

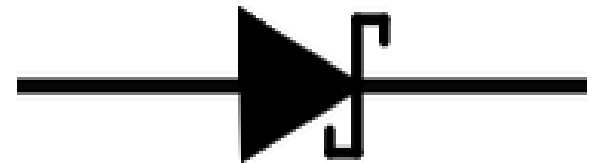
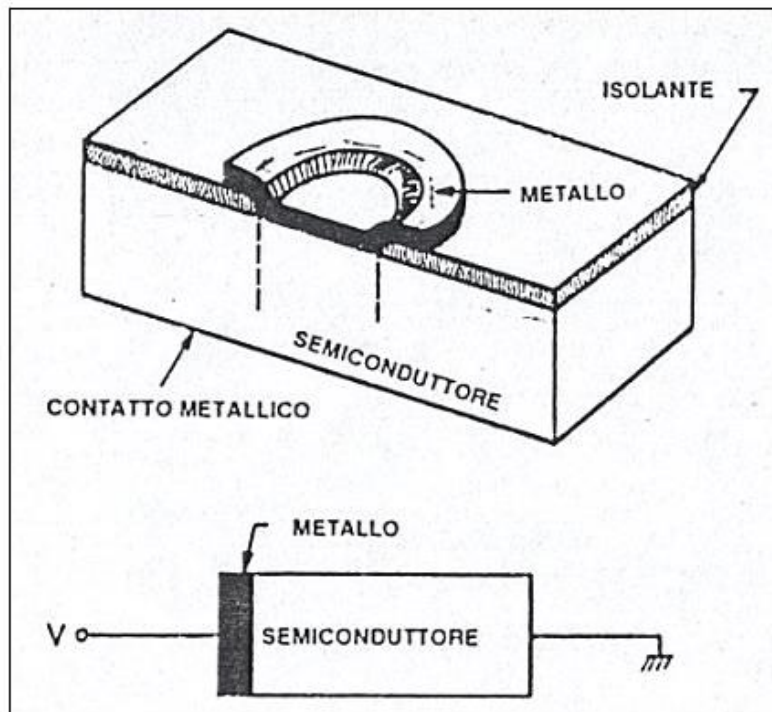
Il contatto metallo/semiconduttore

Contatto Metallo-Semiconduttore

Rappresenta il primo dispositivo a semiconduttore realizzato (1904)

Consisteva in un baffo metallico premuto sulla superficie di un semiconduttore (raddrizzatore a punta di contatto)

Nel 1934 **Schottky** suggerì che il comportamento raddrizzante potesse essere dovuto ad una **barriera di potenziale creata dalla carica spaziale** generate nel semiconduttore (barriere Schottky)



Contatto Metallo-Semiconduttore

Come viene realizzato?

Si parte da un substrato di silicio drogato sul quale è presente un film di ossido di silicio

Su tale film viene aperta una finestra, tramite un processo fotolitografico e attacco chimico

In seguito viene depositato il metallo solo nell'area aperta dell'ossido

Tale deposizione viene fatta in condizioni controllate (alto vuoto)

Anche lo strato di metallo che fuoriesce verrà poi sottoposto ad un processo fotolitografico per definirne l'opportuna geometria

Contatto Metallo-Semiconduttore

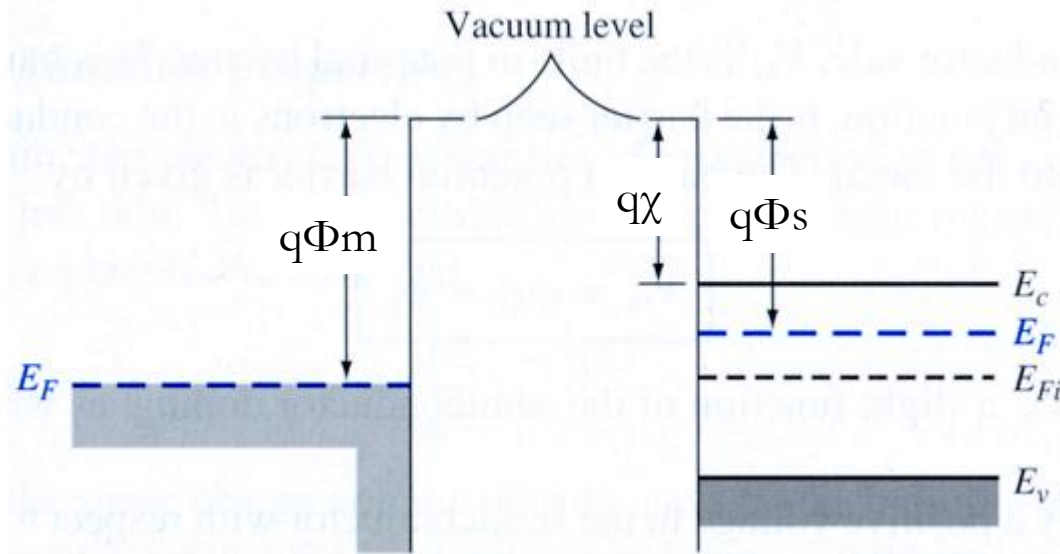
Questa tipologia di dispositivi **non mostra sempre un comportamento raddrizzante**, vedremo che questo dipenderà da differenti fattori.

In realtà, il contatto metallo-semiconduttore **può anche presentare una resistenza di contatto trascurabile** e indipendente dal segno della tensione applicata.

Ogni dispositivo elettronico a semiconduttore presenta dei contatti metallici di questo tipo!

Perché alcune tipologie di contatto metallo-semiconduttore mostrano caratteristiche raddrizzanti?

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n



Definiamo alcune grandezze

$q\Phi_m$ = Funzione lavoro del metallo

$q\Phi_s$ = Funzione lavoro del Semiconduttore

$q\chi$ = Affinità elettronica del Semiconduttore

Cosa succede se entrano in contatto?

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Supponiamo di essere in condizioni di **equilibrio termodinamico**

Nel momento in cui si stabilisce un contatto tra i due materiali (giunzione metallo - semiconduttore), la differenza di energia posseduta causerà un **trasferimento di elettroni**

Questo processo si fermerà non appena i due livelli di Fermi si saranno allineati.

- Il livello di Fermi è costante nella giunzione
- Il livello del vuoto è continuo
- l'affinità elettronica χ dei materiali semiconduttori è costante con la coordinata x

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Supponiamo di considerare un semiconduttore di tipo n

Supponiamo che $q\Phi_M > q\Phi_S$

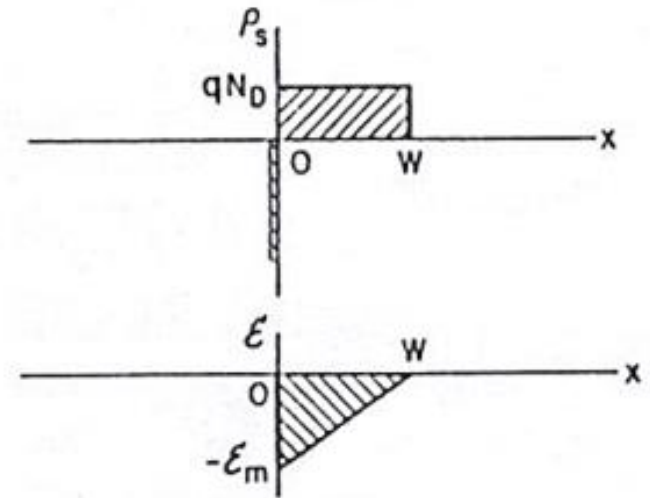
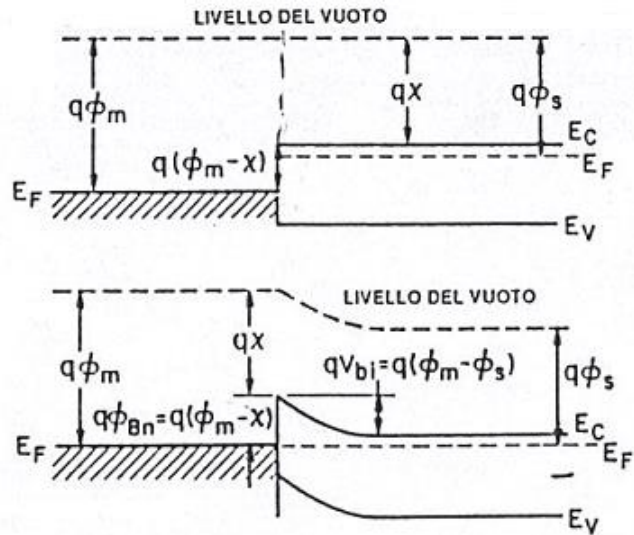
Trasferimento di elettroni dal sistema con E_f maggiore a quello in cui E_f è minore

In questo caso dal semiconduttore n al metallo

Gli elettroni lasciano dietro di se una regione di carica spaziale positiva, che si oppone al flusso degli elettroni stessi (diffusione vs drift)

A regime i livelli di Fermi diventano costanti e il flusso di cariche diventa nullo

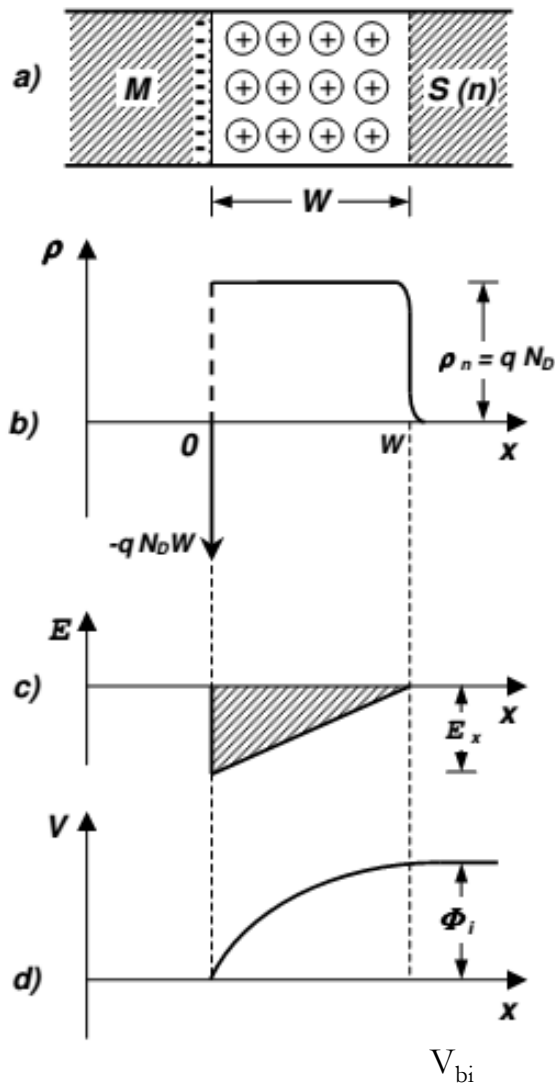
Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n



In equilibrio, il trasferimento di elettroni determina, entro il semiconduttore, una **densità totale di carica diversa da zero**:

- **Regione di carica spaziale** (svuotamento di elettroni)
- Nascita di un **campo elettrico** che agisce in modo da bilanciare la tendenza degli elettroni ad occupare stati energetici a energia più bassa.

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n



Anche in questo caso, **partendo dalla densità di carica** e risolvendo **l'equazione di Poisson**, possiamo determinare il **campo interno** alla giunzione e il **potenziale interno**

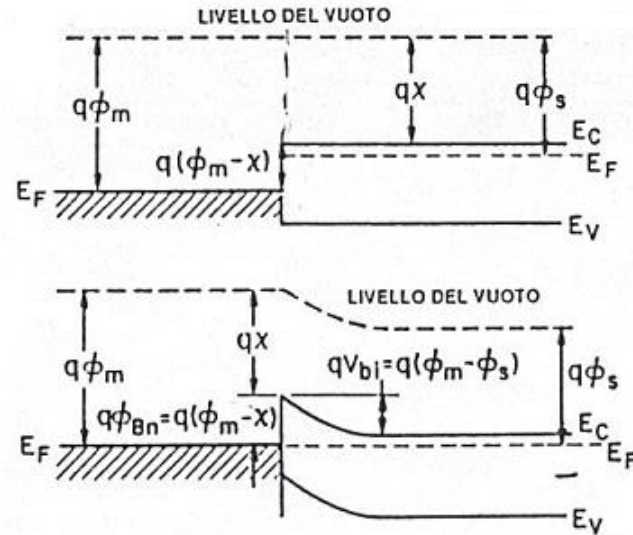
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s}$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s}$$

$$\frac{dV}{dx} = -E$$

Lo vediamo in seguito

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n



$$\Phi_m > \Phi_s$$

Le bande si incurvano verso l'alto, solo sul lato del semiconduttore

- Si crea una barriera di potenziale tra metallo e semiconduttore

$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi) \quad \text{È indipendente dal drogaggio!!!}$$

- Si crea un potenziale di built in

$$qV_{bi} = q(\Phi_m - \Phi_s) \quad [\text{N.B. } q\Phi_{Bn} > qV_{bi}]$$

$$V_{bi} = \Phi_{Bn} - V_n \quad [qV_n = E_F - E_C]$$

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

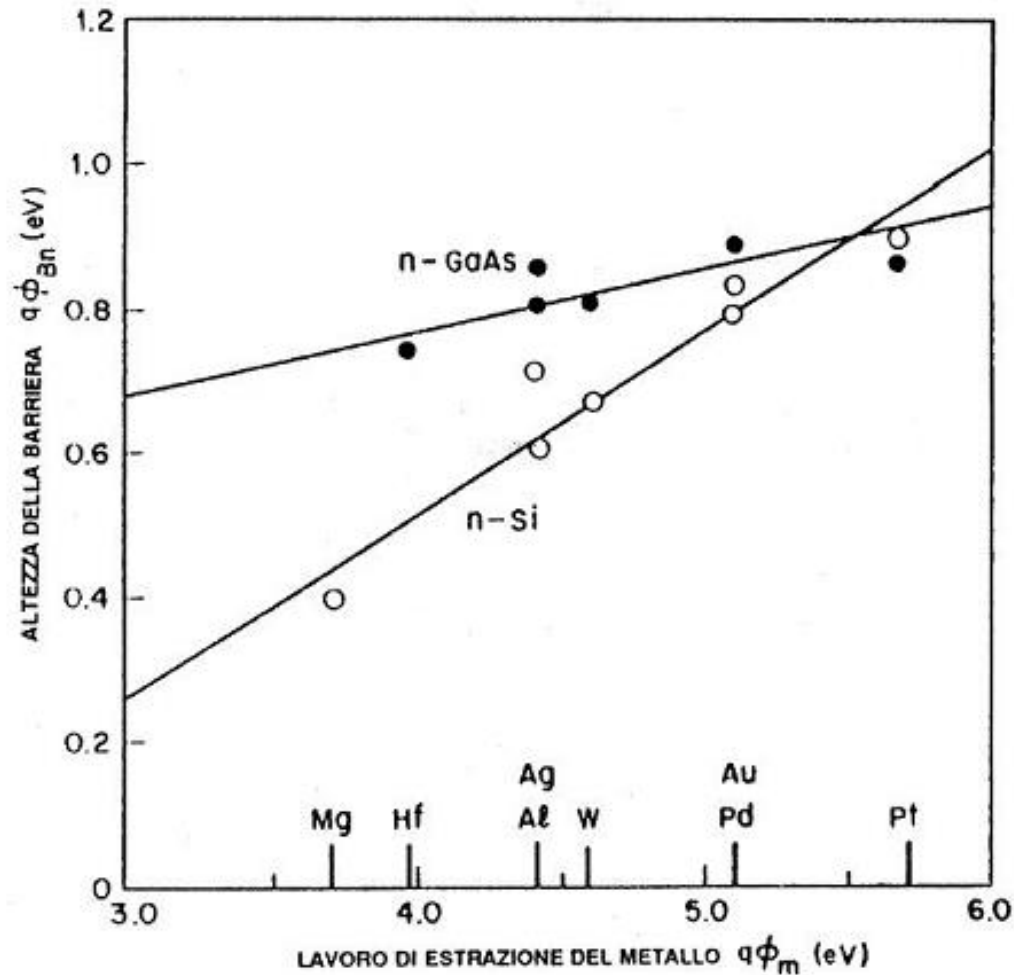
Work function

Element	ϕ_m
Ag, silver	4.26
Al, aluminium	4.28
Au, gold	5.10
Cr, chromium	4.50
Mo, molybdenum	4.60
Ni, nickel	5.15
Pd, palladium	5.12
Pt, platinum	5.65
Ti, titanium	4.33
W, tungsten	4.55

Electron affinity

Element	χ
Ge, germanium	4.13
Si, silicon	4.05
GaAs, gallium arsenide	4.07
AlAs, aluminium arsenide	3.50
SiO ₂ , silicon oxide	0.9

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n



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

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

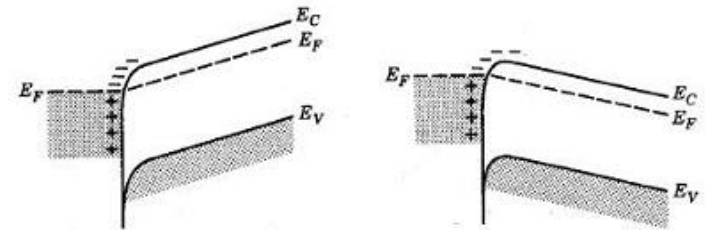
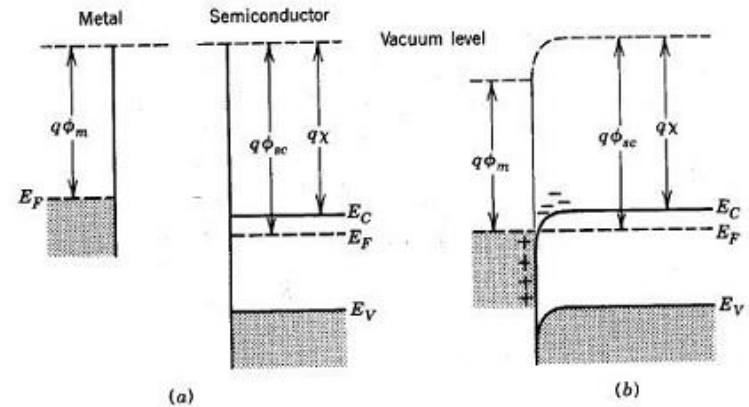
Se $q\Phi_m < q\Phi_s$

Gli elettroni del semiconduttore non vedono più una barriera di potenziale

Contatto ohmico

Se applico una **tensione positiva** le bande del semiconduttore si piegano verso l'alto, **gli elettroni possono fluire dal semiconduttore al metallo**

Se applico una **tensione negativa**, si incurvano verso il basso e **gli elettroni possono fluire dal metallo al semiconduttore**



Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Se $q\Phi_m < q\Phi_s$

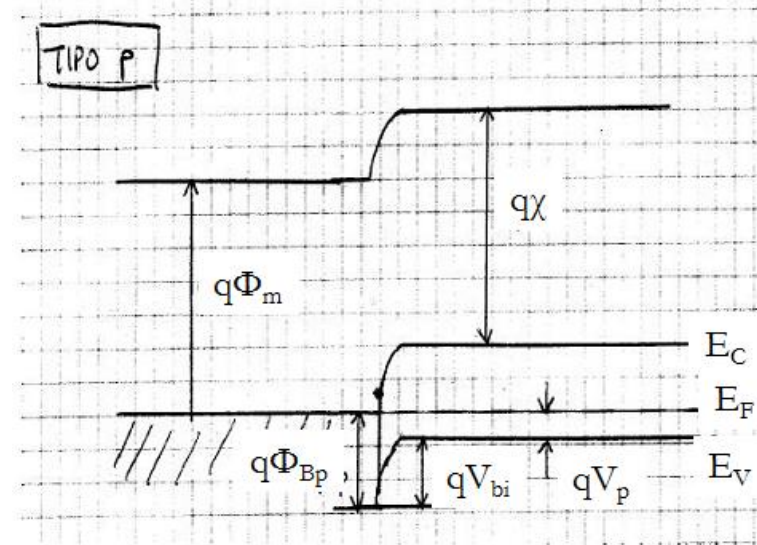
In questo caso **gli elettroni si trasferiscono dal metallo al semiconduttore;**

la loro densità, in eccesso rispetto alle condizioni di equilibrio, fornisce, una **carica negativa distribuita nel semiconduttore in prossimità della giunzione** compensata da una δ di carica positiva alla superficie del metallo.

In questo caso **il campo elettrico interno**, e di conseguenza il potenziale, **non** sono dovuti alla presenza di **cariche fisse ionizzate** e localizzate, **bensì a cariche mobili**

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo p

Se $q\Phi_m < q\Phi_s$



Come al solito, gli elettroni si spostano dal sistema ad E_f maggiore a quello con E_f minore

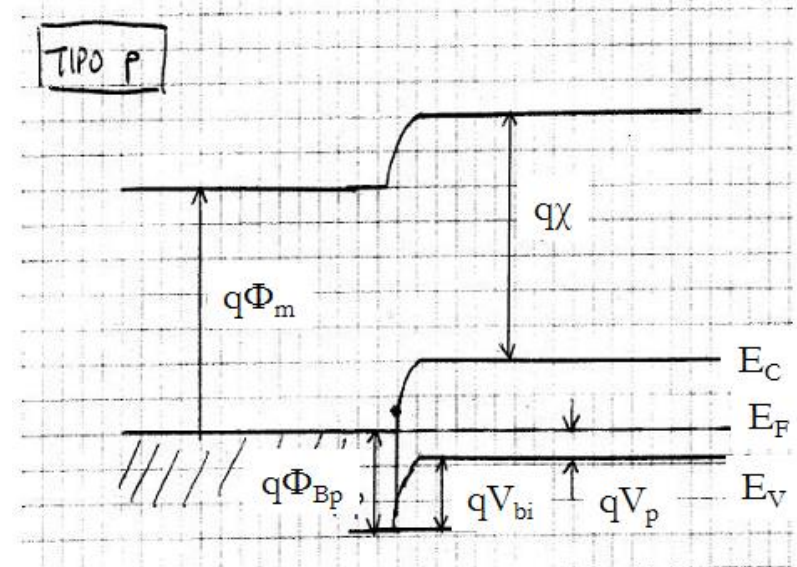
Gli elettroni passano dal metallo alla banda di valenza del semiconduttore

Ovvero, le lacune passano dal semiconduttore al metallo

Svuotamento di lacune nel semiconduttore, all'interfaccia

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo p

Se $q\Phi_m < q\Phi_s$



Si crea una regione di svuotamento carica negativamente

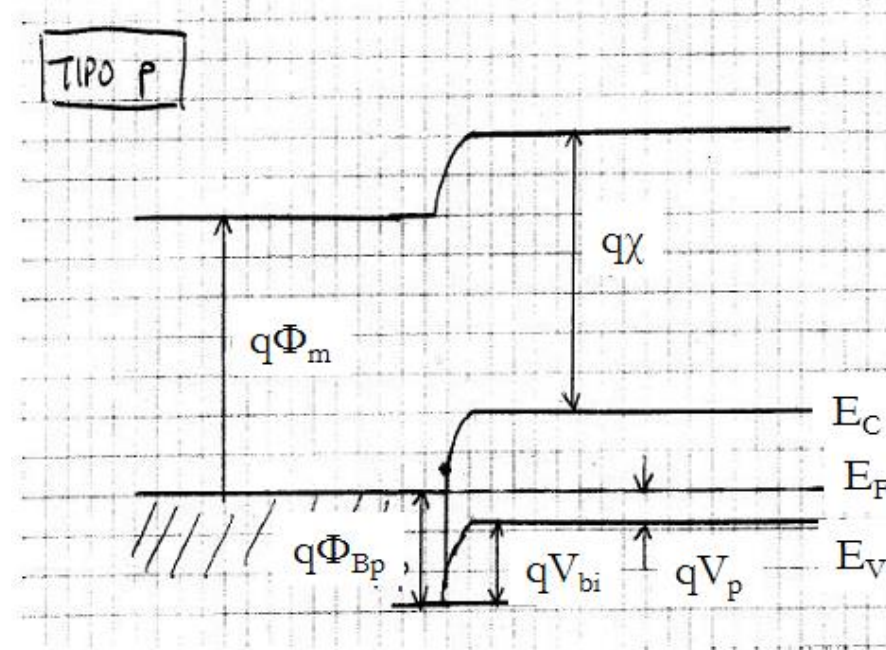
Si crea un campo interno che si oppone al flusso di lacune

A regime la corrente totale è nulla

Analogamente a quanto visto per i semiconduttori di tipo n con $q\Phi_m < q\Phi_s$ si crea una barriera per il flusso di lacune dal metallo al semiconduttore

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

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo p



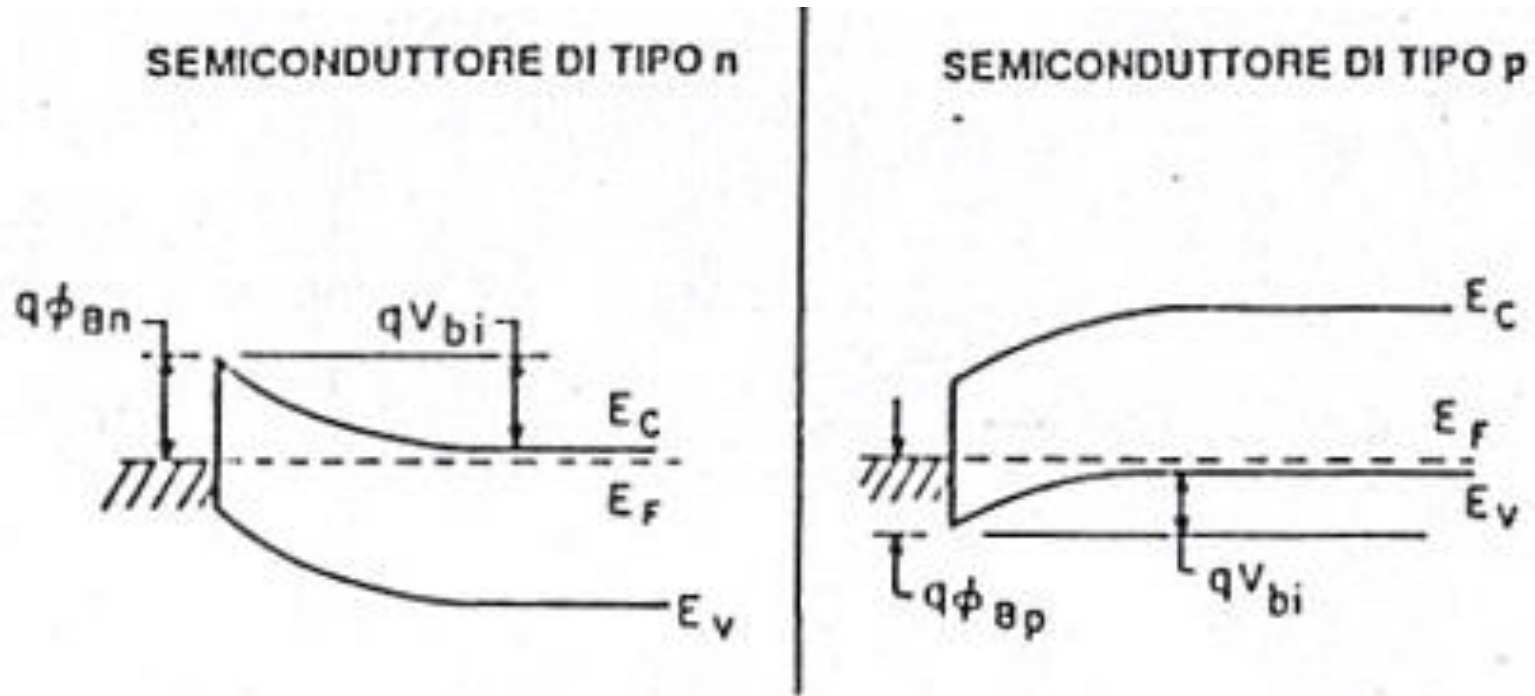
Se considero lo stesso metallo (stessa Φ_m) e lo stesso tipo di semiconduttore (stesso band gap), ma drogato di tipo p ottengo:

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

Da cui

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

Contatto Metallo-Semiconduttore

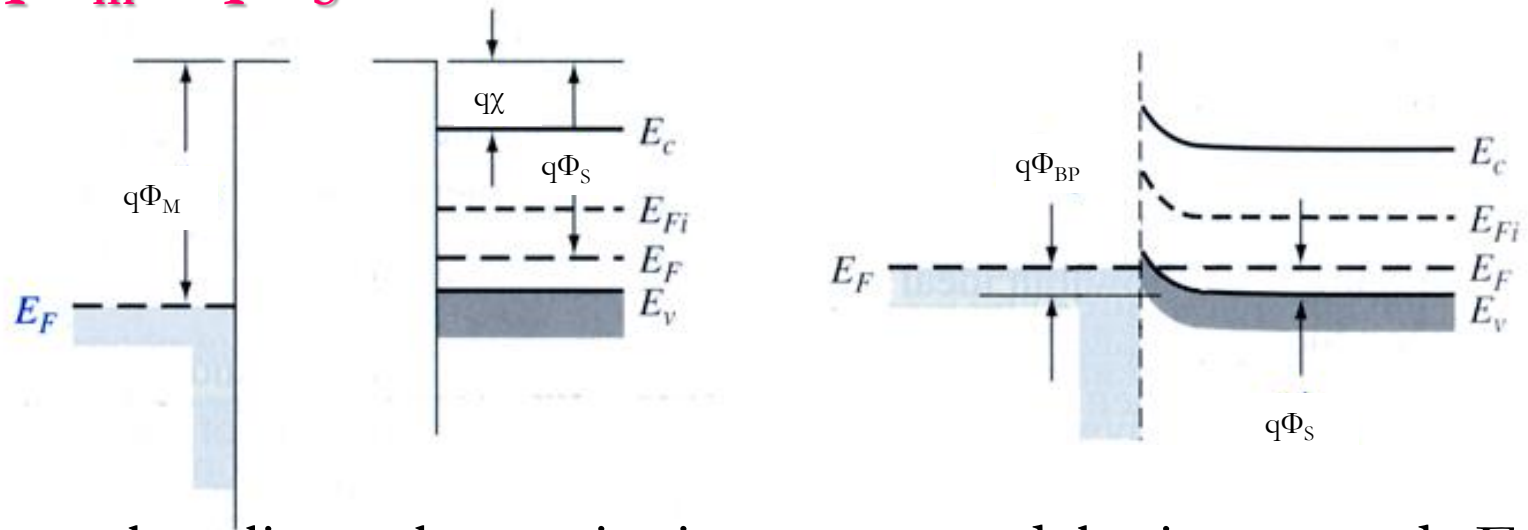


$$\text{Se } q(\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp}) = E_g$$

La somma delle altezze delle due barriere è uguale al band gap del semiconduttore considerato, e questo vale per qualsiasi metallo e per qualsiasi drogaggio

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo p

Se $q\Phi_m > q\Phi_s$



Come al solito, elettroni si spostano dal sistema ad E_f maggiore a quello con E_f minore

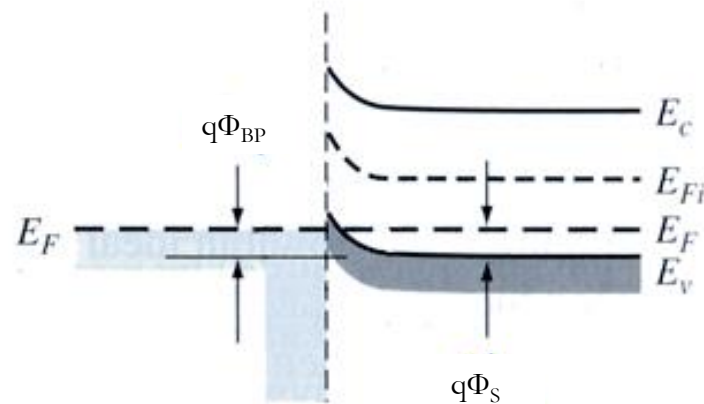
Gli elettroni riescono a fluire **dalla banda di valenza** del semiconduttore verso il metallo

Questo equivale a considerare un flusso di lacune dal metallo al semiconduttore

Il semiconduttore si carica positivamente

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo p

Se $q\Phi_m > q\Phi_s$



NON è una carica spaziale, sono lacune, portatori mobili!

Aumento di lacune nel semiconduttore, all'interfaccia

Anche in questo caso non ho una barriera all'interfaccia

Contatto Ohmico

Contatto Metallo-Semiconduttore

La situazione è speculare se invece si considera un semiconduttore di tipo p (che costituirà il terminale positivo qualora applicassimo una tensione)

	n-type semiconductor	p-type semiconductor
$\Phi_M > \Phi_S$	rettificante	ohmico
$\Phi_M < \Phi_S$	ohmico	rettificante

**Il contatto
metallo/semiconduttore
Con tensione applicata**

Contatto M-S con tensione applicata

Dai grafici precedenti abbiamo notato che gli elettroni che si muovono:

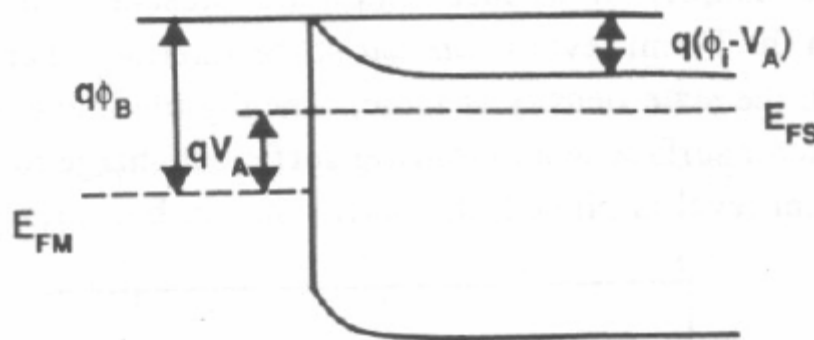
dal metallo al semiconduttore \rightarrow vedono una barriera di altezza ϕ_{Bn} ;

dal semiconduttore al metallo \rightarrow vedono una barriera di altezza ϕ_{bi}

Cosa succede se applichiamo una tensione diretta?

Metallo morsetto positivo!

Si modifica la posizione del livello di Fermi nel semiconduttore, riducendo in questo modo l'ampiezza della barriera vista dagli elettroni del semiconduttore:



**Si favorisce il passaggio di elettroni dal semiconduttore al metallo (NON viceversa!)
L'altezza della barriera che gli elettroni vedono dal metallo rimane la stessa!**

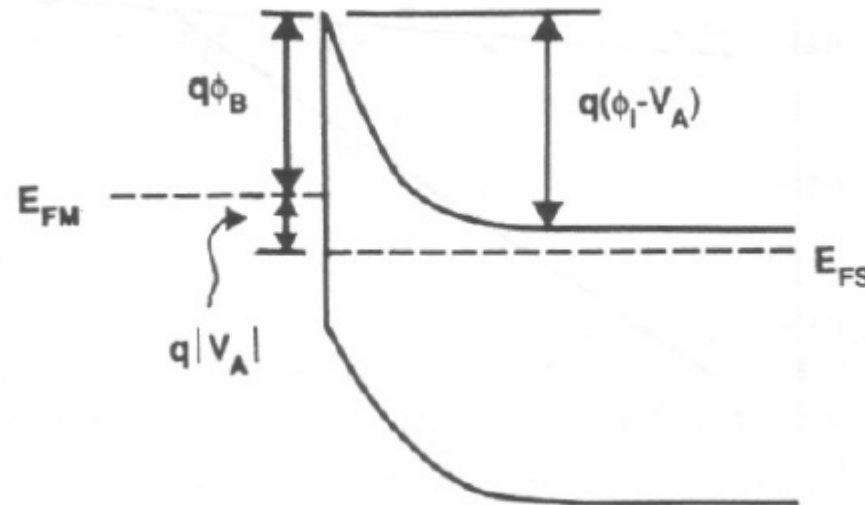
Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Cosa succede se applichiamo una tensione inversa?

Il livello di Fermi del semiconduttore in questo caso varia in verso opposto

La barriera di potenziale che gli elettroni del semiconduttore vedono aumenta significativamente, per cui la probabilità che passino nel metallo è ridotta rispetto al caso precedente

Scorre meno corrente, comportamento raddrizzante



Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Per comodità, d'ora in avanti faremo tutta la trattazione considerando una giunzione metallo semiconduttore di tipo n

Come precedentemente detto, tale configurazione è assimilabile, per certi versi, ad una giunzione p⁺-n

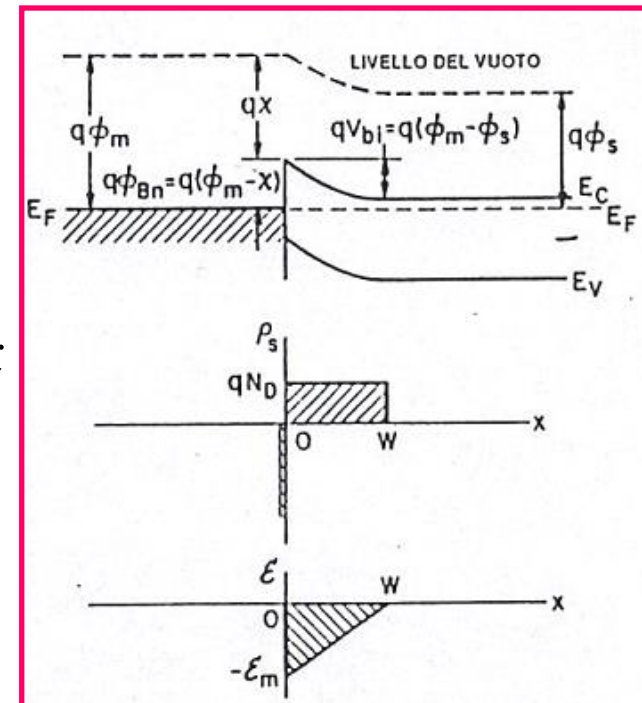
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{1}{N_D} (V_{bi} - V_A)}$$

E il campo elettrico risulta essere:

$$|E(x)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (W - x) = E_m - \frac{qN_D}{\epsilon_s} x$$

E il potenziale elettrostatico:

$$|V(x)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right) - \phi_{Bn}$$



Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Da queste relazioni possiamo ricavare il valore del campo massimo (per $x=0$)

$$E_m = E(x=0) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} W = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{1}{N_D} (V_{bi} - V_A)} =$$
$$= \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} (V_{bi} - V_A)} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{W}$$

Porto dentro la radice
Moltiplico e divido per $(V_{bi}-V_A)$

Analogamente al caso della giunzione p-n possiamo ricavare anche la carica elettrostatica e della capacità di svuotamento:

$$Q_{sc} = qN_D W = \sqrt{2qN_D \epsilon_s (V_{bi} - V_A)}$$

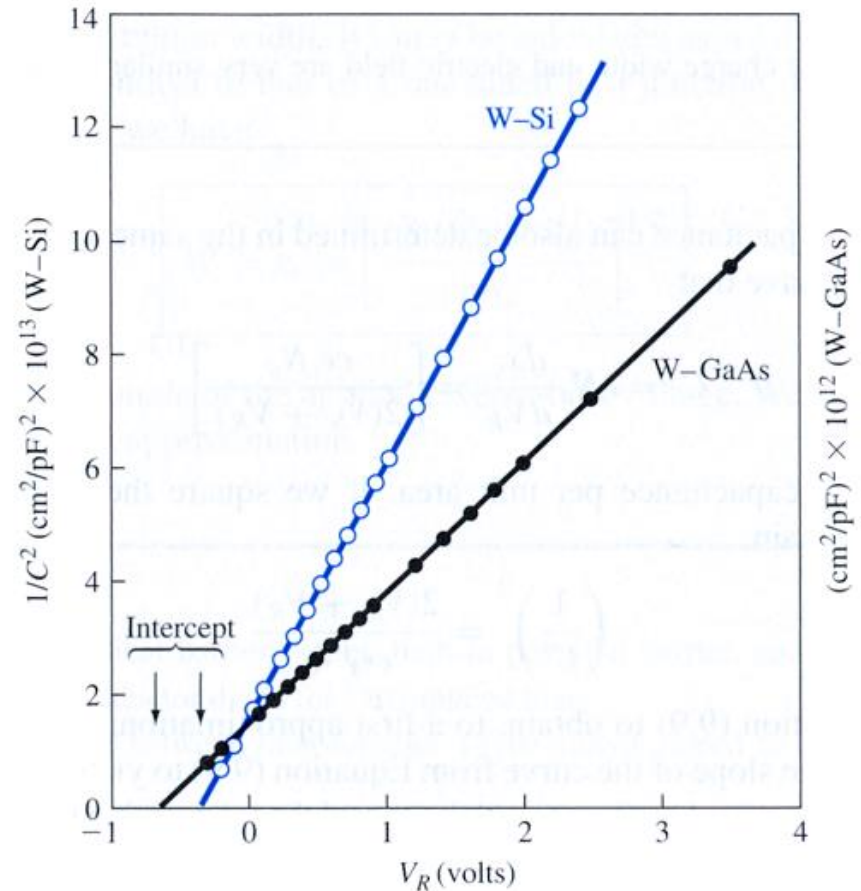
$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| = \frac{2qN_D \epsilon_s}{2\sqrt{2qN_D \epsilon_s (V_{bi} - V_A)}} = \sqrt{\frac{qN_D \epsilon_s}{2(V_{bi} - V_A)}}$$

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{qN_D \epsilon_s}$$

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Dalla relazione precedente otteniamo che:

$$\frac{\partial(1/C_j^2)}{\partial V} = \frac{2}{qN_D\epsilon_s}$$
$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \frac{1}{\frac{\partial(1/C_j^2)}{\partial V}}$$



Anche in questo caso, possiamo ottenere la concentrazione dei droganti (ioni donori N_D nel lato n) dall'analisi delle caratteristiche C-V

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Facciamo una precisazione importante

Quando polarizzo in diretta una giunzione raddrizzante Metallo-Semiconduttore, abbasso significativamente la barriera vista dagli elettroni del semiconduttore verso il metallo

Sarà questo processo a contribuire principalmente alla conduzione

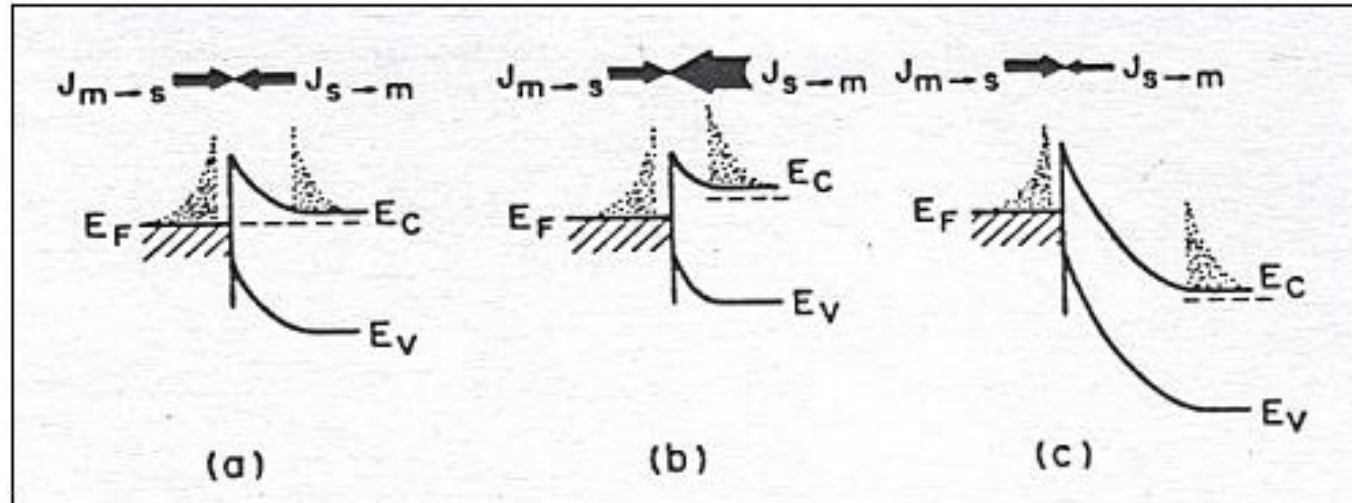
In questo caso, a differenza di quanto visto nelle giunzioni p-n, la corrente è una corrente di portatori maggioritari, ovvero, non si hanno processi di diffusione di minoritari

Contatto Metallo-Semiconduttore di tipo n

Questo è estremamente importante perché significa che **non abbiamo il contributo capacitivo C_D**

Tempi di commutazione più rapidi rispetto alle giunzioni p-n

Caratteristiche Corrente-Tensione



Abbiamo appena sottolineato che il contributo più significativo alla corrente è dato dai **maggioritari**, elettroni che vedono una barriera di potenziale minore e riescono a passare nel metallo

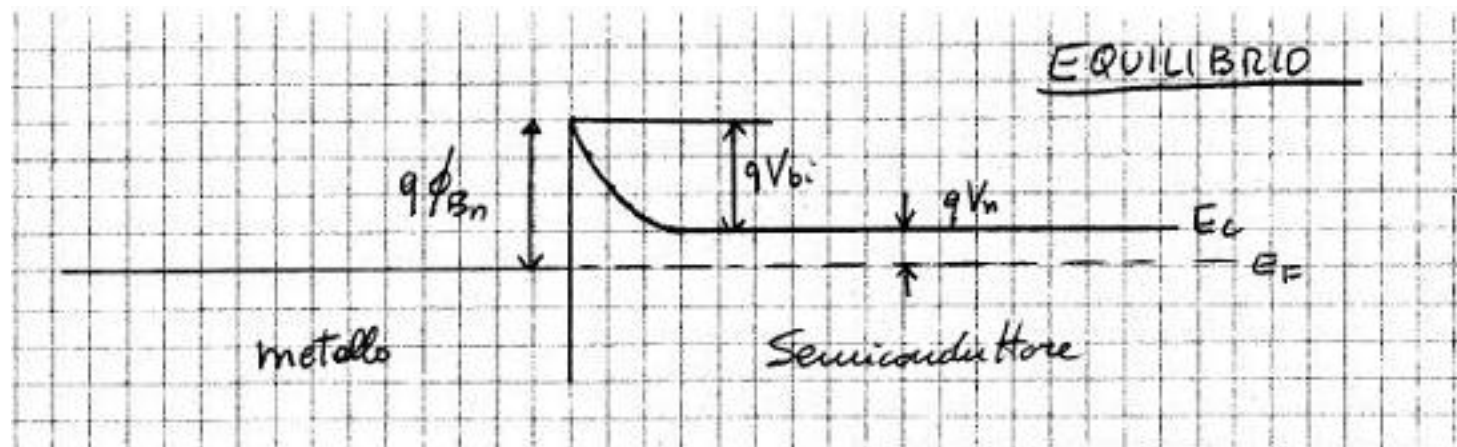
Il processo di trasferimento è prevalentemente dovuto all'agitazione termica, **effetto termoelettrico**

Partiamo nella nostra analisi dalle condizioni di equilibrio

Caratteristiche Corrente-Tensione

All'equilibrio, $J_{m \rightarrow s} = J_{s \rightarrow m}$

Flusso di carica nelle due direzioni uguale ed opposto, e proporzionale alla densità di elettroni al confine tra metallo e semiconduttore.



La quantità di elettroni è data da:

$$n_m = \int_{q\phi_{Bn}}^{\infty} g_m(E) f(E)$$

Densità di stati
nel metallo

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

Densità di stati nel
semiconduttore

Caratteristiche Corrente-Tensione

Alla superficie abbiamo una densità di elettroni pari a:

$$n_s = N_C e^{E_F - E_C / kT} = N_C e^{-q\phi_{Bn} / kT}$$

Essendo in superficie

$$E_C - E_F = q\phi_{Bn}$$

Vero solo in superficie!!

Nel bulk $E_C - E_F = qV_n$

Moltiplico e divido per $\exp(qV_n/kT)$, e ricordando che, all'equilibrio

$$N_C e^{-qV_n/kT} = N_D = n_0$$

$$n_s = N_C e^{-qV_n/kT} e^{-q(\phi_{Bn} - V_n)/kT}$$

$$n_s = N_D e^{-q(\phi_{Bn} - V_n)/kT} = N_D e^{-qV_{bi}/kT}$$

$$J_{m \rightarrow s} = J_{s \rightarrow m} \propto n_s \Rightarrow J_{m \rightarrow s} = J_{s \rightarrow m} = C_1 N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT}$$

C_1 è una costante di proporzionalità

Caratteristiche Corrente-Tensione

Se il contatto è invece polarizzato in diretta con una tensione che chiameremo V_F avrò una diminuzione della barriera Schottky, ovvero un aumento della densità di elettroni all'interfaccia:

$$n_s \approx N_D e^{-q(V_{bi} - V_F)/kT} = N_C e^{-q(\phi_{Bn} - V_F)/kT}$$

$$J_{s \rightarrow m} = C_1 N_C e^{-q(\phi_{Bn} - V_F)/kT}$$

Al contrario, $J_{m \rightarrow s}$ non varia

La corrente totale sarà quindi pari a:

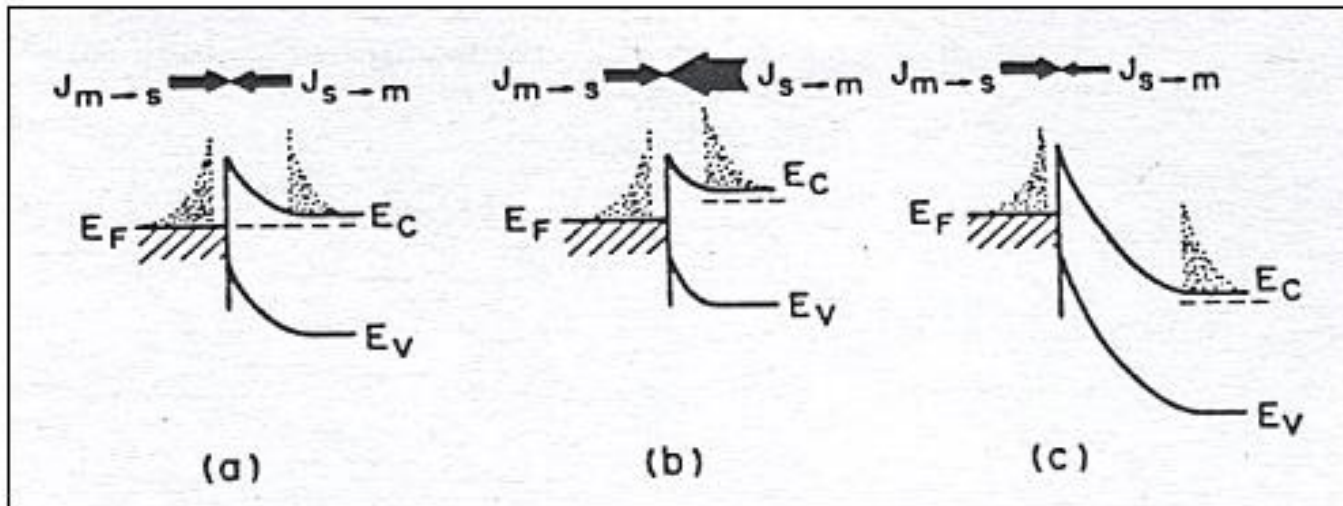
$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = C_1 N_C e^{-q(\phi_{Bn} - V_F)/kT} - C_1 N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT}$$

$$J = C_1 N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT} \left[e^{qV_F/kT} - 1 \right] = J_S \left[e^{qV_F/kT} - 1 \right]$$

Caratteristiche Corrente-Tensione

Per la polarizzazione inversa dobbiamo considerare che otteniamo invece $J_{m \rightarrow s}$ non varia neanche in questo caso e che $J_{s \rightarrow m}$ varia come nel caso precedente

Dobbiamo sostituire V_F con $-V_R$



$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = C_1 N_C e^{-q(\phi_{Bn} + V_R)/kT} - C_1 N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT}$$

$$J = C_1 N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT} \left[e^{-qV_R/kT} - 1 \right] = J_S \left[e^{-qV_R/kT} - 1 \right]$$

Caratteristiche Corrente-Tensione

In tutti e tre i casi visti abbiamo una dipendenza della corrente da un pre-fattore $C_1 N_C$

Questo pre-fattore dipende dal quadrato della temperatura applicata mediante un fattore A^*

Costante di Richardson $[A^*] = [A/K^{-2}cm^{-2}]$

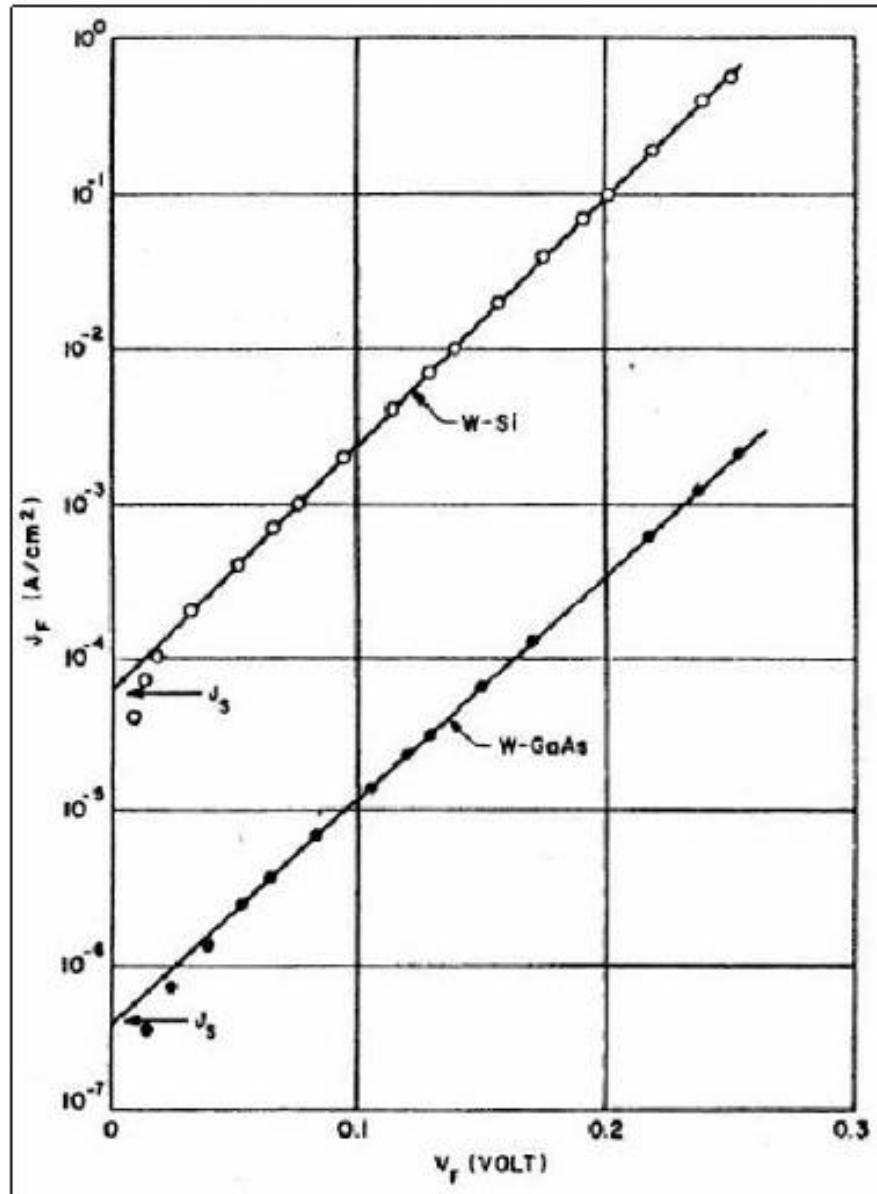
Di conseguenza, la caratteristica corrente-tensione in condizione di emissione termoelettrica si potrà scrivere:

$$J = J_S \left[e^{qV/kT} - 1 \right]$$

$$J_S = A^* T^2 e^{-q\phi_{Bn}/kT}$$

Semiconduttore	A^* (p)	A^* (n)
Silicio	32	110
Arseniuro di Gallio	72	8

Caratteristiche Corrente-Tensione



Gli andamenti (in scala logaritmica) per le correnti sono riportati nella figura a lato

Per $V = 0$ è possibile ricavare da tale grafico il valore della corrente di saturazione inversa, da cui quello della barriera.

Giunzione pn

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right)$$

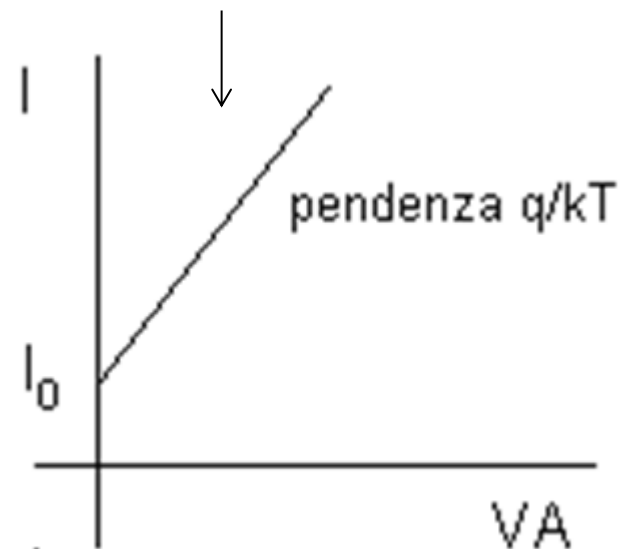
$$I_0 = J_s A = qA \left[\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right] \quad (169)$$

tensione diretta

$$e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \cong e^{\frac{qV_A}{kT}}$$

$$\rightarrow \ln I = \ln I_0 + \frac{qV_A}{kT}$$

In scala log



Caratteristiche Corrente-Tensione

Oltre alla corrente dei maggioritari, per un contatto metallo – semiconduttore n **si ha anche una componente di corrente derivante dai minoritari (lacune) legata all'iniezione dal metallo verso la banda di valenza del semiconduttore** e ancora una volta stimabile come quella della giunzione p+n

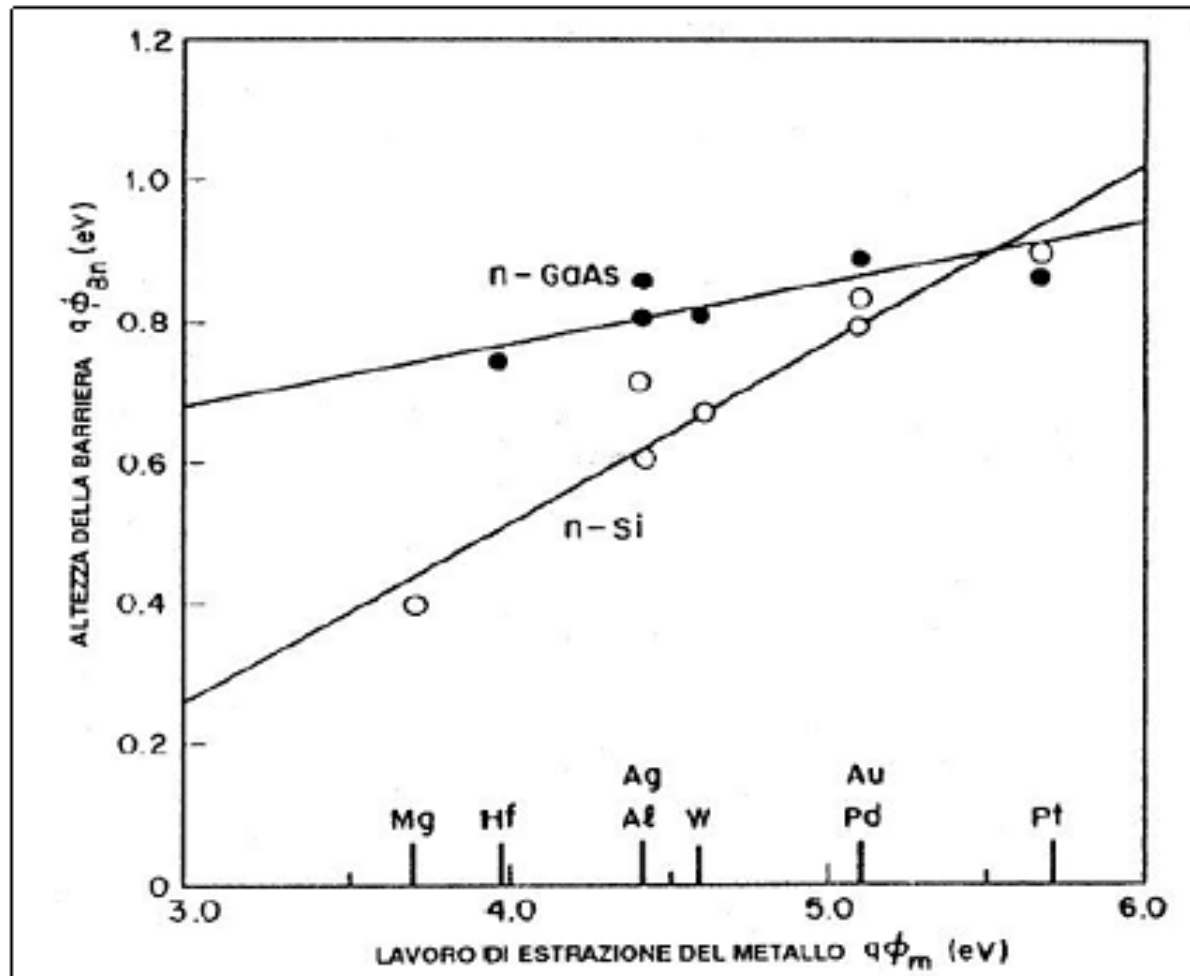
$$J_p = J_{p0} \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

$$J_{p0} = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_D}$$

- Tale componente di corrente è significativa solo ad **alti livelli di iniezione**
- J_{p0} risulta di molti ordini di grandezza inferiore alla J_s
- da ciò deriva la considerazione del **diodo Schottky come dispositivo unipolare**

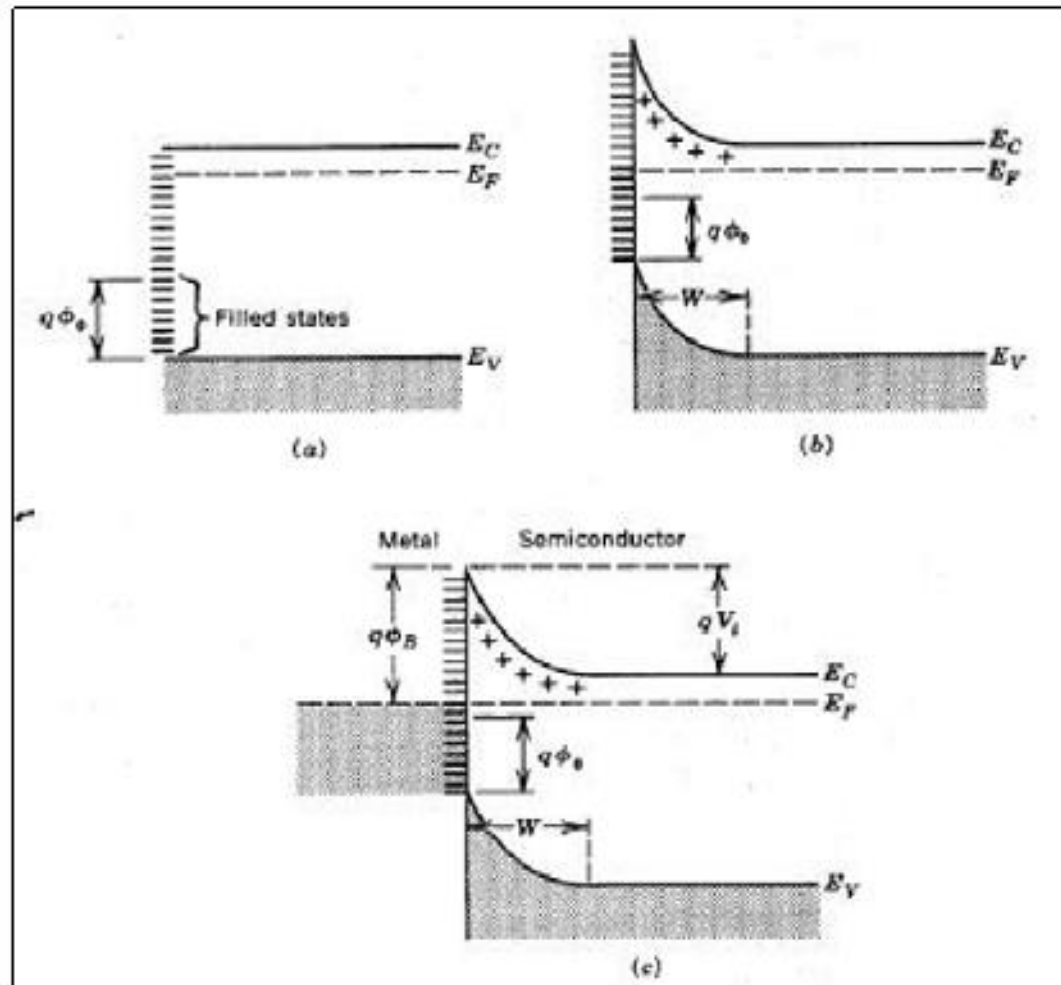
Metallo-semiconduttore non idealità

La teoria prevede una variazione lineare della φ_B con la φ_m , che non è invece individuato nei contatti aventi semiconduttori a legame covalente, come il Silicio e il Germanio.



Metallo-semiconduttore non idealità

Nella pratica è possibile notare che, indipendentemente dai valori di φ_m e φ_s , la maggior parte dei contatti metallo – semiconduttore sono di tipo rettificante



Metallo-semiconduttore non idealità

Nei semiconduttori a legame covalente, gli atomi in superficie presentano un **legame non saturato**

questo genera una serie di **stati energetici distribuiti** uniformemente **entro il band gap** che influenzano il livello di Fermi e dunque la dimensione della barriera di Shottky

Tali effetti di interfaccia, passanti anche sotto il nome di **teoria di Bardeen – Mead**, provocano una variazione della barriera pari, al limite di una densità infinita di stati superficiali:

$$q\phi_B = E_g - q\phi_0 \approx \frac{2}{3} E_g$$

Tale problema non sussiste nei semiconduttori a legame ionico, non aventi stati energetici nel band gap, e per i quali la dimensione della barriera può essere determinata principalmente mediante la differenza $\psi_m - \chi$

Metallo-semiconduttore non idealità

Empiricamente possiamo individuare una relazione generale per la barriera nei due casi del tipo

$$q\phi_B = S\chi_m + \phi_0(s)$$

In cui χ_m è l'elettronegatività del metallo e $0 < S < 1$

S è piccolo per i semiconduttori a legame covalente e grande per quelli a legame ionico

In generale, l'interazione di tipo chimico-fisico all'interfaccia metallo-semiconduttore influenza in maniera significativa il comportamento della giunzione

Metallo-semiconduttore non idealità

1. Il metallo può essere solo fisi – assorbito sulla superficie del semiconduttore senza formare alcun legame chimico;
2. Il metallo può fermare un debole legame chimico con semiconduttore senza però formare alcun composto;
3. Il metallo può reagire con il semiconduttore dando vita ad uno o più composti;
4. Sul semiconduttore può formarsi naturalmente un sottile strato di ossido che prevenga il contatto tra metallo e semiconduttore.

La teoria di Schottky descrive bene solo il primo caso

Il secondo viene ben rappresentato dalla teoria di Bardeen

Negli altri due casi il tipo di contatto dipende fortemente dalle possibili reazioni (3) e dal tipo di preparazione delle superfici (4) durante il processo realizzativo

Metallo-semiconduttore: non idealità

Esistono una serie di deviazioni dall'idealità, che riportiamo qui di seguito:

1. Come già visto per la giunzione p – n, la caratteristica corrente – tensione può non avere esattamente l'andamento trovato in precedenza, ma può dipendere da un **fattore di idealità η** secondo la relazione

$$J = J_s \left(e^{qV / \eta kT} - 1 \right)$$

con $\eta \doteq 1.11$

2. Esiste una **resistenza serie associata alla zona neutra** del semiconduttore, rilevante per le **alte correnti**;

Schottky: non idealità

3. **La barriera non è completamente indipendente dalla tensione applicata** ($\Delta\Phi_B \propto V^{1/4}$), il che può comportare una variazione della corrente di saturazione inversa anche abbastanza rilevante;

4. In analogia al caso p – n, esistono dei fenomeni di **generazione e ricombinazione**, per cui nella corrente di saturazione inversa occorre tener conto anche di un termine

$$J_{R-G} = \frac{qn_i W}{2\tau_0}$$

5. deviazioni dall'idealità sono rappresentati anche dai già considerati **effetti di interfaccia.**

Confronto Schottky – giunzione p-n

Vantaggi:

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

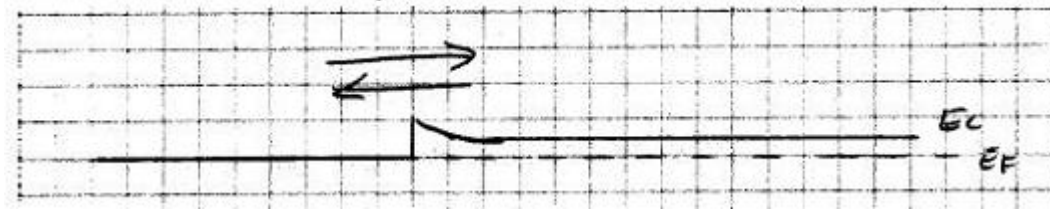
Svantaggi:

1. grande corrente inversa;
2. scarsa riproducibilità.

Contatti Ohmici

Abbiamo già avuto modo di vedere che in alcune circostanze, le giunzioni metallo-semiconduttore presentano delle caratteristiche ohmiche

Tali condizioni possono essere raggiunte anche per diodi Schottky in cui la barriera è molto piccola



e la resistenza di contatto vale:

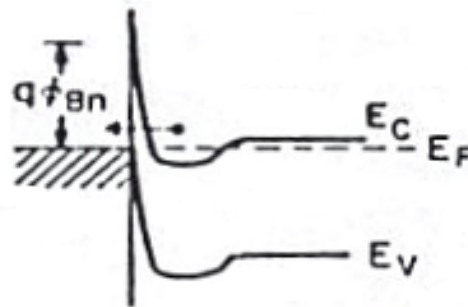
$$R_C = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} = \frac{k}{qA^*T} e^{q\phi_{Bn}/kT}$$

- **Emissione termoelettrica**
- **Diminuisce al diminuire della barriera**
- **Conduzione bidirezionale**

Contatti Ohmici

Una condizione ohmica può essere raggiunta anche per alti livelli di drogaggio

In questo caso, la distorsione delle bande è tale da **restringere la barriera vista dal metallo** e da favorire dunque il passaggio di elettroni per **effetto tunnel**



Questo fatto, di per se, non sorprende, essendo un semiconduttore fortemente drogato assimilabile ad un metallo

Se il semiconduttore è molto drogato il livello di Fermi è molto vicino alla banda di conduzione, per cui la regione di svuotamento si riduce (se si riduce a qualche Armstrong → passaggio di carica per effetto Tunnel)

Contatti Ohmici

In tal caso la resistenza di contatto, è inversamente proporzionale alla corrente, I^{-1}

Ma è anche inversamente proporzionale alla probabilità di passaggio di una carica per effetto tunnel

$$I \propto e^{-2W} \sqrt{\frac{2m_n q (\phi_{Bn} - V)}{\hbar^2}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_D} (V_{bi} - V)} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_D} (\phi_{Bn} - V)}$$

$$I \propto e^{-2W} \sqrt{\frac{2m_n q (\phi_{Bn} - V)}{\hbar^2}} \propto e^{-2\sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_D} (\phi_{Bn} - V)}} \sqrt{\frac{2m_n q (\phi_{Bn} - V)}{\hbar^2}}$$

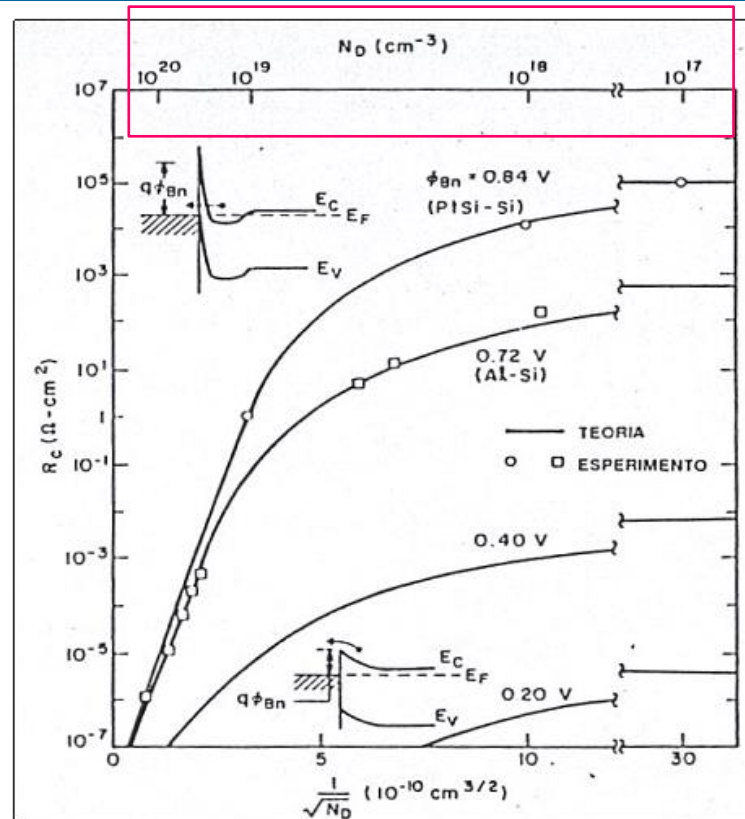
$$C_2 = 2\sqrt{\frac{m_n \varepsilon_S}{\hbar^2}}$$

$$I \propto e^{-2\sqrt{\frac{4m_n \varepsilon_S (\phi_{Bn} - V)^2}{N_D \hbar^2}}} \propto e^{-4\sqrt{\frac{m_n \varepsilon_S}{\hbar^2} \frac{(\phi_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}}}} \propto e^{-2C_2 \frac{(\phi_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}}}$$

$$R_C \propto e^{2C_2 \frac{(\phi_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}}}$$

È necessario avere una bassa barriera e alti valori di drogaggio

Caratteristiche Corrente-Tensione



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

- $N_D > 10^{19}$ Effetto Tunnel, R_C diminuisce rapidamente
- $N_D < 10^{17}$ Emissione termoelettrica, R_C risulta praticamente indipendente dal drogaggio

Caratteristiche Corrente-Tensione

