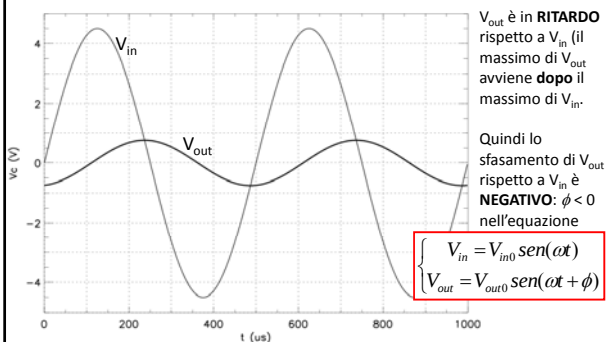


Come si misura lo sfasamento - addendum

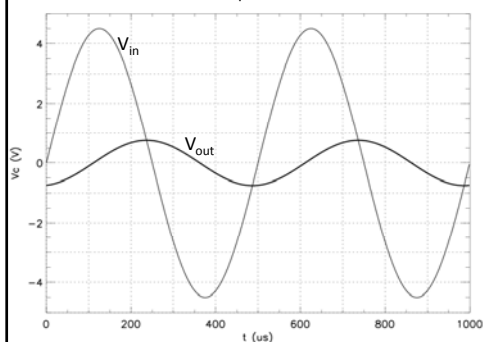
Supponiamo di aver connesso $V_{in}=CH1$ $V_{out}=CH2$ e di vedere le forme d'onda seguenti:



Questo è il caso del circuito RC, con uscita ai capi di C

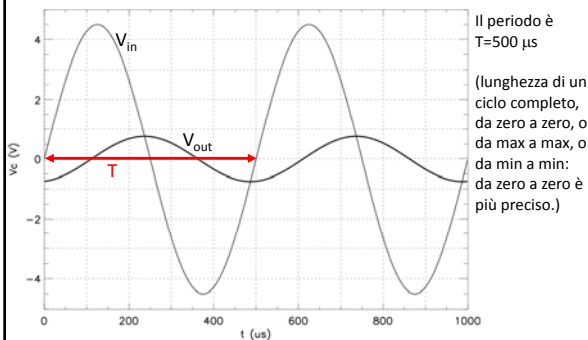
Come si misura lo sfasamento - addendum

Una volta stabilito il segno dello sfasamento, si può trovare il valore. Si devono stimare il ritardo e il periodo.



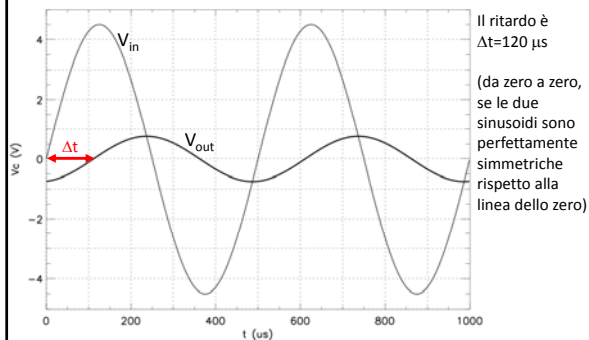
Come si misura lo sfasamento - addendum

Una volta stabilito il segno dello sfasamento, si può trovare il valore. Si devono stimare il ritardo e il periodo.



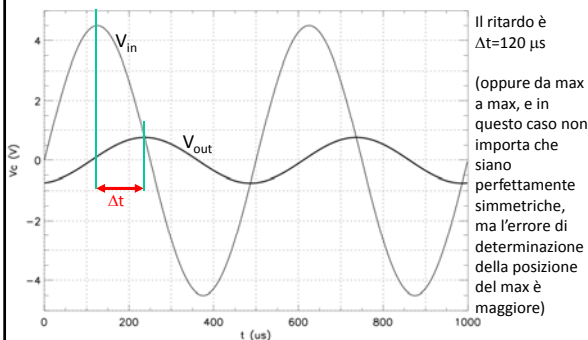
Come si misura lo sfasamento - addendum

Una volta stabilito il segno dello sfasamento, si può trovare il valore. Si devono stimare il ritardo e il periodo.



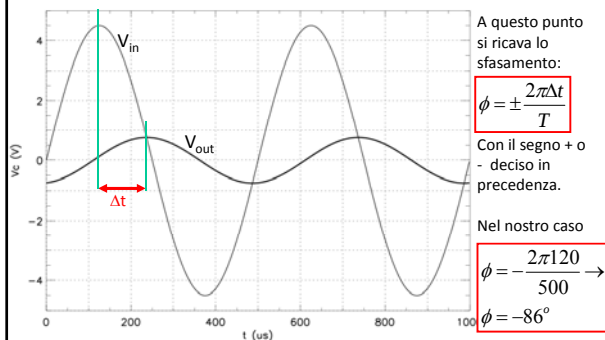
Come si misura lo sfasamento - addendum

Una volta stabilito il segno dello sfasamento, si può trovare il valore. Si devono stimare il ritardo e il periodo.



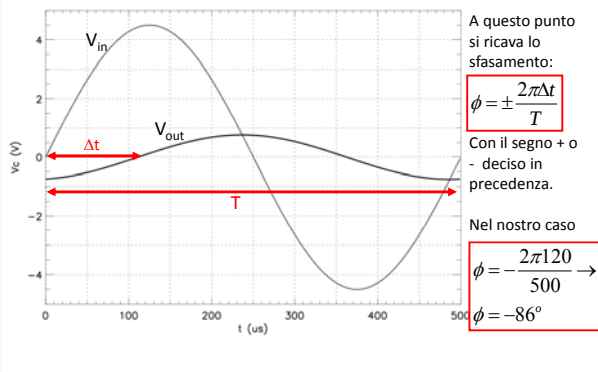
Come si misura lo sfasamento - addendum

Una volta stabilito il segno dello sfasamento, si può trovare il valore. Si devono stimare il ritardo e il periodo.



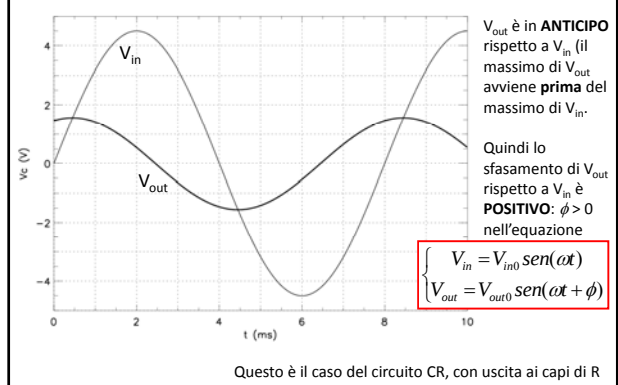
Come si misura lo sfasamento - addendum

Ovviamente per una misura precisa del ritardo e del periodo conviene ampliare la scala dei tempi il più possibile:



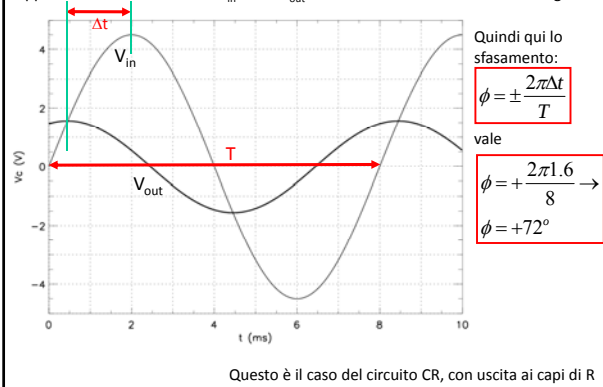
Come si misura lo sfasamento - addendum

Supponiamo di aver connesso $V_{in}=CH1$ $V_{out}=CH2$ e di vedere le forme d'onda seguenti:



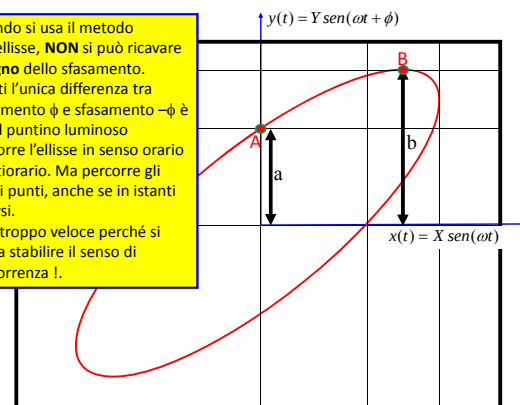
Come si misura lo sfasamento - addendum

Supponiamo di aver connesso $V_{in}=CH1$ $V_{out}=CH2$ e di vedere le forme d'onda seguenti:



Come si ricava lo sfasamento dall'ellisse ?

- Quando si usa il metodo dell'ellisse, **NON** si può ricavare il **segno** dello sfasamento.
- Infatti l'unica differenza tra sfasamento ϕ e sfasamento $-\phi$ è che il puntino luminoso percorre l'ellisse in senso orario o antiorario. Ma percorre gli stessi punti, anche se in istanti diversi.
- Ed è troppo veloce perché si possa stabilire il senso di percorrenza !.

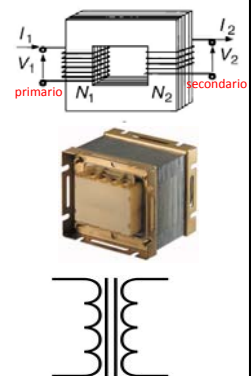


Componenti lineari

- Finora abbiamo studiato circuiti con componenti lineari, in cui la tensione e la corrente sono legate da operatori lineari (moltiplicazione nel resistore, integrazione nel condensatore, derivazione nell' induttore)
- Tra poco studieremo un componente non-lineare, ma prima vogliamo studiare un ulteriore componente lineare, il **trasformatore**, che ci sarà utile in futuro.

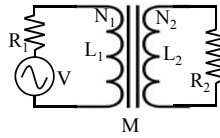
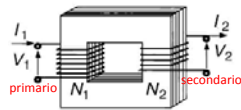
Il trasformatore

- Due avvolgimenti di conduttore (primario e secondario) sono avvolti intorno ad uno stesso nucleo ferromagnetico ad alta permeabilità μ , come in figura.
- La corrente alternata circolante nell'avvolgimento primario induce nel nucleo un flusso magnetico alternato che varia con la stessa fase della corrente.
- Le linee di forza sono chiuse, e siccome μ è così alto, sono sostanzialmente obbligate a rimanere nel nucleo. Quindi lo stesso flusso concatenato con il primario è anche concatenato con il secondario.



Il trasformatore

- Una corrente variabile I_1 nel primario, oltre a generare una forza elettromotrice E_1 nel circuito primario per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, genera una forza elettromotrice indotta E_2 anche nel secondario, a causa della mutua induzione tra i due circuiti mediata dal nucleo magnetico. E quindi genera una corrente I_2 se il circuito secondario è chiuso su un carico.
- Simmetricamente, la corrente I_2 indurrà, a causa della mutua induzione, una forza elettromotrice nel circuito primario, oltre alla forza elettromotrice nel secondario.
- Quindi le equazioni delle due maglie si scriveranno:



$$\begin{cases} V - L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} = R_1 I_1 \\ -L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} = R_2 I_2 \end{cases}$$

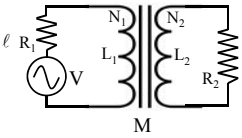
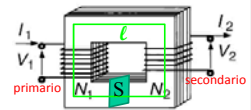
Il trasformatore

- Ricaviamo ora L_1 , L_2 e M nell'ipotesi che non ci sia flusso disperso.
- Considerando un sistema con il solo primario, dall'equazione di Maxwell per il campo magnetico H , applicata ad un percorso chiuso nel nucleo, si ottiene:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = i_{\text{conc}} \rightarrow H_1 \ell = N_1 I_1$$

- E quindi $B_1 = \mu H_1 = \mu N_1 I_1 / \ell$
- Da cui il flusso $\Phi_1(B_1) = N_1 B_1 S = \mu N_1^2 I_1 S / \ell$
- D'altra parte per definizione $\Phi(B) = LI$
- E quindi $L_1 = \mu N_1^2 S / \ell$
- Analogamente, considerando solo il secondario, si ottiene $L_2 = \mu N_2^2 S / \ell$
- Per ottenere M si deve considerare la presenza simultanea dei due circuiti:

$$\Phi_2(B_1) = N_2 S B_1 = N_2 S \mu N_1 I_1 / \ell$$

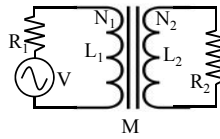
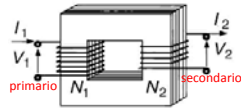


- Per definizione $\Phi_2(B_1) = M I_1$
- e quindi $M = \frac{\mu S}{\ell} N_1 N_2$
- Si noti che $M^2 = L_1 L_2$

Il trasformatore

- Anche senza integrare il sistema di equazioni
- si può ricavare la proprietà più importante del trasformatore. Infatti indicando con E_1 ed E_2 le forze elettromotrici ai capi dei due avvolgimenti, si ha:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{E_2} &= \frac{V - R_1 I_1}{R_2 I_2} = \frac{L_1 \dot{I}_1 - M \dot{I}_2}{-L_2 \dot{I}_2 + M \dot{I}_1} \\ &= \frac{(\mu S N_1^2 / \ell) \dot{I}_1 - (\mu S N_1 N_2 / \ell) \dot{I}_2}{-(\mu S N_2^2 / \ell) \dot{I}_2 + (\mu S N_1 N_2 / \ell) \dot{I}_1} \\ &= \left[\frac{N_1}{N_2} \right] \frac{(\mu S N_1 / \ell) \dot{I}_1 - (\mu S N_2 / \ell) \dot{I}_2}{-(\mu S N_2 / \ell) \dot{I}_2 + (\mu S N_1 / \ell) \dot{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} \end{aligned}$$



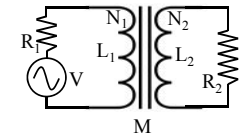
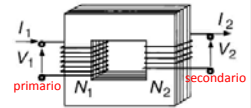
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Nel trasformatore **ideale** il rapporto tra le tensioni è pari al rapporto tra le spire

Il trasformatore

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Per questa proprietà il trasformatore viene utilizzato nei circuiti di conversione della potenza.
- Ad esempio si può ottenere una bassa tensione a partire dalla tensione di rete a 220V.
- In tal caso si usa un trasformatore con un primario a molte spire ed un secondario a poche spire.
- Nella esperienza con il diodo si userà un trasformatore per ottenere dalla rete una tensione alternata con 6V di ampiezza.

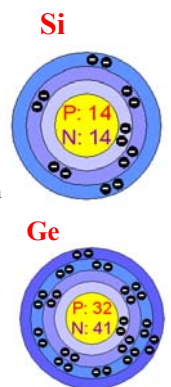


Componenti non lineari (o non ohmici)

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

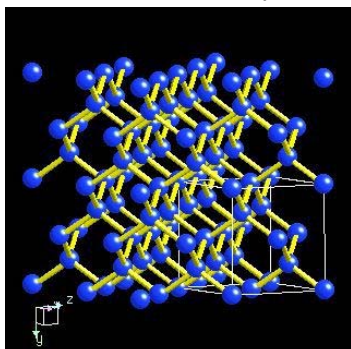
Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

- 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 tetravalenti: hanno cioè **quattro elettroni nello strato più esterno** dell'atomo (e quindi più facili da staccare dall'atomo)



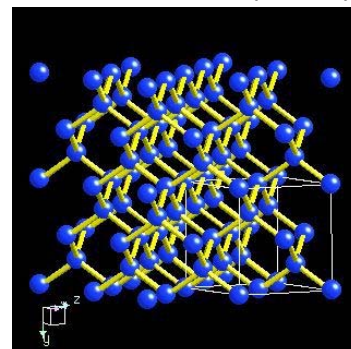
- Allo stato solido un **cristallo** di Si o Ge ha tutti gli atomi organizzati in un reticolo 3D ordinato, tenuto insieme da **legami covalenti**.
- In tale legame due atomi condividono ciascuno un elettrone di valenza, in una configurazione energeticamente conveniente, detta **legame covalente**.

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)



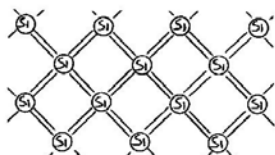
- Nel reticolo del Silicio la struttura è tale che tutti e 4 gli elettroni di valenza sono utilizzati nei legami tra l'atomo considerato e quelli circostanti.

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)



Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

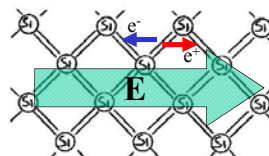
- In queste condizioni sono disponibili per condurre corrente elettrica solo gli elettroni che per **agitazione termica** si staccano dalla loro coppia di atomi di appartenenza, lasciando una lacuna.



Rappresentazione in piano

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

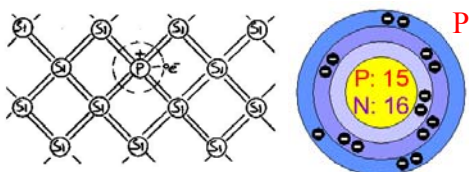
- Se sottoposti ad un campo elettrico, sia l'elettrone che la lacuna staccatisi si possono spostare nel cristallo, formando una corrente che viene detta **intrinseca**.



Rappresentazione in piano

Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

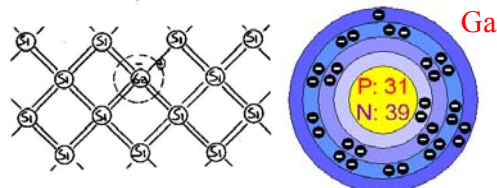
- La conducibilità del cristallo semiconduttore può essere variata introducendo delle impurezze (**drogaggio**).
- Ad esempio sostituendo atomi di Si con atomi di P, che è pentavalente. Avanza un **elettrone**, che resta debolmente legato all'atomo di origine, e facilmente disponibile per la conduzione.



Drogaggio di tipo N

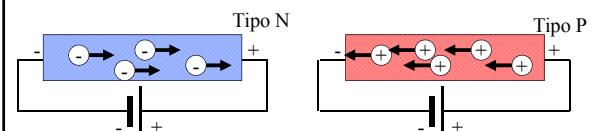
Conduzione elettrica nei semiconduttori (cenni)

- 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.



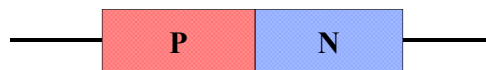
Drogaggio di tipo P

- 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, An, As).
- Nei semiconduttori di **tipo P** la conduzione maggioritaria avviene grazie alle lacune "in più" create dagli atomi del drogante trivalente (B, Ga, In).

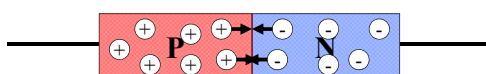


Il diodo a semiconduttore

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

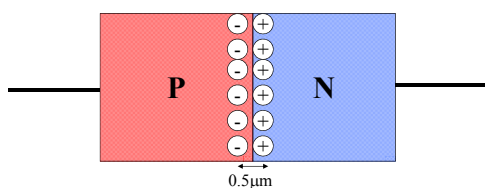


- Nella zona di tipo P c'è un eccesso di lacune, che tendono a **diffondere** dentro la zona di tipo N.
- Viceversa, nella zona di tipo N c'è un eccesso di elettroni che tendono a diffondere nella zona di tipo P.



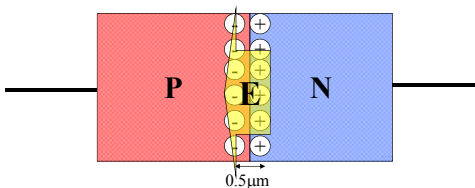
Il diodo a semiconduttore

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



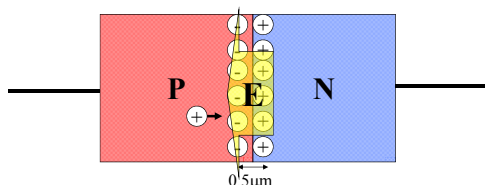
Il diodo a semiconduttore

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



Il diodo a semiconduttore

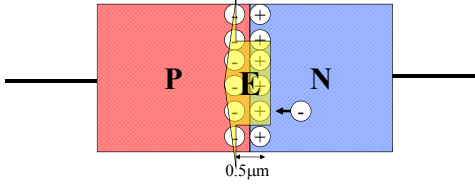
- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perchè si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico, che si oppone ad una ulteriore diffusione.



- Una lacuna diretta da P a N viene ostacolata perchè 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

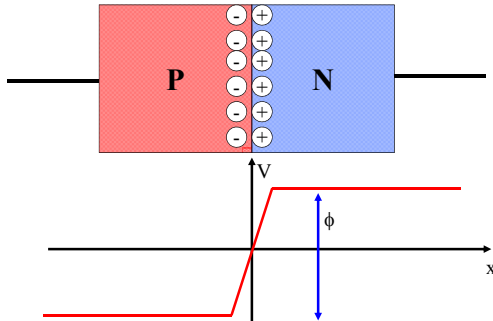
- I processi di diffusione non vanno avanti per molto, perchè si forma un **doppio strato** di cariche che genera un campo elettrico che si oppone ad una ulteriore diffusione.



- Un elettrone diretto da N a P viene ostacolato, perchè 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.

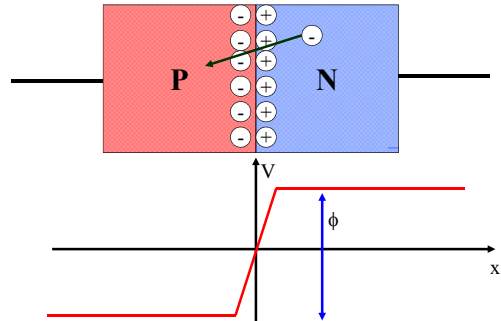
Il diodo a semiconduttore

- 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 è dato dalla statistica di Boltzmann:

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

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

$$N = \int_{\phi}^{\infty} Ce^{\frac{-E}{kT}} dE = CkTe^{\frac{-\phi}{kT}}$$

- Il numero totale di elettroni è $N_T = \int_0^{\infty} Ce^{\frac{-E}{kT}} dE = CKT$

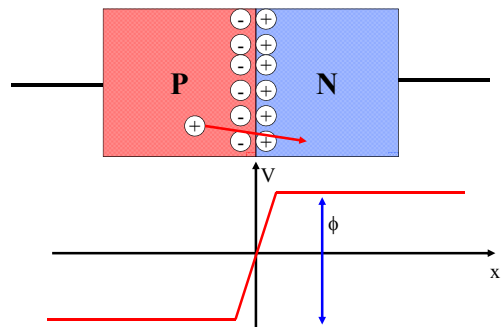
- Per cui la probabilità che un elettrone abbia energia $>\phi$ e passi il doppio strato è

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

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

Il diodo a semiconduttore

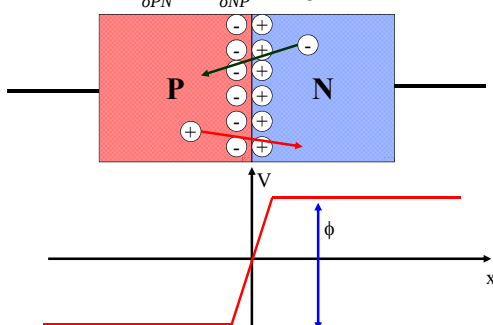
- Ci sarà una analoga corrente di lacune da P a N



Il diodo a semiconduttore

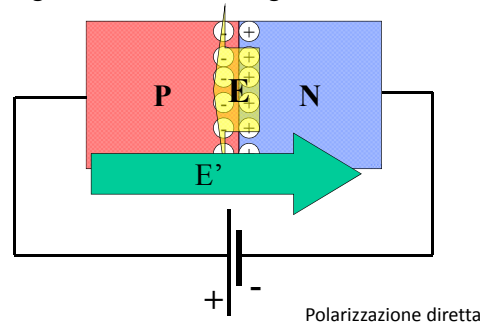
- A regime, le due correnti devono essere uguali ed opposte.

$$I_{oPN} = I_{oNP} = Ae^{\frac{-\phi}{kT}}$$



Polarizzazione diretta del diodo

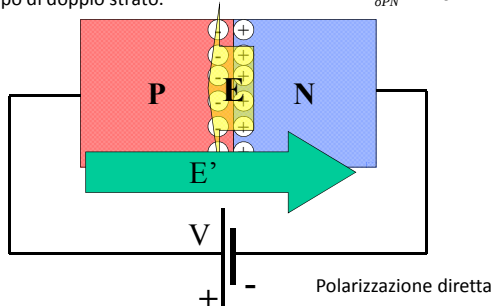
- Supponiamo ora di applicare un campo elettrico nella giunzione tramite un generatore di tensione.



Polarizzazione diretta

Polarizzazione diretta del diodo

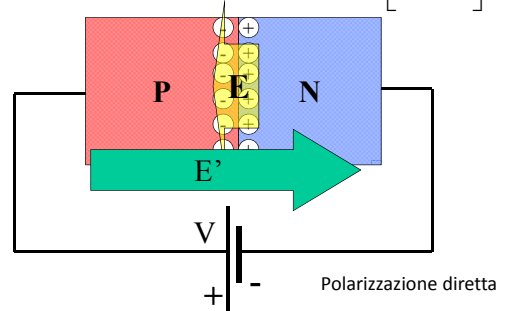
- La differenza di energia tra P ed N diventa $\phi - e|V|$, e quindi la corrente di elettroni da N a P diventa $I_{NP} = Ae^{\frac{\phi - e|V|}{kT}}$
- La corrente (minoritaria) di elettroni da P ad N invece rimane la stessa, perchè non era ostacolata dal campo di doppio strato. $I_{oPN} = Ae^{\frac{\phi}{kT}}$



Polarizzazione diretta del diodo

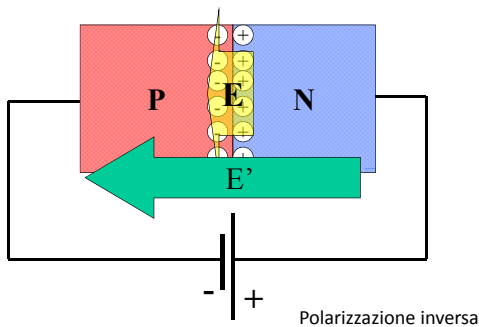
- La corrente di elettroni è quindi:

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



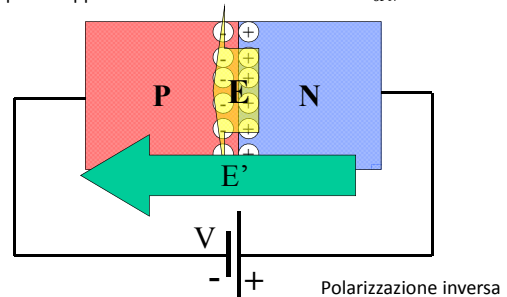
Polarizzazione inversa del diodo

- Supponiamo ora di rovesciare il generatore.



Polarizzazione inversa del diodo

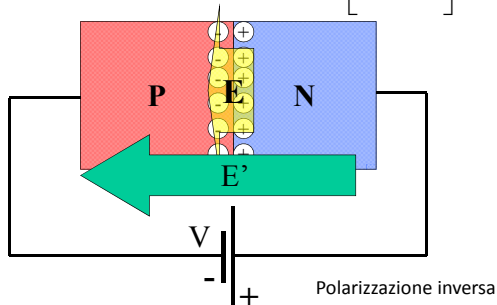
- La differenza di energia tra P ed N diventa $\phi + e|V|$, e quindi la corrente di elettroni da N a P diventa $I_{NP} = Ae^{\frac{\phi + e|V|}{kT}}$
- La corrente (minoritaria) di elettroni da P ad N invece rimane la stessa, perchè non era ostacolata dal campo di doppio strato. $I_{oPN} = Ae^{\frac{\phi}{kT}}$



Polarizzazione inversa del diodo

- La corrente di elettroni è 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 è :

Per polarizzazione diretta:

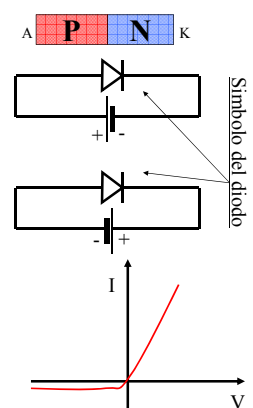
$$I_{NP} - I_{oPN} = I_o \left[1 - e^{\frac{e|V|}{kT}} \right]$$

Per polarizzazione inversa:

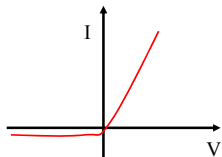
$$I_{oPN} - I_{NP} = I_o \left[1 - e^{\frac{e|V|}{kT}} \right]$$

Quindi la corrente convenzionale è :

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

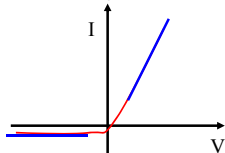


$$I = I_o \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right]$$



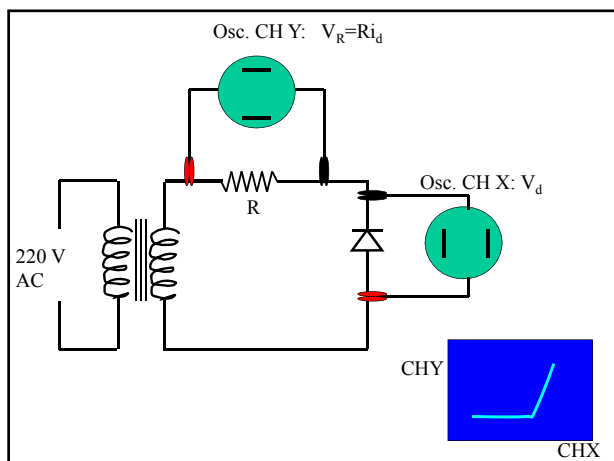
- Il diodo si comporta approssimativamente come una resistenza molto alta per polarizzazione inversa, e come una resistenza bassa per polarizzazione diretta.

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



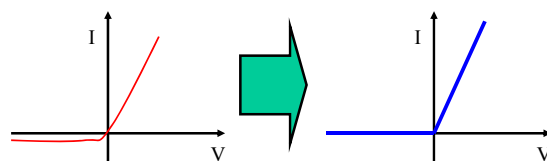
Misura della caratteristica V-I del diodo

- 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'involucro 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 è 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).
- $V/R < 10\text{mA}$...



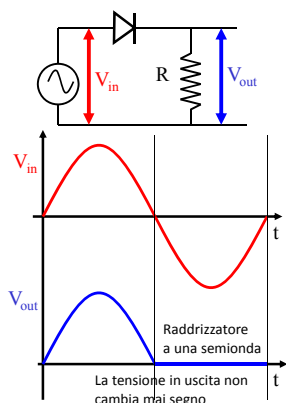
Applicazioni del diodo

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



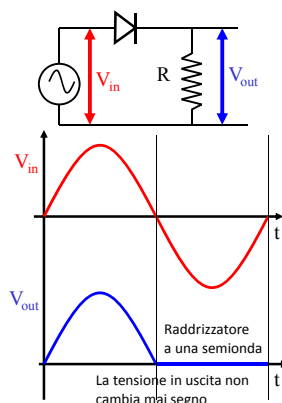
Applicazioni del Diodo

- Una delle applicazioni più comuni del diodo è quella di raddrizzatore, in circuiti nei quali si vuole convertire una tensione alternata in una continua.
- Questa applicazione è 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.



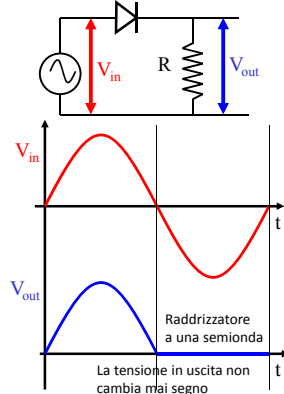
Applicazioni del Diodo

- Il circuito a destra può essere considerato un partitore di tensione tra il diodo e R .
- Ma il rapporto di partizione è diverso quando il diodo è polarizzato direttamente (V_{in} positiva) e quanto è polarizzato inversamente (V_{in} negativa).
- Nel primo caso (V_{in} positiva) la resistenza equivalente del diodo polarizzato direttamente è bassa, e quindi $V_{out} = V_{in}$**



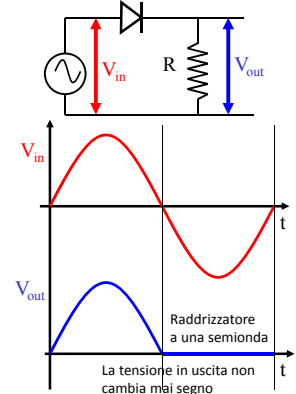
Applicazioni del Diodo

- Il circuito a destra può essere considerato un partitore di tensione tra il diodo e R.
- Ma il rapporto di partizione è diverso quando il diodo è polarizzato direttamente (V_{in} positiva) e quanto è polarizzato inversamente (V_{in} negativa).
- Nel secondo caso (V_{in} negativa) la resistenza equivalente del diodo polarizzato inversamente è elevata, quindi $V_{out} \ll V_{in}$

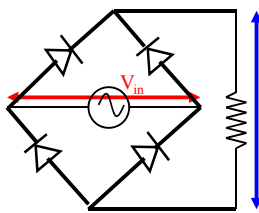


Applicazioni del Diodo

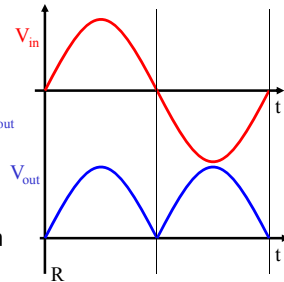
- Il circuito a destra può essere considerato un partitore di tensione tra il diodo e R.
- Ma il rapporto di partizione è diverso quando il diodo è polarizzato direttamente (V_{in} positiva) e quanto è polarizzato inversamente (V_{in} negativa).
- In pratica V_{out} è sempre positiva o nulla, ma non diventa mai negativa. E' stata raddrizzata.



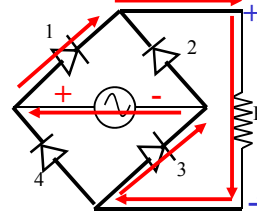
Applicazioni del Diodo



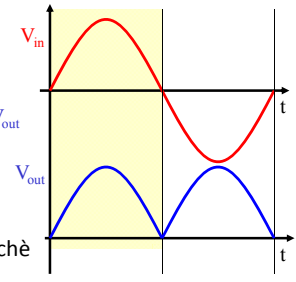
- Il ponte di diodi utilizza ambedue le semionde della V_{in} .



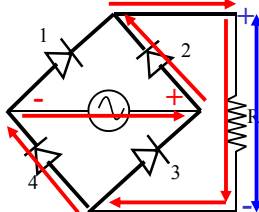
Applicazioni del Diodo



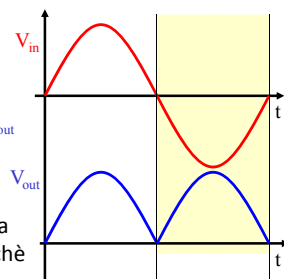
- Durante la prima semionda conducono i diodi 1 e 3, perchè polarizzati direttamente, mentre i diodi 2 e 4 sono polarizzati inversamente e non conducono



Applicazioni del Diodo



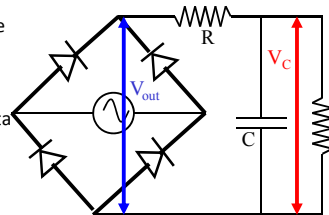
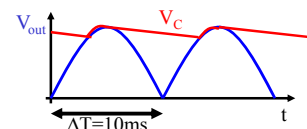
- Durante la seconda semionda conducono i diodi 2 e 4, perchè polarizzati direttamente, mentre i diodi 1 e 3 sono polarizzati inversamente e non conducono



La corrente nel carico R scorre sempre nello stesso verso e quindi e' continua.

Applicazioni del Diodo

- La forma d'onda "sinusoidale raddrizzata" di V_{out} è continua, ma ha una elevata "ondulazione" (ripple).
- Si usa un filtro RC, con una elevata costante di tempo (molto maggiore del semiperiodo) per eliminare le alte frequenze, e quindi "livellarla" intorno al suo valore medio.
- Siccome R non può essere alta (altrimenti si alza troppo la resistenza interna del generatore), C deve essere molto grande.
- Ordini di grandezza: $R=10\Omega$, $C=10\text{ mF}$, $\tau=100\text{ms}$



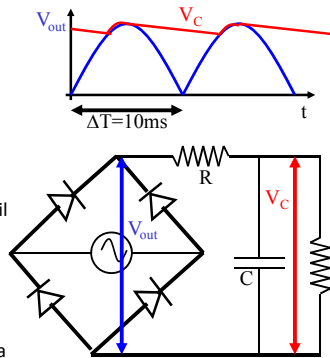
Applicazioni del Diodo

- Ordini di grandezza: $R=10\Omega$, $C=10\text{ mF}$, $\tau=100\text{ms}$
- Se il ripple è piccolo in percentuale, si può calcolare approssimativamente la sua entità. Durante le fasi di scarica il condensatore si scarica sul carico (i diodi impediscono la scarica verso il generatore).

$$V_C = Q / C$$

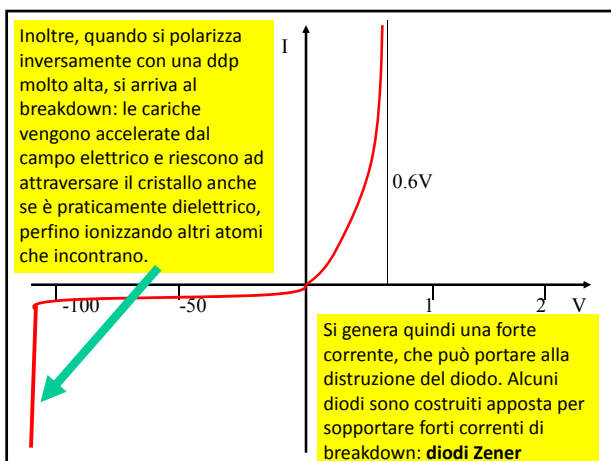
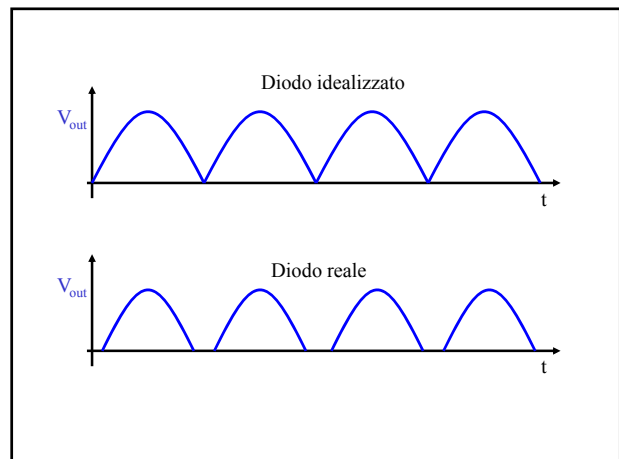
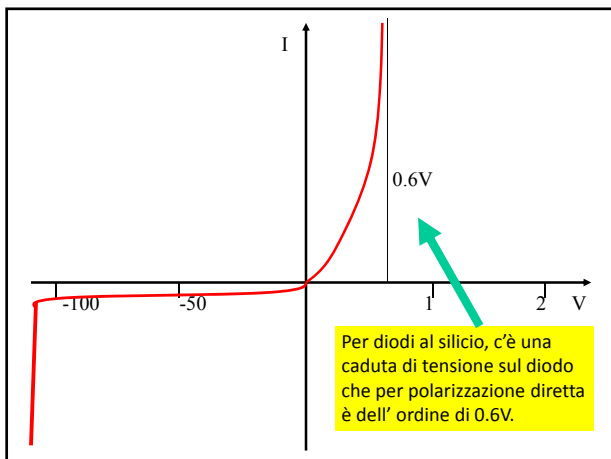
$$dV_C = i_{\text{carico}} dt / C$$

$$\Delta V_C = i_{\text{carico}} \Delta T / C$$
- Per $i_{\text{carico}}=1\text{A}$, coi valori sopra si ottiene $\Delta V=1\text{V}$.



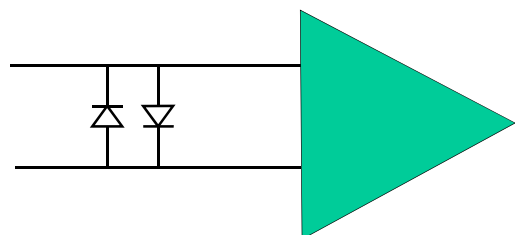
Il diodo reale

- La caratteristica più importante del diodo è quella di condurre bene corrente se polarizzato direttamente, e non condurre corrente se polarizzato inversamente.
- La caratteristica del diodo misurata sperimentalmente è più complessa:



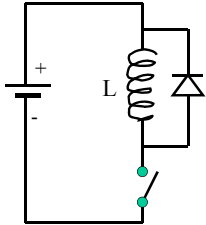
Applicazioni del Diodo

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



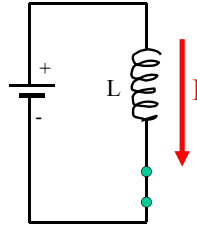
Applicazioni del Diodo

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



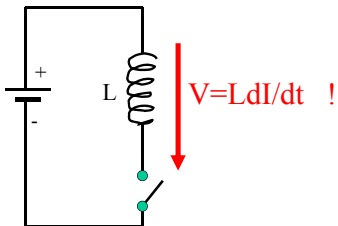
Applicazioni del Diodo

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



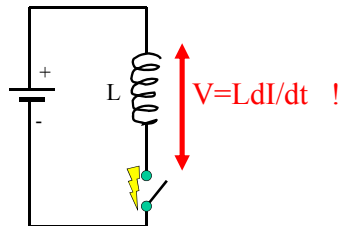
Applicazioni del Diodo

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



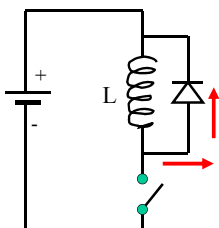
Applicazioni del Diodo

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



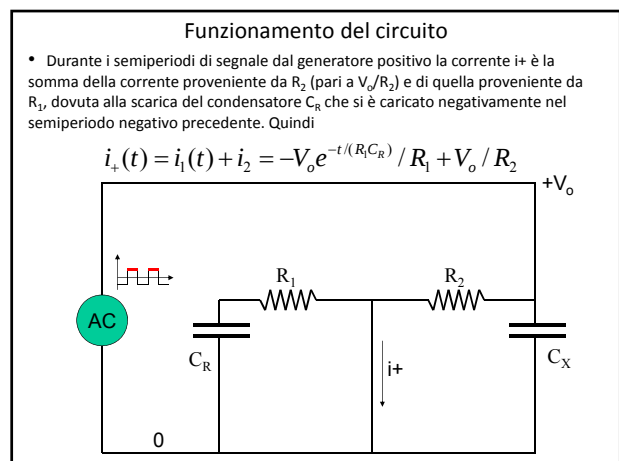
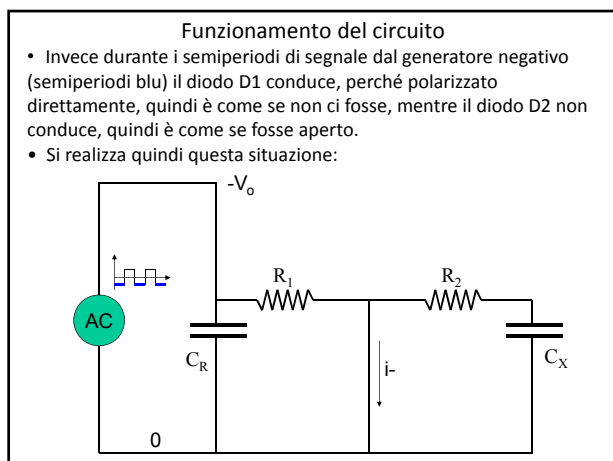
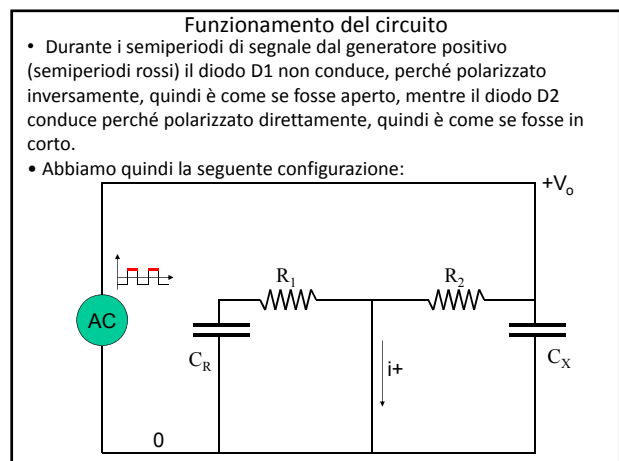
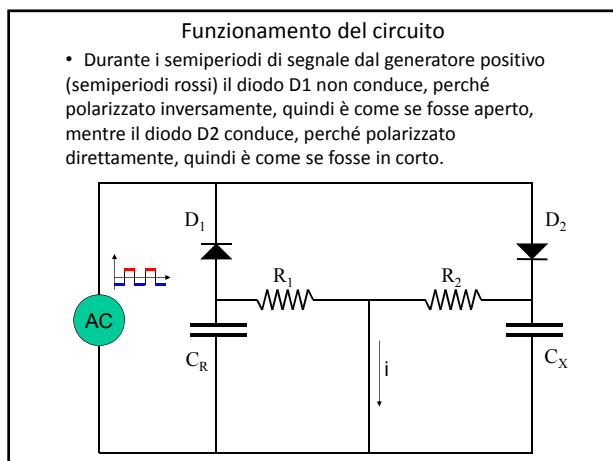
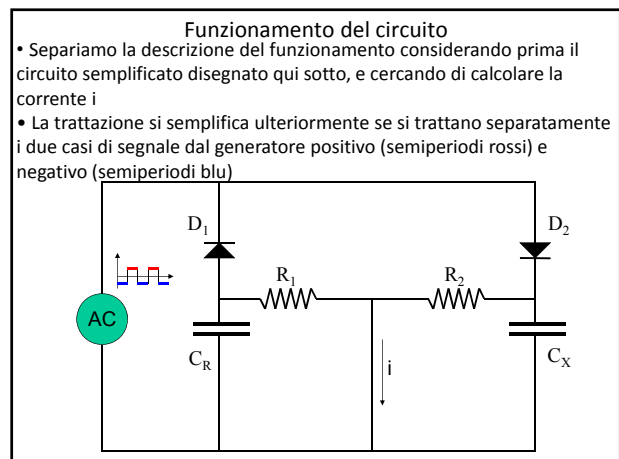
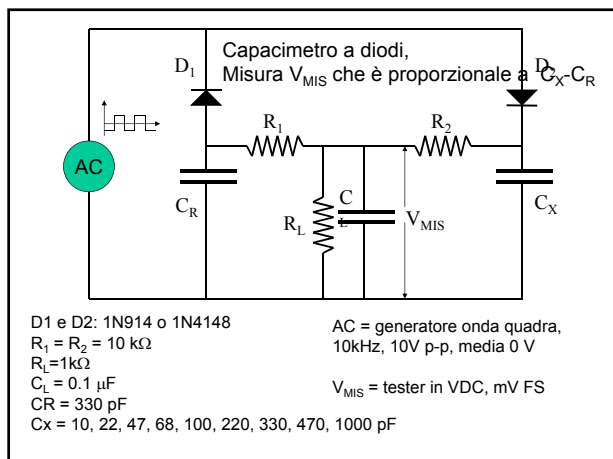
Applicazioni del Diodo

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



Come realizzare un capacimetro a diodi

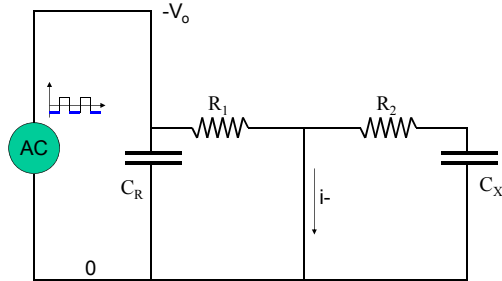
- E' un circuito a ponte che permette di confrontare un condensatore incognito C_x con un condensatore noto C_{ref} .
- Se i due condensatori sono uguali, la tensione in uscita dal circuito V_{mis} è nulla.
- Se i due condensatori sono diversi, la tensione in uscita è proporzionale a $C_{ref} - C_x$.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



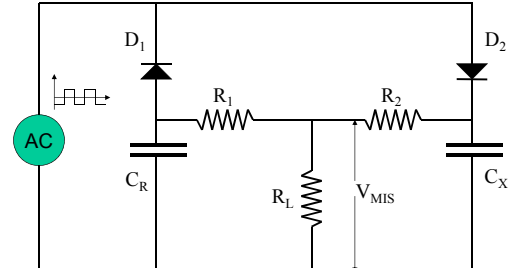
Funzionamento del circuito

- 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).

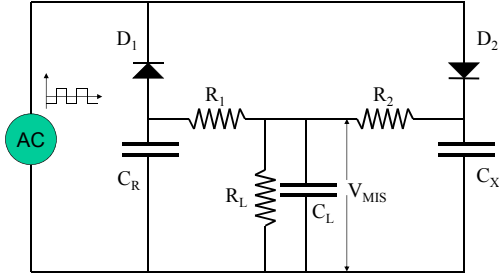
$$i_-(t) = i_1 + i_2(t) = -V_o / R_1 + V_o e^{-t/(R_2 C_x)} / R_2$$



- 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 $T \gg 2RC_R, 2RC_x$
- e $R_1 = R_2$

