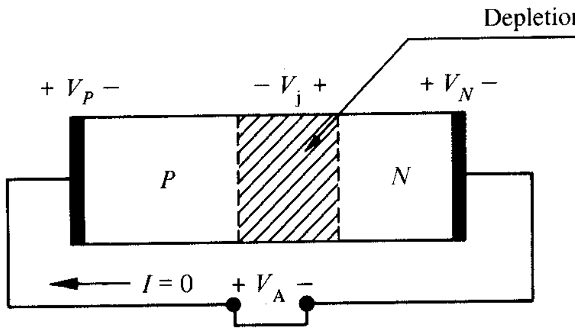
Elettrostatica della giunzione con una tensione esterna applicata

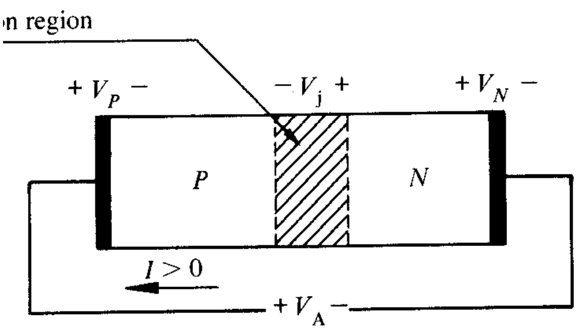
Consideriamo innanzitutto un diodo all'equilibrio, cioè senza tensione applicata. Pensiamolo inserito in un ipotetico circuito. Dobbiamo contattarlo ai lati con contatti metallici caratterizzati da un certo potenziale di contatto, dipendente solo dai materiali. Sia V_j il potenziale ai capi della zona di svuotamento, che , all'equilibrio termodinamico, vale V_{bi}.



Applichiamo l'equazione di Kirchoff alle tensioni:

$$V_j - V_N - V_P = 0 \longrightarrow V_j = V_N + V_P = V_{bi}$$

Ora consideriamo il caso di una tensione applicata



$V_j - V_N + V_A - V_P = 0$
(V_N e V_P restano gli stessi)

$$\downarrow$$

$$V_J = V_N + V_P - V_A = V_{bi} - V_A$$

Siccome V_{bi} è stato usato come parametro nelle condizioni al contorno, basterà sostituire V_{bi} - V_A in ognuna delle espressioni trovate in precedenza.

Precisamente, per la giunzione brusca:

zona n

$$V(x) = V_{bi} - \frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x - x_n)^2$$

$$\downarrow$$

$$(V_{bi} - V_A) - \frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x - x_n)^2$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}V_{bi}}$$

$$\downarrow$$

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}(V_{bi} - V_A)}$$

zona p

$$V(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s}\left(x + x_p\right)^2$$ resta invariata

$$x_p = \frac{N_A}{N_A + N_D} W =$$

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

$$= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_D}{N_A\left(N_A + N_D\right)}\left(V_{bi} - V_A\right)}$$

Da notare la convenzione sul segno di VA, che è positiva se rende p positivo rispetto a n.

Per la giunzione graduale:

$$V(x) = -\frac{qa}{2\varepsilon_s}\left[\frac{x^3}{3} - \left(\frac{w}{2}\right)^2 x - \frac{2}{3}\left(\frac{w}{2}\right)^3\right]$$

$$W = \left[\frac{12\varepsilon_s}{qa}\left(V_{bi} - V_A\right)\right]^{1/3}$$

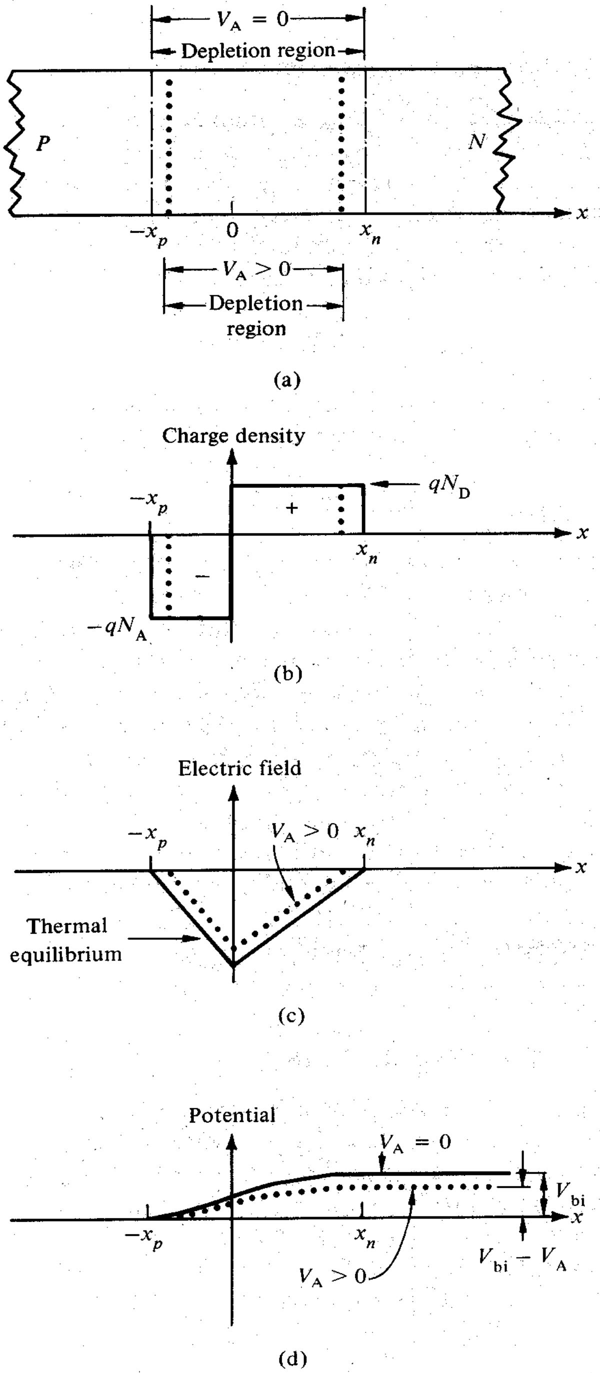


Fig. 2.7 Effect of forward bias on the diode electrostatics ($V_A > 0$, dotted lines; $V_A = 0$, unbroken lines).

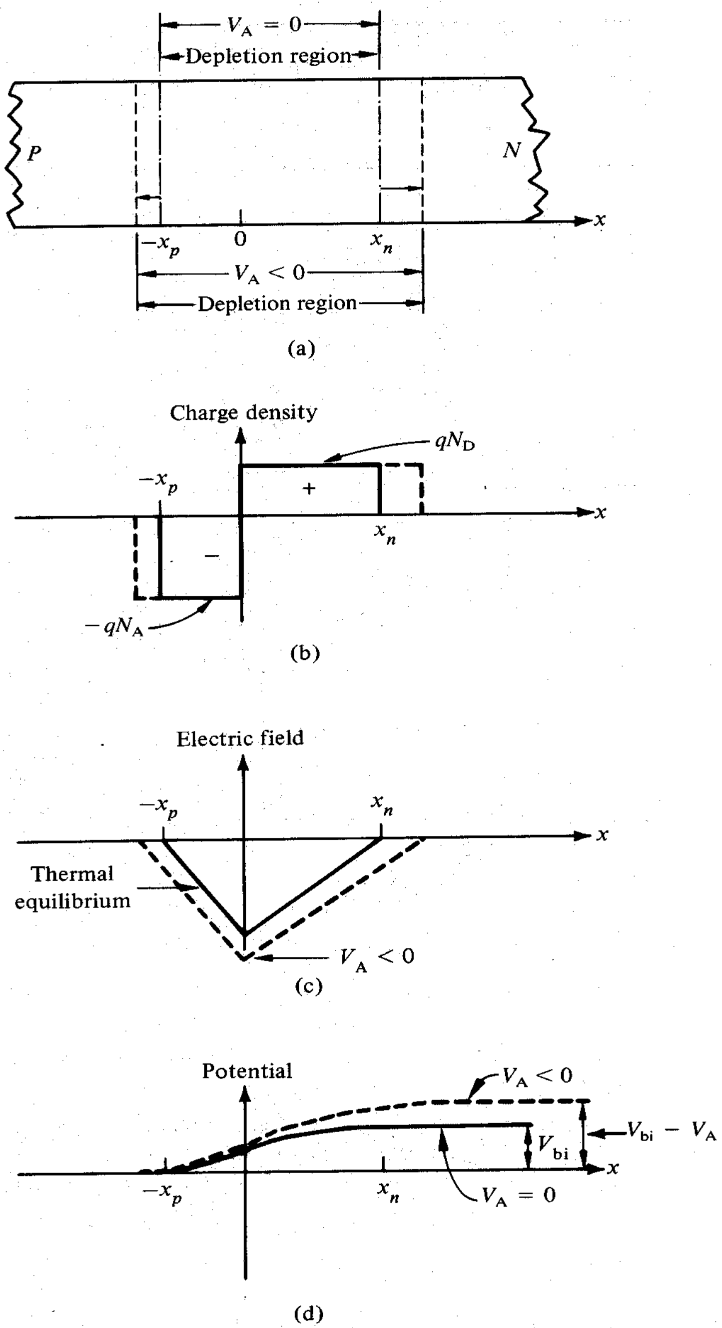


Fig. 2.8 Effect of bias on depletion region electrostatics ($V_A < 0$, dashed lines; $V_A = 0$, unbroken lines).

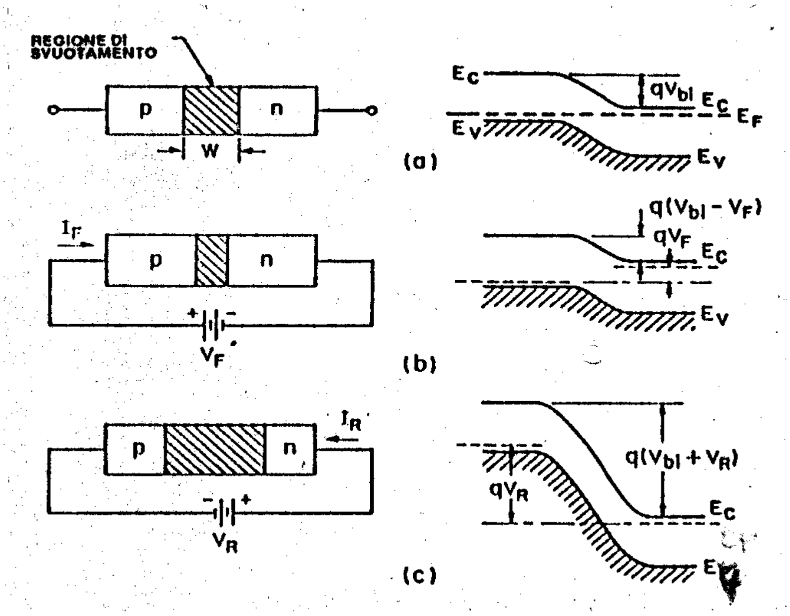
Capacità di svuotamento

Applicando una d.d.p. V ai capi della giunzione, si modifica l'ampiezza dello scalino di potenziale già esistente all'equilibrio. All'equilibrio il lato p è ad un potenziale più negativo del lato n. Per questo motivo, una polarizzazione che, tenuto n a massa, applichi in p un potenziale positivo di $V_A = +V_F$, ridurrà lo scalino.

$$V_{bi} \longrightarrow V_{bi} - V_F$$

al contrario un potenziale esterno negativo $V_A = -V_R$ contribuirà ad aumentare l'ampiezza di questo scalino

$$V_{bi} \longrightarrow V_{bi} + V_R$$



In generale

$$V_{bi} \longrightarrow V_{bi} - V_A$$

dove V_A è misurato in p in riferimento al potenziale di n
In queste condizioni di NON equilibrio può esservi flusso di corrente, ma innanzitutto si modifica la regione svuotata

brusca

$$\mathbf{W} = \sqrt{\frac{2\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{s}}}{\mathbf{q}} \frac{(\mathbf{N_A} + \mathbf{N_D})(\mathbf{V_{bi}} - \mathbf{V})}{\mathbf{N_A N_D}}}$$

asimmetrica

$$\xrightarrow{}$$

$$N_A >> N_D \qquad \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{(V_{bi} - V)}{N_D}}$$

lineare

$$W = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_s}{qa}(V_{bi} - V)}$$

Se varia W, varia la carica Q della regione svuotata (le altre regioni sono neutre). Questa variazione, rapportata alla tensione che l'ha causata, determina la CAPACITÀ DI SVUOTAMENTO della giunzione p-n

$$C_J = \frac{dQ}{dV}$$

In analogia al caso dei condensatori piani, dQ è la variazione di carica o nel lato p oppure nel lato n.
La variazione totale, per neutralità, deve essere nulla

Per una giunzione brusca

$$Q_n = qN_D x_n = q \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} W$$

$$dQ_n = q \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} dW$$ per unità di area

$$V_{bi} - V = \frac{q}{2\varepsilon_s} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} W^2$$

$$\left| dV \right| = \frac{q}{\varepsilon_s} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} W dW = \frac{W}{\varepsilon_s} dQ_n$$

allora

$$C_J = \frac{dQ_n}{dV} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$ per unità di area

come per i condensatori piani

Questo è un risultato generale (non lo dimostriamo ma vale per qualunque distribuzione di droganti nella giunzione) quindi

$$C_J(V) = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s}{2}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}\frac{1}{V_{bi} - V}}$$

giunzione brusca`

$$C_J(V) = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s}{2}\frac{N_D}{V_{bi} - V}}$$

giunzione brusca asimmetrica
$N_A >> N_D$

$$C_J(V) = \sqrt[3]{\frac{qa\varepsilon_s{}^2}{12(V_{bi} - V)}}$$

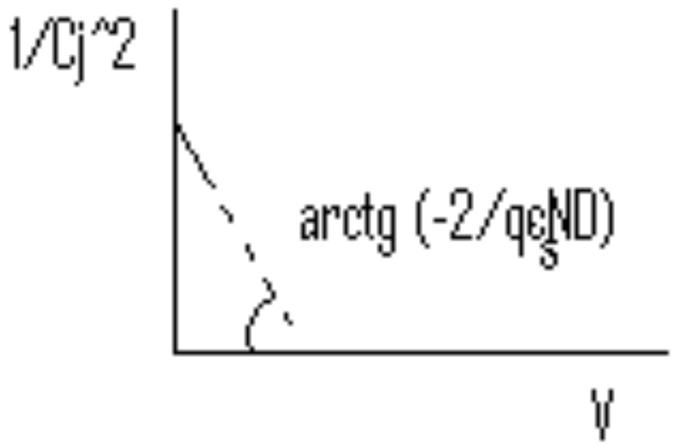
giunzione a gradiente lineare

Metodo C-V

Giunzioni brusche asimmetriche

$$\frac{1}{C_J^2} = \frac{2}{q\varepsilon_s}\frac{V_{bi} - V}{N_D}$$

Misurando $\frac{1}{C_J^2}$ si misurano poi V_{bi} e N_D



Nel caso in cui N_D non fosse costante:

$$N_D(W) = \frac{2}{q\varepsilon_s}\frac{1}{\frac{d(1/C_J^2)}{dV}}$$

Precisazione sulla capacità di svuotamento di una giunzione

La capacità di svuotamento C_J è stata assimilata a quella di un condensatore a facce piane parallele.
E' necessario sottolineare alcuni aspetti importanti:

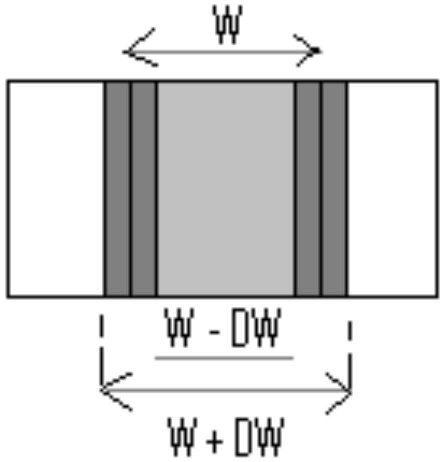
- nel condensatore piano la carica risiede su entrambi i piatti e la capacità è una costante, indipendente dalla tensione applicata
- nella regione di svuotamento le cariche sono distribuite in una regione la cui estensione varia non linearmente con V

C_J quindi non è una costante caratteristica del dispositivo, ma dipende dal suo punto di lavoro

C_J può essere definita, data la tensione di lavoro, solo per piccole variazioni della tensione, cioè tali che la variazione ΔW dell'estensione della zona di svuotamento sia piccola rispetto a W.
Inoltre la relazione

$$C_J = \frac{dQ_n}{dV} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$

è ricavata assumendo valida l'approssimazione di svuotamento che, come abbiamo visto, è ben verificata in inversa:



Un’altra cosa da sottolineare a riguardo della capacità di svuotamento, è che la variazione di carica in gioco è legata al movimento dei portatori di maggioranza.
La “prontezza” di risposta del dispositivo a variazioni della tensione imposta è legata ai tempi con cui i maggioritari si muovono sotto l’azione dei campi elettrici presenti nel materiale.

Misura di capacità di una giunzione

Consideriamo una giunzione p^+-n-n^+ di silicio, la cui area è 10^{-3} cm^2.
La regione n è cresciuta su un substrato n^+ ed ha spessore w_1
Si determini, dato il grafico di $\frac{1}{C_J^2}$ in funzione di V_a, il valore di V_{bi} e quello di w_1

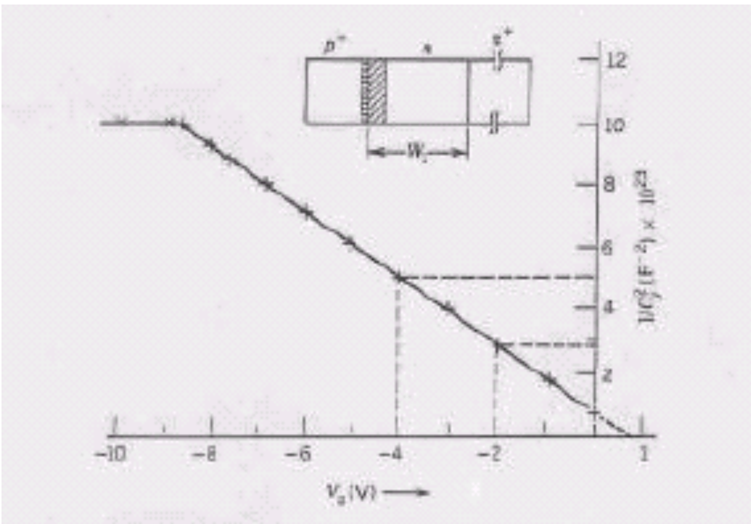


FIGURE 6.7 $1/C_J^2$ versus V_a plot for an abrupt p^+-n junction.

innanzitutto

$$\frac{1}{C_J^2} = \frac{2}{q\varepsilon_s}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\left(V_{bi} - V_a\right)$$

L'intercetta con l'asse x (ottenuta per interpolazione), fornisce il valore di V_{bi}=0.68 V
Per quanto riguarda il coefficiente angolare:

$$\frac{d\left(1/C_J^2\right)}{dV_a} = \frac{(5-2.9)10^{23}}{-4+2} = -\frac{2.1*10^{23}}{-2} =$$

$$= 1.05*10^{23} = \frac{2}{q\varepsilon_s}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}$$

$$\Rightarrow \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} = 1.13*10^4 cm^{-3}$$

D'altronde

$$V_{bi} = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} \Rightarrow N_A N_D$$

$$= n_i^2 e^{\frac{qV_{bi}}{kT}} = 5.91*10^{31} cm^{-6}$$

$$N_D = 1.31*10^{14} cm^{-3}$$

$$N_A = 4.55*10^{17} cm^{-3}$$

Osserviamo che $\dfrac{1}{C_J^2}$ diventa costante oltre un certo valore di V_a, perché?