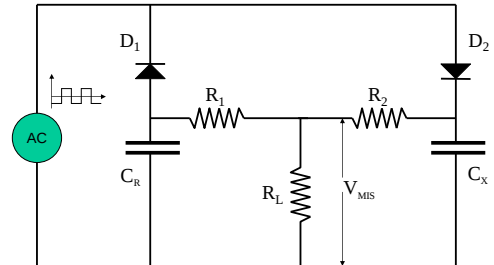
Funzionamento del circuito

- Durante i semiperiodi di segnale dal generatore negativo (semiperiodi blu) la corrente i_- sarà la somma di i_1 proveniente da R_1 (pari a $-V_o/R_1$) e della corrente i_2 da R_2 proveniente dalla scarica del condensatore C_x (che si è caricato a V_o durante il semiperiodo precedente).

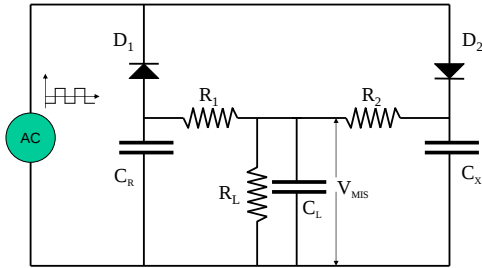
$$i_-(t) = i_1 + i_2(t) = -V_o / R_1 + V_o e^{-t/(R_2 C_x)} / R_2$$



- Se adesso reinseriamo R_L che è molto minore di R_1 e R_2 , possiamo supporre che in prima approssimazione V_{MIS} sia semplicemente $i R_L$, cioè $i_+ R_L$ durante i semiperiodi positivi e $i_- R_L$ durante i semiperiodi negativi.



- Se adesso reinseriamo R_L che è molto minore di R_1 e R_2 , possiamo supporre che in prima approssimazione V_{MIS} sia semplicemente $i R_L$, cioè $i_+ R_L$ durante i semiperiodi positivi e $i_- R_L$ durante i semiperiodi negativi.
- Se la costante di tempo $C_L R_L$ è maggiore del periodo T dell'onda quadra, inserendo il condensatore C_L la tensione V_{MIS} diventa semplicemente la media nel tempo di $i R_L$.



Funzionamento del circuito

- Quindi

$$\begin{aligned} V_{mis} &= \langle R_L i(t) \rangle = \frac{R_L}{T} \int_0^{T/2} i_+(t) dt + \frac{R_L}{T} \int_0^{T/2} i_-(t) dt = \\ &= \frac{R_L V_o}{T} [C_R (e^{-T/2R_1 C_R} - 1) - C_x (e^{-T/2R_2 C_x} - 1)] \cong \\ &\cong \frac{R_L V_o}{T} [C_x - C_R] \end{aligned}$$

- se $T \gg 2R_1 C_R, 2R_2 C_x$
- e $R_1 = R_2$

