COMPORTAMENTO DINAMICO DELLE GIUNZIONI P-N

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.
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) mentre 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.
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 <u>non</u> 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: $C = dQ/dV$, $G = dI/dV$.

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

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

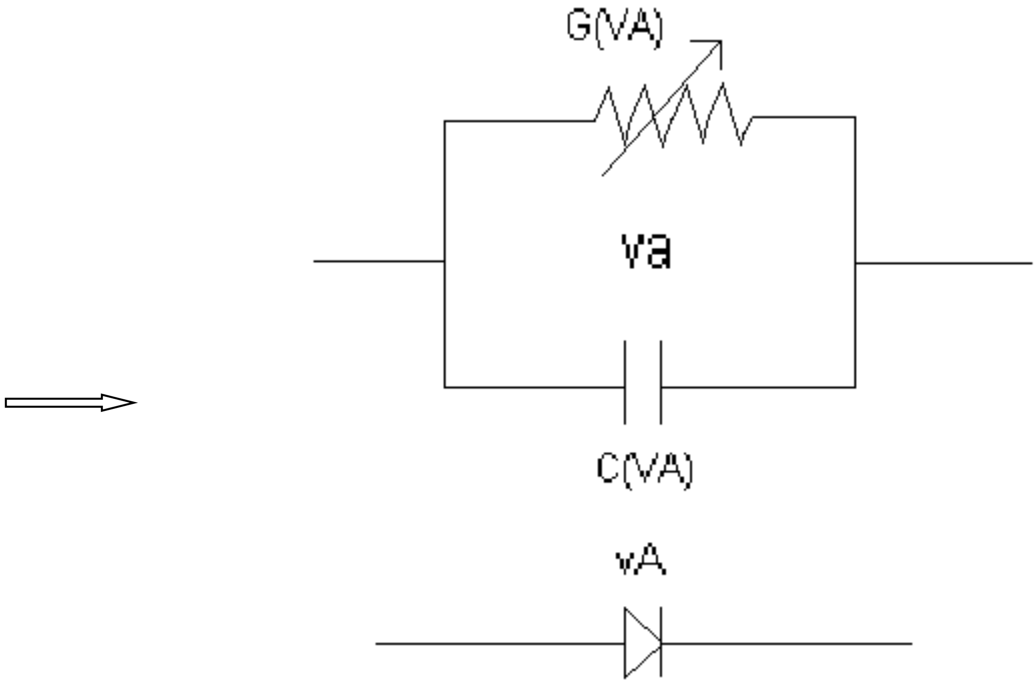
Dove V_A e' la componente continua, v_a la componente alternata di piccola ampiezza

Polarizzazione inversa

Capacità di svuotamento : C**J**

In risposta a v**a**, la zona di svuotamento si allarga o si restringe. Sono i portatori di maggioranza a muoversi e il tempo di reazione è molto basso (~10**-10** ÷ 10**-12** sec)

➔ C**J** risulta indipendente da ω fino a frequenze molto alte (~ 100 MHz).



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

-Conduttanza : G_0

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

In questa ipotesi:

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

se $v_A = V_A + v_a$:

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

La corrente dovuta al segnale è:

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

Essendo $|v_a| << V_A$, $I(V_A + v_a)$ può essere espanso in serie di Taylor:

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

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

$$G_0 = \frac{i}{v_a} = \left.\frac{dI}{dV}\right|_{V=V_A}$$ (mhos) ⇐ Conduttanza a bassa frequenza

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

Si definisce: $$r = \frac{1}{G_0} = \frac{kT}{q(I + I_0)}$$ Resistenza dinamica

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

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

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

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

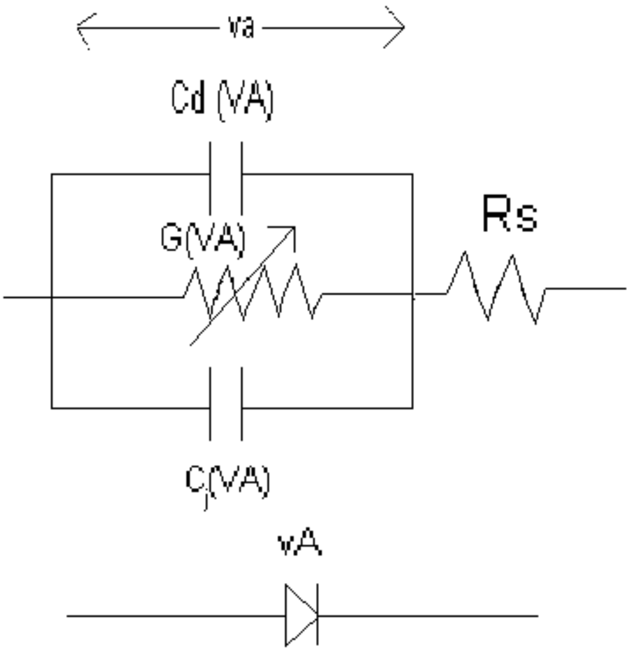
Nel caso della giunzione brusca:

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

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

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

Polarizzazione diretta



Oltre a C_J, c'è anche C_D dovuta alla risposta dei minoritari.
I minoritari contribuiscono anche al valore di G.

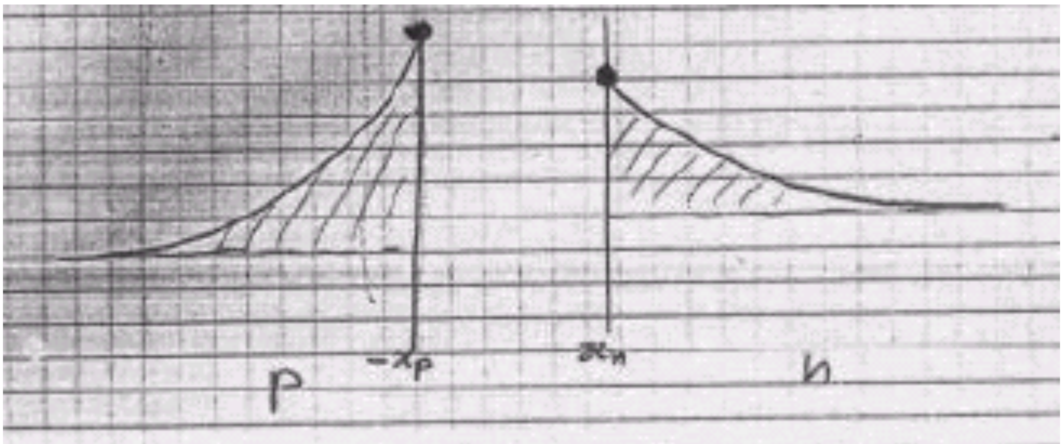
<u>Importante</u>: la diffusione è un processo lento rispetto alla frequenza del segnale.

Sotto l'azione di una tensione $v_a(t)$, p_n (e n_p) diventa una funzione della posizione <u>e</u> del tempo:

$$p_n(x,t)$$

Immagazzinamento di carica (charge storage)

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



Questa carica è data da:

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

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

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

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

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

In una giunzione brusca asimmetrica $N_A^+ >> N_D^-$

$$X_p = 0 \Longrightarrow Q_n = 0$$

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

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

$$Q_p = \underbrace{\frac{L_p^2}{D_p}}_{\tau_p}\underbrace{\frac{qD_p p_{n0}}{L_p}}_{J_s}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right) = \tau_p J_p(x_n) \qquad \text{eq. (3.76)}$$

Capacità di diffusione: Basse frequenze

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

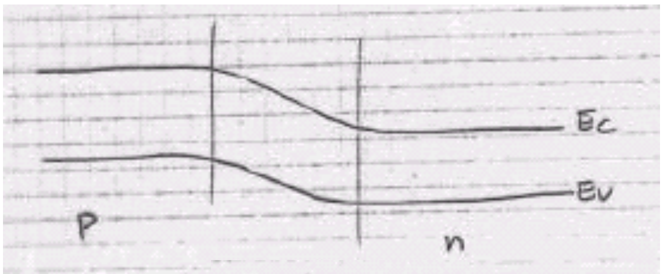
Si osservi come per V < 0, $C_d \Longrightarrow 0$ ed infatti non vi è iniezione di minoritari nelle regioni neutre.

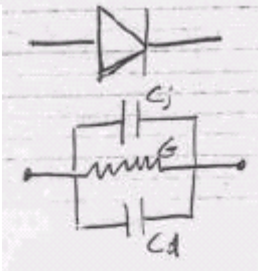
Conduttanza : basse frequenze

$$G = A\frac{dJ}{dV} = A\frac{q}{kT} J_s e^{\frac{qV}{kT}}$$

$$= A\frac{q}{kT}\left(J + J_s\right) \cong A\frac{q}{kT} J = \frac{q}{kT} I$$

Circuito equivalente:





⇐ simbolo

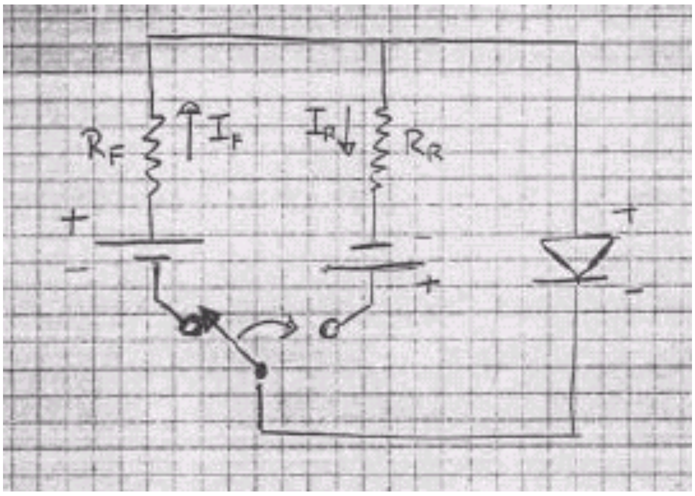
⇐ circuito equivalente per piccoli segnali

C_j, C_d, G dipendono da V

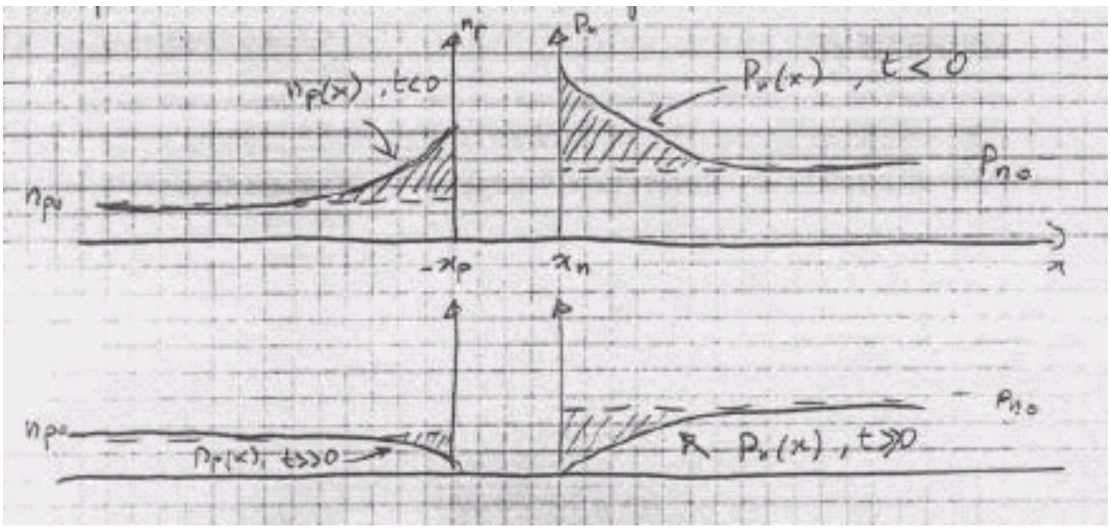
Comportamento durante un transitorio (switching response)

Per semplicità consideriamo una giunzione p^+n ($N_A >> N_D$).

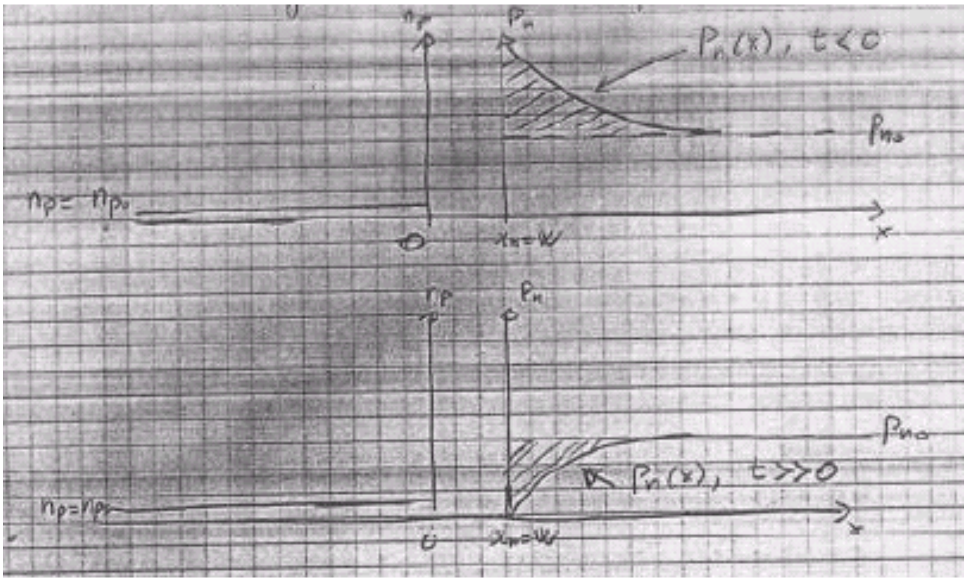
Si vuole considerare la transizione ON/OFF che si ha quando si inverte bruscamente la polarizzazione da diretta a inversa.



Questo significa studiare l'evoluzione che conduce da una situazione stazionaria di iniezione di minoritari ad una situazione, asintoticamente stazionaria, di completa "chiusura" della giunzione.



Per la giunzione brusca p^+n



Come si vede, il cambiamento consiste nella "eliminazione" della carica, dovuta ai minoritari, rappresentata dalla <u>somma</u> delle due aree tratteggiate.
Questa eliminazione avviene tramite 2 meccanismi:

1)Riflusso attraverso la regione svuotata (corrente <u>inversa</u>);
2) Ricombinazione di lacune in $x>x_n$.

In particolare, si osserverà una diminuzione di $p_n(x_n)$ dal suo valore iniziale >> p_{n0} ad un valore finale << p_{n0}.
Il corrispondente potenziale della giunzione seguirà questo andamento

$$V_i = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{p_n(x_n,t)}{p_{n0}}\right)$$

(Si noti che, <u>non</u> essendo piccoli segnali, si permette a V_j di raggiungere il potenziale applicato solo come valore asintotico)

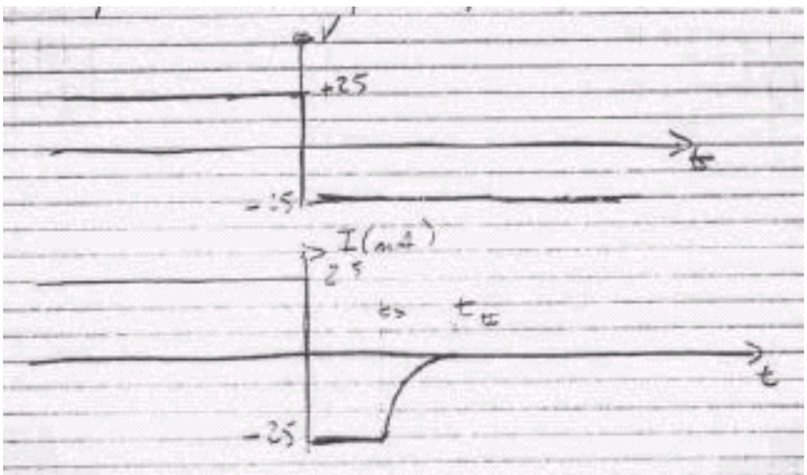
Si osservi come V_j, anche per grandi correnti, non eccede, come ordine di grandezza, il volt.

Si consideri una commutazione da +25V a –25V del circuito dato. Sia $R_F = R_R = 1K\Omega$, e sia $I_S = 10^{-14}$ A.
E' facile verificare come la caduta di tensione +25V si ripartisca in circa 24,2 V su R_F e 0,8 V sul diodo, con una corrente di circa 24mA.

Quando avviene la commutazione, fino a che $p_n(x_n)$ non scende fino a valori confrontabili con p_{n0}, V_j rimane compresa tra 0,8 e 0V.
In questa fase, i –25 V devono cadere tutti sulla resistenza R_R
$\Longrightarrow$ passa una corrente I_R data da:

$$I_R = -\frac{25 + V_j}{R_R} \cong -\frac{25}{R_R} V \cong -25mA$$

Quindi, una intensa corrente costante scorre in inversa, fino al tempo t_s per cui $p_n(x_n) \approx p_{n0}$.
Dopo questo istante, la regione neutra non ha quasi più portatori minoritari, $p_n(x_n)$ diventa << p_{n0} e V_j raggiunge rapidamente valori negativi (giunzione in inversa), fino ad uguagliare i –25V. A questo punto non passa più corrente.



t_s viene definito tempo di immagazzinamento.
t_{tt} (t_{off} in fig. 3.20 e eq. 3.80) viene definito tempo di transizione inversa.

Analisi del tempo di immagazzinamento

In $x>x_n$, durante gli stati non stazionari:

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p}$$ eq. di continuità

Si moltiplichi tutto per l'area e per q e si integri tra x_n e ∞:

$$qA\frac{\partial}{\partial t}\int_{x_n}^{\infty} \Delta p_n dx = -A\int_{x_n}^{\infty} \frac{\partial J_p}{\partial x}dx - \frac{qA}{\tau_p}\int_{x_n}^{\infty} \Delta p_n dx$$

ossia

$$\frac{\partial Q_p(t)}{\partial t} = I(t) - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$ Equazione del controllo di carica

Nel periodo $0 \le t \le t_s$, $I(t) = -I_R$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} = -I_R - \frac{Q_p}{\tau_p}$$

$$\frac{dQ_p}{I_R + \frac{Q_p}{\tau_p}} = -dt$$

Integrando tra 0 e t_s:

$$\int_{Q_P(0)}^{Q_P(t_s)} \frac{dQ_p}{I_R + \frac{Q_p}{\tau_p}} = -\int_0^{t_s} dt$$

$$t_s = \tau_p \ln\left(\frac{I_R + \dfrac{Q_p(0)}{\tau_p}}{I_R + \dfrac{Q_p(t_s)}{\tau_p}}\right)$$

Per quanto detto si può assumere $Q_p(t_s) \approx 0$ e, per la (3.76), (dopo aver posto $I_F = A\, J_p(x_n)$:

$$Q_p(0) = \tau_p\, I_F$$

$$t_s = \tau_p \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_R}\right)$$

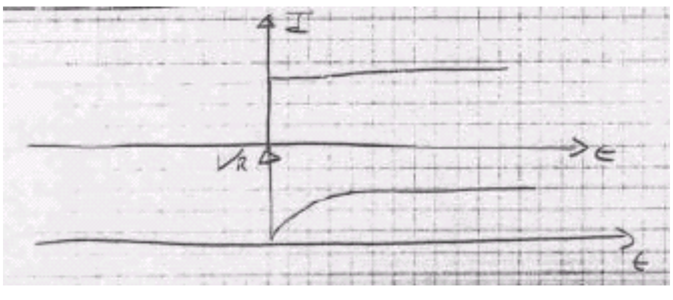
Per $t>t_s$, si ha una rapida discesa della corrente. Si considera chiuso il transitorio quando la corrente inversa scende a meno del 10% di I_R.

<u>TRANSIZIONE OFF/ON</u>(I_F costante)

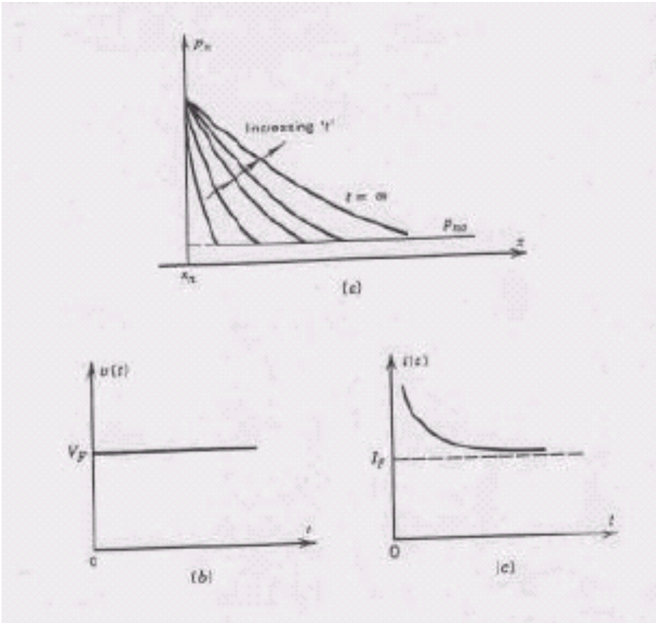
$$Q_p(t) = \tau_p I_F \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right)$$

$$V_j(t) = \frac{kT}{q} \ln\left[1 + \frac{I_F}{I_S}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right)\right]$$

Dapprima la corrente I_F "riempie" di minoritari la regione n, poi la ricombinazione bilancia I_F e si ha uno stato stazionario.



ON $\longrightarrow$ OFF (tensione costante)



OFF $\longrightarrow$ ON (corrente costante)