

Esercizio

In una giunzione brusca $p^+ - n$ in Silicio di area $A = 1 \text{ mm}^2$, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ } \mu\text{s}$, lunghezza della regione p pari a $W_p = 1 \text{ mm}$, lunghezza della regione n pari a $W_n = 0.5 \text{ mm}$ e tensione di built in $V_{bi} = 0.898 \text{ V}$, si misura , per una tensione inversa $V_a = - 5 \text{ V}$, una capacità pari a 120 pF .

1. Determinare il drogaggio del semiconduttore.

Eseguendo una seconda misura, si fa scorrere nel dispositivo una corrente pari a 12.5 mA .

2. Determinare il potenziale applicato ai capi del diodo (supponendo il diodo perfettamente ideale e trascurando i valori delle resistenze serie).

Comportamento dinamico del diodo

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Finora abbiamo affrontato situazioni stazionarie ossia ogni qualvolta che è stato necessario abbiamo posto

$$\partial/\partial t = 0$$

(es. $\partial\Delta p_n / \partial t = 0$ nell'equazione di continuità)

In altre parole, **abbiamo considerato la risposta della giunzione p-n ad una tensione continua (DC) e lontano dal transitorio iniziale conseguente alla sua applicazione.**

Ora consideriamo la **risposta** della giunzione ad un **segnale tempo-variante**: una tensione alternata (AC) oppure un transitorio.

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Fisicamente, corrisponde a tenere conto dei tempi di risposta dei portatori alla tensione di ingresso.

Siccome i portatori sono di due tipi, essi hanno in generale delle dinamiche molto diverse.

- I maggioritari sono “veloci” (tempi di risposta $\sim 10^{-10}$ – 10^{-12} sec)
- i minoritari sono più lenti ($\tau_n, \tau_p \sim 10^{-6}$ sec)

Ai processi in cui si ha una variazione della carica in risposta ad una variazione di tensione, è associato il concetto di capacità.

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Pertanto, all'interno di una giunzione p-n, **si possono individuare due contributi capacitivi**, legati rispettivamente ai due tipi di portatori presenti:

- capacità di svuotamento → maggioritari C_J
- capacità di diffusione → minoritari C_d

Inoltre **vanno considerate anche le variazioni di corrente rispetto alla tensione applicata** → dI/dV
conduttanza (dinamica).

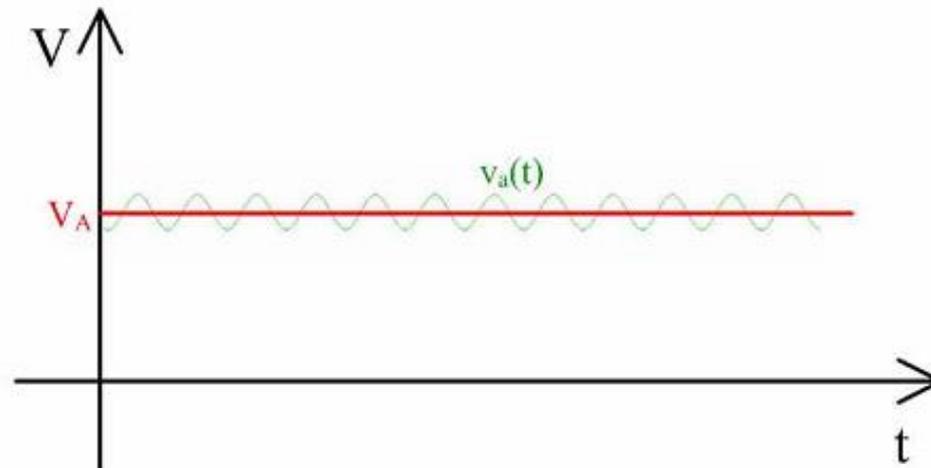
Siccome **il diodo è un oggetto non lineare** rispetto alla tensione, **capacità e conduttanza** non saranno valori costanti, caratteristici del dispositivo, ma dipenderanno dal punto di lavoro → **sono definiti attraverso una formula di derivazione: $C = dQ/dV$, $G = dI/dV$** ⁶.

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Come risponde la giunzione ad una tensione dipendente dal tempo, definita come

$$v_A(t) = V_A + v_a(t)$$

Dove V_A è la componente continua, v_a la componente alternata di piccola ampiezza ($v_a \ll V_A$)



Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Polarizzazione inversa

Capacità di svuotamento : C_J

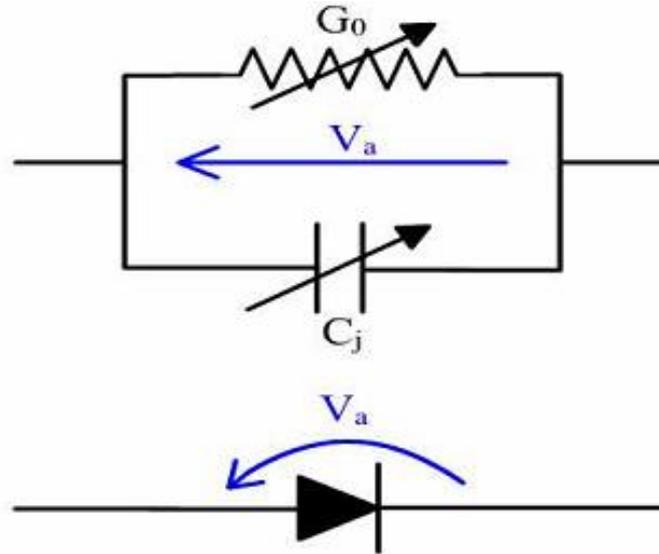
All'applicazione di $v_a(t)$, la regione di svuotamento risponde allargandosi o restringendosi

Essendo **coinvolti essenzialmente i maggioritari**, aventi un tempo di risposta molto basso, allora la **C_J** **risulterà indipendente dalla pulsazione** del segnale applicato fino ad alte frequenze (dell'ordine del centinaio di MHz)

In inversa la giunzione si comporta come se fosse un capacitore praticamente ideale, poichè la corrente continua che attraversa il dispositivo è praticamente nulla

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Possiamo schematizzare il diodo mediante un circuito equivalente composto dal parallelo di una conduttanza e di una capacità



Ricaviamo la conduttanza: G_0

I portatori (di maggioranza) reagiscono istantaneamente al segnale (piccolo) sovrapposto.

In questa ipotesi $\rightarrow \rightarrow$

$$I(v_A) = I_0 \left[e^{\frac{qv_A}{kT}} - 1 \right]$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

$$I(V_A + v_a) = I_0 \left[e^{\frac{q(V_A + v_a)}{kT}} - 1 \right]$$

La corrente dovuta al segnale è:

$$i = I(V_A + v_a) - I(V_A)$$

Ma essendo $v_a \ll V_A$ il termine $I(V_A + v_a)$ può essere espanso in serie di Taylor, da cui otteniamo

$$I(V_A + v_a) \cong I(V_A) + v_a \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_A}$$

$$i \cong v_a \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_A}$$

$$G_0 = \frac{i}{v_a} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_A}$$

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_A} = I_0 \frac{q}{kT} e^{\frac{qV_A}{kT}} = \frac{q}{kT} (I + I_0)$$

Conduttanza a
bassa frequenza

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Definiamo resistenza dinamica r :

$$r = \frac{1}{G_0} = \frac{kT}{q(I + I_0)}$$

Se dal diodo ideale si passa al diodo reale, occorre tener conto anche del contributo dovuto alla generazione:

$$I = I_0 \left[e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right] - \frac{qAn_i}{2\tau_0} W$$

$$\Rightarrow \frac{dI}{dV_A} = \frac{I_0 q}{kT} e^{\frac{qV_A}{kT}} - \frac{qAn_i}{2\tau_0} \frac{dW}{dV_A}$$

$$\Rightarrow G_0 = \frac{q}{kT} (I + I_0) - \frac{qAn_i}{2\tau_0} \frac{dW}{dV_A}$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Nel caso in cui si considera una giunzione brusca:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s}{q} (V_{bi} - V_A) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{dW}{dV_A} = \left[\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2} \frac{(-1)}{(V_{bi} - V_A)^{\frac{1}{2}}}$$

$$G_0 = \frac{q}{kT} (I + I_0) + \frac{qAn_i}{4\tau_0} \left[\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \frac{1}{(V_{bi} - V_A)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Polarizzazione diretta:

Rispetto al caso precedente **entra in gioco anche l'azione dei minoritari** presenti in concentrazione n_p e p_n nelle regioni p ed n e nelle regioni neutre per diffusione, per cui **dovremo introdurre una capacità di diffusione (Cd)**;

La diffusione contribuisce inoltre anche al valore della conduttanza dinamica.

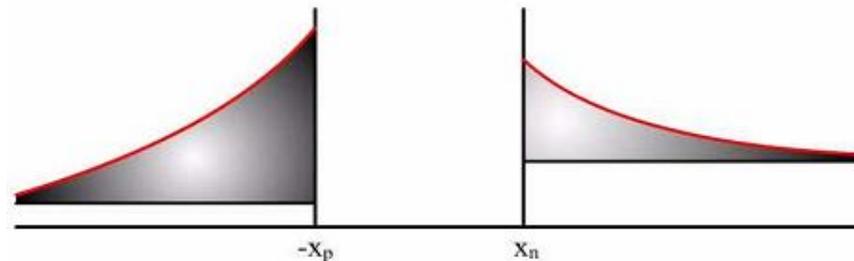
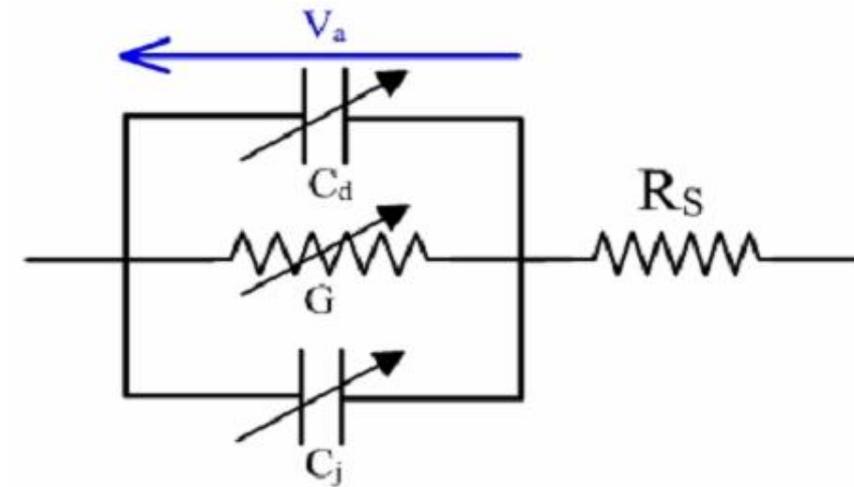
La diffusione, ricordiamo, **è un processo molto lento rispetto alla frequenza del segnale**, per cui, sotto una tensione applicata $v_a(t)$, p_n e n_p divengono funzioni sia dello spazio che del tempo.

$$p_n(x,t)$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Immagazzinamento di carica (charge storage)

In polarizzazione diretta, le regioni “neutre” ricevono una quantità di portatori minoritari in eccesso.



Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Questa carica è data da:

$$Q_p = q \int_{x_n}^{\infty} (p_n - p_{n0}) dx$$

$$\Delta p_n(x) = p_{n0} \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$= qp_{n0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \int_{x_n}^{\infty} \exp\left(-\frac{x-x_n}{L_p}\right) dx$$

$$= qL_p p_{n0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$Q_n = -q \int_{-\infty}^{-x_p} (n_p - n_{p0}) dx$$

$$= -qL_n n_{p0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

In una giunzione brusca asimmetrica $N_A \gg N_D$

$$X_p = 0 \rightarrow Q_n = 0$$

Il contributo principale è dato dalle lacune che diffondono nella regione n, ovvero Q_p

$$J_s = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + q \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \cong$$

$$\cong q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} = q \frac{D_p p_{n0}}{L_p}$$

$$Q_p = \underbrace{\frac{L_p^2}{D_p}}_{\tau_p} \underbrace{\frac{q D_p p_{n0}}{L_p}}_{J_s} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) = \tau_p J_p$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Si è stabilito dunque che **la carica immagazzinata è il prodotto della corrente per il tempo di vita dei minoritari**, e questo si spiega ricordando che

Se il loro tempo di vita è più lungo, le lacune iniettate diffondono più in profondità nella regione n prima di ricombinarsi, per cui **il numero di lacune immagazzinate è maggiore**

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Capacità di diffusione: Basse frequenze

$$C_d = A \frac{dQ_p}{dV} = A \frac{q^2 L_p p_{n0}}{kT} e^{\frac{qV}{kT}}$$

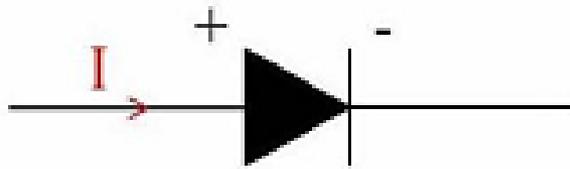
Si osservi come per $V < 0$, $C_d \rightarrow 0$
infatti non vi è iniezione di minoritari nelle regioni neutre

Conduttanza : basse frequenze

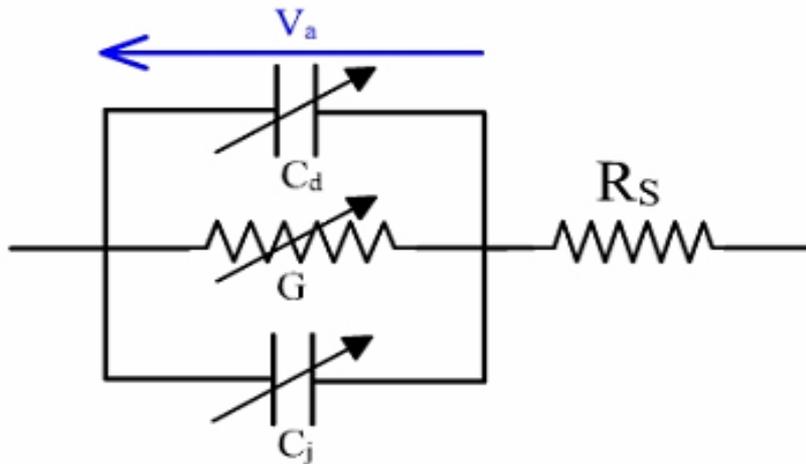
$$G = A \frac{dJ}{dV} = A \frac{q}{kT} J_s e^{\frac{qV}{kT}}$$
$$= A \frac{q}{kT} (J + J_s) \cong A \frac{q}{kT} J = \frac{q}{kT} I$$

Comportamento dinamico delle giunzioni pn

Il circuito equivalente



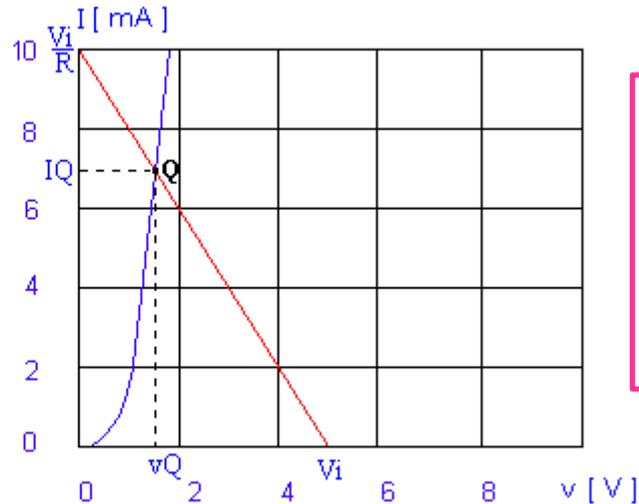
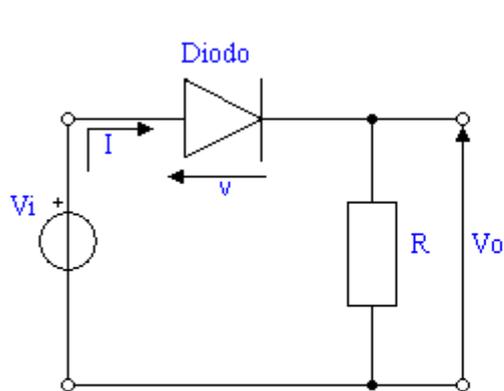
← Simbolo



← Circuito equivalente per piccoli segnali

Circuiti con diodi

Circuiti con diodi



$$V_i = V_d + RI_d$$

da cui

$$I_d = V_i/R - V_d/R$$

Consideriamo il circuito riportato in figura, in cui è presente un diodo in serie ad una resistenza R

Vogliamo cercare, a partire dalla tensione applicata dall'alimentatore, di ricavare la corrente che scorre nel circuito

Il problema può essere risolto:

- 1) Per via grafica
- 2) Con metodo iterativo

Circuiti con diodi

1. Si parte da un valore “realistico” di V_d , per ora del tutto ipotetico
2. Si sostituisce nell’equazione della maglia
3. Si ricava la corrente corrispondente
4. Si ricava un nuovo valore di V_d dall’equazione del diodo in cui viene inserito il valore di corrente ricavato al punto 3)
5. Si ripete l’intera sequenza il numero di volte necessario per far convergere il risultato con la precisione richiesta

Circuiti con diodi

Se applichiamo la legge di Kirkhhoff alle tensioni al circuito in figura avremo infatti un'equazione trascendentale

$$V_{DD} - RI - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) = 0$$

Tale equazione non è di semplice risoluzione, e come detto in precedenza può essere risolta in modo grafico, oppure utilizzando un metodo iterativo.

Per esempio consideriamo una $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ e

$$I_0 = 10^{-10} \text{ A}$$

Circuiti con diodi

Generalmente si inizia considerando una caduta di tensione sul diodo pari a $V_D' = 0.7 \text{ V}$

Se così fosse, avremmo una corrente pari a:

$$I^I = \frac{V_{DD} - V_D^I}{R} = 4.3 \text{ mA}$$

$$V_D^{II} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I^I}{I_0} + 1\right) \approx 0.45 \text{ V}$$

Come si nota tale valore è significativamente differente da quello che avevamo ipotizzato noi.

Il procedimento consiste nel ripetere la nostra operazione fino ad ottenere una convergenza

Circuiti con diodi

Utilizziamo quindi quest'ultimo valore per determinare un nuovo valore della corrente che scorre nel diodo.

Otteniamo in questo caso

$$I^{II} = \frac{V_{DD} - V_D^{II}}{R} = 4.55 \text{ mA}$$

$$V_D^{III} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I^{II}}{I_0} + 1\right) \approx 0.456 \text{ V}$$

Come si nota, in questo caso le soluzioni tendono a convergere.

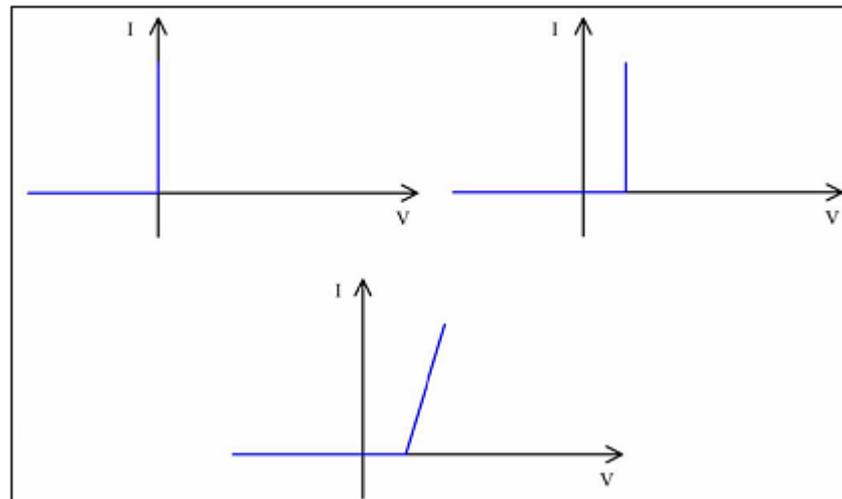
Facendo una ulteriore iterazione otteniamo un valore ancora più preciso $\rightarrow I^{III} = 4.544 \text{ mA}$ e $V_D^{IV} = 0.458 \text{ V}$ da cui $I^{IV} = 4.542 \text{ mA}$ – ci siamo!

Applicazioni dei diodi nei circuiti

Rettificatore

È l'applicazione classica di un diodo, che, polarizzato in diretta è in grado di far scorrere corrente in modo praticamente inalterato, ma che in inversa non fa praticamente passare corrente.

Tale proprietà può essere valutata grazie a modelli semplificati, riportati nella figura qui di sotto.



Applicazioni dei diodi nei circuiti

Nel primo caso, si **ha corrente nulla per tensioni negative e massima corrente senza caduta di tensione in polarizzazione diretta**, per cui il diodo si comporta come un **circuito aperto in inversa** e come un **corto circuito in diretta**;

Nel secondo caso si considera anche una **piccola caduta di tensione fissa**, per cui avremo un comportamento da **circuito aperto in inversa** e da **generatore di tensione in diretta** (rappresenta la caduta di tensione fissa);

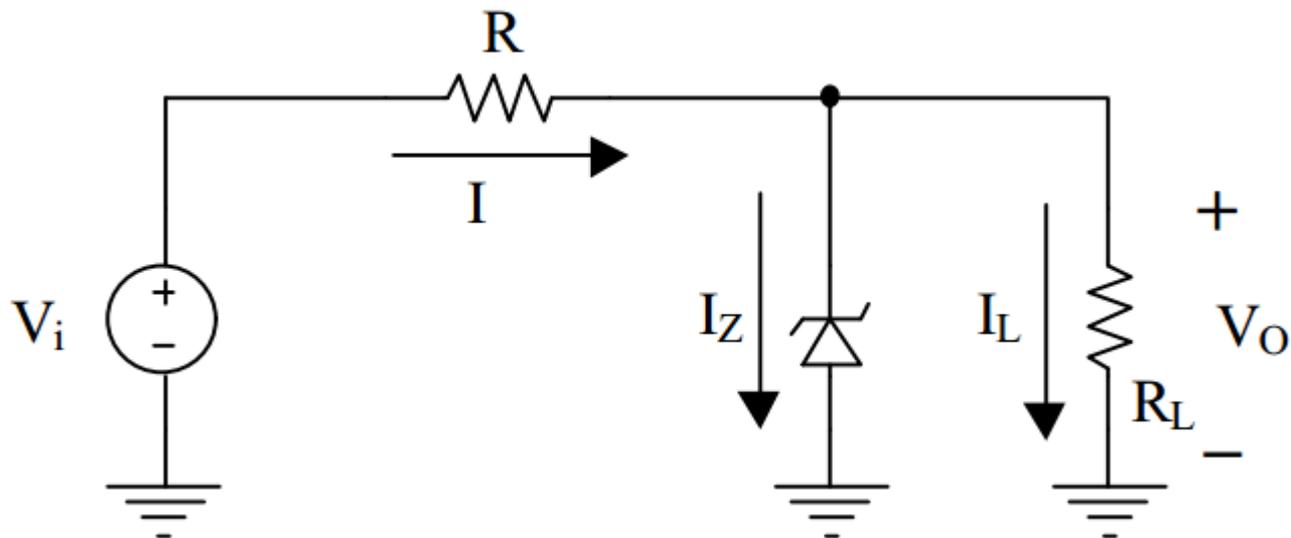
Una ulteriore approssimazione prevede una **caduta inizialmente fissa di tensione**, che quindi incomincia a variare linearmente, per cui stavolta in diretta avremo un comportamento rappresentabile come una **serie generatore di tensione – resistenza**.

Applicazioni dei diodi nei circuiti

Regolatore di tensione

Rotture per valanga e/o Effetto tunnel (Zener).

Mantenendo in breakdown il diodo, ai suoi capi si ha una tensione molto stabile anche per ampie fluttuazioni della corrente.



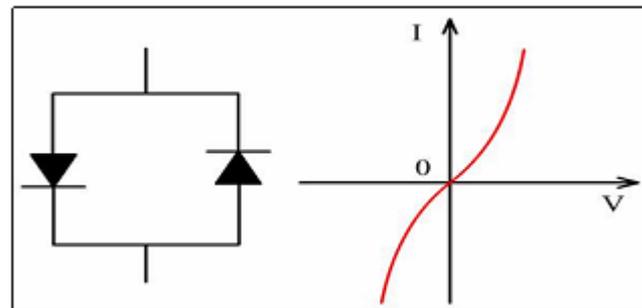
Varistor

Variable Resistor. Per piccoli segnali il diodo può essere visto come una resistenza variabile di valore

$$\frac{1}{\frac{dI(V)}{dV}}$$

Al variare di V , la relazione con I è non-ohmica.

Due diodi in parallelo, ma rovesciati, costituiscono un resistore non lineare per entrambe le polarizzazioni.



Varactor

Variable capacitor.

Il diodo in inversa ha una capacità variabile con la polarizzazione, ed una conduzione trascurabile.

Questo è alla base dell'utilizzo del VARACTOR in circuiti risonanti accordabili (amplificazione parametrica, generazione armonica, mixing, rivelazione, sintonizzazione....)

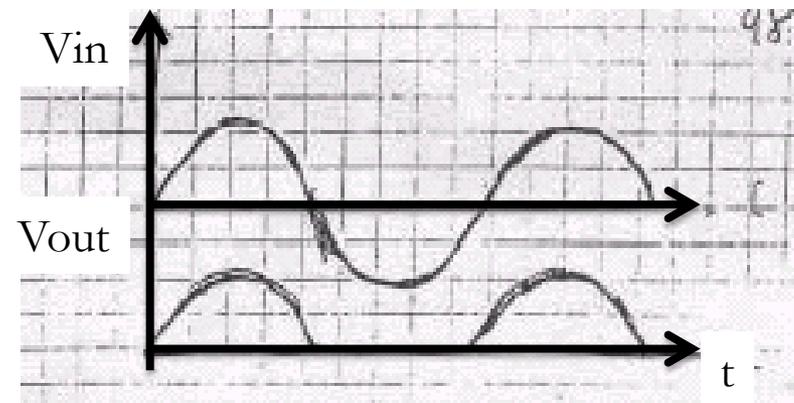
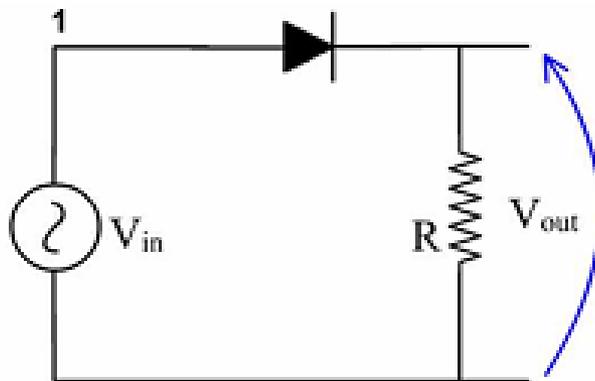
Applicazioni dei diodi nei circuiti

Alimentatori

Detti anche circuiti raddrizzatori,

Raddrizzatori a mezza onda

Data una tensione in ingresso di tipo sinusoidale filtra le creste negative in uscita (quando la tensione applicata è negativa il diodo non permette l'arrivo di corrente sul resistore)



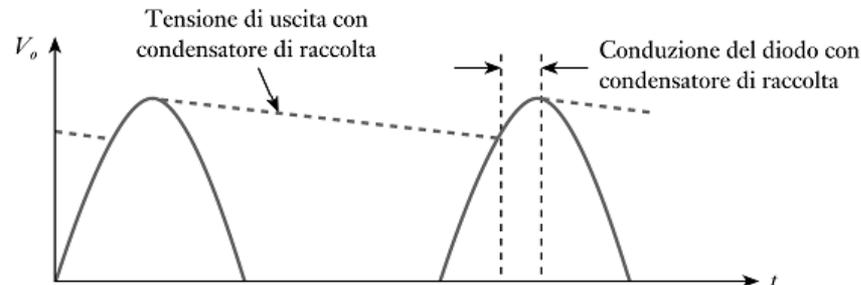
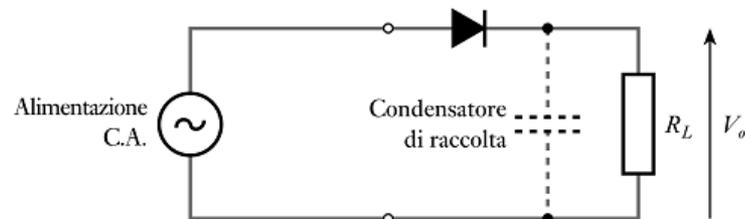
Applicazioni dei diodi nei circuiti

Alimentatori

Raddrizzatore con condensatore di filtro

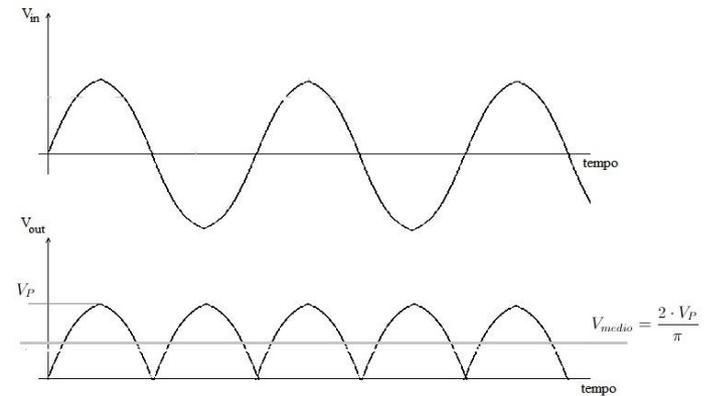
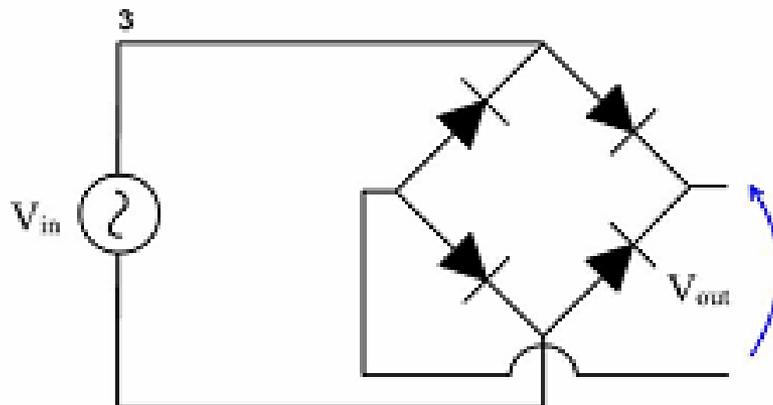
la polarizzazione diretta permette la carica sul condensatore, che, in inversa, quando il diodo non conduce corrente, si scarica sulla resistenza

Raddrizzatore a semplice semi-onda



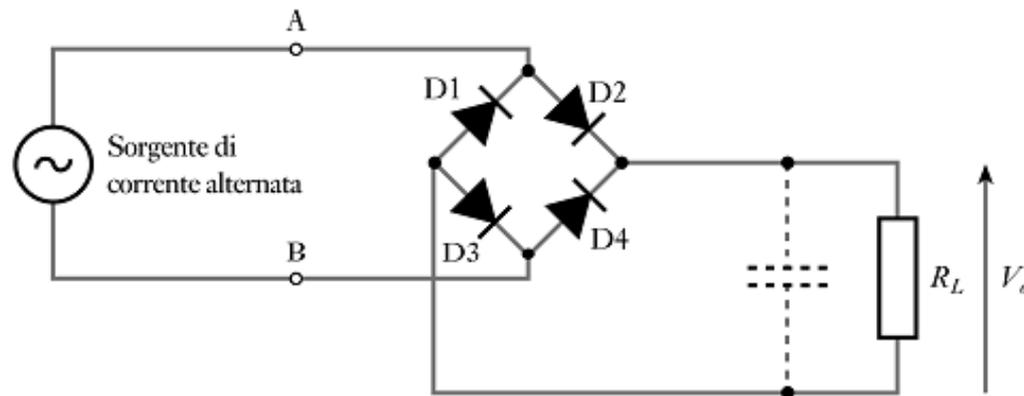
Alimentatori

Raddrizzatore a ponte (o a doppia semionda) che ribalta in uscita le creste negative del segnale sinusoidale in ingresso (ne ottiene matematicamente il modulo).

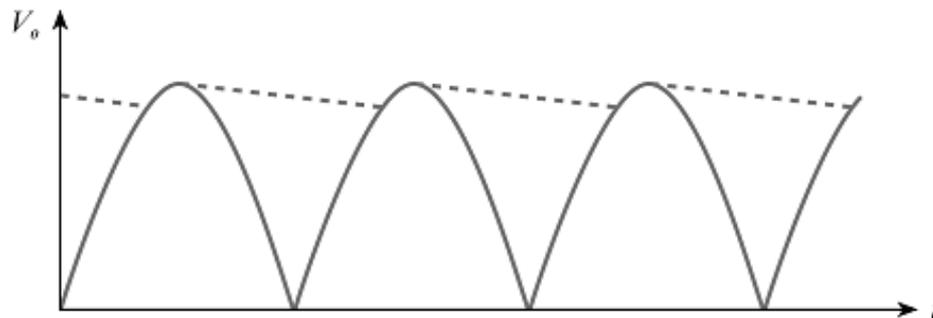


Applicazioni dei diodi nei circuiti

Raddrizzatore a doppia semionda (ponte di Graetz)

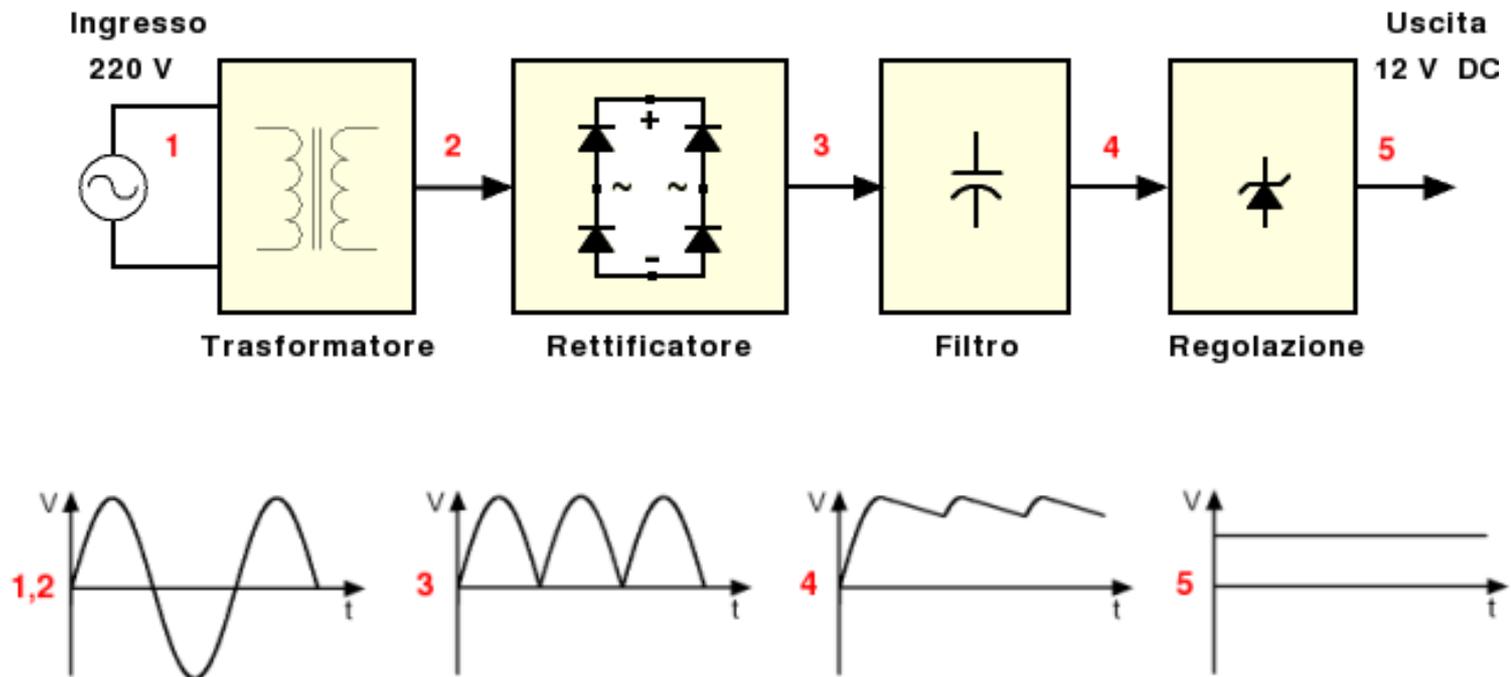


$$V_r \cong \frac{(V_P - 2V_{ON})}{R_L} \frac{T}{2C}$$



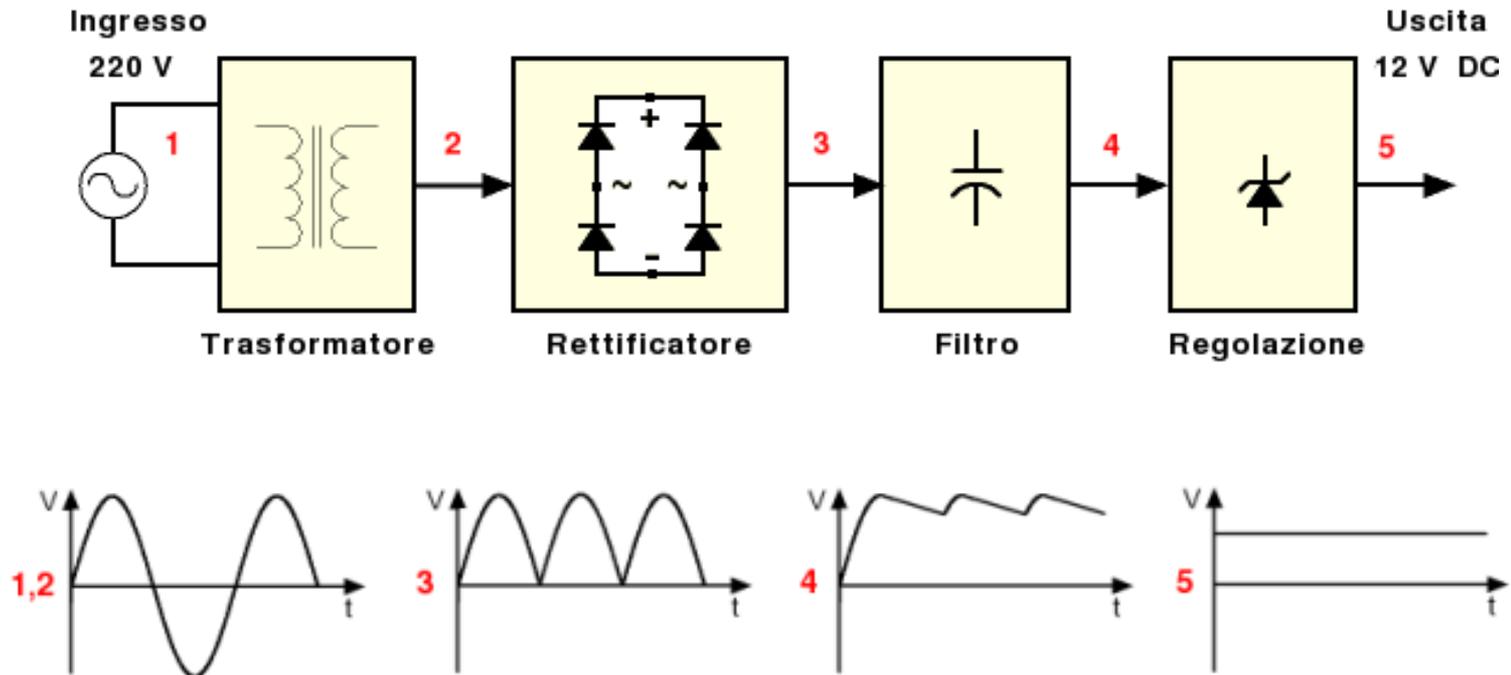
Applicazioni dei diodi nei circuiti

Diagramma a blocchi di un alimentatore in continua



Applicazioni dei diodi nei circuiti

Diagramma a blocchi di un alimentatore in continua



Esercizio

In una giunzione brusca $p^+ - n$ in Silicio di area $A = 1 \text{ mm}^2$, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$, lunghezza della regione p pari a $W_p = 1 \text{ mm}$, lunghezza della regione n pari a $W_n = 0.5 \text{ mm}$ e tensione di built in $V_{bi} = 0.898 \text{ V}$, si misura , per una tensione inversa $V_a = -5 \text{ V}$, una capacità pari a 120 pF .

1. Determinare il drogaggio del semiconduttore.

Eseguendo una seconda misura, si fa scorrere nel dispositivo una corrente pari a 12.5 mA .

2. Determinare il potenziale applicato ai capi del diodo (supponendo il diodo perfettamente ideale e trascurando i valori delle resistenze serie).