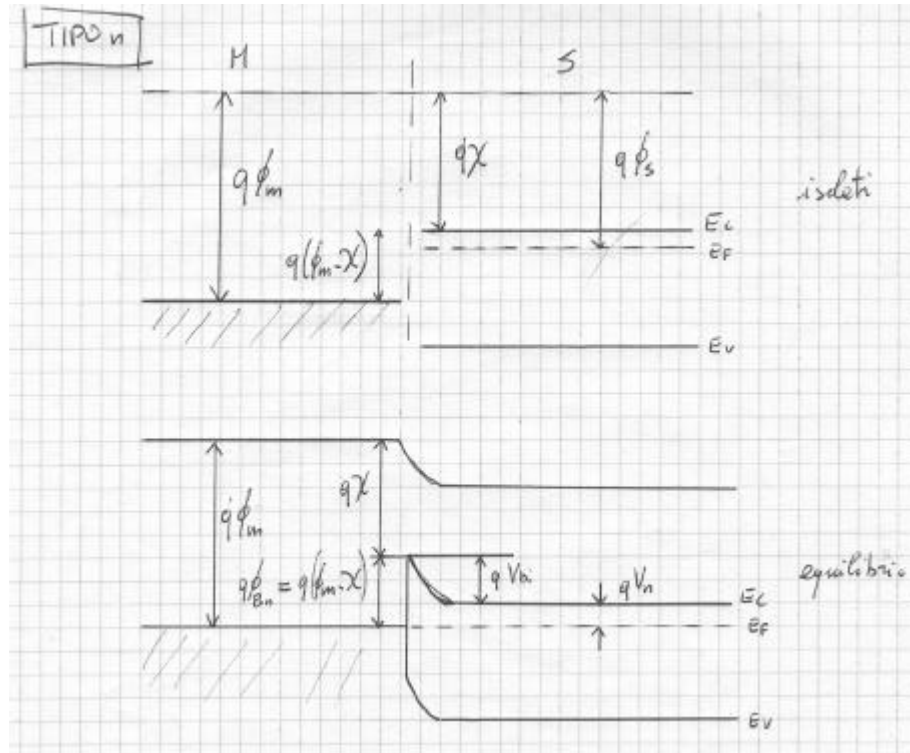


## Contatto Metallo-Semiconduttore



Definizioni:

$q\Phi_{Bn}$  = altezza di barriera (su semiconduttore n)

$V_{bi}$  = potenziale di built-in

$\Phi_m$  = funzione lavoro nel metallo

$\chi$  = affinità elettronica nel semiconduttore

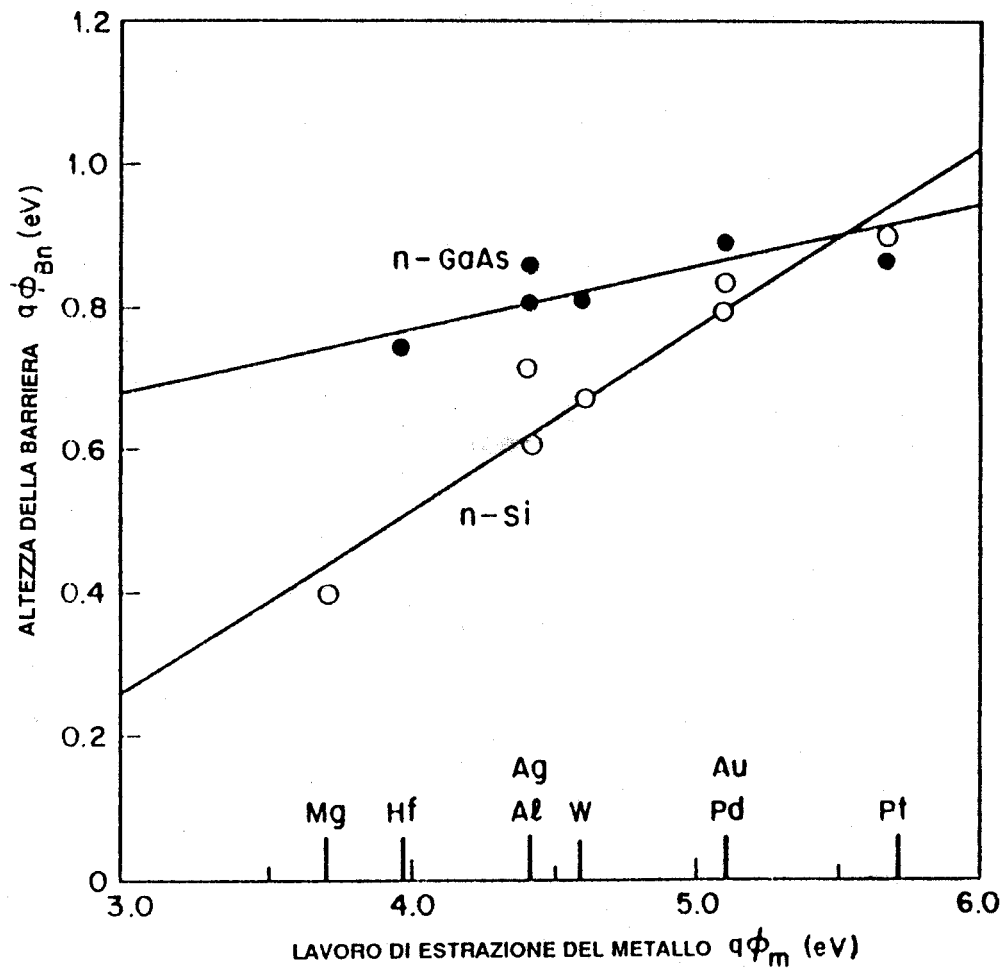
$qV_n$  = differenza di potenziale tra  $E_C$  ed  $E_F$

Di conseguenza:

$$\Phi_{Bn} = \Phi_m - \chi$$

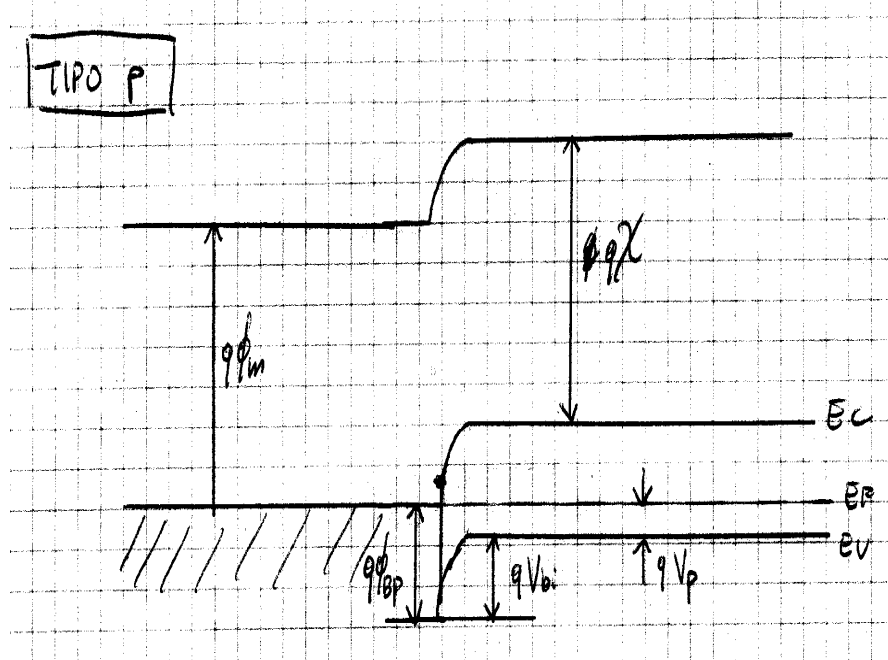
$$V_{bi} = \Phi_{Bn} - V_n$$

Si noti come  $\Phi_{Bn}$  non dipende dal drogaggio del semiconduttore.



Altezza di barriera misurata nel caso di un contatto metallo-silicio e di un contatto in Arseniuro di Gallio.

## Tipo p



$q\Phi_{Bp}$  = altezza di barriera (su semiconduttore p) E' negativa

$qV_p$  = differenza  $E_V - E_F$

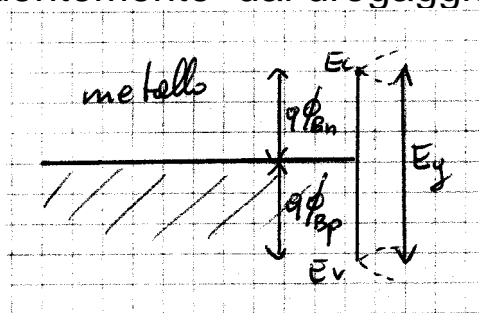
Di conseguenza

$$q\Phi_{Bp} = E_g - q(\Phi_m - \chi)$$

E quindi

$$q(\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp}) = E_g$$

Questo dice che, dato un metallo ed un semiconduttore specifici, la somma delle altezze di barriera per contatti metallo-semiconduttore p e n è sempre uguale a  $E_g$  indipendentemente dal drogaggio.

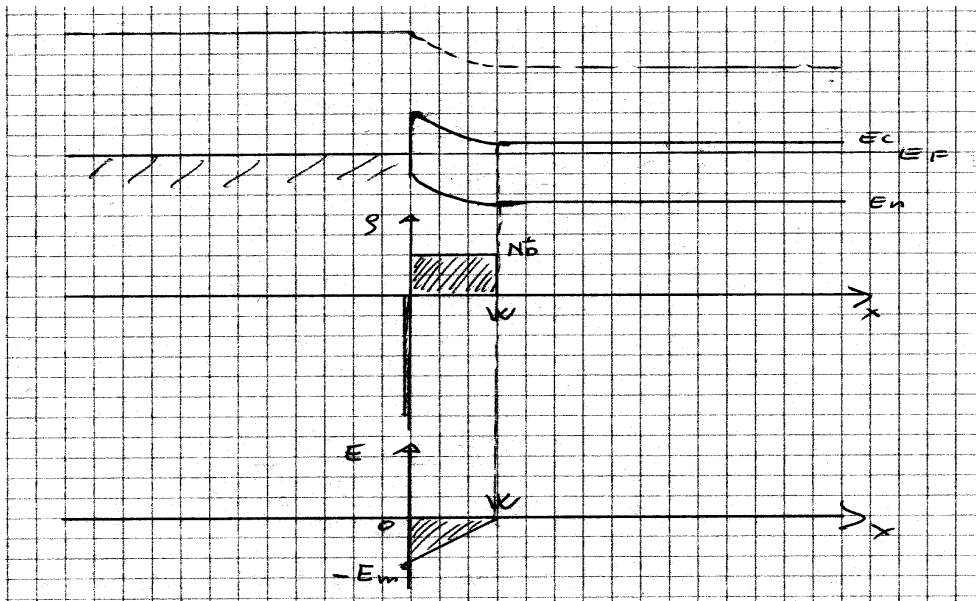


Semiconduttore a qualsiasi drogaggio.

## Tipo n

La curvatura delle bande è tutta nel semiconduttore:

- si forma una regione svuotata;
- la carica fissa  $N_D^+$  viene bilanciata da un sottile strato di carica negativa (elettroni) nel metallo, all'interfaccia;
- potenziale e campo, nel semiconduttore, diventano uguali a quelli di una giunzione brusca asimmetrica  $p^+n$ .



$$W = \sqrt{\frac{2e_s}{qN_D} (V_{bi} - V)}$$

Con polarizzazione  $V$   
(il metallo fa da +)

$$E(x) = -\frac{qN_D}{e_s} (W - x)$$

$$E_m = E(0) = -\frac{qN_D}{e_s} W = \frac{2}{W} \frac{qN_D}{2e_s} W^2 = \frac{2(V_{bi} - V)}{W}$$

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

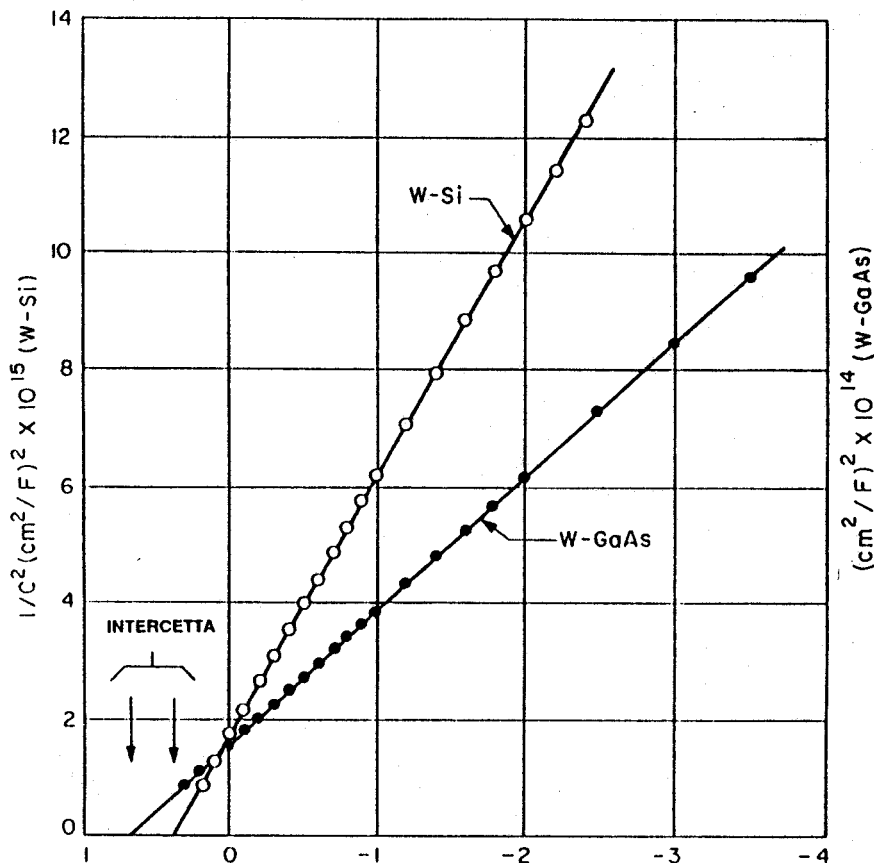
Allo stesso modo, nel semiconduttore, per unità di area:

$$Q_{sc} = qN_D W = \sqrt{2q e_s N_D (V_{bi} - V)}$$

$$C = \frac{Q_{sc}}{V} = \sqrt{\frac{q e_s N_D}{2(V_{bi} - V)}} = \frac{e_s}{W}$$

Da questa si deduce la possibilità di utilizzare il metodo C-V:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q e_s N_D} \quad \frac{d}{dV} \left( \frac{1}{C^2} \right) = \frac{2}{q e_s N_D} \quad N_D = - \frac{2}{q e_s} \frac{1}{\frac{d}{dV} \left( \frac{1}{C^2} \right)}$$



Curve di  $1/C^2$  in funzione della tensione applicata per diodi W-Si e W-GaAs.<sup>3</sup>

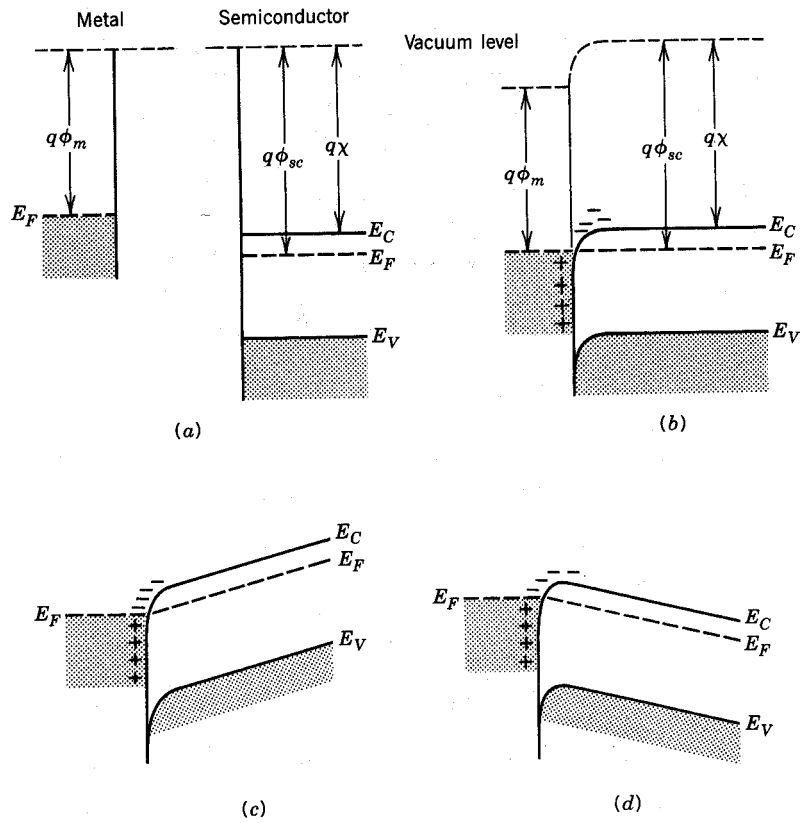
Noto  $N_d$ , si ha:

$$E_C - E_F = V_n$$

Misurato  $V_{bi}$  come intercetta di  $1/C^2$  con l'asse delle ascisse, si ottiene:

$$\Phi_{Bn} = V_{bi} + V_n$$

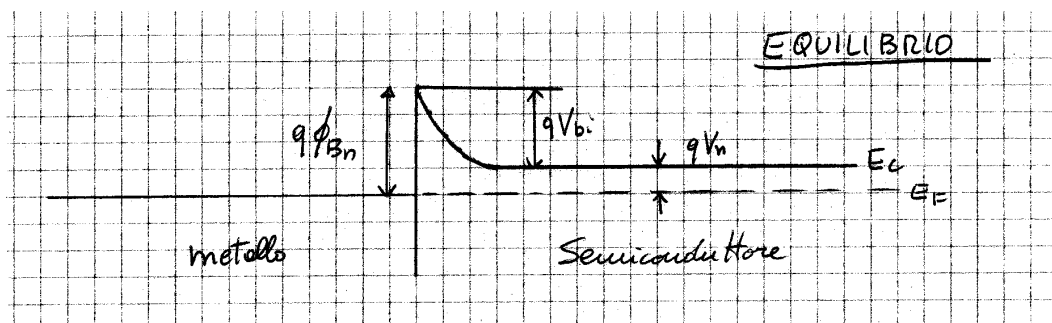
Caso  $\Phi_m < \Phi_s$



**FIGURE 10.9** Energy band diagrams of a metal-*n*-type semiconductor with  $\phi_m < \phi_{sc}$ . (a) Materials isolated from each other, (b) contact at thermal equilibrium, (c) negative bias on the semiconductor, and (d) positive bias on the semiconductor.

## Caratteristiche corrente-tensione

In un contatto metallo-semiconduttore n, la barriera non preclude completamente il passaggio agli elettroni (sia in una direzione che nell'altra), ma lo limita a quelli con energia superiore alla barriera stessa.



La quantità di questi elettroni è data da (per unità di volume):

$$n_m = \int_{q\phi_{Bn}}^{\infty} f(E) g_m(E) dE \quad n_{sc} = \int_{q\phi_{Bn}}^{\infty} f(E) g_{sc}(E) dE$$

↑
↑  
 densità degli stati nel metallo      densità degli stati nel semiconduttore

Si osservi che nel semiconduttore  $n_{cs} = n_s$  è cioè la densità superficiale all'interfaccia.

Poiché, in un semiconduttore  $n = N_C \exp\left\{-\frac{E_C - E_F}{kT}\right\}$

e poiché all'interfaccia  $E_C - E_F = q\phi_{Bn}$

Si ha

$$n_s = N_C \exp\left\{-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right\} \quad (V_n = E_{Cbulk} - E_F)$$

In altra forma

$$n_s = N_C \exp\left\{-\frac{qV_n}{kT}\right\} \exp\left\{-q\frac{\phi_{Bn} - V_n}{kT}\right\} = n_0 = N_D$$

Ossia:

$$n_s = N_D \exp\left\{-\frac{qV_{bi}}{kT}\right\} \quad (V_{bi} = \Phi_{bn} - V_n)$$

Il flusso di elettroni che va dal semiconduttore al metallo sarà proporzionale a  $n_s$ , dando luogo ad una corrente  $J_s = -q n_s v_n$  dove  $v_n$  è la velocità media attraverso la barriera:

$$\begin{aligned} |J_s| &= C_1 n_s = C_1 N_D \exp\left\{-\frac{qV_{bi}}{kT}\right\} \\ &= C_1 N_D \exp\left\{-\frac{qV_{bi}}{kT}\right\} \end{aligned}$$

All'equilibrio, la corrente opposta, dovuta al moto degli elettroni dal metallo al semiconduttore, avrà lo stesso valore

$$|J_{m@s}| = |J_{s@m}| \quad \text{all'equilibrio}$$

### NON EQUILIBRIO

Quando si applica una tensione  $V$  al sistema (indicheremo  $V$  positiva, in analogia alla giunzione, quando il potenziale è più negativo in  $n$  che nel metallo) il potenziale di built-in  $V_{bi}$  viene corretto in  $V_{bi} - V$ .

In queste condizioni di non-equilibrio:

$$\begin{aligned} 1) \quad J_{m@s} &= C_1 N_D \exp\left\{-\frac{q(V_{bi} - V)}{kT}\right\} \\ &= C_1 N_D \exp\left\{-\frac{qV_{bi}}{kT}\right\} \exp\left\{\frac{qV}{kT}\right\} \\ &= C_1 N_C \exp\left\{-\frac{qV_{bn}}{kT}\right\} \exp\left\{\frac{qV}{kT}\right\} \end{aligned}$$

$$2) \quad J_{s@m} = C_1 N_C \exp\left\{-\frac{qV_{bn}}{kT}\right\} \quad \text{identica a prima, perché la barriera, vista dal metallo è identica}$$



In totale  $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = \underbrace{C_1 N_C}_{J_s} \exp\left(-q \frac{f_{Bn}}{kT}\right) e^{\frac{qV}{kT}} - 1$

La corrente  $C_1 N_C$  risulta dipendere da  $T^2$ , e viene indicata con:

A*	p	n
Si	32	110
GaAs	72	8

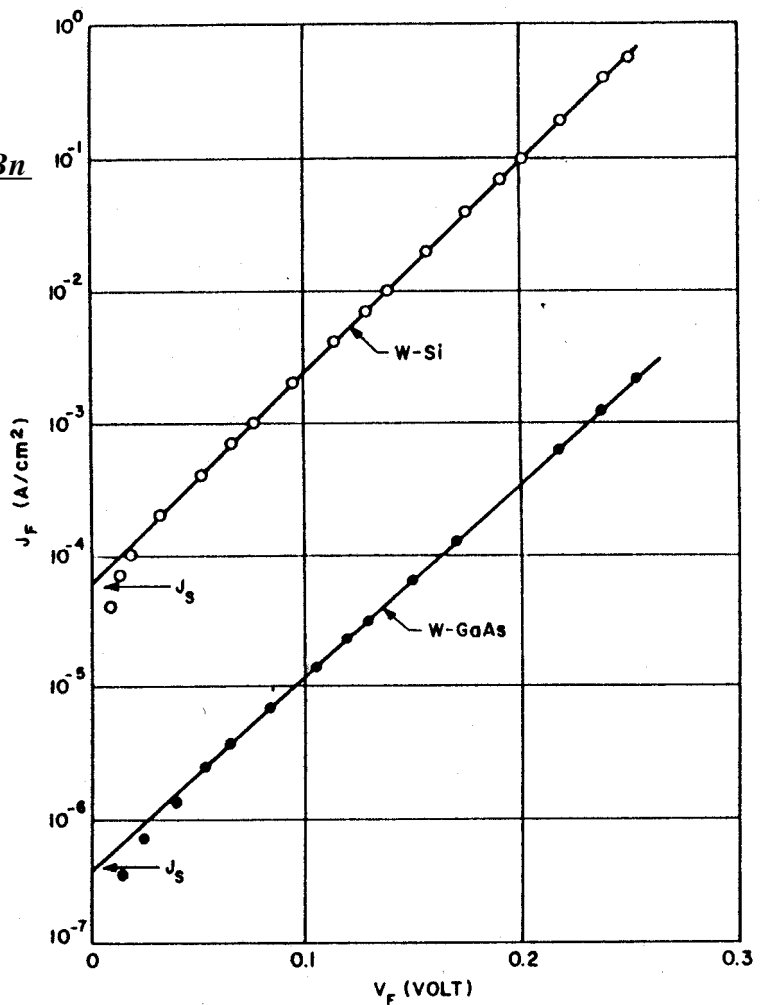
$$C_1 N_C = A^* T^2$$

Costante di Richardson efficace  
(misurata in  $A/k^{-2} \times cm^{-2}$ )

Posto  $J_s = A^* T^2 e^{-\frac{q f_{Bn}}{kT}}$

si ha  $J = J_s e^{\frac{qV}{kT}} - 1$

proprio come nelle giunzioni p-n.



Estrapolando la curva per  $V=0$  (e cioè tracciando la retta che, in scala logaritmica, descrive l'andamento esponenziale puro) si ottiene il valore di  $J_s$ , e da questo quello di  $\Phi_{Bn}$ .

## Corrente di minoritari

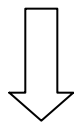
In realtà, il contatto metallico consente un flusso di lacune anche tra il metallo e la banda di valenza del semiconduttore. Questa corrente di minoritari è stimabile come nelle giunzioni p<sup>+</sup>n:

$$J_p = J_{p0} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

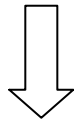
$$J_{p0} = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D}$$

ed è significativa solo ad alti livelli di iniezione.

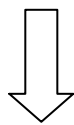
Il confronto tra  $J_{p0}$  e  $J_s$  da la prima, molti ordini di grandezza, inferiore alla seconda.



Il diodo schottky è un dispositivo unipolare. In esso l'unica corrente significativa è quella dei MAGGIORITARI.



Nel diodo Schottky NON si ha Capacità di Diffusione.



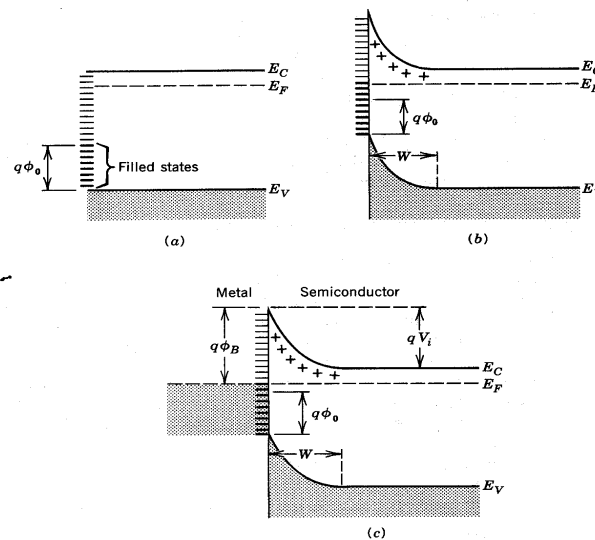
I tempi di commutazione di un diodo Schottky sono più rapidi di quelli di un diodo a giunzione p-n.

## Effetti di interfaccia (teoria di Bardeen-Mead)

Nei casi pratici si osserva che indipendentemente dai valori relativi di  $\Phi_m$  e  $\Phi_s$ , la maggioranza delle combinazioni metallo-semiconduttore forma contatti rettificanti. Inoltre, la teoria prevede che  $\Phi_B$  dipende linearmente da  $\Phi_m$  mentre ciò non si verifica nei semiconduttori a legame covalente. (es. Si, Ge).

Nei semiconduttori a legame covalente, gli atomi in superficie hanno un legame non saturato.

Questo fatto dà origine ad una serie di stati superficiali le cui energie sono distribuite con continuità dentro il gap. Questi stati determinano il livello di Fermi in superficie e perciò influenzano  $\Phi_B$ .



**FIGURE 10.11** Energy band diagrams illustrating the barrier-formation process on *n*-type semiconductor with a large density of surface states. (a) Flat-band condition, (b) surface in thermal equilibrium with the bulk, and (c) semiconductor in contact with a metal.

E' stato calcolato che, nel limite di una densità infinita di stati superficiali,

$$q\Phi_B = E_g - q\Phi_0 \cong (2/3) E_g$$

I semiconduttori a legame ionico non hanno stati superficiali dentro il gap.

Empiricamente  $\Phi_B = S\chi_m + \Phi_0(s)$  per qualunque semiconduttore (con  $\chi_m$  = elettronegatività del metallo).

## Classificazione delle interfacce

Nei casi pratici, è di notevole importanza il comportamento dei due componenti della giunzione da un punto di vista fisico-chimico.

Infatti può succedere che:

- 1) il metallo sia solo fisso-sorbito sulla superficie del semiconduttore senza formare alcun legame chimico;
- 2) il metallo formi un debole legame chimico col semiconduttore senza però formare alcun composto;
- 3) il metallo reagisca col semiconduttore e dia luogo a uno o più composti;
- 4) sul semiconduttore si formi naturalmente un sottile strato di ossido che prevenga il contatto tra metallo e semiconduttore;

Nel caso 1) la teoria di Schottky ideale descrive bene il comportamento della giunzione. Il caso 2) è ben descritto dalla teoria di Bardeen. Nei casi 3) e 4) la barriera è determinata dal tipo di reazione (3) e dal tipo di preparazione delle superfici (4) durante il processo di formazione della giunzione.

### Confronto Schottky - giunzione p-n

#### Vantaggi:

- $J_s \approx 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , molto maggiore che nel caso p-n  $\implies$  a pari corrente corrisponde una caduta di tensione minore;
- fattore di idealità molto vicino a 1;
- velocità di risposta dovuta alla mancanza di  $C_{\text{diff}}$  ;
- minore sensibilità alla temperatura.

#### Svantaggi:

- grande corrente inversa;
- scarsa riproducibilità.

## Deviazioni dall'idealità per un diodo Schottky

$$J = C_1 N_C \exp\left(-\frac{f_B}{kT}\right) e^{\frac{qV}{kT}} - 1$$

$$J_0 = C_1 N_C \exp\left(-\frac{f_B}{kT}\right)$$

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{kT}} - 1$$

$J_0$  è una quantità indipendente dalla tensione applicata. In realtà non è precisamente così. Si tiene conto di questo fatto, attraverso l'uso del fattore di idealità  $\eta$ :

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \quad \eta = 1 \div 1,1 \text{ nei dispositivi reali}$$

Oltre a  $J_0$ , possibili motivi di deviazione rispetto all'idealità sono i seguenti:

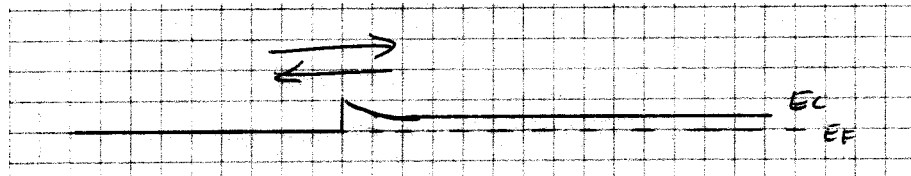
- resistenza serie associata alla zona neutra del semiconduttore (si manifesta per alte correnti);
- $\Phi_B$  non è completamente indipendente dalla tensione applicata. L'effetto di  $V$  è piuttosto lieve ( $\Delta\Phi_B \propto V^{1/4}$ ) ma poiché compare in un esponenziale, le variazioni di  $J_0$  possono essere rilevanti;
- effetti di generazione nella regione di svuotamento. Analogamente al caso p-n, in inversa occorre tener conto anche di:

$$J_{R-G} = \frac{qn_i W}{2t_0}$$

- effetti di interfaccia.

## Contatti metallici (ohmici)

È evidente che, per valori molto bassi della barriera  $q\Phi_{Bn}$ , la asimmetria della conduzione elettrica tra metallo e semiconduttore scompare.

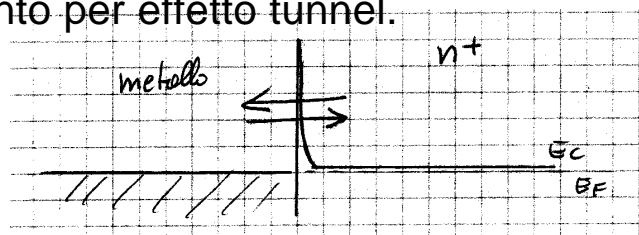


Il contatto non è rettificante, ed assume caratteristiche ohmiche. Il valore della resistenza di contatto è inversamente proporzionale alla corrente, per cui

$$R_C = \frac{1}{\frac{qJ}{eV}} = \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)$$

Quanto minore è  $\Phi_{Bn}$ , tanto minore è  $R_C$ .

In caso di drogaggi molto intensi, tuttavia, il forte restringimento della regione svuotata porta lo spessore della barriera a valori tanto ridotti da consentire il suo attraversamento per effetto tunnel.



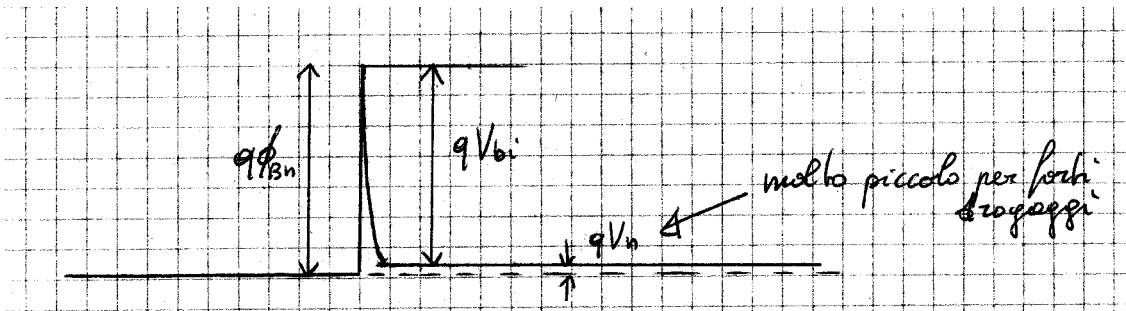
Anche in questo caso la conduzione è bidirezionale, ed il contatto assume caratteristiche ohmiche. (Non sorprende: un semiconduttore fortemente drogato, al limite degenerare, tende ad un comportamento metallico, trasformando la giunzione da metallo-semiconduttore a metallo-metallo).

La resistenza di contatto, proporzionale a  $I^{-1}$ , è quindi inversamente proporzionale alla probabilità di passaggio di una carica per effetto tunnel:

$$I \propto \exp\left[-\frac{2W}{\hbar} \sqrt{\frac{2m_n q (f_{Bn} - V)}{\eta^2}}\right]$$

Poiché

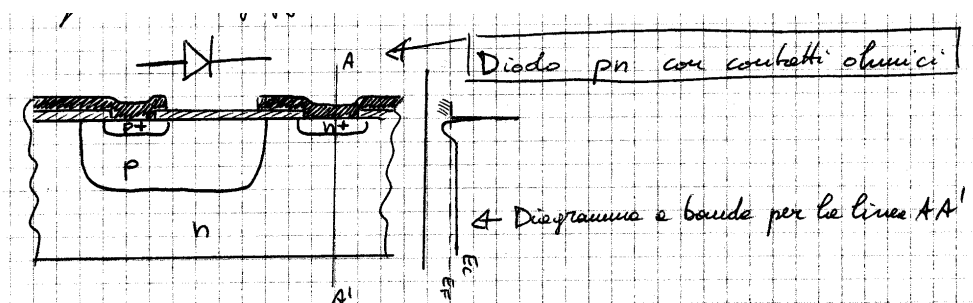
$$W = \sqrt{\frac{2e_s}{qN_D} (V_{Bi} - V)} \gg \sqrt{\frac{2e_s}{qN_D} (f_{Bn} - V)}$$



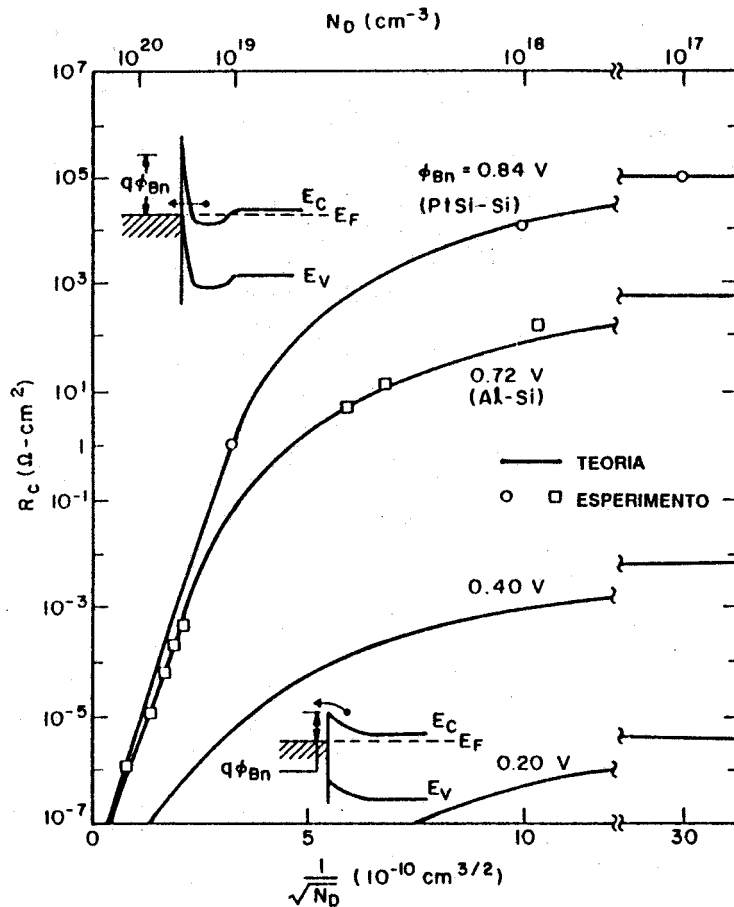
si ha  $I \propto \exp\left[-\frac{C_2 (f_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}}\right]$  con  $C_2 = 2\sqrt{\frac{m_n e_s}{\eta^2}}$

e quindi per piccoli  $V$   $R_C \propto \exp\left[\frac{C_2 f_{Bn}}{\sqrt{N_D}}\right]$

In questo caso si conferma l'opportunità di scegliere bassi valori di  $\Phi_{Bn}$  e si aggiunge l'indicazione di usare forti drogaggi.



Valori calcolati e  
valori misurati di  
resistenza specifica  
di un contatto.



Resistenza specifica:

$$R_C = \frac{1}{\frac{q}{e} \frac{U}{V} \frac{\bar{\sigma}}{\sigma}} \quad \text{W} - \text{cm}^2$$

Per ottenere la resistenza di un contatto, occorre dividere  $R_C$  per l'area di questo, espressa in  $\text{cm}^2$ .

Si noti la scelta dell'Al come metallo di contatto sul silicio, oppure la sua alternativa (molto usata nei dispositivi attuali) PtSi = Siliciuro di Platino.

In quest'ultimo caso, la metallizzazione è fatta da un sottile strato di PtSi, sul quale aderisce l'Al.

