

# Clase 5 <sup>1</sup> - Electroestática de la Juntura PN

## JUNTURA PN EN EQUILIBRIO TERMICO

### Contenido:

1. Introducción a la juntura PN
2. Electroestática de la Juntura PN en equilibrio térmico
3. Aproximación de vaciamiento
4. Potenciales de contacto

### Lectura recomendada:

- Müller, Kamins, “Device Electronics for Integrated Circuits”, Ch. 4, §§4.2.
- Pedro Julian, “Introducción a la Microelectronica”, Ch. 3, §§3.1–3.2.
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 3, §§3.3–3.4.

---

<sup>1</sup>Esta clase es una traducción, realizada por los docentes del curso “Dispositivos Semiconductores” de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesus A. de Alamo para el curso “6.012 - Microelectronic Devices and Circuits” del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

## Preguntas disparadoras

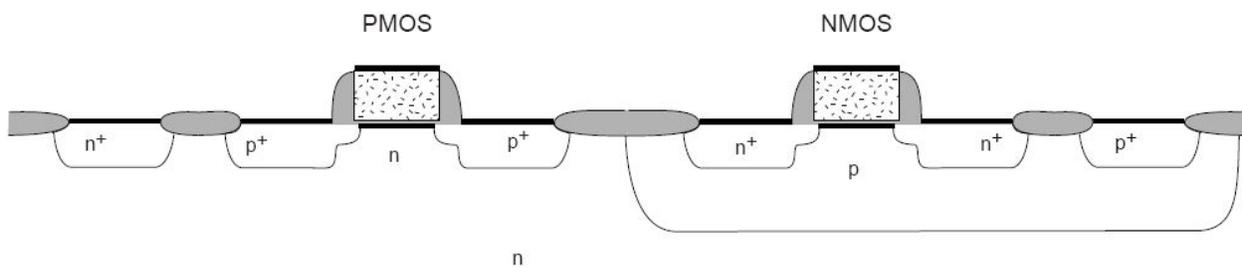
- ¿Qué ocurre si la distribución de dopantes en un semiconductor cambia abruptamente del tipo N al tipo P?
- ¿Existe alguna descripción simple de la electrostática de una juntura PN?

# 1. Introducción a la juntura PN

- Juntura PN: Región P y Región N en contacto directo
- ¿Por qué es importante estudiar la juntura PN?

Esta presente en *todos* los dispositivos semiconductores.

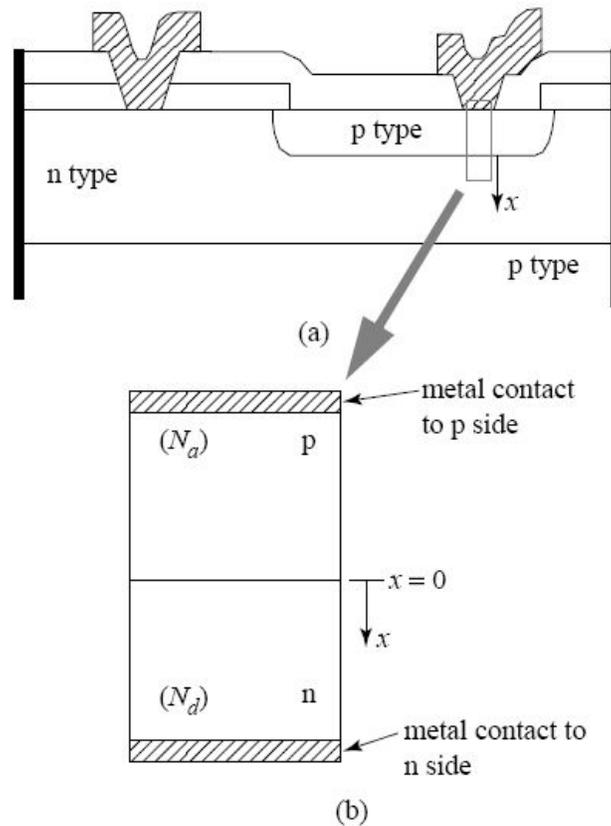
Ejemplo: Corte lateral de un circuito integrados CMOS



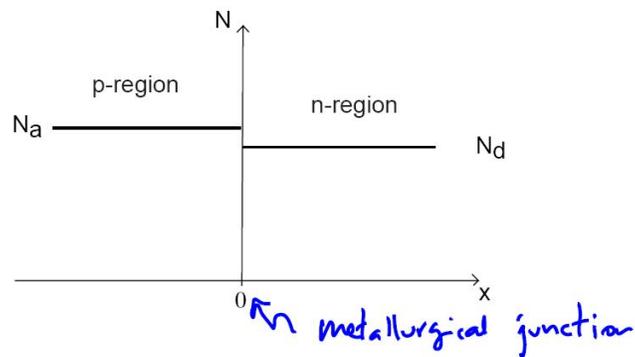
Comprender la juntura PN es esencial para entender la operación de un transistor.

## 2. Electrostatica de la Juntura PN en equilibrio térmico

Nos centramos en la juntura:

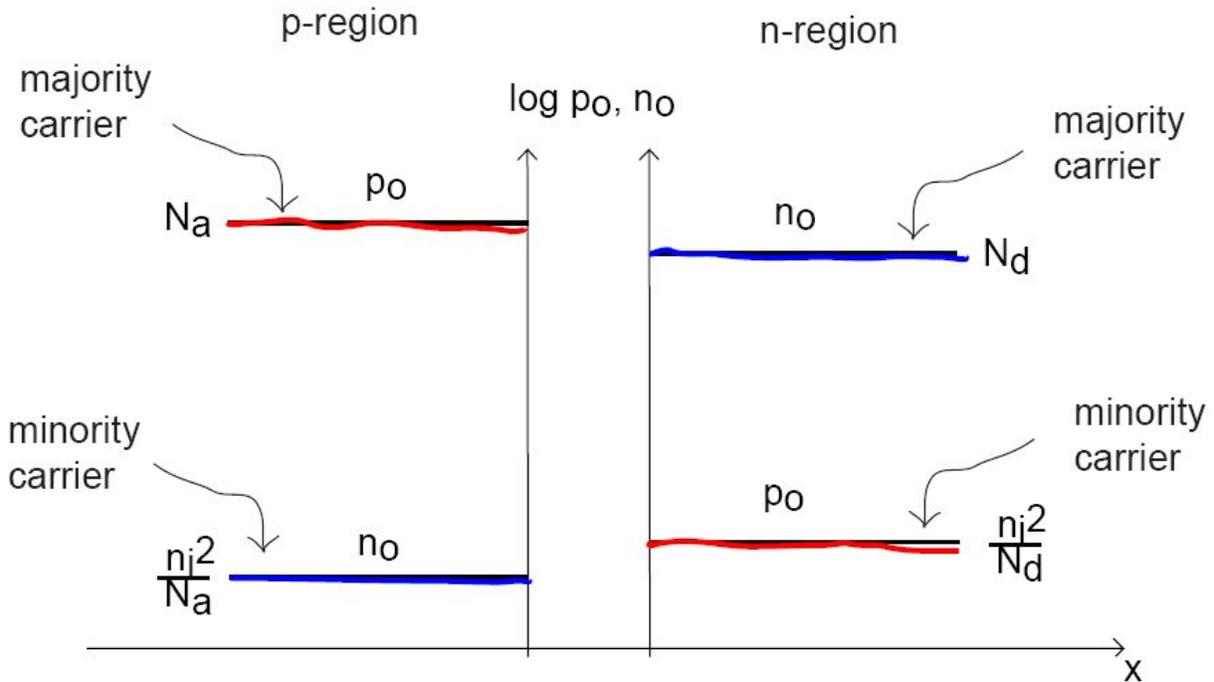


Distribución de dopantes en una juntura PN abrupta :



¿Cómo es la distribución de portadores en equilibrio térmico?

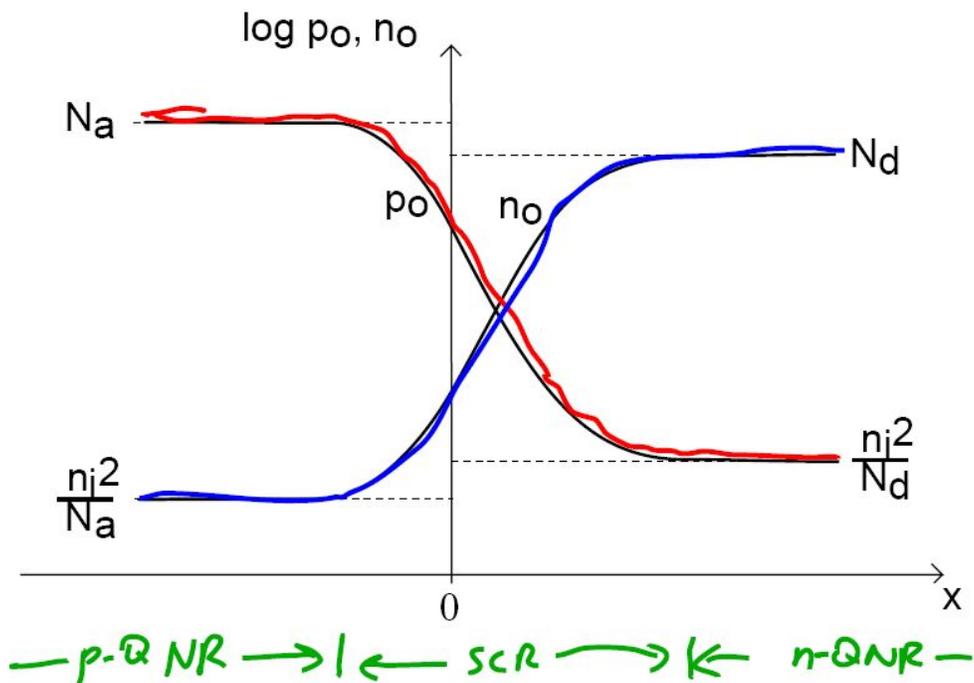
Primero pensemos en los dos lados por separado:



Luego los colocamos juntos. Que sucede?

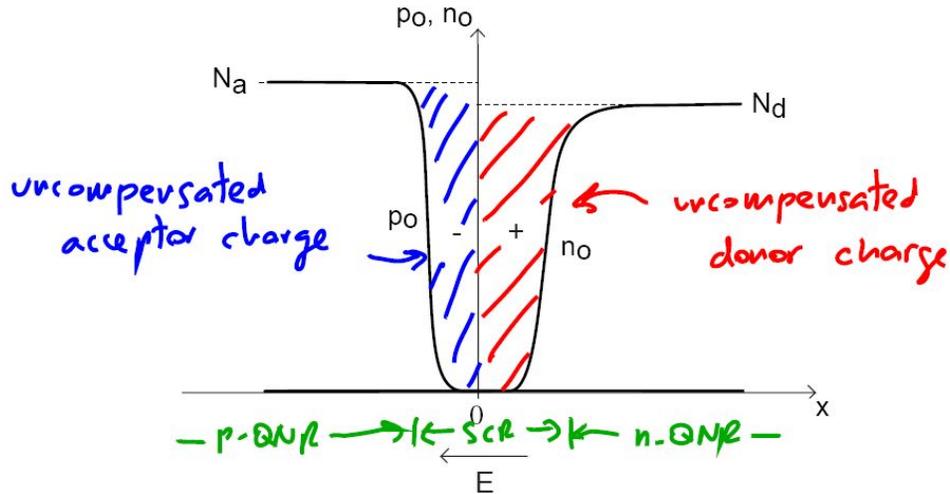
Se difunden los electrones y los huecos del lado en que son portadores mayoritarios hacia el otro lado, hasta que la corriente de arrastre balancea la corriente de difusión.

Distribución de portadores resultante en equilibrio térmico:



- Lejos de la "juntura metalúrgica" nada sucede.
  - *Regiones cuasi-neutrales*
- Alrededor de la juntura metalúrgica: la corriente de arrastre debe cancelar a la de difusión
  - *Región de carga espacial*

En escala lineal:



Equilibrio Termico: Balance entre corrientes de arrastre y difusión

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \xrightarrow{J_p^{\text{diff}}} \\
 \xleftarrow{J_p^{\text{drift}}}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \xrightarrow{J_p^{\text{diff}}} \\ \xleftarrow{J_p^{\text{drift}}} \end{array}} \right\} J_p = 0 \\
 \begin{array}{l}
 \xrightarrow{J_n^{\text{diff}}} \\
 \xleftarrow{J_n^{\text{drift}}}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \xrightarrow{J_n^{\text{diff}}} \\ \xleftarrow{J_n^{\text{drift}}} \end{array}} \right\} J_n = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} J_p = 0 \\ J_n = 0 \end{array}} \right\} J = 0 \text{ e} \\
 \text{every } x$$

Podemos dividir al semiconductor en tres regiones:

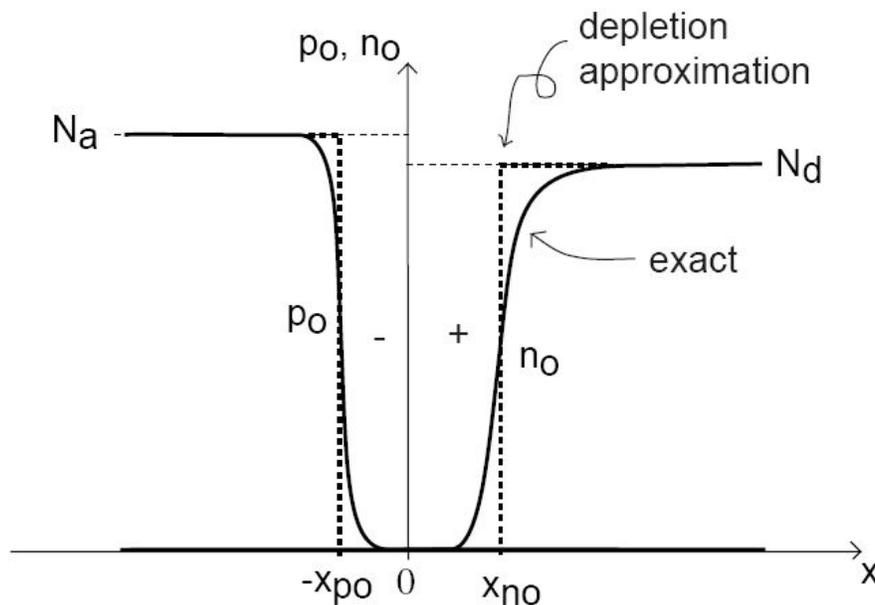
- Dos regiones P y N cuasi-neutrales (QNR's)
- Una región con carga especial (SCR)

Queremos determinar  $n_o(x)$ ,  $p_o(x)$ ,  $\rho(x)$ ,  $E(x)$ , y  $\phi(x)$ .

Resolvemos la electrostática utilizando una aproximación simple y poderosa...

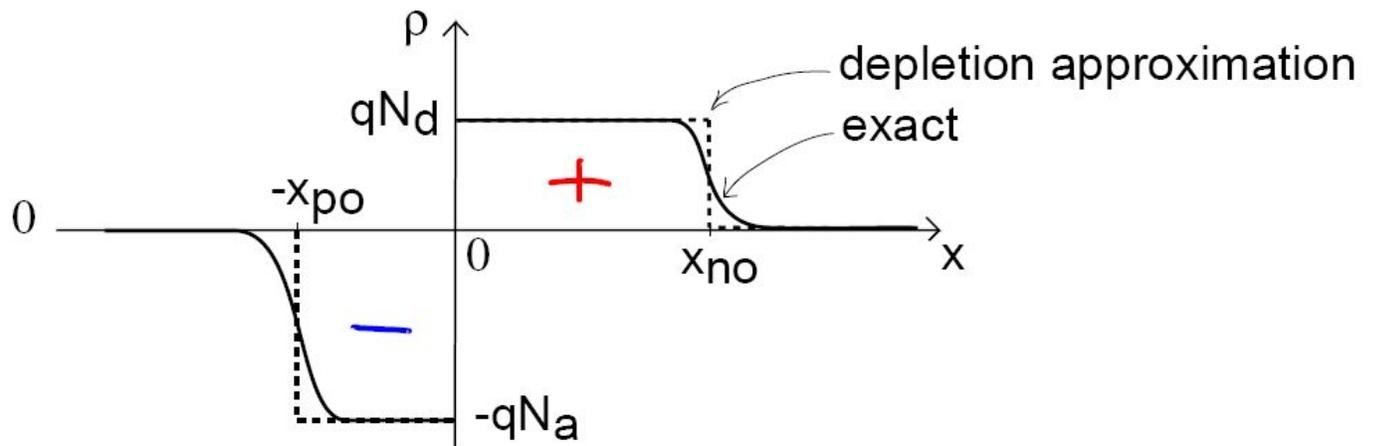
### 3. Aproximación de Vaciamiento

- Asumimos que las QNR's tienen neutralidad de carga
- Asumimos que las SCR están vacías de portadores (*región de vaciamiento*)
- Transición entre SCR y QNR's abrupta (debemos calcular donde colocar  $-x_{po}$  y  $x_{no}$ )



- $x < -x_{po}$        $p_o(x) = N_a, n_o(x) = \frac{n_i^2}{N_a}$
- $-x_{po} < x < 0$        $p_o(x), n_o(x) \ll N_a$
- $0 < x < x_{no}$        $n_o(x), p_o(x) \ll N_d$
- $x_{no} < x$        $n_o(x) = N_d, p_o(x) = \frac{n_i^2}{N_d}$

## ● DENSIDAD DE CARGA ESPACIAL

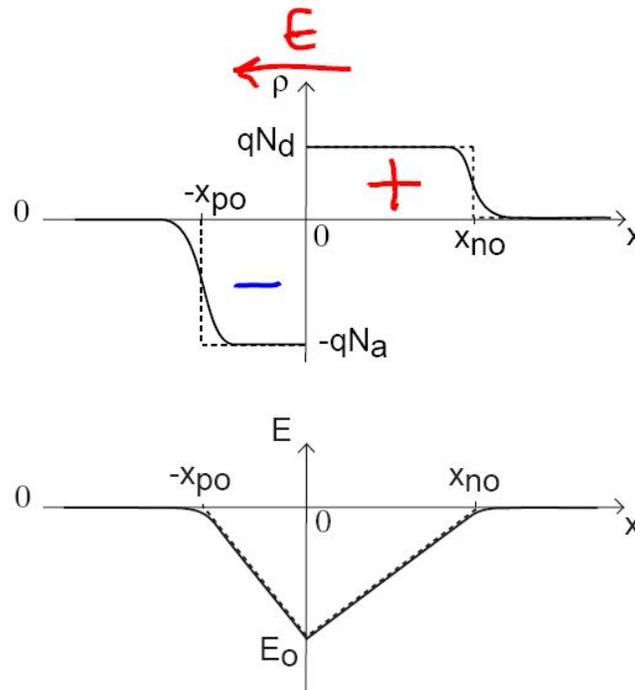


$$\begin{aligned}
 \rho(x) &= 0 & x < -x_{po} \\
 &= -q N_a & -x_{po} < x < 0 \\
 &= q N_d & 0 < x < x_{no} \\
 &= 0 & x_{no} < x
 \end{aligned}$$

## ● CAMPO ELÉCTRICO

Integramos la ecuación de Gauss:

$$E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx$$



- $x < -x_{po}$        $E(x) = 0$
- $-x_{po} < x < 0$        $E(x) - E(-x_{po}) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{-x_{po}}^x -qN_a dx$   
 $= -\frac{qN_a}{\epsilon_s} x \Big|_{-x_{po}}^x = -\frac{qN_a}{\epsilon_s} (x + x_{po})$
- $0 < x < x_{no}$        $E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s} (x - x_{no})$
- $x_{no} < x$        $E(x) = 0$

## ● POTENCIAL ELECTROSTÁTICO

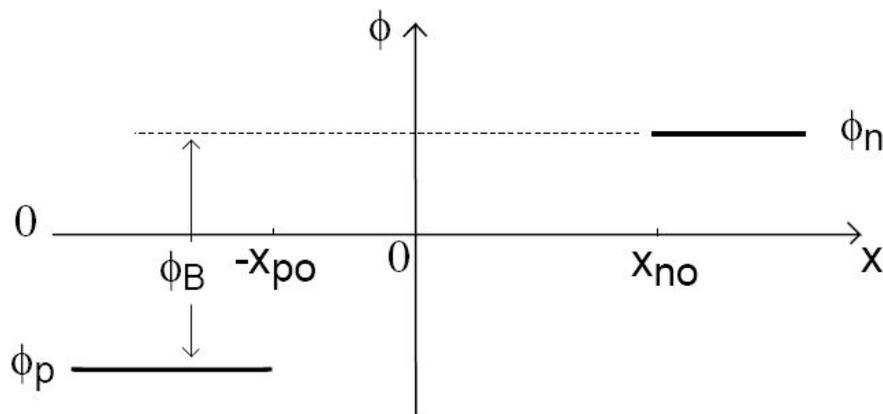
(definiendo  $\phi = 0$  @  $n_o = p_o = n_i$ ):

$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_o}{n_i} \right) \quad \phi = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_o}{n_i} \right)$$

En las regiones QNR's conocemos  $n_o$ ,  $p_o \Rightarrow$  podemos determinar  $\phi$ :

$$\text{en QNR-P: } p_o = N_a \Rightarrow \phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_a}{n_i} \right)$$

$$\text{en QNR-N: } n_o = N_d \Rightarrow \phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right)$$



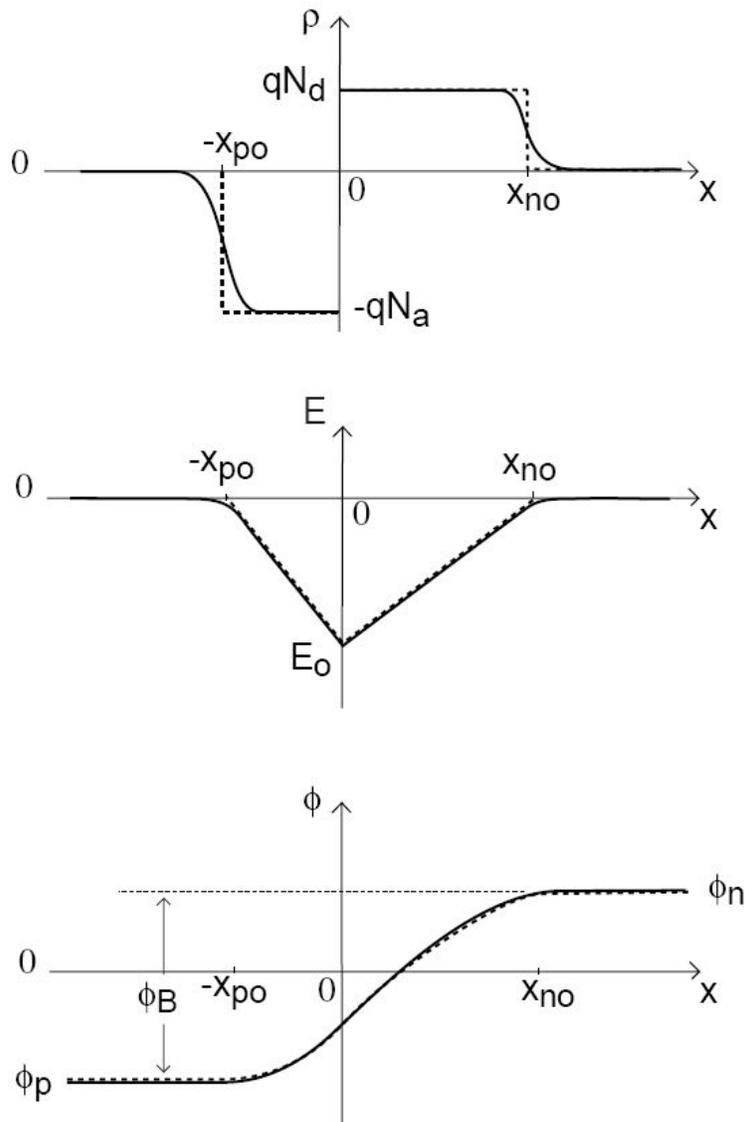
Potencial de juntura<sup>2</sup>:

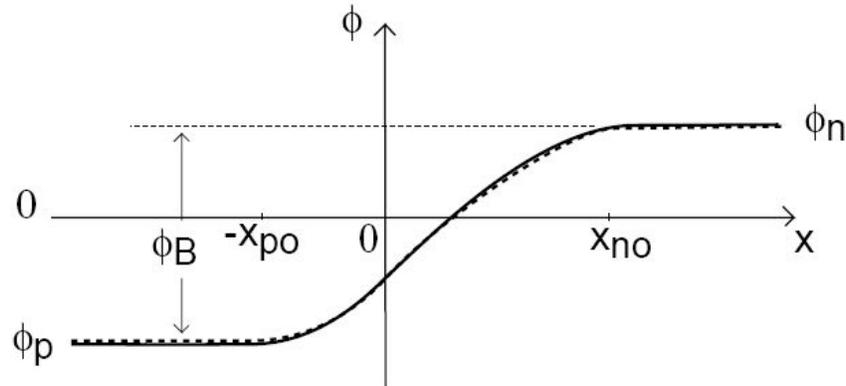
$$\phi_B = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

<sup>2</sup>**Importante:** esta es una expresión general, para la cual no se empleó la aproximación de vaciamiento.

Para obtener  $\phi(x)$  integramos  $E(x)$ :

$$\phi(x_2) - \phi(x_1) = - \int_{x_1}^{x_2} E(x) dx$$





- $x < -x_{po}$        $\phi(x) = \phi_p$
- $-x_{po} < x < 0$        $\phi(x) = \phi(-x_{po}) - \int_{-x_{po}}^x -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x + x_{po})dx$   
 $= \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_{po})^2$
- $0 < x < x_{no}$        $\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x - x_{no})^2$
- $x_{no} < x$        $\phi(x) = \phi_n$

El trabajo esta casi concluido...

Aun no conocemos  $x_{no}$  y  $x_{po} \Rightarrow$  necesitamos dos ecuaciones adicionales

1. Pedimos neutralidad global de carga eléctrica:

$$q N_a x_{po} = q N_d x_{no}$$

2. Pedimos que  $\phi(x)$  sea continua en  $x = 0$ :

$$\phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s} x_{po}^2 = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s} x_{no}^2$$

Dos ecuaciones con dos incógnitas. Solución:

$$x_{no} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} \quad x_{po} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_d}{q(N_a + N_d)N_a}}$$

Ahora el problema esta completamente resuelto.

Otros resultados:

Ancho total de la región de carga espacial:

$$x_{do} = x_{no} + x_{po} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\phi_B(N_a + N_d)}{qN_aN_d}}$$

Campo electrico en la juntura metalúrgica:

$$|E_o| = \sqrt{\frac{2q\phi_B N_a N_d}{\epsilon_s(N_a + N_d)}}$$

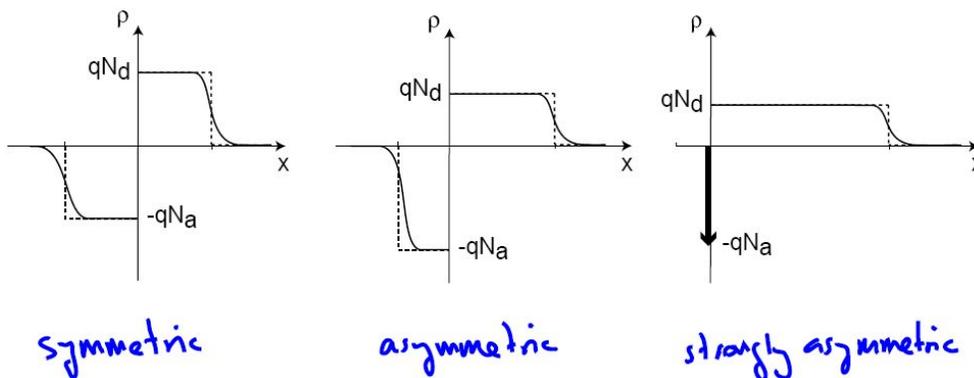
Tres casos de interés:

- Juntura simétrica:  $N_a = N_d \Rightarrow x_{po} = x_{no}$
- Juntura asimétrica:  $N_a > N_d \Rightarrow x_{po} < x_{no}$
- Juntura muy asimétrica:  
ej. p<sup>+</sup>n juntura:  $N_a \gg N_d$

$$x_{po} \ll x_{no} \simeq x_{do} \simeq \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B}{qN_d}} \propto \frac{1}{\sqrt{N_d}}$$

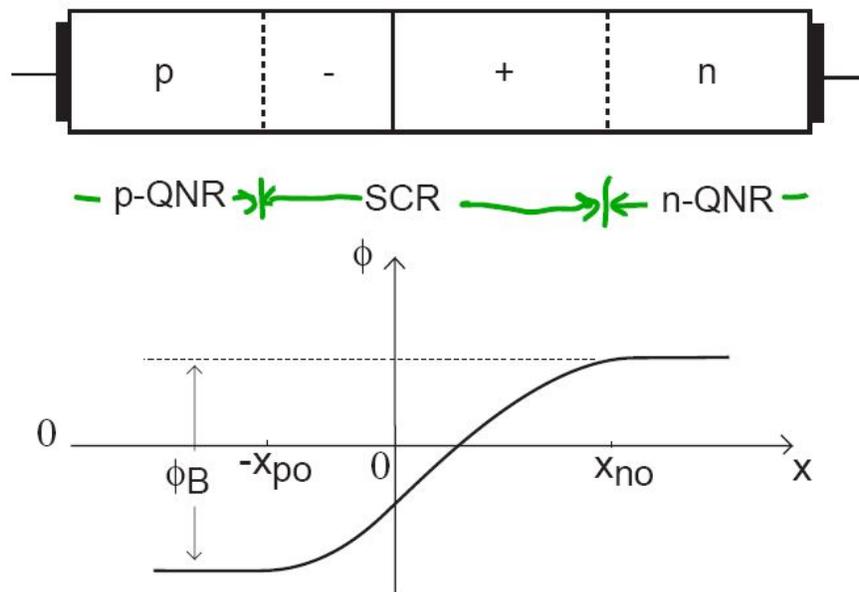
$$|E_o| \simeq \sqrt{\frac{2q\phi_B N_d}{\epsilon_s}} \propto \sqrt{N_d}$$

El lado poco dopado controla la electrostática de la juntura PN.



## 4. Potencial de contacto

La distribución de potencial hasta aquí es:



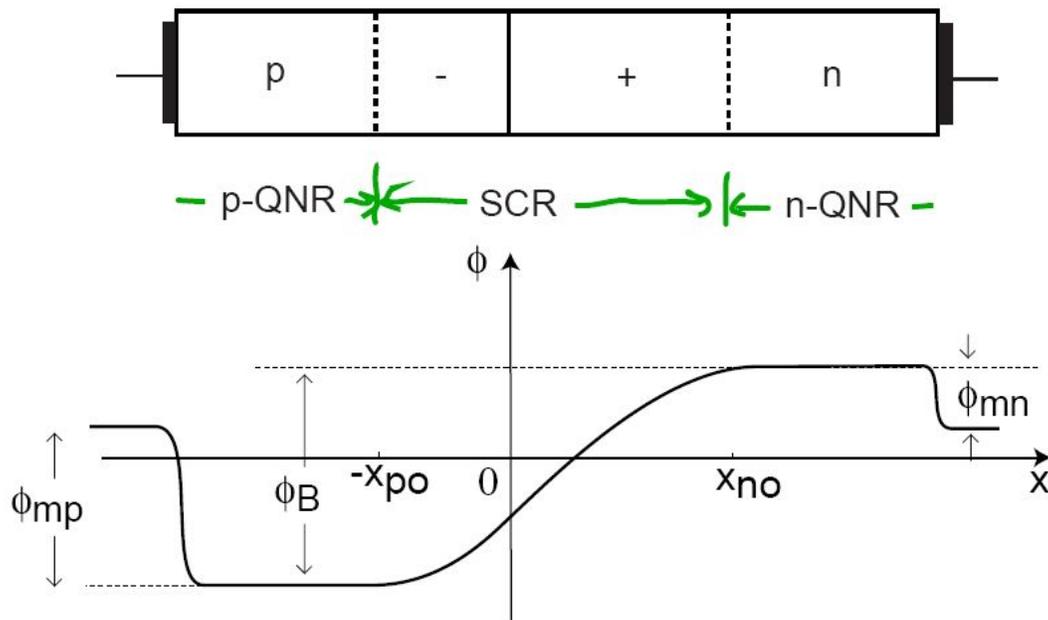
Pregunta 1: *Si coloco un voltímetro sobre entre los contactos, ¿puedo medir  $\phi_B$ ?*

- Si       No       Depende

Pregunta 2: *Si cortocircuito los contactos con un cable, ¿circula corriente a través del mismo?*

- Si       No       A veces

Nos estamos olvidando del *potencial de contacto* en los contactos metal-semiconductor:



Contactos metal-semiconductor: junturas de materiales distintos

$\Rightarrow$  potenciales de juntura:  $\phi_{mn}$ ,  $\phi_{mp}$

La diferencia de potencial a lo largo de la estructura debe ser cero

$\Rightarrow$  NO se puede medir  $\phi_B$  de forma directa.

$$\phi_B = \phi_{mn} + \phi_{mp}$$

## Conclusiones principales

- Electroestática de una juntura PN en equilibrio:
  - una *Región de carga espacial*
  - Rodeada por dos *Regiones cuasi-neutrales*

⇒ Potencial de juntura en una juntura PN
- A primer orden, las concentraciones de portadores en las regiones de carga espacial son mucho menores que el nivel de dopaje  
⇒ *Aproximación de vaciamiento.*
- Potencial de contacto en las junturas metal-semiconductor:  
⇒ entre los contactos metálicos de una juntura PN no hay potencial electrostático