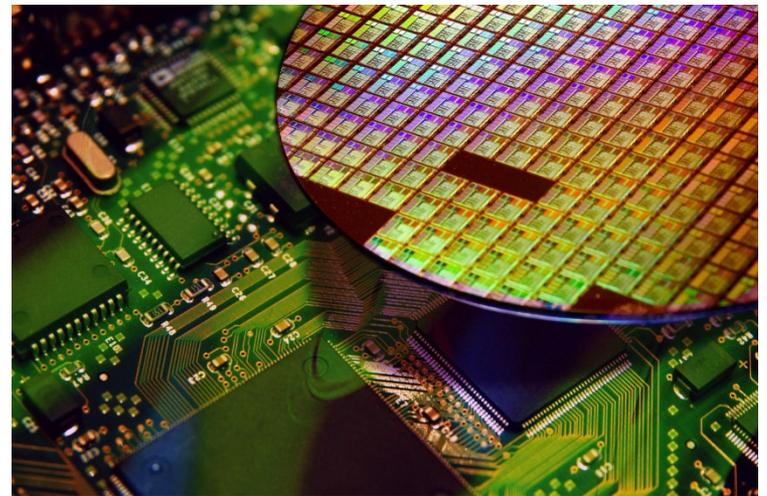


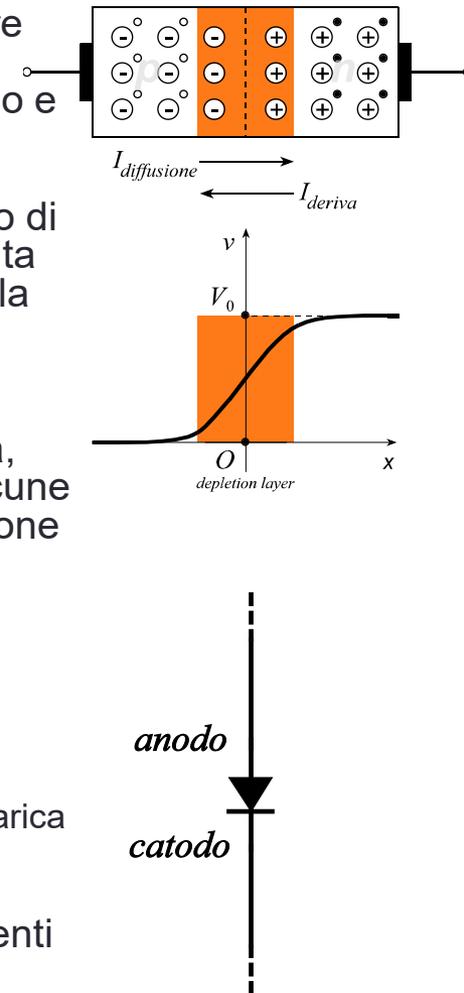
DISPOSITIVI ELETTRICI A SEMICONDUCTTORE

Seconda parte



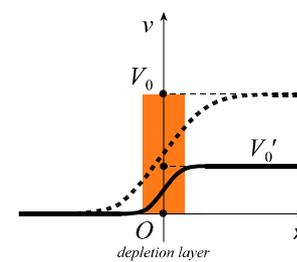
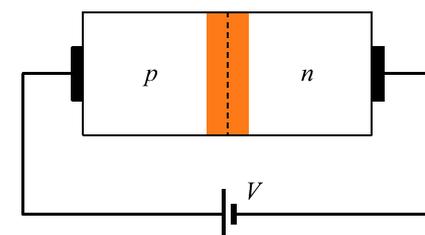
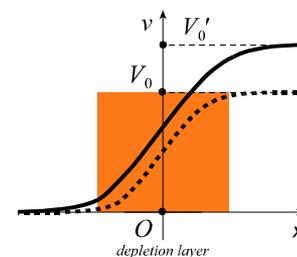
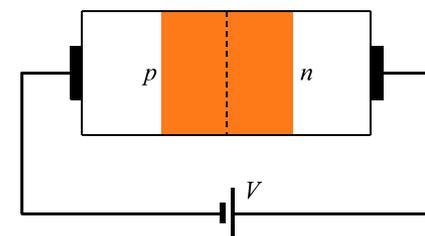
Riassunto della lezione precedente

- Un diodo a semiconduttore è costituito da una sbarretta di semiconduttore drogata di tipo p ad una estremità e di tipo n all'estremità opposta. La superficie di separazione all'interno della sbarretta tra un tipo di drogaggio e l'altro è detta **giunzione pn** .
- Per effetto della concentrazione non uniforme di elettroni e lacune, all'atto di formazione della giunzione si origina una corrente di diffusione I_D costituita da lacune della zona p che si spostano nella zona n e di elettroni che dalla zona n si spostano in quella p .
- A causa di questo spostamento alcune lacune provenienti dalla zona p , giunte nella zona n si ricombinano con gli elettroni di tale zona; viceversa, alcuni elettroni dalla zona n , giunti nella zona p , si ricombinano con le lacune presenti in tale regione. Ciò determina a cavallo della giunzione una regione priva di cariche libere che prende il nome di **depletion layer** o **regione di carica spaziale**. A tale regione corrisponde un **gradino di potenziale** che agevola il passaggio attraverso la giunzione delle cariche minoritarie presenti nelle due regioni
- In generale nel diodo convivono due tipi di correnti:
 - **Corrente di diffusione**: dovuta a disuniformità nelle distribuzioni dei portatori di carica
 - **Corrente di deriva**: dovuta all'azione di un campo elettrico sulle cariche
- In condizioni di equilibrio (in assenza di connessioni esterne) le due correnti tendono ad annullarsi



Riassunto della lezione precedente

- In **polarizzazione inversa** (polo negativo del generatore di forza elettromotrice V collegato all'anodo del diodo e quello positivo al catodo) aumenta l'altezza del gradino di potenziale ed alla corrente di diffusione I_D prevale quella di deriva I_S , inoltre si allarga il depletion layer.
- In **polarizzazione diretta** (polo positivo del generatore di forza elettromotrice V collegato all'anodo del diodo e quello negativo al catodo) diminuisce l'altezza del gradino di potenziale ed alla corrente di deriva I_S prevale quella di diffusione I_D , inoltre si restringe il depletion layer.



Caratteristica del diodo

- All'equilibrio, in assenza di alcuna tensione di polarizzazione, la corrente di deriva I_S bilancia esattamente la corrente I_D dovuta alla diffusione dei portatori maggioritari, così la corrente i attraverso il diodo vale:

$$i = I_D - I_S = 0$$

- La corrente di diffusione dipende dalla differenza di potenziale v applicata al diodo attraverso la relazione:

$$I_D = K e^{\frac{v}{\eta V_T}}$$

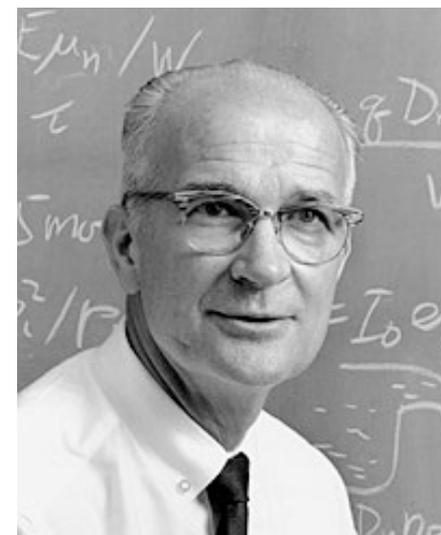
- in cui K è una costante e η è un parametro, detto **coefficiente di emissione**, e vale circa 1 per il germanio e circa 2 per il silicio. Dalla relazione precedente si ha che, all'equilibrio, se v è nulla, risulta:

$$0 = i = I_D - I_S = K - I_S$$

- per cui, in generale, l'equazione caratteristica del diodo è:

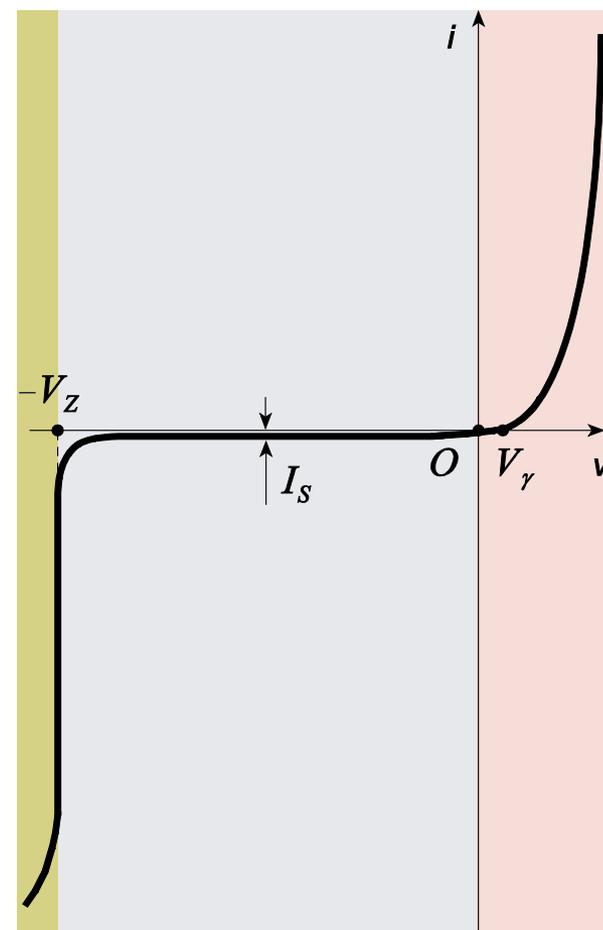
$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

- Tale equazione venne proposta da W. Shockley nel 1950 in un compendio sulla fisica dei semiconduttori.
- Si osservi che tale corrente, avendo il verso convenzionale della cariche positive, ha il verso delle lacune nel diodo.



Caratteristica del diodo

- In figura è mostrato l'andamento della corrente attraverso il diodo al variare della differenza di potenziale ad esso applicata;
- è possibile distinguere tre regioni di funzionamento, in relazione al valore della tensione di polarizzazione v :
 - $v > 0$: regione di polarizzazione diretta;
 - $v < 0$: regione di polarizzazione inversa;
 - $v < -V_Z$: regione di breakdown.
- Nella regione di polarizzazione diretta si osserva che la corrente diventa significativamente superiore a I_S quando la differenza di potenziale v è superiore ad un certo valore di **soglia** V_γ pari a 0.2V per il germanio e 0.6V per il silicio.



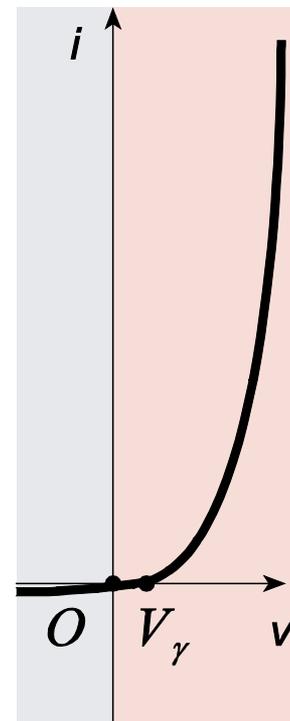
Polarizzazione diretta

- Siccome alla temperatura d'ambiente V_T vale circa $25mV$, per $v > V_\gamma$ risulta $e^{\frac{v}{\eta V_T}} \gg 1$, così in tale regione la caratteristica del diodo si approssima come:

$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{v}{\eta V_T}}$$

- In corrispondenza di correnti elevate, in polarizzazione diretta, il coefficiente di emissione η tende all'unità e, di conseguenza, l'espressione approssimata della caratteristica del diodo diviene:

$$i \approx I_S e^{\frac{v}{V_T}}$$

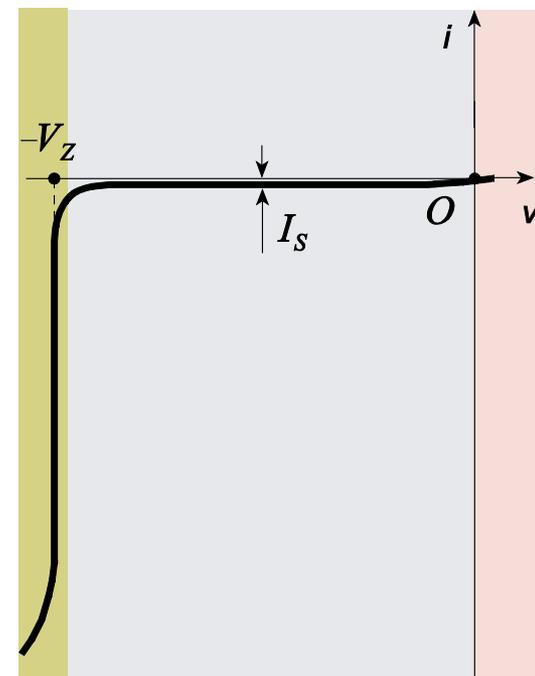


Polarizzazione inversa

- Nella regione di polarizzazione inversa, dove $v < 0$, se $|v| \gg V_T$, il termine esponenziale nella caratteristica del diodo risulta trascurabile rispetto all'unità, così risulta:

$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right) \approx -I_S$$

- dalla quale segue che in tale regione di funzionamento la corrente attraverso il diodo resta praticamente indipendente dalla differenza di potenziale v e pari a I_S , comunemente denominata **corrente inversa di saturazione**, dell'ordine del nA per i diodi al silicio e del μA per quelli al germanio.
- La regione di breakdown, non descritta nella equazione di Shockley, ha origine per tensioni inferiori alla tensione di Zener V_Z e, in tale regione, la corrente aumenta notevolmente in corrispondenza di piccole variazioni della tensione.



La corrente inversa di saturazione

- La corrente inversa di saturazione I_S aumenta con la temperatura e, in particolare, *raddoppia per ogni aumento della temperatura di 10°C*.
- Ciò è principalmente dovuto al fatto che attraverso l'aumento della temperatura, col crescere dell'agitazione termica, possono rompersi ulteriori legami covalenti, rendendo disponibili per la conduzione nuove coppie elettrone-lacuna.
- Tale caratteristica è espressa dalla relazione:

$$I_S(T) = I_S(T_0) 2^{\frac{T-T_0}{10^\circ C}}$$

- dove T_0 è una temperatura di riferimento espressa in gradi centigradi e $I_S(T_0)$ rappresenta la corrente inversa di saturazione a questa temperatura di riferimento.

La tensione ai capi del diodo

- Dall'equazione di Shockley è possibile inoltre stabilire la dipendenza dalla temperatura della tensione v ai capi della giunzione; infatti, invertendo tale equazione ed esplicitando V_T , si ha:

$$v = \eta V_T \ln \left(1 + \frac{i}{I_S} \right) = \frac{\eta k T}{e} \ln \left(1 + \frac{i}{I_S} \right) \approx \frac{\eta k T}{e} \ln \left(\frac{i}{I_S} \right)$$

- avendo assunto $i \gg I_S$. Derivando v rispetto alla temperatura, si ha:

$$\frac{\partial v}{\partial T} = \frac{\eta k}{e} \ln \left(\frac{i}{I_S} \right) + \eta V_T \frac{1}{I_S} \left(-\frac{i}{I_S^2} \right) \frac{\partial I_S}{\partial T} = \frac{v}{T} - \frac{\eta V_T}{I_S} \frac{\partial I_S}{\partial T}$$

- da cui segue che, fissato il valore della corrente i , la tensione ai capi del diodo diminuisce al crescere della temperatura e, in particolare si trova che **diminuisce di circa 2.5mV per ogni aumento di 1°C**.

Analisi di circuiti con diodi

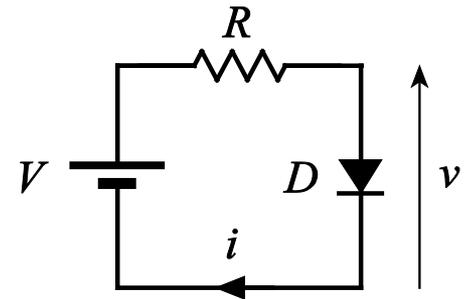
- Consideriamo il circuito di figura, applicando la legge di Kirchhoff per le tensioni si trova:

$$V = v + Ri$$

da cui segue:

$$i = -\frac{1}{R}v + \frac{V}{R}$$

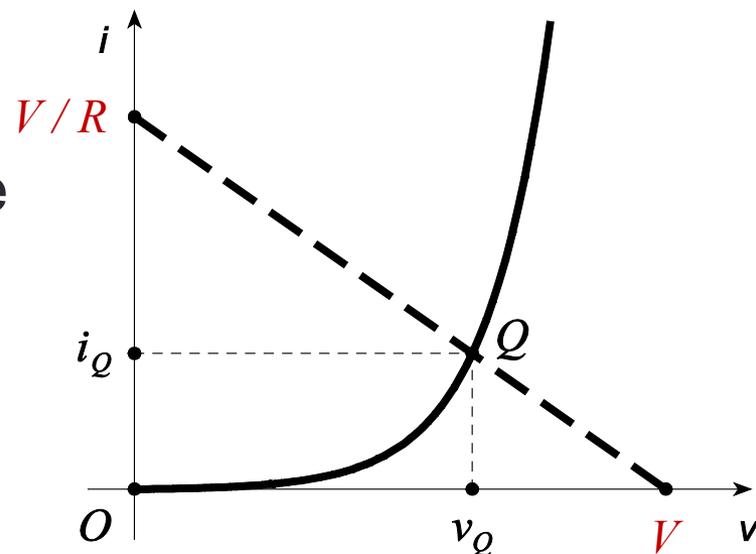
- D'altra parte, dalla relazione di Shockley si evince che la corrente i dipende dalla tensione v che, a sua volta, attraverso la relazione precedente, dipende dalla stessa i .
- La determinazione della corrente i attraverso il diodo di figura può essere svolta in due maniere, o graficamente o con un metodo approssimato.



Retta di carico

- Il metodo grafico, detto della *retta di carico*, consiste nel valutare l'intersezione grafica tra la relazione precedente e l'equazione di Shockley:

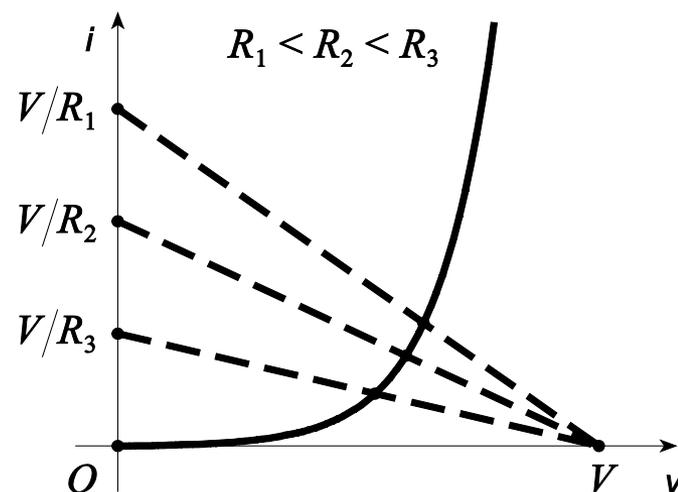
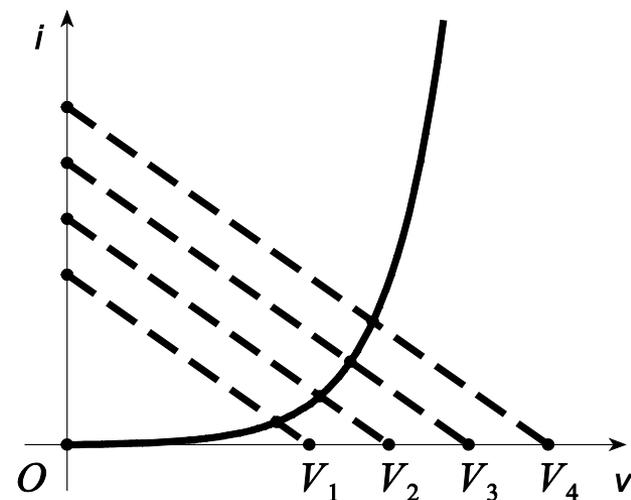
$$\begin{cases} i = -\frac{1}{R}v + \frac{V}{R} \\ i = I_S \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right) \end{cases}$$



- il punto di intersezione Q di coordinate (v_Q, i_Q) è detto *punto di funzionamento* del diodo nel circuito considerato.

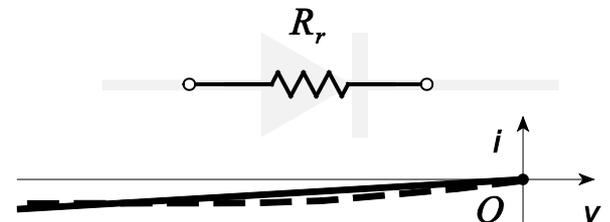
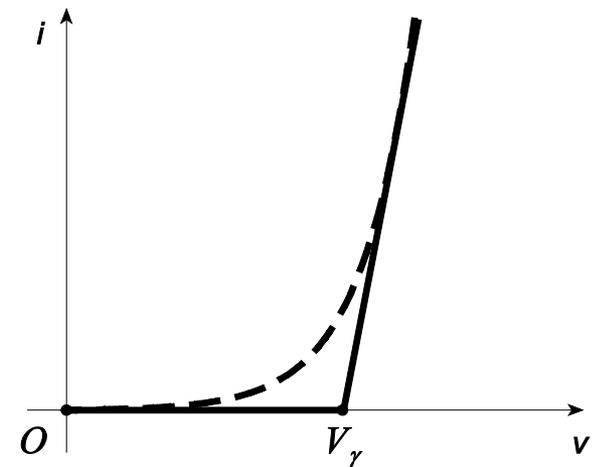
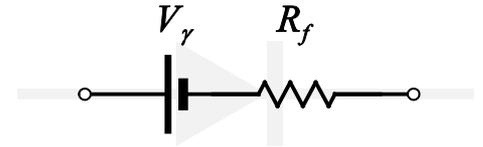
Retta di carico

- Questo procedimento, per altro, si presta ad una rapida determinazione degli effetti del cambiamento delle caratteristiche del circuito in esame.
- In particolare, se varia la forza elettromotrice V , la retta di carico trasla parallelamente a se stessa, mentre se cambia il valore della resistenza R la retta di carico ruota attorno al punto di coordinate $(V, 0)$.
- Dall'analisi del comportamento del circuito al variare di V , col metodo della retta di carico, si evince facilmente che per piccole variazioni di V la parte di caratteristica compresa tra due punti di funzionamento adiacenti può ritenersi approssimativamente lineare.
- Tuttavia, tale proprietà cessa ovviamente di valere in corrispondenza di ampie variazioni della forza elettromotrice V .



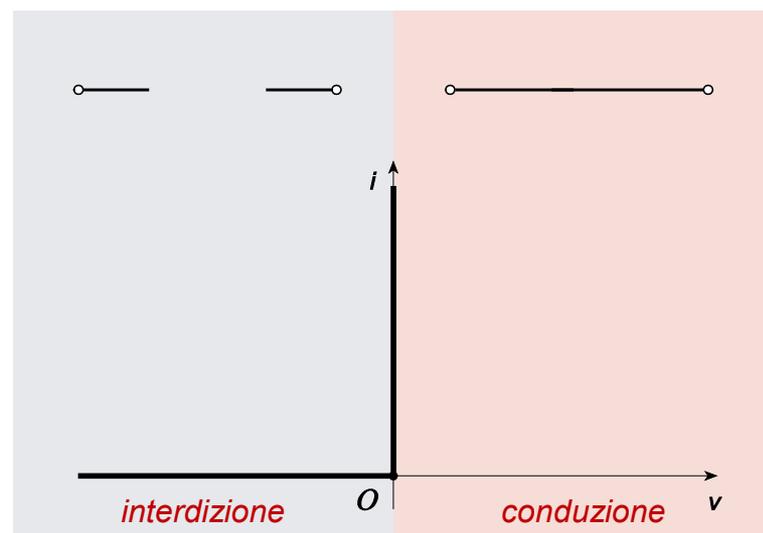
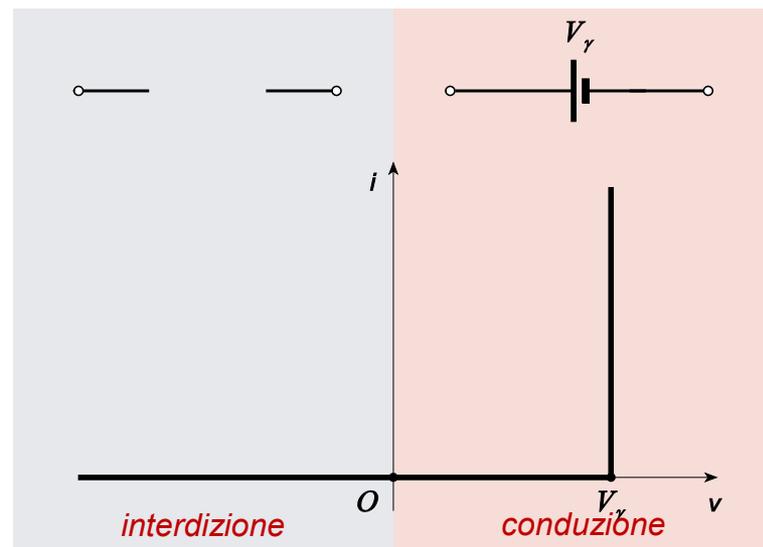
Caratteristica per grandi segnali

- Per grandi escursioni della forza elettromotrice V , o della corrente i attraverso il diodo, è possibile schematizzare questo componente facendo uso di una approssimazione a tratti dell'equazione di Shockley.
- Pertanto, per $v > V_\gamma$, condizione in cui il diodo è detto **in conduzione**, tale componente si schematizza con una resistenza R_f , solitamente dell'ordine della decina di ohm, con in serie un generatore di forza elettromotrice, di intensità pari alla tensione di soglia V_γ e col polo positivo rivolto verso l'anodo del diodo.
- Per $v < V_\gamma$, quando il diodo è considerato **interdetto**, questo componente si schematizza con una resistenza R_r , dell'ordine del megaohm e, pertanto, spesso assunta infinita.



Caratteristica per grandi segnali

- L'approssimazione del funzionamento del diodo per grandi segnali può essere ulteriormente estesa assumendo che le resistenze R_f e R_r possano essere completamente trascurate.
- Pertanto in questo caso ideale per il funzionamento del diodo risulterà
 - *in conduzione* $R_f \rightarrow 0$
 - *in interdizione* $R_r \rightarrow \infty$
- e la tensione V_γ sarà considerata trascurabile o meno in relazione alle circostanze



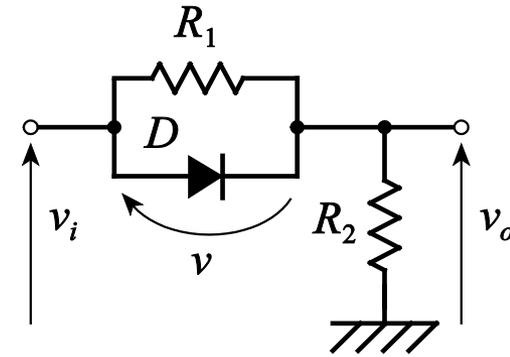
Esempio 1

- Stabiliamo la caratteristica $v_o - v_i$ del circuito di figura, assumendo che la resistenza R_f sia trascurabile e che la resistenza R_r sia infinita.
- In assenza del diodo, la differenza di potenziale v ai suoi capi è:

$$v = v_i \frac{R_1}{R_1 + R_2};$$

- siccome il diodo è interdetto per $v < V_\gamma$ ed in conduzione per $v > V_\gamma$, risulta:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i < V_\gamma \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ v_i > V_\gamma \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} D \text{ interdetto,} \\ D \text{ in conduzione.} \end{array}$$



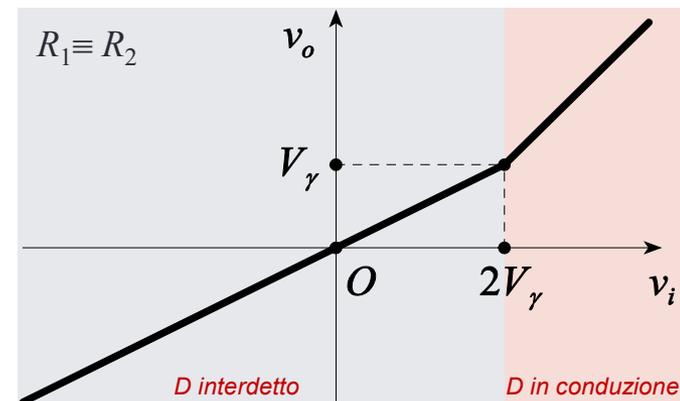
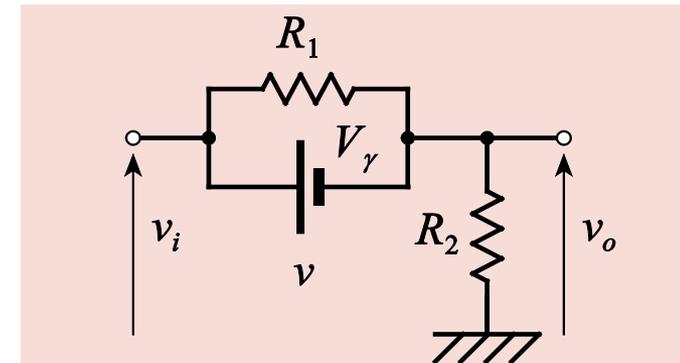
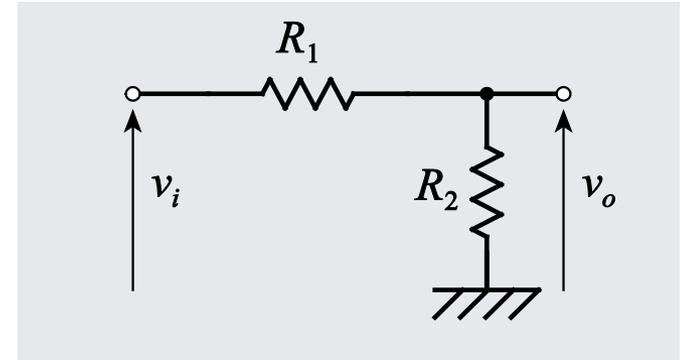
- Quando il diodo è interdetto il circuito equivalente è quello mostrato in figura in cui viene sostituito da un circuito aperto, così in tale circostanza:

$$v_o = v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2};$$

- mentre, se è in conduzione viene schematizzato con un generatore di forza elettromotrice , così:

$$v_o = v_i - V_\gamma.$$

- In figura è mostrata la caratteristica $v_o - v_i$ nel caso particolare in cui le resistenze R_1 e R_2 siano uguali.



Esempio 2

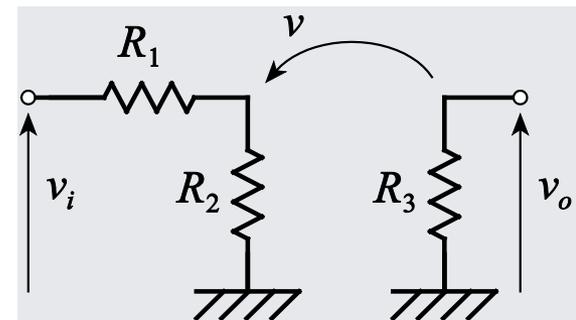
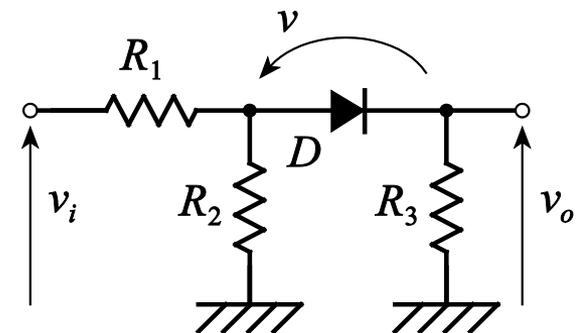
- Stabiliamo la caratteristica $v_o - v_i$ del circuito di figura, assumendo che la resistenza R_f sia trascurabile e che la resistenza R_r sia infinita.
- Se il diodo è interdetto, per $v < V_\gamma$, in cui

$$v = v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

- il circuito può essere schematizzato come indicato in figura.
- Pertanto i due stati di funzionamento del diodo sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i < V_\gamma \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \\ \Rightarrow \quad D \text{ interdetto,} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i > V_\gamma \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \\ \Rightarrow \quad D \text{ in conduzione.} \end{array} \right.$$

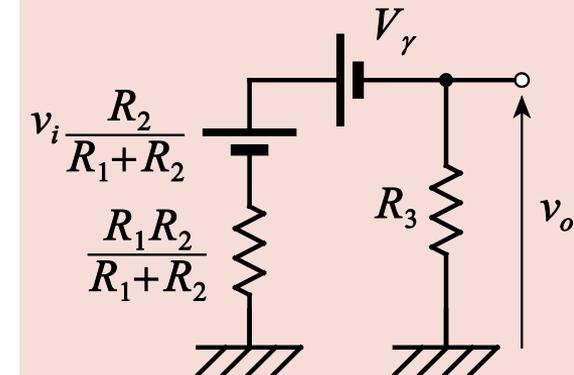
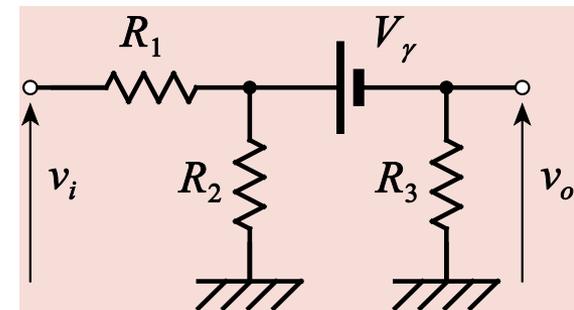
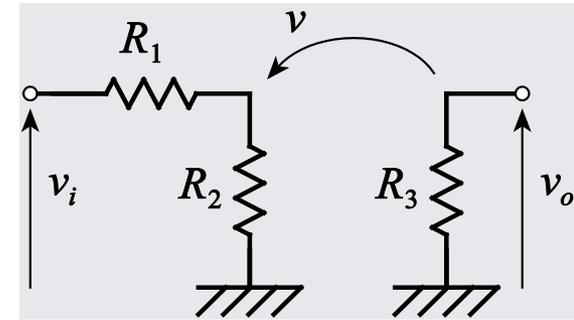


- Quando il diodo è interdetto la resistenza R_3 non è percorsa da corrente, per cui risulta:

$$v_o = 0,$$

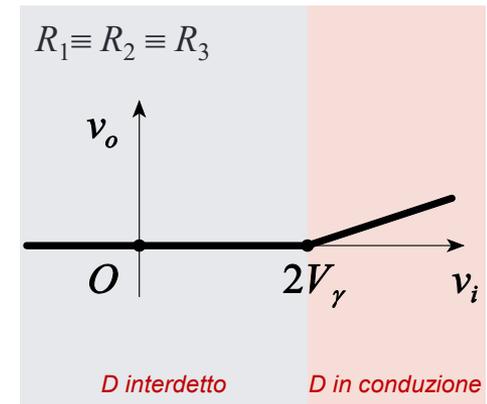
- invece, quando il diodo conduce, il circuito diviene quello di figura.
- Applicando il teorema di Thévenin a sinistra del diodo, il circuito si modifica come mostrato nello schema e da questo si deduce:

$$v_o = \left(v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_\gamma \right) \frac{R_3}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3}.$$



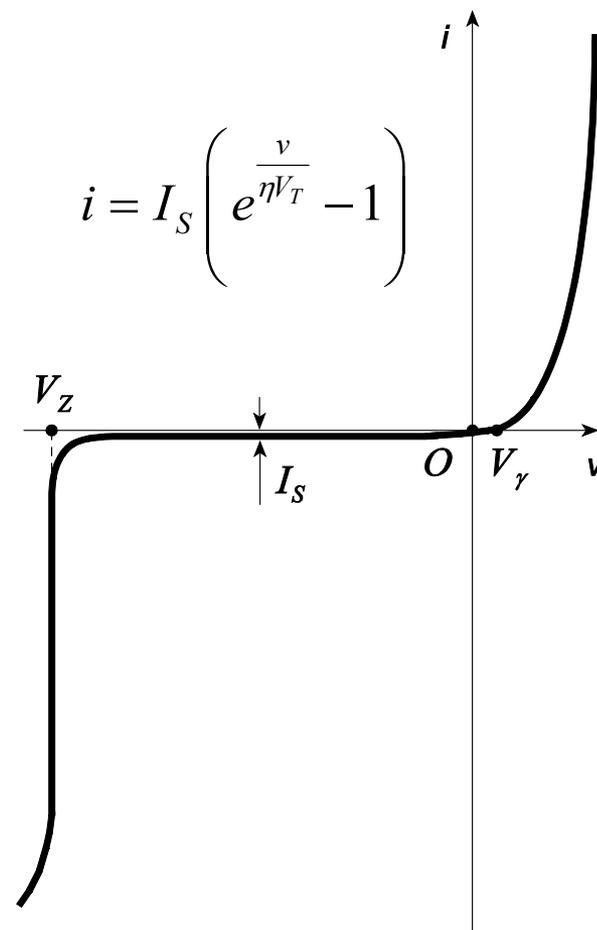
- Per rappresentare la caratteristica assumiamo, per semplicità, che tutte le resistenze abbiano lo stesso valore, allora dalla relazione precedente, si ha:

$$v_o = \left(v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_\gamma \right) \frac{R_3}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3} = \frac{1}{3} v_i - \frac{2}{3} V_\gamma .$$



Modello del diodo per piccoli segnali

- Il modello del diodo secondo il quale la caratteristica espressa dall'equazione di Shockley è approssimata con una spezzata, risulta inadeguato per la descrizione del funzionamento di tale dispositivo quando l'ampiezza del segnale ad esso applicato è piccola rispetto al suo valor medio.
- Sebbene in principio si possa comunque ricorrere all'equazione di Shockley per la descrizione, risulta opportuno poter linearizzare localmente tale relazione.



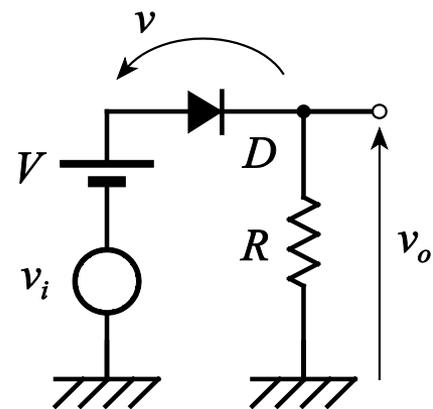
Esempio 3

- Consideriamo il circuito di figura, in cui

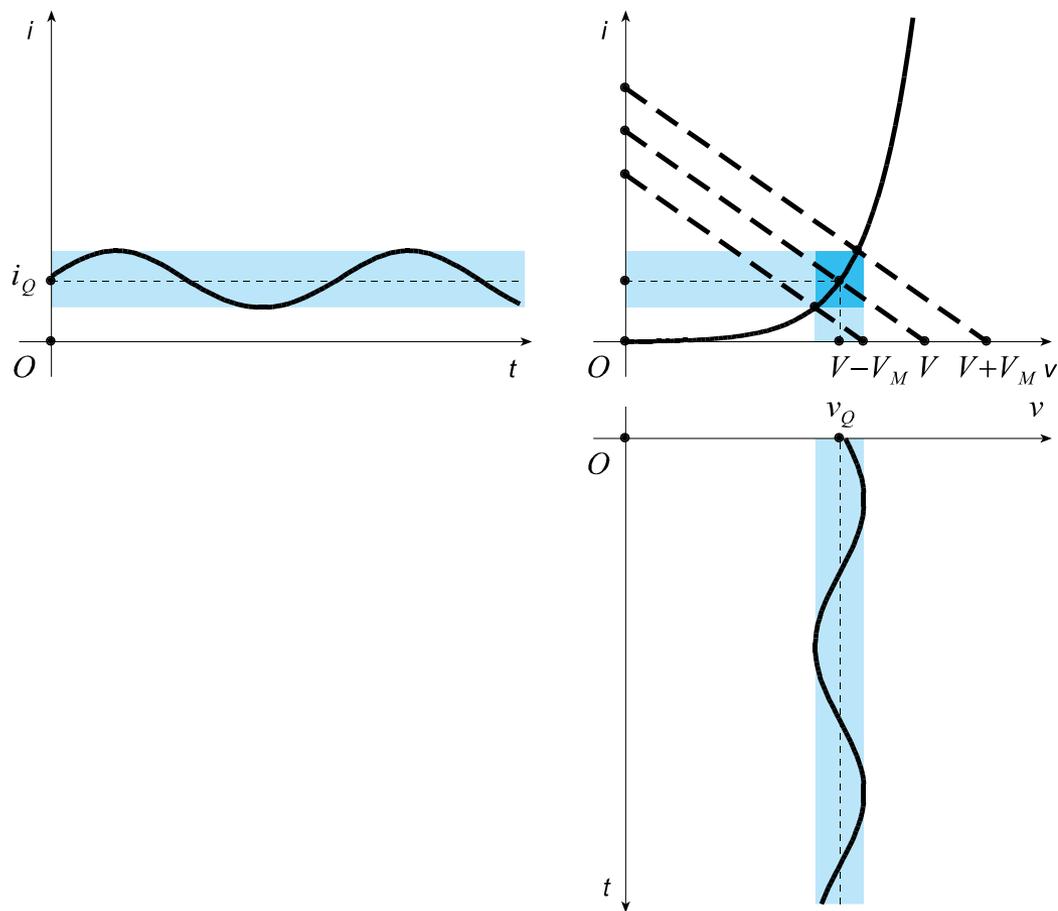
$$v_i = V_M \sin \omega t ,$$

con $V_M \ll V$ e $V > V_\gamma$.

- Per effetto del generatore di forza elettromotrice V il diodo opera in conduzione e l'applicazione del generatore sinusoidale non determina l'uscita del diodo da tale regime di funzionamento.



- Dalla costruzione grafica risulta evidente che, relativamente ad una piccola regione della caratteristica intorno al punto di funzionamento (v_Q, i_Q) , tale caratteristica possa ritenersi lineare.



Parametri differenziali del diodo

- L'esempio precedente mette in luce che, limitatamente agli effetti determinati dal solo generatore sinusoidale, il diodo possa essere schematizzato come una resistenza r_d , di valore pari all'inverso della pendenza della caratteristica, calcolato nel punto di funzionamento. Questa grandezza, denominata **resistenza differenziale** del diodo vale:

$$r_d \equiv \frac{1}{g_d}$$

- dove g_d è la **conduttanza differenziale**, pari a:

$$g_d \equiv \left. \frac{\partial i}{\partial v} \right|_{(v_Q, i_Q)}$$

- in cui (v_Q, i_Q) rappresenta il punto di funzionamento del diodo.
- Adoperando l'equazione di Shockley si ha:

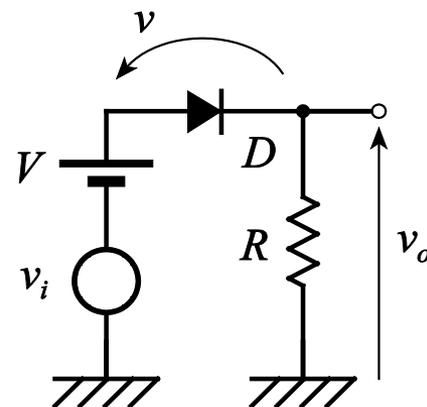
$$g_d = \left. \frac{\partial}{\partial v} I_S \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right) \right|_{(v_Q, i_Q)} = \frac{I_S e^{\frac{v_Q}{\eta V_T}}}{\eta V_T} \approx \frac{i_Q}{\eta V_T}$$

- essendo il diodo in conduzione e siccome $i_Q \gg I_S$ risulta $i_Q \approx I_S e^{\frac{v_Q}{\eta V_T}}$; pertanto:

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{\eta V_T}{i_Q}$$

Esempio 4

- Consideriamo il circuito dell'esempio precedente in cui la batteria eroga una forza elettromotrice di $20V$, l'ampiezza della forza elettromotrice erogata dal generatore sinusoidale v_i vale $120mV$, la resistenza R è di $1.5k\Omega$ e il diodo, al silicio, presenta una resistenza in conduzione R_f pari a 10Ω . Stabiliamo l'espressione di v_o nell'ipotesi che il componente operi alla temperatura di $20^\circ C$.

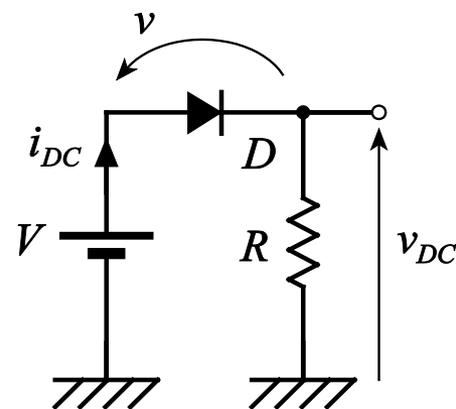


- Appliciamo il principio di sovrapposizione, considerando il contributo alla tensione v_o dovuto a ciascun generatore.
- Se il generatore v_i è sostituito con un cortocircuito, la corrente i_{DC} vale:

$$i_{DC} = \frac{V - V_\gamma}{R + R_f} \approx 12.8 \text{ mA},$$

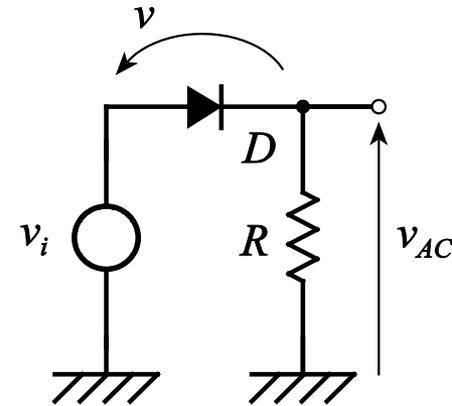
- così

$$v_{DC} = Ri_{DC} \approx 19.3 \text{ V}.$$



- Assumiamo ora che il generatore V sia sostituito con un cortocircuito; la resistenza differenziale del diodo in corrispondenza della corrente i_{DC} vale:

$$r_d = \frac{\eta V_T}{i_{DC}} \approx 3.9 \Omega ,$$



- dove $\eta \approx 2$ e $V_T \approx 25mV$ alla temperatura specificata, pertanto il valore massimo della tensione alternata presente ai capi della resistenza R vale:

$$V_{oM} = V_M \frac{R}{R + r_d} \approx 119.7 mV .$$

- Sommando i due contributi v_{DC} e v_{AC} si ottiene l'espressione della tensione v_o

$$v_o = v_{DC} + v_{AC} = v_{DC} + V_{oM} \sin \omega t \approx 19.3 V + 119.7 mV \sin \omega t .$$

Capacità del diodo

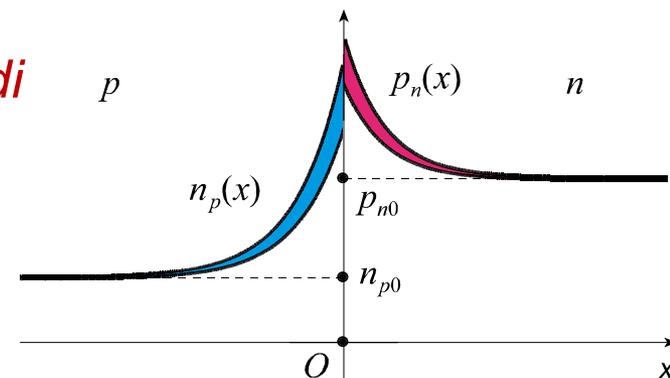
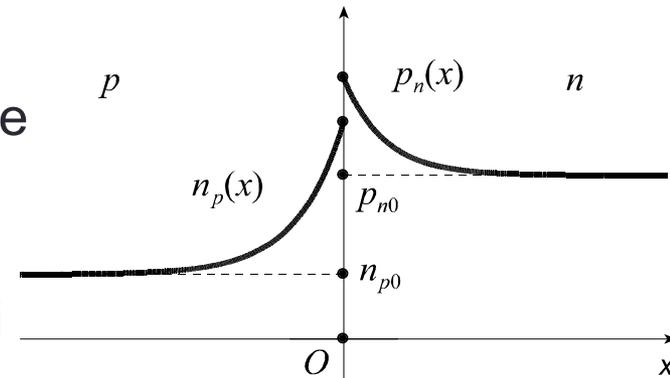
- Nell'esempio precedente si è assunto in maniera implicita che la frequenza del generatore sinusoidale fosse sufficientemente bassa da poter ritenere trascurabili gli effetti di accumulo di carica sulla giunzione.
- Tuttavia, ad alta frequenza tali effetti diventano manifesti, per cui si richiede l'aggiunta di opportuni elementi capacitivi al modello per piccolo segnale del diodo, in modo da poterne tenere conto.
- In polarizzazione diretta la capacità equivalente è detta *capacità di diffusione* e la sua presenza schematizza il fatto che in questo modo di funzionamento esiste una iniezione di cariche minoritarie in ciascuna regione del diodo, provenienti dalla regione opposta;
- in particolare vi saranno lacune in prossimità del lato del diodo drogato di tipo n ed elettroni in prossimità del lato drogato di tipo p .

Capacità di diffusione

- Gli eccessi di carica, corrispondenti alle concentrazioni indicate con $p_n(x)$ e con $n_p(x)$, rispettivamente nelle regioni drogate di tipo n e p , diminuiscono rapidamente allontanandosi dalla giunzione a causa delle ricombinazioni, per cui, a grandi distanze dalla giunzione, le concentrazioni di portatori minoritari sono pari a quelle che si avrebbero a circuito aperto, p_{n0} e n_{p0} , rispettivamente nelle regioni di tipo n e p .
- Per effetto di una variazione ΔV della tensione applicata al diodo, si ha una variazione ΔQ della carica in eccesso; si definisce **capacità di diffusione** C_D il limite:

$$C_D \equiv \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} \Big|_{(v_Q, i_Q)} = \frac{dQ}{dV} \Big|_{(v_Q, i_Q)}$$

- in cui, al solito, (v_Q, i_Q) indica il punto di funzionamento del diodo.



- Si prova che:

$$C_D = \frac{\tau i_Q}{\eta V_T}$$

- dove τ è il tempo di vita medio dei portatori prima che subiscano una ricombinazione, così, dall'espressione della resistenza differenziale $r_d = \eta V_T / i_Q$ segue:

$$C_D = \frac{\tau}{r_d}$$

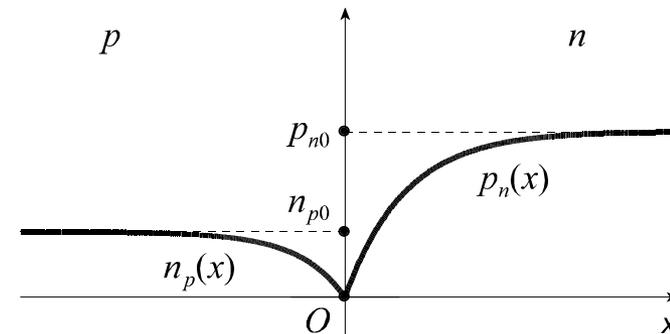
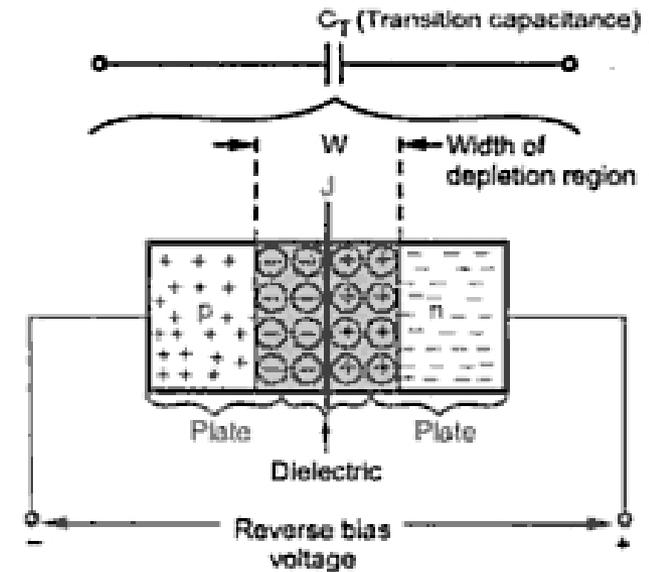
- Questa relazione, permette di riguardare τ come una costante di tempo di diffusione $r_d C_D$.

Capacità di transizione

- In polarizzazione inversa, la capacità equivalente è detta **capacità di transizione** e rappresenta la variazione della carica immagazzinata nella regione di carica spaziale a causa della variazione della tensione inversa applicata alla giunzione.
- Se W indica l'ampiezza della regione di carica spaziale e A l'area della giunzione, la capacità di transizione C_T vale:

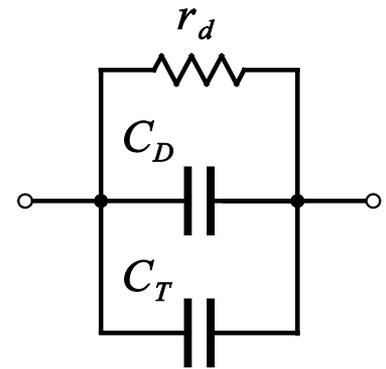
$$C_T \equiv \frac{\varepsilon A}{W}$$

- dove ε è la costante dielettrica del semiconduttore.



Capacità del diodo

- Quindi, per quanto concerne il comportamento ad alta frequenza, il diodo viene schematizzato tenendo conto sia della capacità di diffusione che di quella di transizione, così come mostrato in figura.
- In polarizzazione diretta prevale l'effetto di C_D su quello di C_T mentre, al contrario, in polarizzazione inversa, sebbene sia sempre presente un piccolo flusso di portatori, la capacità di diffusione corrispondente assume un valore molto più piccolo rispetto alla capacità di transizione.



DISPOSITIVI ELETTRICI A SEMICONDUCTORE

Fine seconda parte

