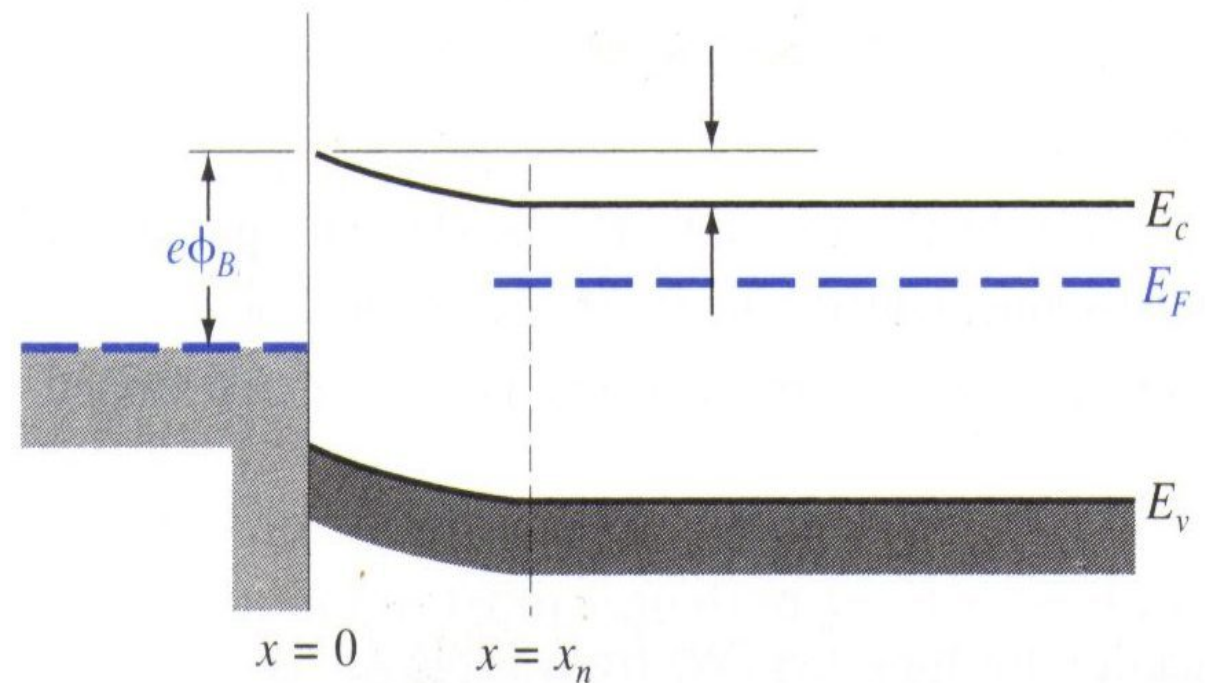




# JUNTURA METAL SEMICONDUCTOR

Dra. María Rebollo

Dr. Andres Ozols

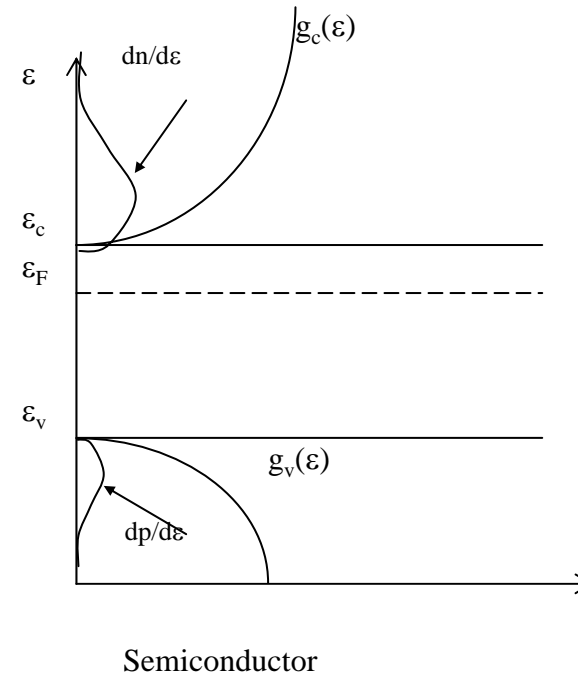
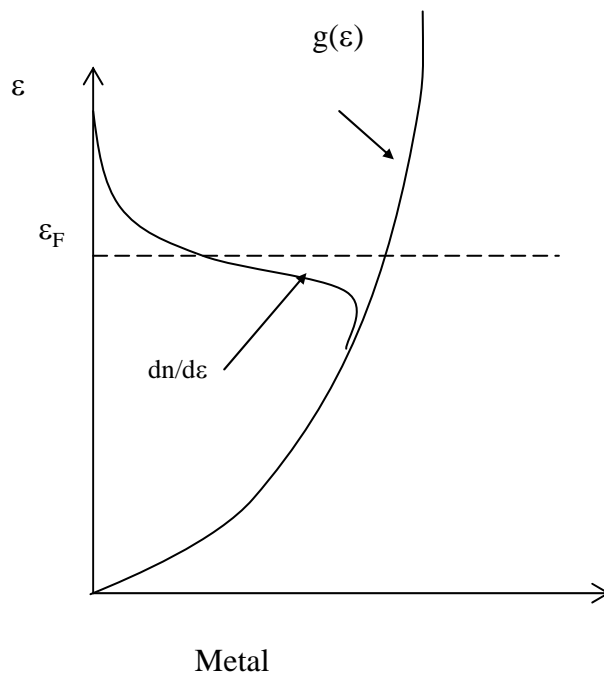


FIUBA

2006

# CARACTERISTICAS CUALITATIVAS Juntura Metal - Semiconductor

## Los Diagramas de bandas de Energía



# CARACTERISTICAS CUALITATIVAS Juntura Metal - Semiconductor

## Barrera Schottky

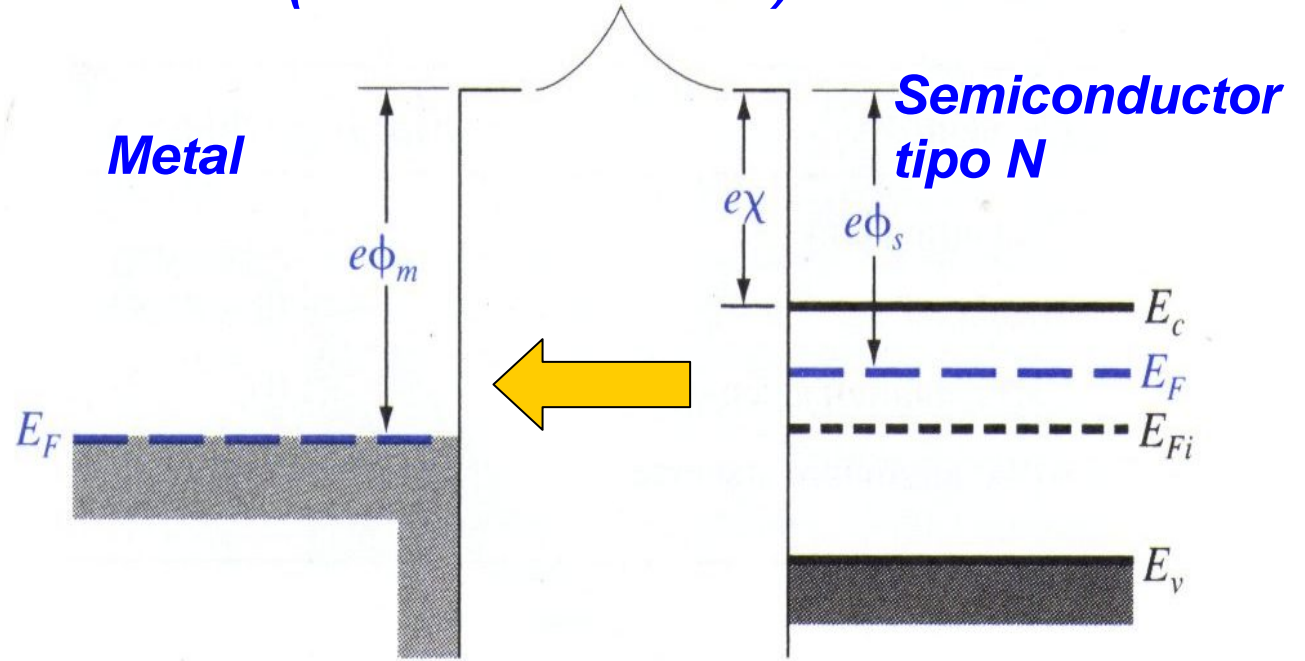
$$\phi_m > \phi_s$$



$E_F$  en Semiconductor  
por encima de la  $E_F$



## Diagrama de bandas de Energía (antes del contacto)



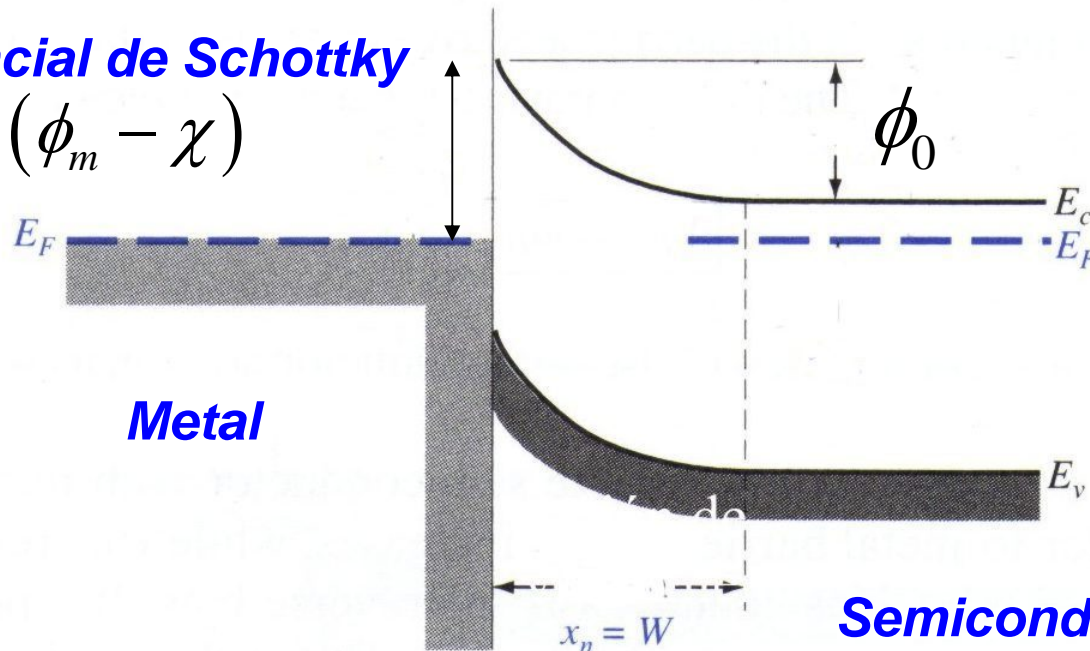
Flujo de electrones para  $E_F$  cte

# Juntura Metal – Semiconductor tipo N

A-  $\phi_m > \phi_s$

Potencial de Schottky

$$\phi_B = (\phi_m - \chi)$$



El potencial de contacto

(Potencial visto por los electrones de la banda de conducción)

$$\phi_0 = \phi_B - (E_C - E_F)$$

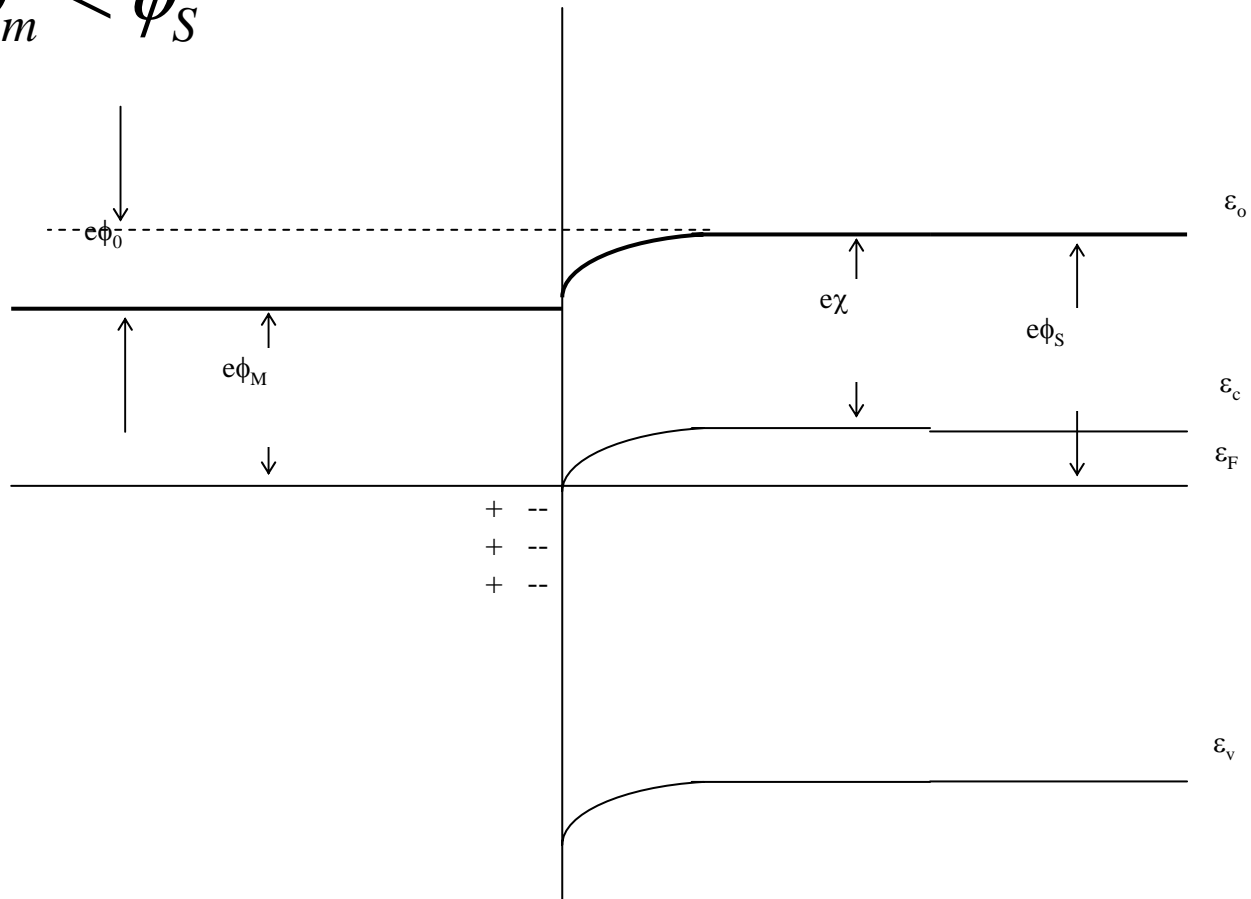
Semiconductor tipo N

Zona de vaciamiento

(carga positiva)

# Juntura Metal – Semiconductor tipo N

**b-**  $\phi_m < \phi_s$



## Funciones de trabajo $\phi$

Elemento	Función de trabajo
Ag	4.26
Al	4.28
Au	5.1
Cr	4.5
Mo	4.6
Ni	5.15
Pd	5.12
Pt	5.65
Ti	4.33
W	4.55

## Afinidad Electrónica $\chi$

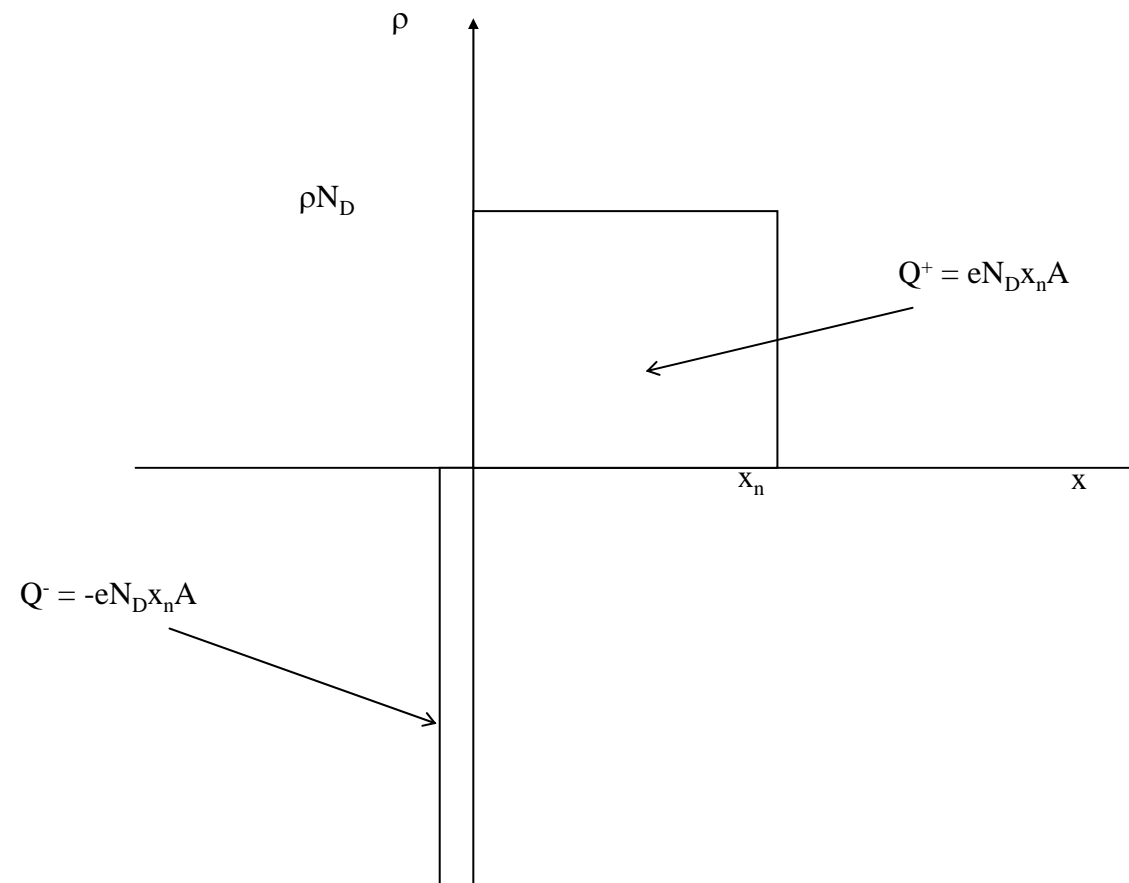
Elemento	Afinidad Electrónica
Ge	4.13
Si	4.01
GaAs	4.07
AlAs	3.5

## Campo Eléctrico

*La ley de Poisson:*

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

*La distribución de carga en la  
juntura metal SC tipo N*



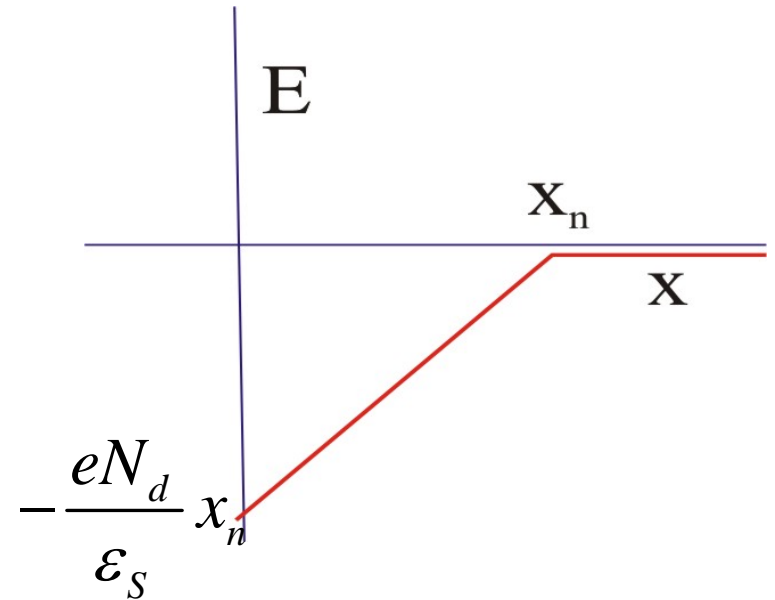
## Campo Eléctrico

$$E = \int \frac{eN_d}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + C_1 \quad C_1 = cte.$$

### La condición de contorno

$$E(x_n) = 0 \quad \longrightarrow \quad C_1 = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} \quad \longrightarrow \quad E = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x)$$

$$\longrightarrow \quad |E_{\max}| = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x_n$$





## Potencial Eléctrico

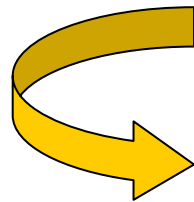
*El potencial se obtiene integrando el campo:*

$$\phi(x) = -\int E(x)dx + C'_1 \quad C'_1 = cte.$$

$$\phi(x) = -\int \frac{eN_D}{\epsilon_S} (x - x_n)dx + C'_1$$

$$\phi(x) = -\frac{eN_D}{\epsilon_S} \left( \frac{x^2}{2} - xx_n \right) + C'_1$$

*La diferencia de potencial en la zona de vaciamiento:*



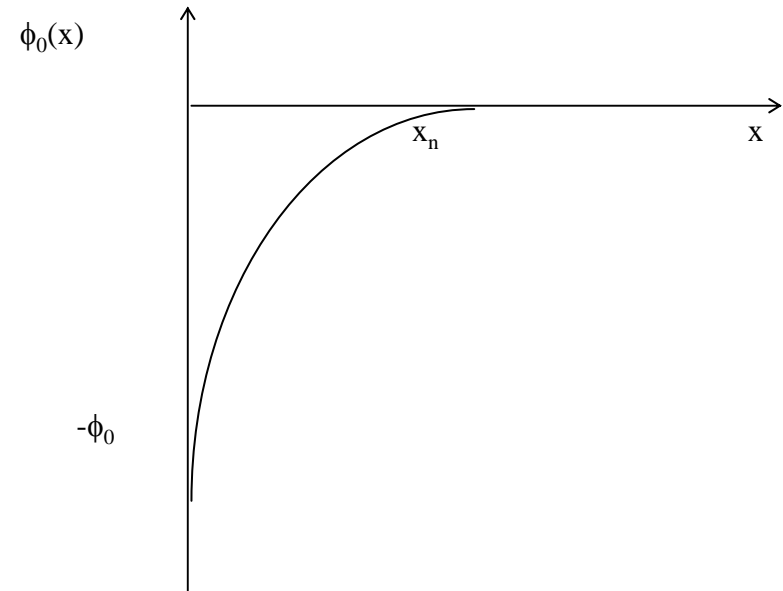
$$\Delta\phi = \phi(x_n) - \phi(0) = \phi_0 = \frac{eN_D x_n^2}{2\epsilon_S}$$

## Potencial Eléctrico

*Eligiendo*  $\phi(x_n) = 0 \Rightarrow C'_1 = -\frac{eN_D x_n^2}{2\epsilon_s}$

$\Rightarrow \phi(x) = -\frac{eN_D}{2\epsilon} (x_n - x)^2$

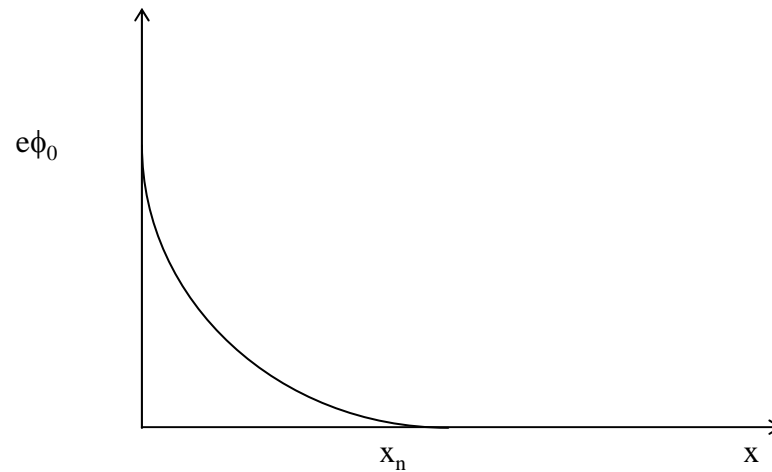
*y*  $\phi(0) = -\phi_0$



## Potencial Eléctrico

*La energía potencial de los electrones es*

$$-e\phi(x) = \frac{e^2 N_D}{2\epsilon} (x_n - x)^2 \quad \text{y} \quad -e\phi(0) = e\phi_0$$



## Ancho de la zona de vaciamiento

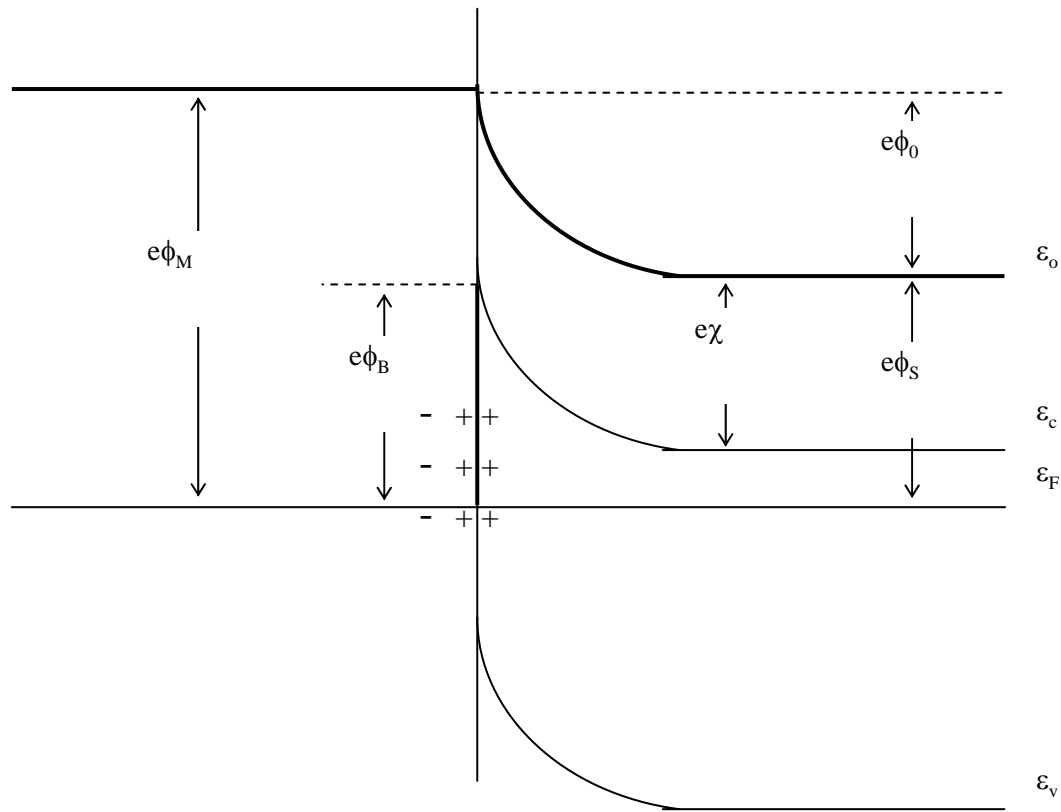
*Es obtenido a partir de la expresión de la juntura pn,*

$$W = x_n \qquad N_a = 0$$



$$W = x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (\phi_o - V)}{eN_d}}$$

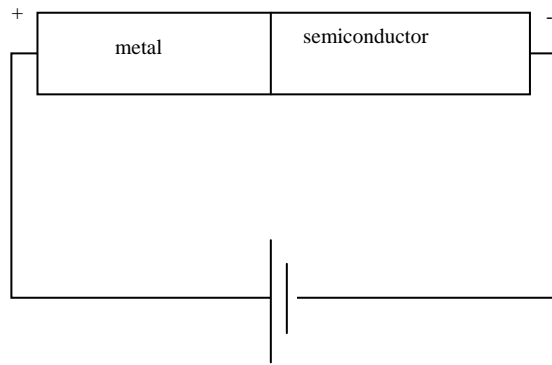
# Juntura Metal – Semiconductor fuera de Equilibrio



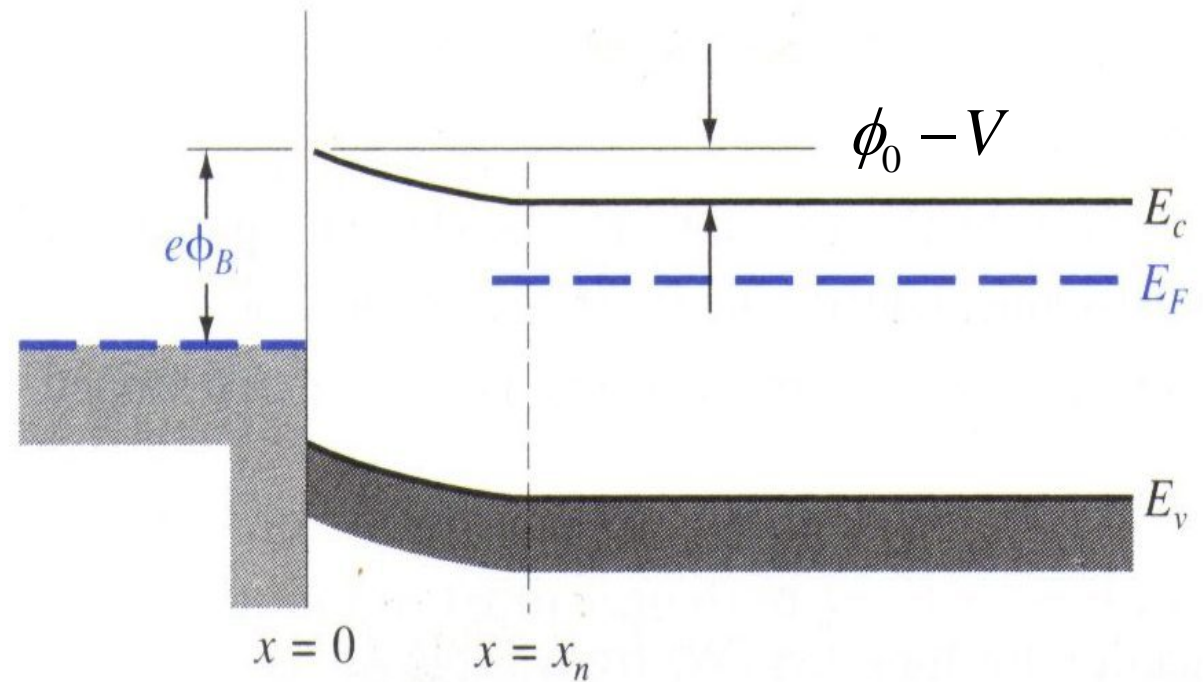
# Juntura Metal – Semiconductor fuera de Equilibrio

## Polarización directa

(aplicado potencial  $+V$ )



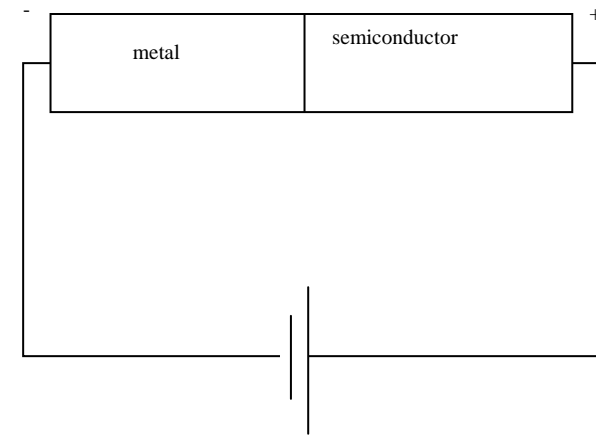
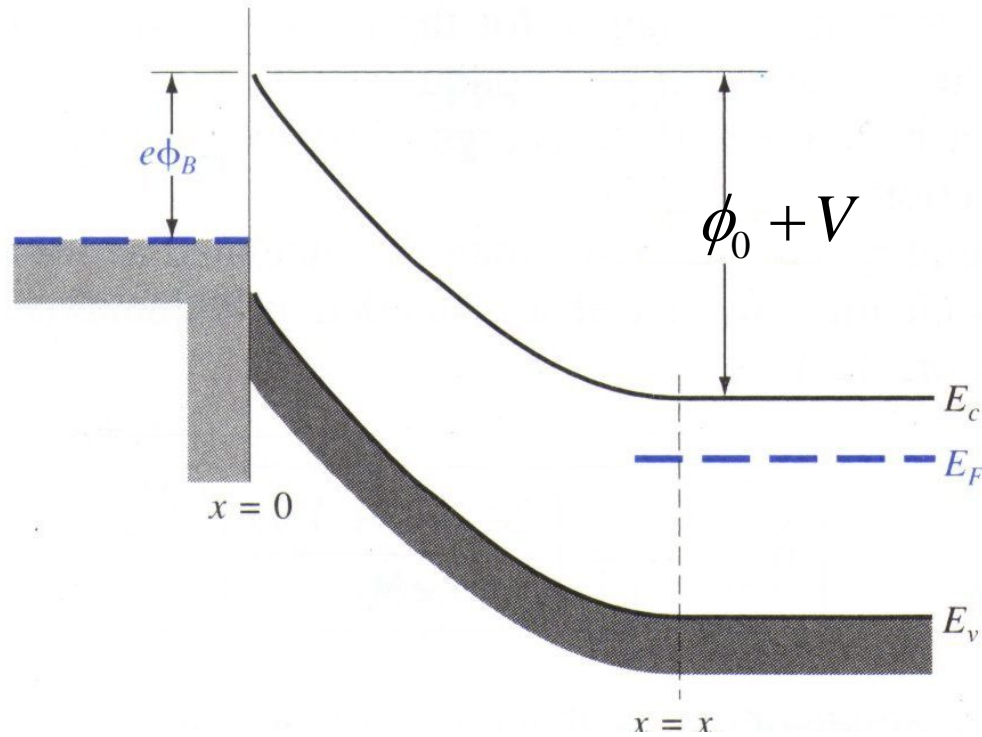
Polarización directa  $V_0 > 0$



# Juntura Metal – Semiconductor fuera de Equilibrio

## Polarización Inversa

(aplicado potencial  $-V$ )



Polarización inversa  $V_0 < 0$

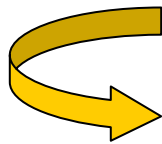
## Capacidad de Juntura

*La carga espacial cambia con la polarización*

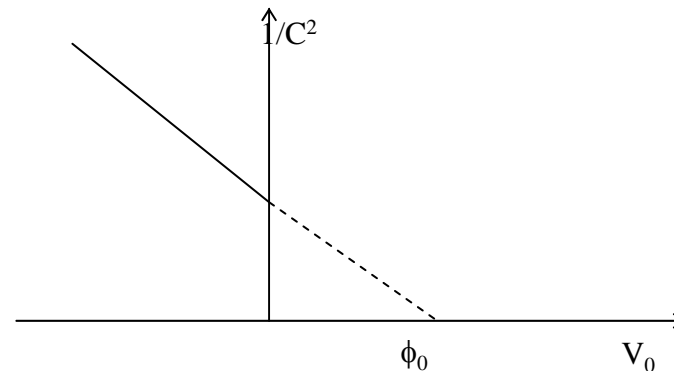
$$Q = AeN_D x_n = A\sqrt{2e\epsilon(\phi_0 - V_0)N_D} \quad A = \text{área de juntura}$$

*La capacidad es obtenida a partir de la expresión de la juntura pn, (bajo condiciones de señal pequeña)*

$$C = AeN_d \frac{dx_n}{dV} = A \sqrt{\frac{e\epsilon_s N_d}{2(\phi_0 - V)}}$$



$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{A^2 e\epsilon N_D} (\phi_0 - V_0)$$





## Característica corriente-voltaje

*Sin polarización:*

*La corriente de electrones compuesta por*

*$Jn_{S-M}$ : la corriente de electrones de la banda de conducción que fluye desde SC al metal. Estos electrones tienen suficiente energía como para saltar el potencial de contacto  $\phi_0$ .*

*$Jn_{M-S}$ : la corriente de electrones desde el metal al semiconductor. En este caso los electrones deben superar el potencial  $\phi_B$ .*

*En equilibrio  $Jn_{S-M} = Jn_{M-S}$ .*

## Característica corriente-voltaje

*La corriente de huecos está compuesta de:*

*$J_{p_{M-S}}$  : la corriente de huecos desde el metal al semiconductor. Se compone de huecos que se generan en la superficie del semiconductor cuando electrones de la banda de valencia pasan a ocupar estados accesibles dentro del metal.*

*$J_{p_{S-M}}$  : la corriente de huecos desde el semiconductor al metal. Se compone de huecos que llegan desde el interior del semiconductor y desaparecen en la superficie cuando atrapan un electrón del metal.*

*En equilibrio  $J_{p_{S-M}} = J_{p_{M-S}}$ .*

## Característica corriente-voltaje

*Con polarización directa:*

*La corriente de electrones desde el semiconductor al metal, debe ser proporcional al número de electrones cuya energía supere  $\phi_0 - V$ .*

*El electrón que llega a la superficie desde la banda de conducción:*

$$\frac{1}{2} m v_{x \text{ mín}}^2 \geq e(\phi_0 - V_0)$$

*La corriente de estos electrones:*

$$I_{n \text{ S-M}} = (-e) \int_{v_{x \text{ mín}}}^{\infty} -v_x dn = e \int_{v_{x \text{ mín}}}^{\infty} v_x dn$$

## Característica corriente-voltaje

*El número de electrones con velocidades ( $v_x$  y  $v_x+dv_x$ ;  $v_y$  y  $v_y+dv_y$ ;  $v_z$  y  $v_z+dv_z$ ):*

$$dn = g(v_x, v_y, v_z) f_{\text{FD}}(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$$

$$g(v_x, v_y, v_z) = \frac{2m^3}{h^3}$$

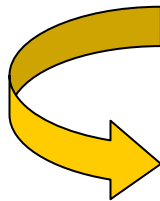
*La aproximación de Boltzmann:*

$$dn = \frac{2m^3}{h^3} e^{(\varepsilon - \varepsilon_F)/kT} dv_x dv_y dv_z$$

## Característica corriente-voltaje

$$I_{n_{S-M}} = e \int_{v_x \text{ mín}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} v_x dn = \frac{2em^3}{h^3} \int_{v_x \text{ mín}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} v_x e^{(\varepsilon - \varepsilon_F)/kT} dv_x dv_y dv_z$$

*con:*  $\varepsilon = \varepsilon_c + \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$



$$I_{n_{S-M}} = \frac{2em^3}{h^3} e^{-(\varepsilon_c - \varepsilon_F)/kT} \int_{v_x \text{ mín}}^{\infty} v_x e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x \int_0^{\infty} e^{-\frac{mv_y^2}{2kT}} dv_y \int_0^{\infty} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}} dv_z$$

## Característica corriente-voltaje

*Pero:*

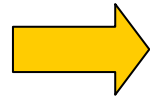
$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{mv_y^2}{2kT}} dv_y = \int_0^{\infty} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}} dv_z = \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}}$$

$$\int_{V_{x \text{ mín}}}^{\infty} v_x e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x = \frac{kT}{m} e^{-\frac{mv_{x \text{ mín}}^2}{2kT}}$$

$$I_{n_{S-M}} = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-\frac{mv_{x \text{ mín}}^2}{2kT}} e^{-(\epsilon_c - \epsilon_F)/kT}$$

## Característica corriente-voltaje

*La región de contacto es muy delgada*



*los electrones pasan al metal por efecto túnel cuando su energía cumpla la condición*

$$\frac{1}{2}mv_x^2 \geq e(\phi_0 - V_0)$$

*La energía mínima*

$$\frac{1}{2}mv_x^2_{\text{mín}} = e(\phi_0 - V_0)$$



$$I_{nS-M} = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-e(\phi_0 - V_0)/kT} e^{-(\epsilon_c - \epsilon_F)/kT}$$

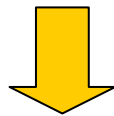
## Característica corriente-voltaje

*Si  $V = 0$*

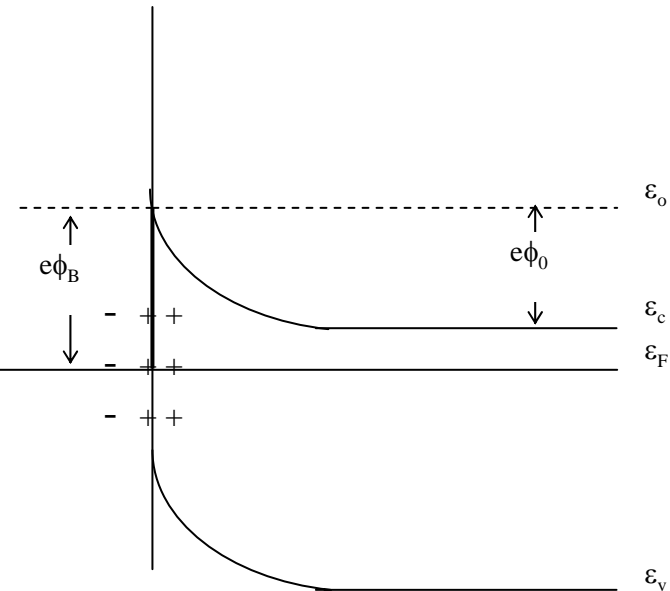
$$I_{nS-M} = I_{nM-S} = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-[e\phi_0 + (\varepsilon_c - \varepsilon_F)] / kT}$$

*Según el gráfico de bandas en equilibrio*

$$e\phi_0 + (\varepsilon_c - \varepsilon_F) = e\phi_B$$



$$I_{nS-M} = I_{nM-S} = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-e\phi_B / kT}$$





## Característica corriente-voltaje

*Si  $V > 0$*

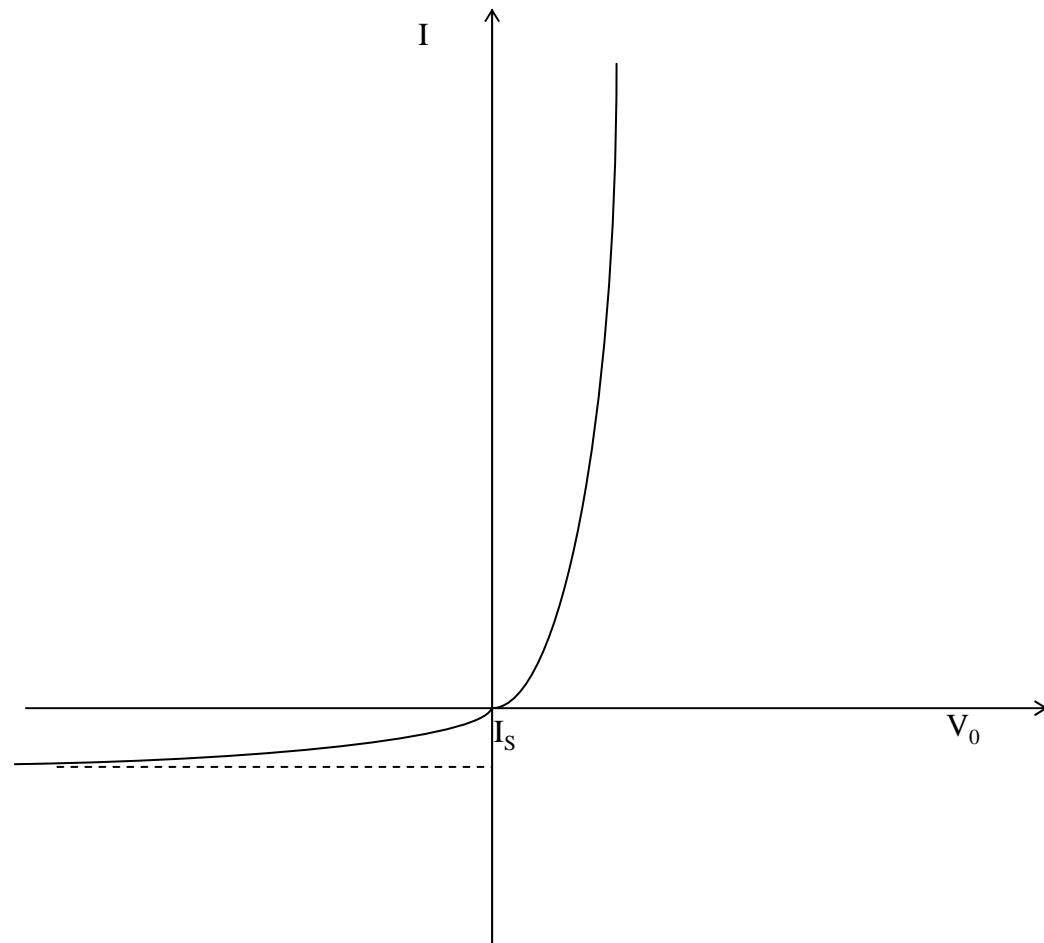
- *La corriente desde el semiconductor al metal se modifica pues la barrera será  $e(\phi_0 - V)$ .*
- *La corriente desde el metal al semiconductor no se modifica pues la barrera que deben saltar los electrones sigue siendo  $\phi_0$ .*
- *La corriente neta en la juntura fuera del equilibrio será:*

$$I_n = I_{nM-S} - I_{nS-M} = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-e(\phi_B - V_0)/kT} - \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-e\phi_B/kT}$$

$$I_n = \frac{e4\pi m}{h^3} (kT)^2 e^{-e\phi_B/kT} (e^{eV_0/kT} - 1)$$

## Ecuación del diodo ideal

$$I_n = I_S \left( e^{eV_0/kT} - 1 \right)$$

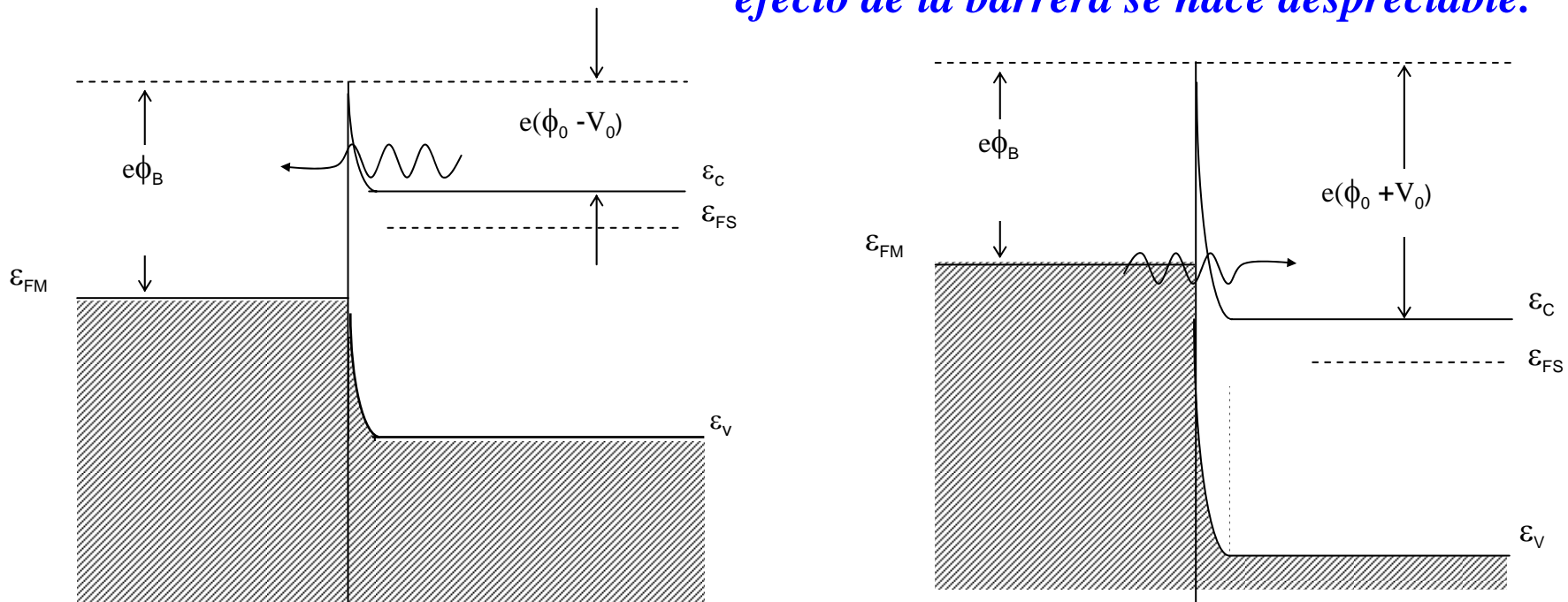


# CONTACTOS NO RECTIFICANTES (ÓHMICOS)

*Cuando el contacto ofrece una resistencia despreciable al flujo de corriente el contacto es óhmico.*

## CONTACTO TÚNEL

*Un contacto M-SC se hace óhmico si el efecto de la barrera se hace despreciable.*



*Por ejemplo dopando fuertemente al semiconductor se puede reducir el ancho de la carga espacial. Se produce efecto túnel para ambos tipos de polarización.*

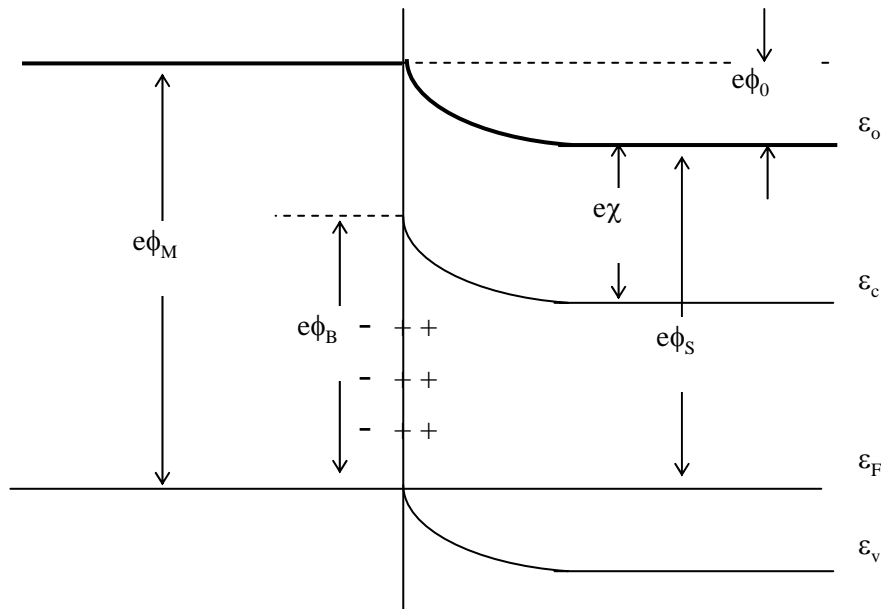
# CONTACTOS NO RECTIFICANTES (ÓHMICOS)

## Contactos óhmicos de Schottky

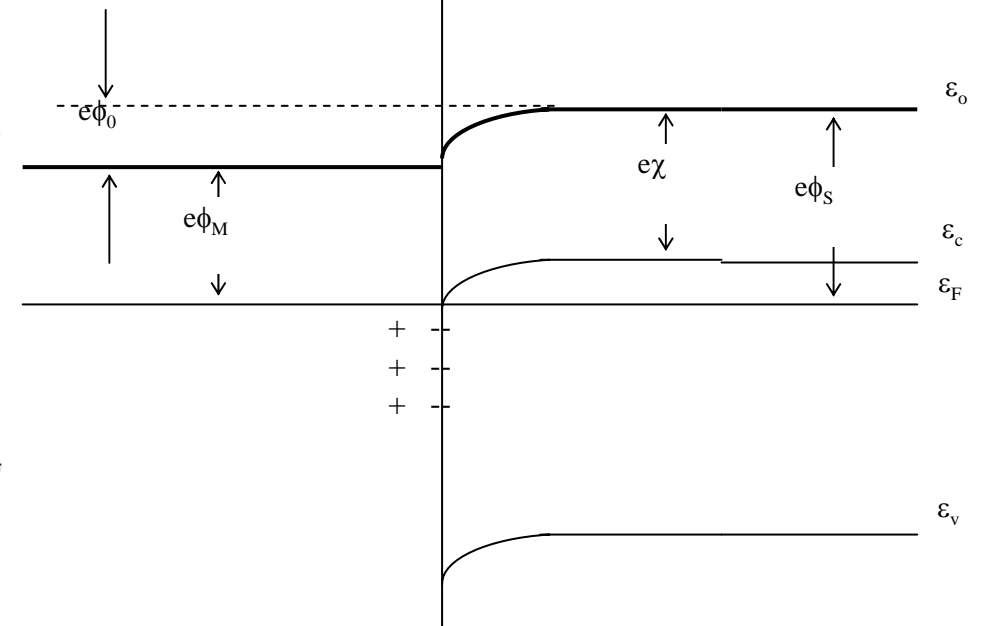
Juntura metal- semiconductor tipo-P

Juntura metal- semiconductor tipo-N

$$\phi_m > \phi_s$$



$$\phi_m < \phi_s$$



## Ejemplo 1

**Datos**

**SC: Si tipo n, dopado**  $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$   
**Metal: W**  $e\phi_m = 4.55 \text{ eV}$   $e\chi = 4.01 \text{ eV}$   
 $T = 300 \text{ K}$

**Calcule**

**El potencial de contacto**  $\phi_0$   
**El ancho de la zona de vaciamiento**  $W$   
**El Campo eléctrico máximo**  $E_{\text{max}}$   
**La capacitancia de juntura**  $C'$

## Ejemplo 1

### *El potencial de contacto*

*SC fuertemente extrínseco*       $\phi_0 = \phi_B - (E_C - E_F)$

### *La Barrera de Schoccky*

$$\phi_B = \phi_m - \chi = (4.55 - 4.01)eV = 0.54eV$$

### *La distancia ente la banda de conducción y $E_F$*

$$n = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{KT}} \cong N_d \quad \longrightarrow \quad E_C - E_F = KT \ln \left( \frac{N_C}{N_d} \right)$$

## Ejemplo 1

### *El potencial de contacto*

$$E_C - E_F = \frac{1}{40} \ln \left( \frac{2.810^{19}}{10^{16}} \right) eV = 0.206 eV$$

$$\phi_0 = \phi_B - (E_C - E_F) = (0.54 - 0.206) eV = 0.33 eV$$

### *El ancho de la zona de vaciamiento*

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (\phi_0 - V)}{eN_d}} = W$$

*El ancho de la zona de vaciamiento*

$$W = \sqrt{\frac{2(11.7)(8.8510^{-14})(0.33)}{(1.610^{-19})10^{16}}} = 0.207 \times 10^{-4} \text{ cm} = 0.207 \mu\text{m}$$

*El Campo eléctrico máximo*

$$|E_{\text{max}}| = \frac{eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{(1.610^{19})(10^{16})(0.20710^{-4})}{11.7(8.8510^{14})} = 3.210^4 \text{ Vcm}^{-1}$$



