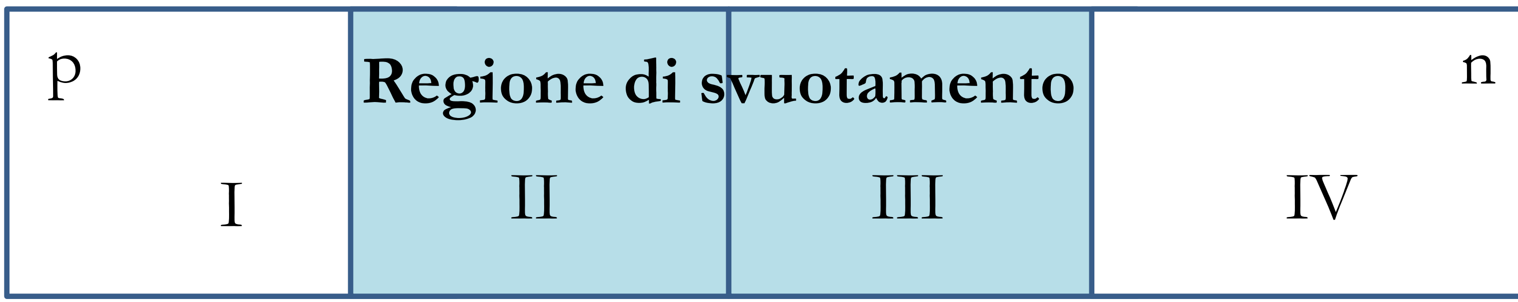
Giunzione Brusca

Dividiamo la giunzione in 4 regioni

Applichiamo l'equazione di Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s} = -\frac{q}{\varepsilon_s}\left(p - n + N_D - N_A\right)$$



$$V_1^{II} = 0 \qquad V_2^{II} = \frac{qN_A}{\varepsilon_s} \qquad V_3^{II} = -\frac{qN_D}{\varepsilon_s} \qquad V_4^{II} = 0$$

Per integrazioni successive, applicando le condizioni precedenti, e raccordando

→→

Giunzione Brusca

$$V_1^I = 0$$

$$V_2^I = \frac{qN_A}{\varepsilon_s}\left(x + x_p\right)$$

$$V_3^I = -\frac{qN_D}{\varepsilon_s}\left(x - x_n\right)$$

$$V_4^I = 0$$

$$V_2^I(0) = V_3^I(0)$$

$$N_A x_p = N_D x_n$$

$$V_1 = 0$$

$$V_2 = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s}\left(x + x_p\right)^2$$

$$V_3 = -\frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x - x_n)^2 + V_{bi}$$

$$V_4 = V_{bi}$$

$$V_2(0) = V_3(0)$$

$$\frac{qN_A}{\varepsilon_s}\frac{x_p^2}{2} = -\frac{qN_D}{\varepsilon_s}\frac{x_n^2}{2} + V_{bi}$$

Giunzione Brusca

$$\begin{cases} \dfrac{qN_A}{\varepsilon_s}\dfrac{x_p^2}{2} = -\dfrac{qN_D}{\varepsilon_s}\dfrac{x_n^2}{2} + V_{bi} \\ N_A x_p = N_D x_n \end{cases}$$

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

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

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

N.B. se entrambi i lati sono molto drogati W si restringe

Giunzione Brusca

Riassumendo, se conosco la concentrazione dei droganti in una giunzione brusca, conosco

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

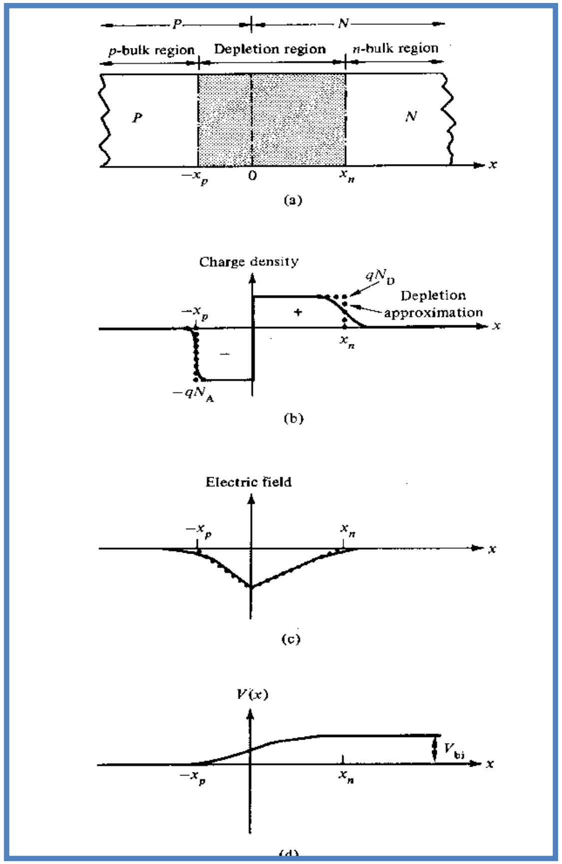
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}\right)V_{bi}}$$

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

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

$$[E_i - E_F]_p = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$[E_F - E_i]_n = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$



Carica netta

Campo elettrico

Potenziale elettrostatico

Curvatura bande

Giunzione Brusca

Se la giunzione è asimmetrica?

Es. $N_A >> N_D$

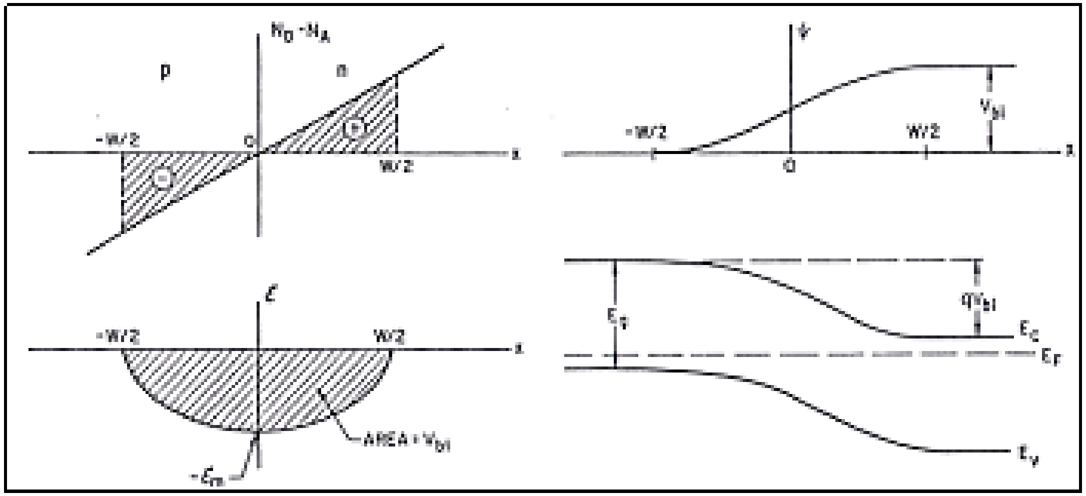
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}\right)V_{bi}} \Rightarrow \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A}{N_D N_A}\right)V_{bi}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_D}\right)V_{bi}}$$

$$x_n = \frac{N_A}{N_D + N_A} W \Rightarrow x_n \approx W$$

$$x_p = \frac{N_D}{N_D + N_A} W \Rightarrow x_n \approx 0$$

Giunzione a gradiente lineare



$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s} = -\frac{q}{\varepsilon_s}(ax)$$

Supponiamo che la concentrazione dei droganti vari con la legge del tipo ax

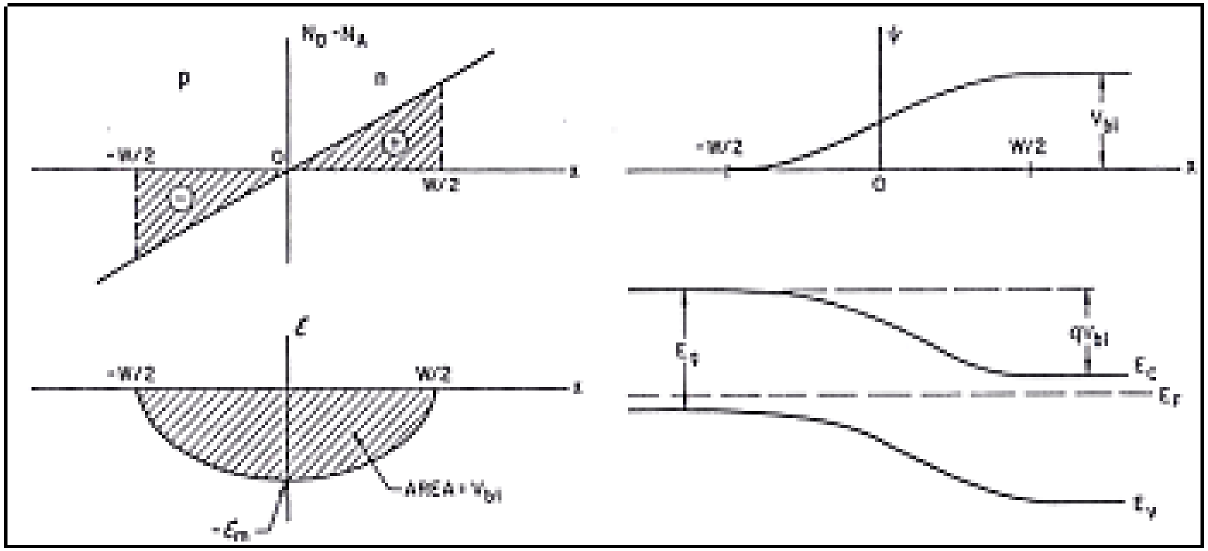
Utilizziamo le stesse approssimazioni fatte nella giunzione brusca vista in precedenza

La regione di svuotamento si estende tra –W/2 e W/2

Provate a svolgere l'esercizio

In questo caso abbiamo solo tre regioni.

Giunzione a gradiente lineare



$$V^{II} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s}$$
$$V^{I} = -\varepsilon(x)$$

$$V_1^{II} = 0 \qquad V_3^{II} = 0$$
$$V_1^{I} = 0 \qquad V_3^{I} = 0$$
$$V_1 = 0 \qquad V_3 = V_{bi}$$

$$V_2^{II} = -\frac{q}{\varepsilon_s} ax$$
$$V_2^{I} = -\frac{1}{2}\frac{q}{\varepsilon_s} ax^2 + B$$
$$B = \frac{1}{2}\frac{q}{\varepsilon_s}\left(\frac{W}{2}\right)^2$$
$$V_2^{I} = -\frac{qa}{2\varepsilon_s}\left[x^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2\right]$$

Giunzione a gradiente lineare

$$V_2 = -\frac{qa}{2\varepsilon_s}\left[\frac{x^3}{3} - \left(\frac{W}{2}\right)^2 x + C\right]$$

$$V_1(-W/2) = V_2(-W/2) = 0$$

$$V_2(W/2) = V_3(W/2) = V_{bi}$$

$$C = -\frac{2}{3}\left(\frac{W}{2}\right)^3$$

$$V_{bi} = \frac{qaW^3}{12\varepsilon_s} \qquad (146)$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_s V_{bi}}{qa}} \qquad (147)$$

Il potenziale di built in

Come calcolo la Vbi (tensione di built-in)?

$$J_N = J_N(trasc.) + J_N(dif.) = q\mu n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{qD_n}{q\mu_n n}\frac{dn}{dx} = -\left(\frac{D_n}{\mu_n}\right)\left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{dn}{dx}\right) = -\frac{KT}{q}\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}$$

$$V_{bi} = -\int_{-\infty}^{+\infty}\varepsilon(x)dx = \frac{KT}{q}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{n(x)}\frac{dn}{dx}dx = \frac{KT}{q}\int_{n(-\infty)}^{n(+\infty)}\frac{dn}{n}$$

$$V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln[n]_{n(-\infty)}^{n(+\infty)}$$

$n(+\infty)=n_n=N_D$

$n(-\infty)=n_p$

Giunzione a gradiente lineare

V_{bi} può essere espresso come:

$$V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln\left[\frac{\left(a\frac{W}{2}\right)^2}{n_i^2}\right] = \frac{2KT}{q}\ln\left(\frac{aW}{2n_i}\right) \qquad (148)$$

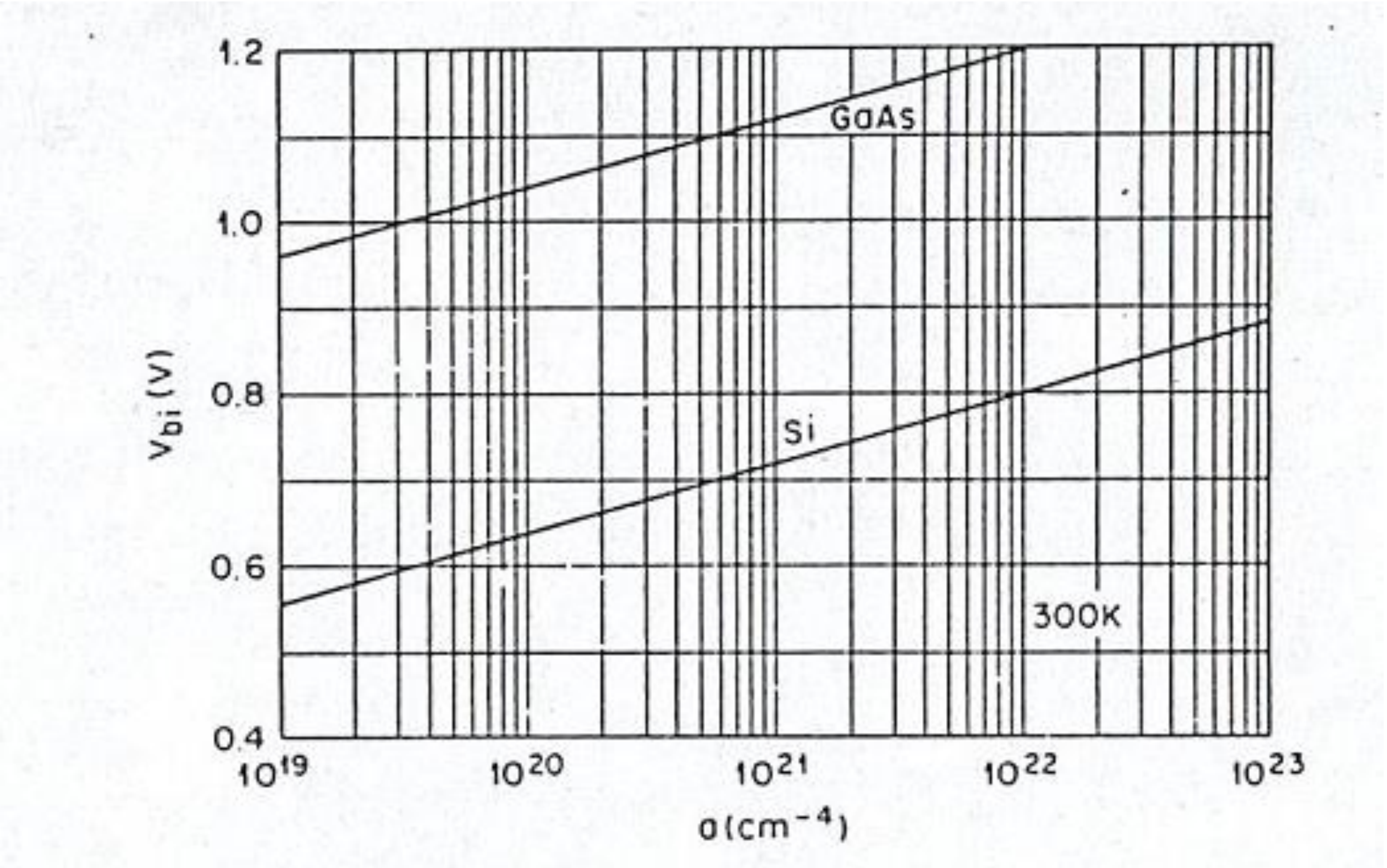
La concentrazione delle impurità varia come ax, da –W/2 a W/2

Per x=-W/2 la concentrazione è uguale -Na=-aW/2, per W/2 è uguale a Nd=aW/2 (i due valori sono identici)

NaNd= $(aW/2)^2$

dove a è il gradiente della concentrazione delle impurità ed è noto

Giunzione a gradiente lineare



Variazione di V_{bi} per giunzioni a gradiente lineare in Si e GaAs in funzione del gradiente di impurità a

La regione di svuotamento
Con tensione applicata

Tensione Applicata: Giunzione Brusca

Consideriamo innanzitutto un diodo all'equilibrio, cioè senza tensione applicata.

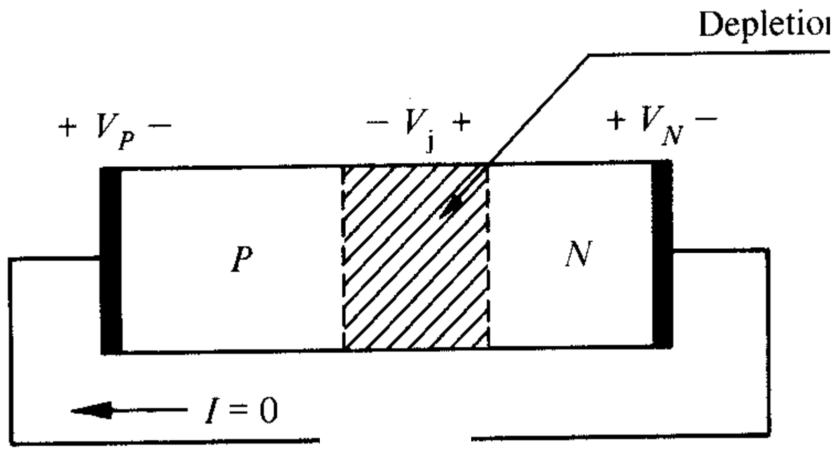
Pensiamolo inserito in un ipotetico circuito.

Dobbiamo contattarlo ai lati con contatti metallici.

Si creano dei potenziali di contatto tali da annullare la V_{bi}.

Il diodo NON può essere utilizzato come generatore!

Sia V_j il potenziale ai capi della zona di svuotamento, che, all'equilibrio termodinamico, vale V_{bi}.

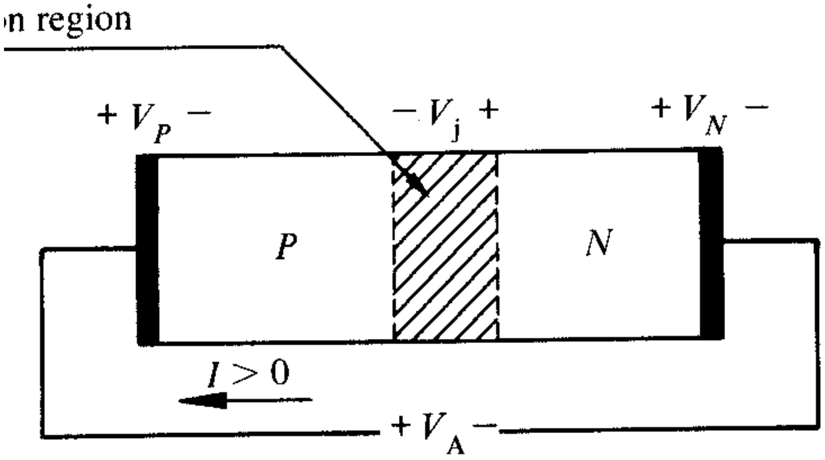


Applichiamo l'equazione di Kirchoff alle tensioni:

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

Tensione Applicata: Giunzione Brusca

Cosa succede se applichiamo una tensione?



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

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

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.
Usando l'approccio di prima, nella zona n:

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

→

Tensione Applicata: Giunzione Brusca

Considerando V_{bi}-V_A al posto di V_{bi} otteniamo:

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

$$V(x) = (V_{bi} - V_A) - \frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x - x_n)^2 \quad (149)$$

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

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}(V_{bi} - V_A)} \quad (150)$$

Tensione Applicata

In zona p, il potenziale resta invariato, ma cambia l'estensione della regione di svuotamento

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

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

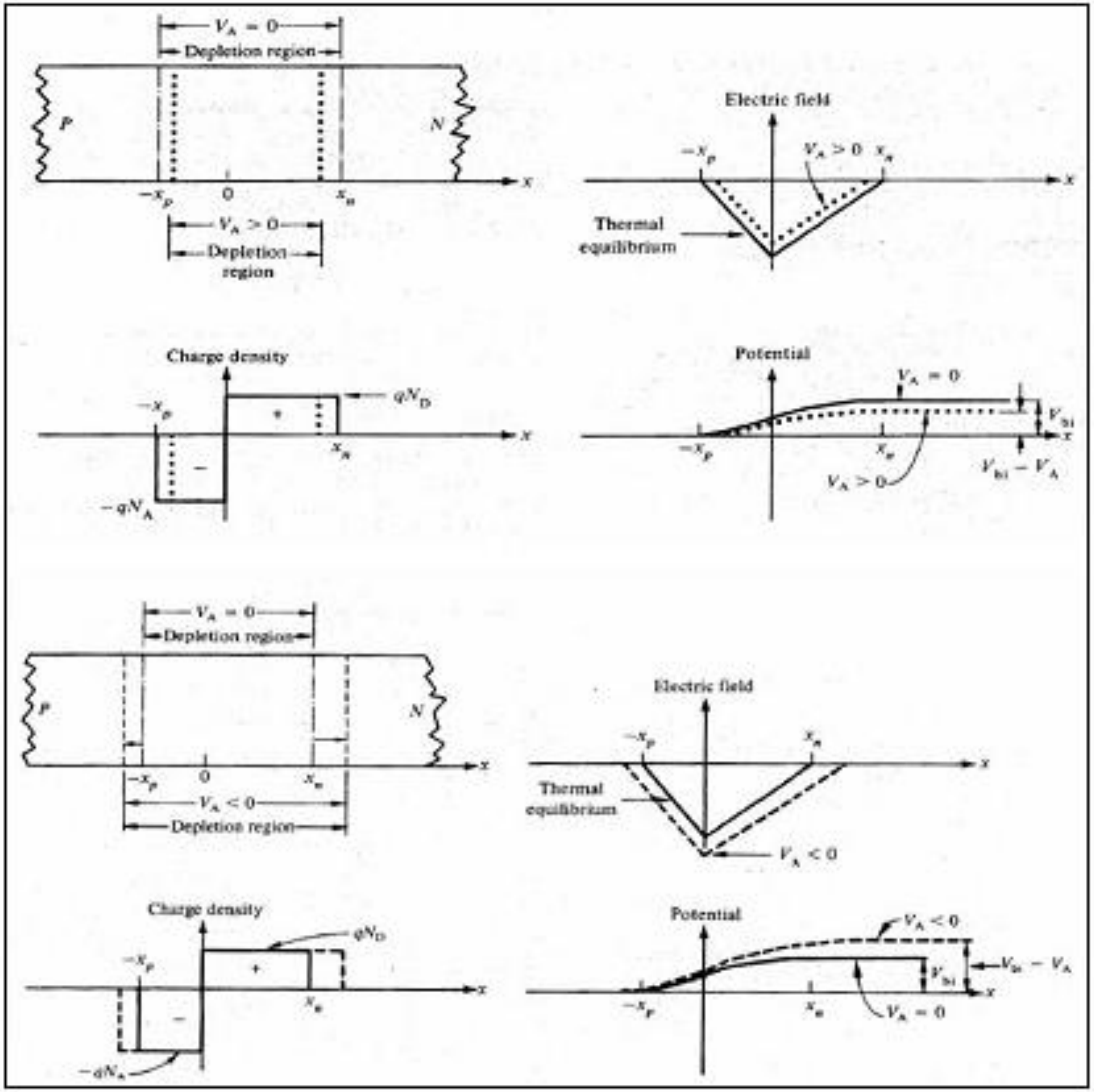
$$x_p = \frac{N_A}{N_A + N_D}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}(V_{bi} - V_A)} \qquad (151)$$

Analogamente, per la giunzione a GL si ottiene:

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

$$W = \left[\frac{12\varepsilon_s}{qa}\left(V_{bi} - V_A\right)\right]^{1/3} \qquad (152)$$

Tensione Applicata: effetti sula giunzione



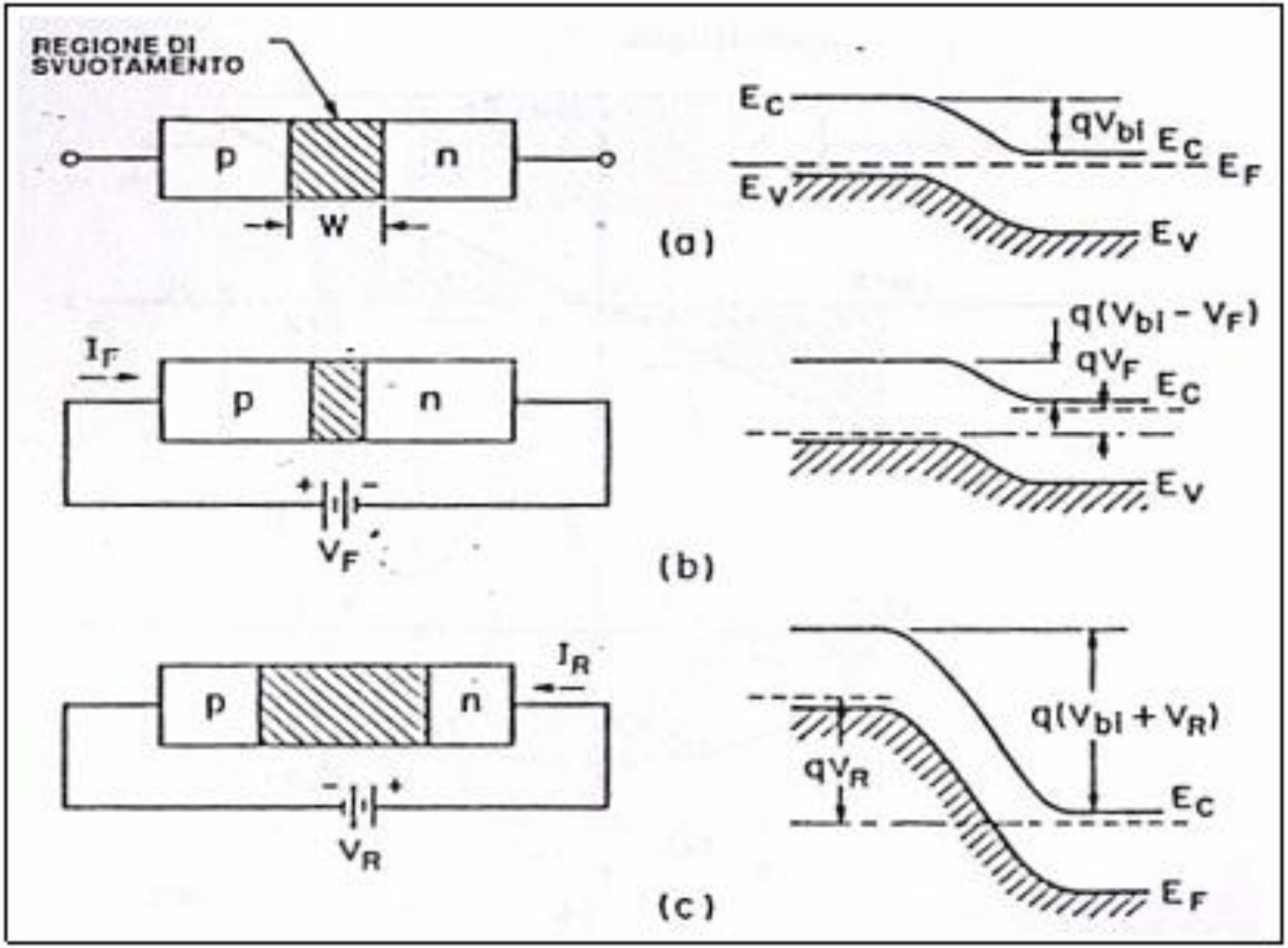
Tensione Applicata

- La **polarizzazione diretta** della giunzione provoca una **diminuzione dell'estensione della regione di svuotamento,** che dunque può contenere **minor densità di carica** e sarà soggetta ad un **campo elettrico meno intenso**

- Nel caso di **polarizzazione inversa**, invece, l'aumento di potenziale provoca **l'aumento dell'estensione della regione di svuotamento**, che, contenendo una **maggiore densità di carica,** risulterà soggetta ad un **campo elettrico maggiore**

- Da un punto di vista della struttura a bande, l'applicazione di un potenziale provoca una sua ulteriore distorsione

Tensione Applicata



ESERCIZIO 1

Si consideri una giunzione brusca pn all'equilibrio e a temperatura ambiente, in cui $N_A = 2x10^{16} cm^{-3}$ e $N_D = 8x10^{15} cm^{-3}$

- si determini il potenziale di built in e l'estensione della zona di svuotamento

Ricordiamo che:
All'estremità della zona p la concentrazione di lacune è uguale a N_A
Le stesse considerazioni possono essere fatte nella zona n

Da cui:
$\Psi_p=(Ei\text{-}Ef)_p/q$
$\Psi_n=(Ei\text{-}Ef)_n/q$

$$n_n = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_i}{kT}\right] \Rightarrow \left[E_F - E_i\right]_n = kT \ln\left[\frac{n_n}{n_i}\right] = kT \ln\left[\frac{N_D}{n_i}\right]$$

$$p_p = n_i \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right] \Rightarrow \left[E_i - E_F\right]_p = kT \ln\left[\frac{p_p}{n_i}\right] = kT \ln\left[\frac{N_A}{n_i}\right]$$

$\Psi_p = 366mV$
$\Psi_n = 342mV$
In definitiva $V_{bi}=0,708V$

che avremmo potuto ricavare anche da
$(kT/q)\ln[N_A N_D/n_i^2]$

$W=[(2\varepsilon_s V_{bi}/q)(1/N_A+1/N_D)]^{1/2}=0,403\mu m$

$x_n=[N_A/(N_A+N_D)]W$
$x_p=[N_D/(N_A+N_D)]W$

$\varepsilon_s=\varepsilon_r\varepsilon_0$
$\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m
$\varepsilon_{r\text{-}s}=11.9$
$q= 1.6 \times 10^{-19}$ C

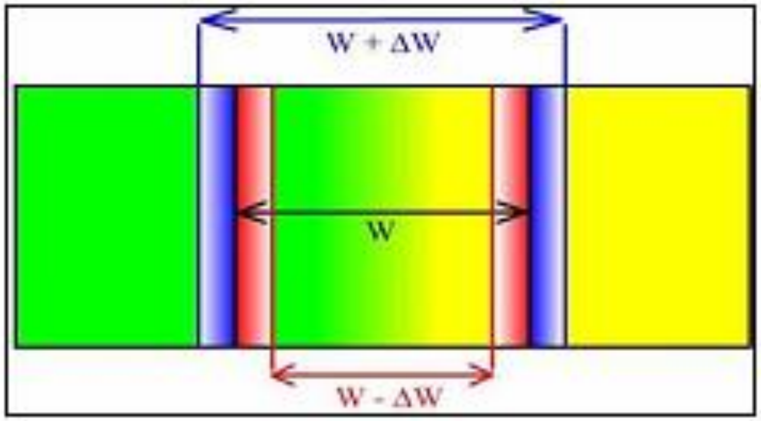
Xn=0,288μm
Xp=0,115μm

Effetti capacitivi
Capacità di svuotamento

Capacità di svuotamento

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

$$C_J = \frac{dQ}{dV} \tag{153}$$



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

Capacità di svuotamento

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

$$dQ_n = q\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}dW$$

Densità di carica

$$V = (V_{bi} \pm V_A) = \frac{q}{2\varepsilon_s}\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}W^2$$

$$|dV| = \frac{q}{\varepsilon_s}\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}WdW = \frac{W}{\varepsilon_s}dQ_n$$

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

Capacità per unità di area

Capacità di svuotamento: precisazioni

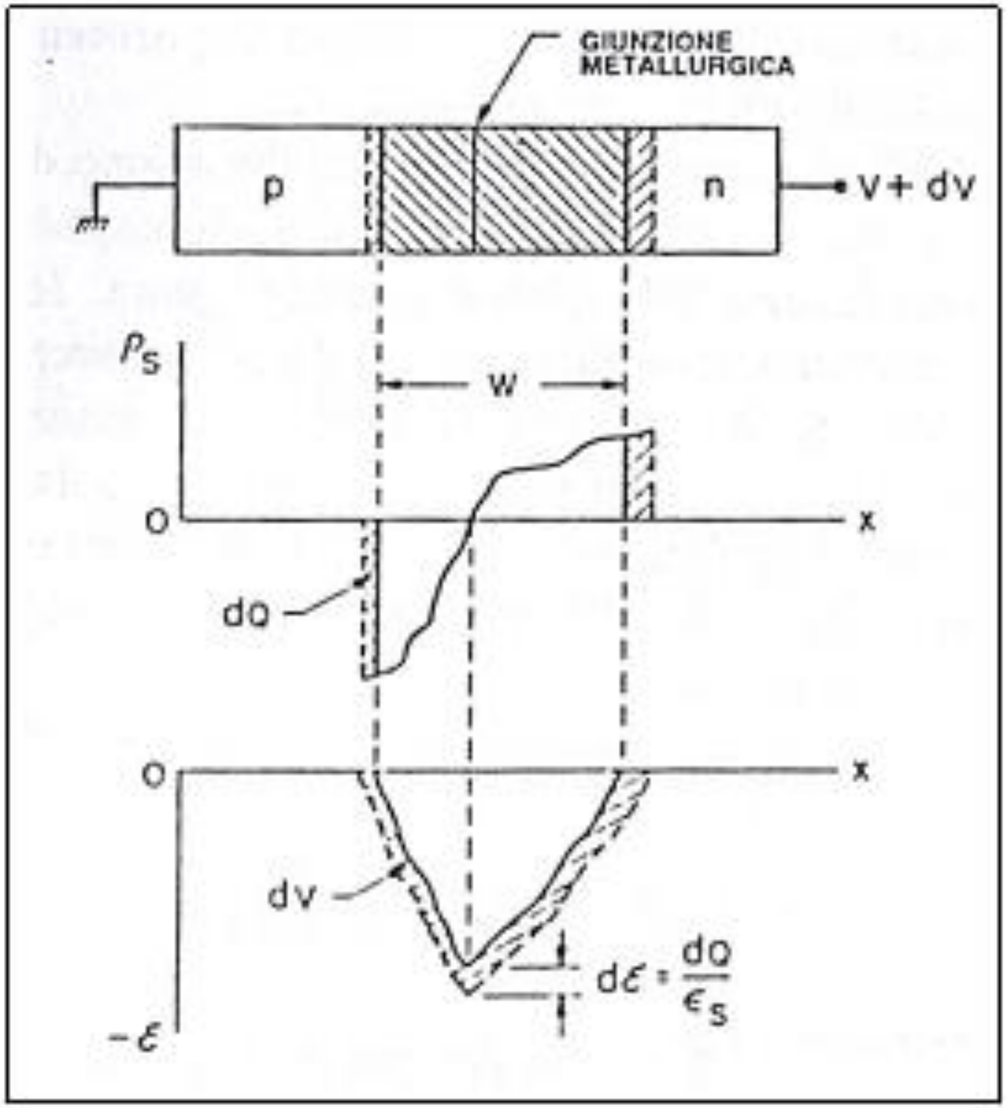
Analogia tra quest'ultima relazione capacità dei condensatori piani, anch'essa proporzionale, per unità di area, alla costante dielettrica del mezzo in modo diretto ed alla distanza tra le armature in modo inverso

Esistono delle fondamentali differenze tra questi due casi:

1. la densità di carica per il condensatore piano è distribuita sulle armature dello stesso, mentre, *nel caso della giunzione, la carica è distribuita nello spazio*;
2. la distanza tra le armature per un condensatore piano è una costante, per cui è costante anche la sua capacità, mentre la *capacità di svuotamento dipende dall'ampiezza della regione, che non è una costante ma una funzione del potenziale*;
3. *la misura della capacità di svuotamento è verificata solo per variazioni della regione di svuotamento ΔW piccole rispetto a W*, e la stessa relazione è valida solo se si sfrutta l'approssimazione di svuotamento

Capacità di svuotamento

Tale relazione può essere generalizzata a qualsiasi tipologia di distribuzione di carica



Capacità di svuotamento

Tale relazione può essere generalizzata a qualsiasi tipologia di distribuzione di carica

$$C_J(V) = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s}{2}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}\frac{1}{V_{bi} - V}}$$ giunzione brusca (155)

$$C_J(V) = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s}{2}\frac{N_D}{V_{bi} - V}}$$ giunzione brusca asimmetrica $N_A >> N_D$ (156)

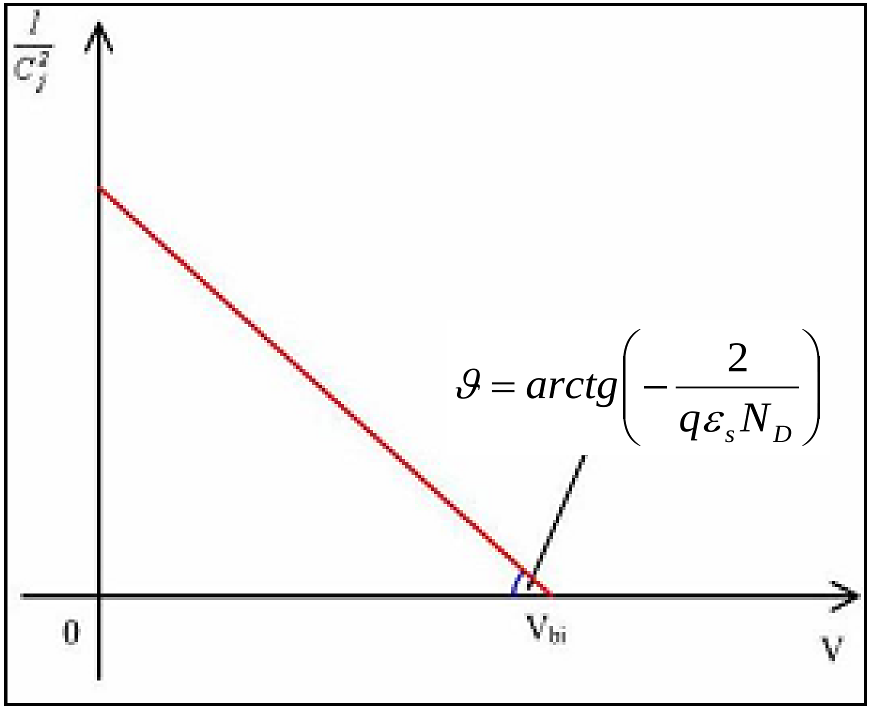
$$C_J(V) = \sqrt[3]{\frac{qa\varepsilon_s^{\,2}}{12(V_{bi} - V)}}$$ giunzione a gradiente lineare (157)

Metodo C-V

Dalle relazioni precedenti si evince che, nota la capacità di svuotamento, è possibile ricavare alcuni dati importanti della giunzione

Giunzione brusca asimmetrica:

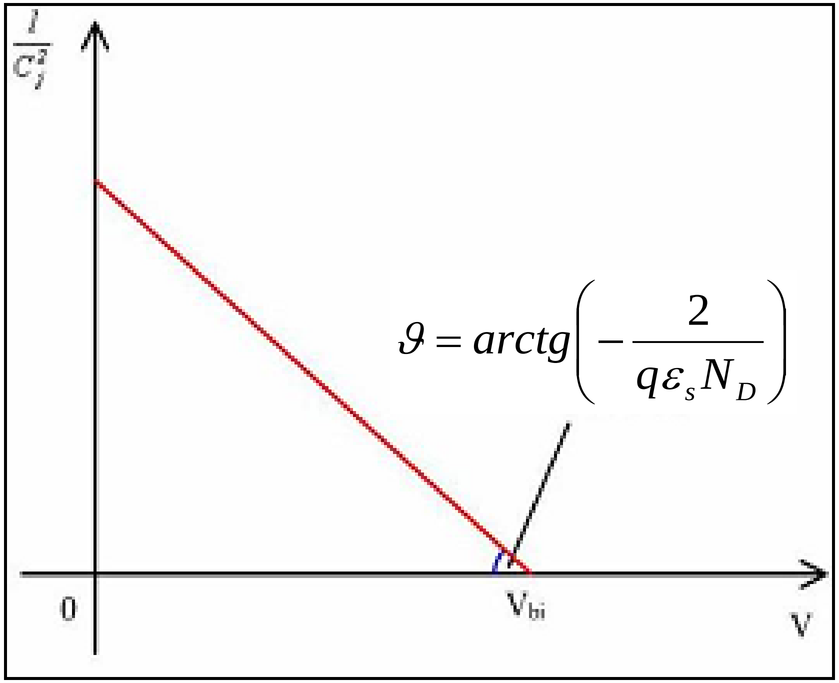
$$\frac{1}{C_J^2} = \frac{2}{q\varepsilon_s}\frac{V_{bi} - V}{N_D}$$



Noto l'andamento di C_j in funzione della tensione posso determinare V_{bi} (intercetta) e drogaggio

Metodo C-V

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



Per V=Vbi 1/Cj^2=0

Cj→∞!!!

Se V=Vbi le bande sono piatte!

W=0

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

ESERCIZIO

Si consideri una giunzione p-n della quale si conosce l'area di giunzione Ag=1mm^2. Si considerino inoltre $\tau_p = \tau_n = 10^{-6}$ s. Su tale dispositivo sono state effettuate le misure C-V riportate in tabella.

C (F)	V (V)
0.774E-10	0
0.394E-10	-2
0.271E-10	-5
0.233E-10	-7

Dopo avere determinato la tipologia di giunzione pn, determinare il valore della tensione di built in

Suggerimento,
Plottare l'inverso del quadrato e del cubo della Cj in funzione della tensione

$1/Cj^2$	**V (V)**
	0
	-2
	-5
	-7

$1/Cj^3$	**V (V)**
	0
	-2
	-5
	-7

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

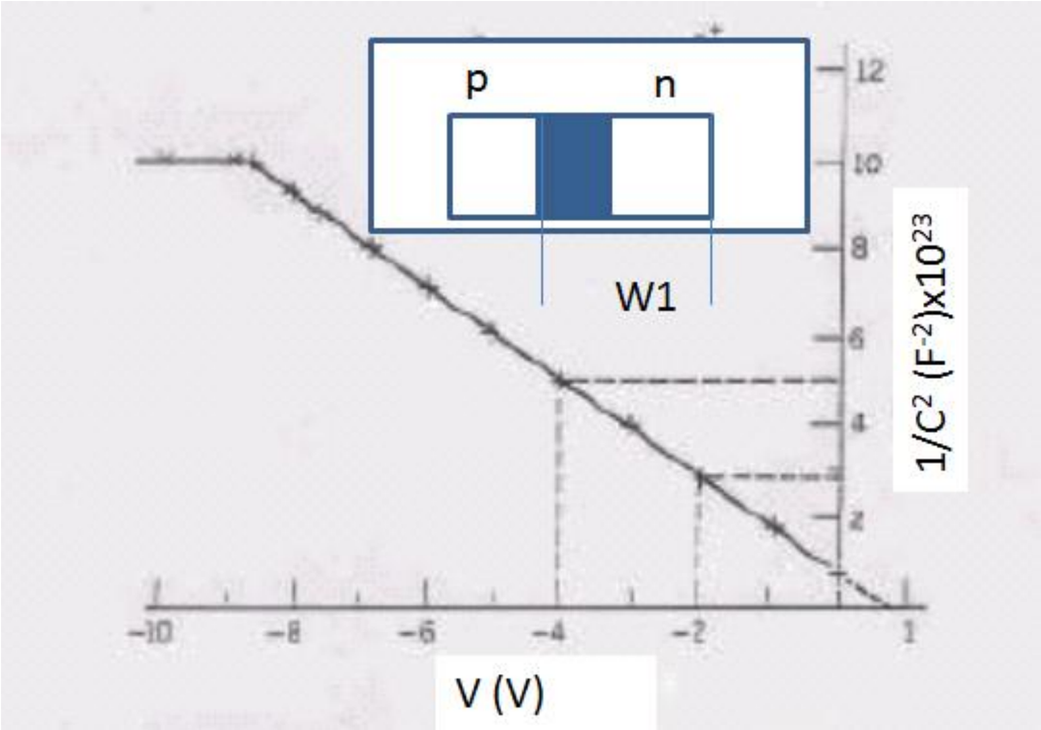
$$C_J(V) = \sqrt[3]{\frac{qa\varepsilon_s^{\ 2}}{12(V_{bi} - V)}}$$

C_j	$(1/C_j)^2$	V
0.774E-8	1.67E16	0
0.394E-8	6.45E16	-2
0.271E-8	1.36E17	-5
0.233E-8	1.84E17	-7

$$m = (y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)$$
$$q = (y_2 x_1 - y_1 x_2)/(x_1 - x_2)$$

Esercizio

Si consideri una struttura p – n brusca con il seguente andamento della capacità di svuotamento in funzione della tensione applicata



Nota l'area della giunzione, pari a 10^{-3} cm^2, determinare :

a) il valore di Vbi

b) Supponendo che la giunzione sia p^+-n determinare W1