

## Clase 6<sup>1</sup> - Juntura PN (II)

### ELECTROSTÁTICA DE LA JUNTURA PN CON POLARIZACIÓN APLICADA

#### Contenidos:

1. Electrostática de la juntura PN con polarización aplicada
2. Capacidad de juntura
3. Corriente a través de la juntura
4. Diagramas de bandas

#### Lectura recomendada:

Howe-Sodini: Microelectronics an integrated approach,  
Chap. 3

P. Julian: Introducción a la Microelectrónica, Cap. 3

---

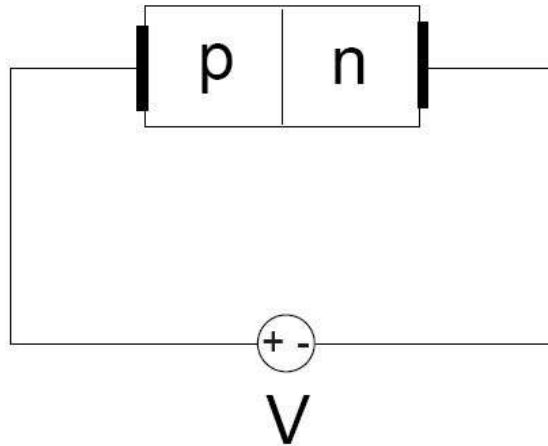
<sup>1</sup>Esta clase es una traducción realizada por los docentes del curso “Dispositivos Semiconductores - de la FIUBA”, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso “6.012 - Microelectronic Devices and Circuits” del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

## Preguntas disparadoras

- ¿Qué ocurre con la electrostática de la juntura PN si se aplica una tensión entre sus terminales?
- ¿Por qué una juntura PN se comporta en cierto modo como un capacitor?

# 1. Electrostática de la juntura PN con polarización aplicada

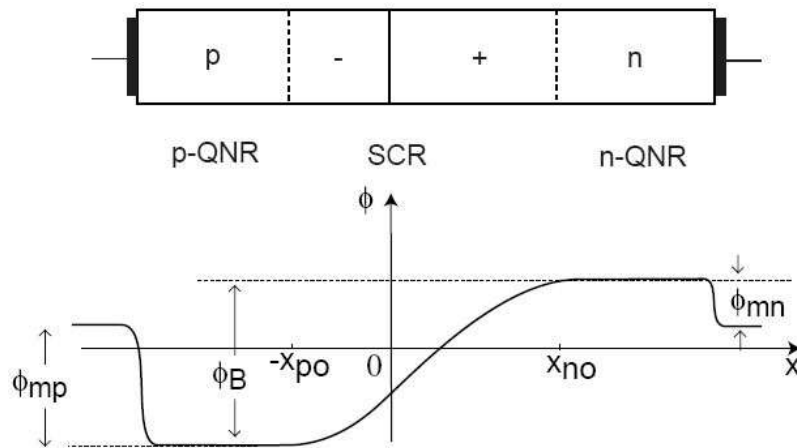
Convención de signo para la tensión de polarización de la juntura PN:



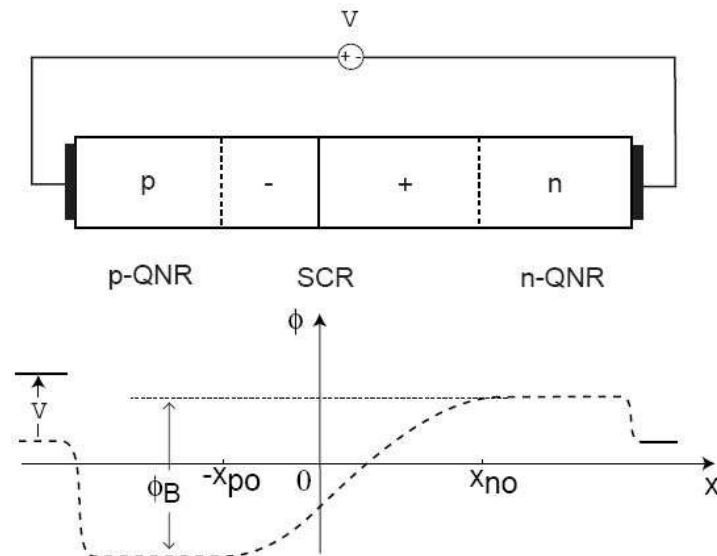
$V > 0$  polarización directa, *forward* bias

$V < 0$  polarización inversa, *reverse* bias

- Distribución de potencial en una juntura PN en equilibrio térmico:

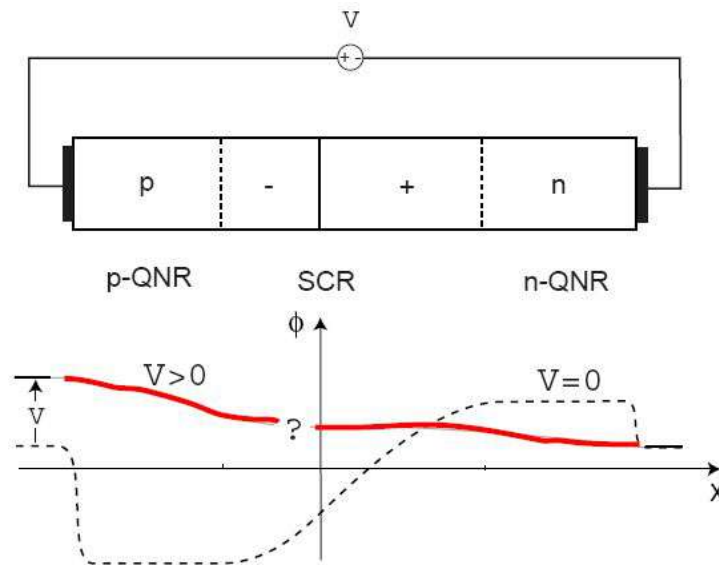


- Aplicamos una diferencia de potencial entre los lados P y N:



La batería impone una diferencia de potencial a lo largo de la juntura.

¿Cómo se modifica la distribución de potencial dentro de la juntura como resultado de la polarización aplicada?



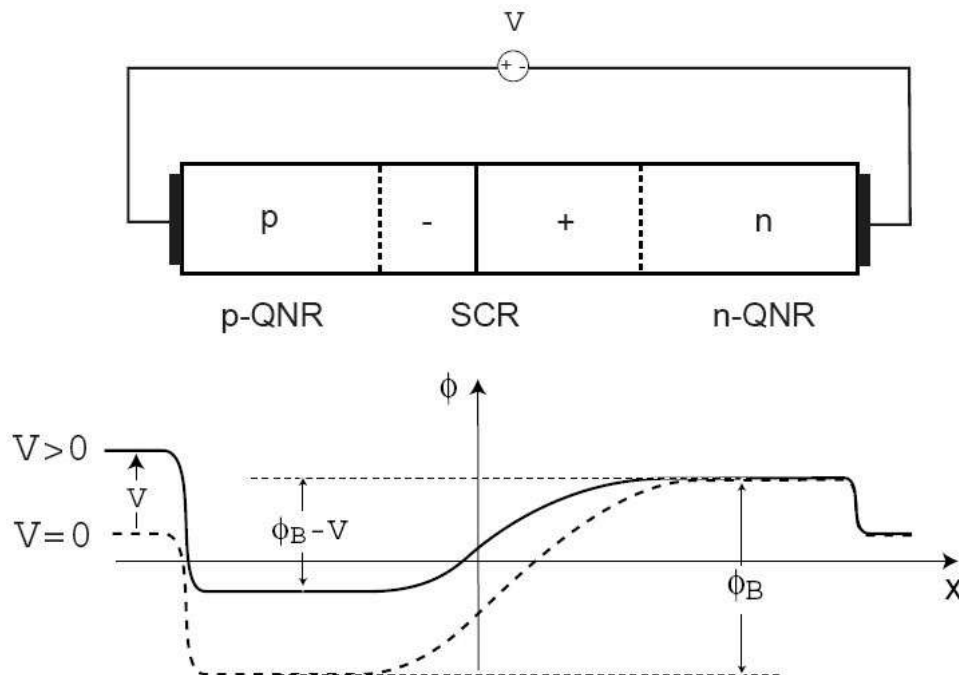
Hay cinco regiones donde  $V$  puede caer:

- ¿contacto metal/p-QNR?
- ¿p-QNR?
- ¿zona desierta (SCR)?
- ¿n-QNR?
- ¿contacto metal/n-QNR?

¿En qué región se produce la mayor caída del potencial externo  $V$  aplicado?

¿Cómo se distribuye el potencial  $V$  a lo largo del diodo?

La tensión externa aplicada cae en la zona desierta (SCR):



Se modifica la diferencia de potencial entre los los bordes de la zona desierta:

- en equilibrio:  $\phi_B$
- en polarización directa:  $\phi_B - V < \phi_B$
- en polarización inversa:  $\phi_B - V > \phi_B$  (dado que  $V < 0$ )

¿Y qué le ocurre a la electrostática de la región SCR?

## Electrostática del diodo PN con polarización aplicada:

[height=15cm]./Figuras/pnxticsbias.jpg

- *en directa*: la diferencia de potencial en la zona de sierta  $\downarrow \Rightarrow |E| \downarrow \Rightarrow x_d \downarrow$
- *en inversa*: la diferencia de potencial en la zona de sierta  $\uparrow \Rightarrow |E| \uparrow \Rightarrow x_d \uparrow$

Esencialmente,

- La electrostática de la juntura PN polarizada no se modifica cualitativamente respecto al equilibrio térmico.
- Se modifica el dipolo de carga en la zona desierta (SCR) de modo de compensar el potencial forzado externamente.

Consecuencia importante:

- La formulación analítica de la electrostática de la juntura PN polarizada es idéntica a la del equilibrio térmico, pero considerando:

$$\phi_B \longrightarrow \phi_B - V$$

Luego, utilizando la aproximación de vaciamiento:

$$x_n(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} \quad x_p(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)N_d}{q(N_a + N_d)N_a}}$$

$$x_d(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_B - V)(N_a + N_d)}{qN_aN_d}}$$

$$|E|(V) = \sqrt{\frac{2q(\phi_B - V)N_aN_d}{\epsilon_s(N_a + N_d)}}$$



Todo puede ser reescrito como:

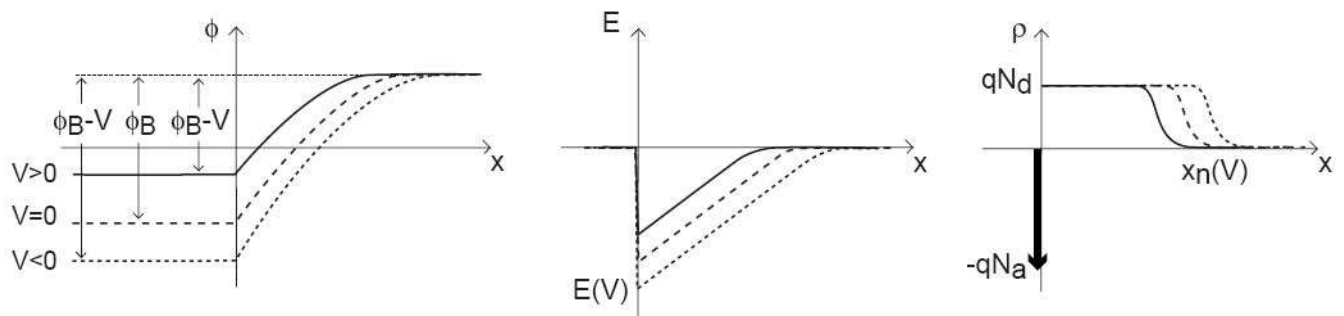
$$x_n(V) = x_{no} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$

$$x_p(V) = x_{po} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$

$$x_d(V) = x_{do} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$

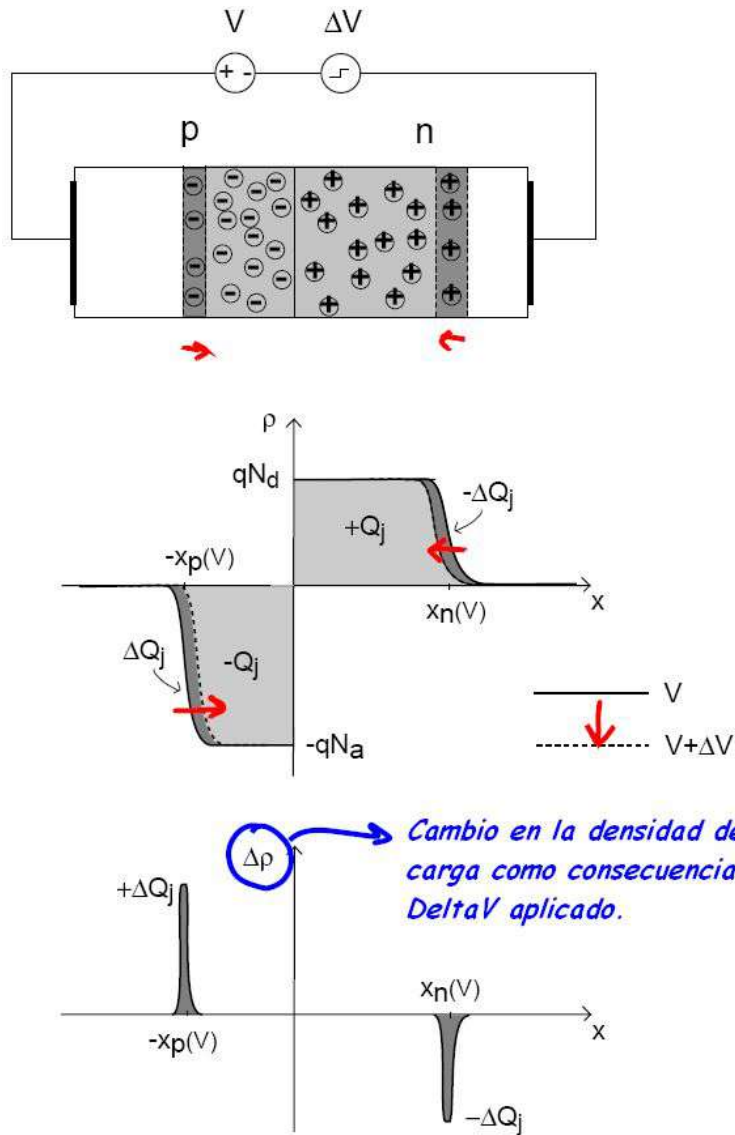
$$|E|(V) = |E_o| \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$

En una juntura fuertemente asimétrica, todos los cambios tienen lugar en el lado menos dopado:



## 2. Capacidad de juntura

Aplicamos una *variación de tensión* que se suma a la polarización:

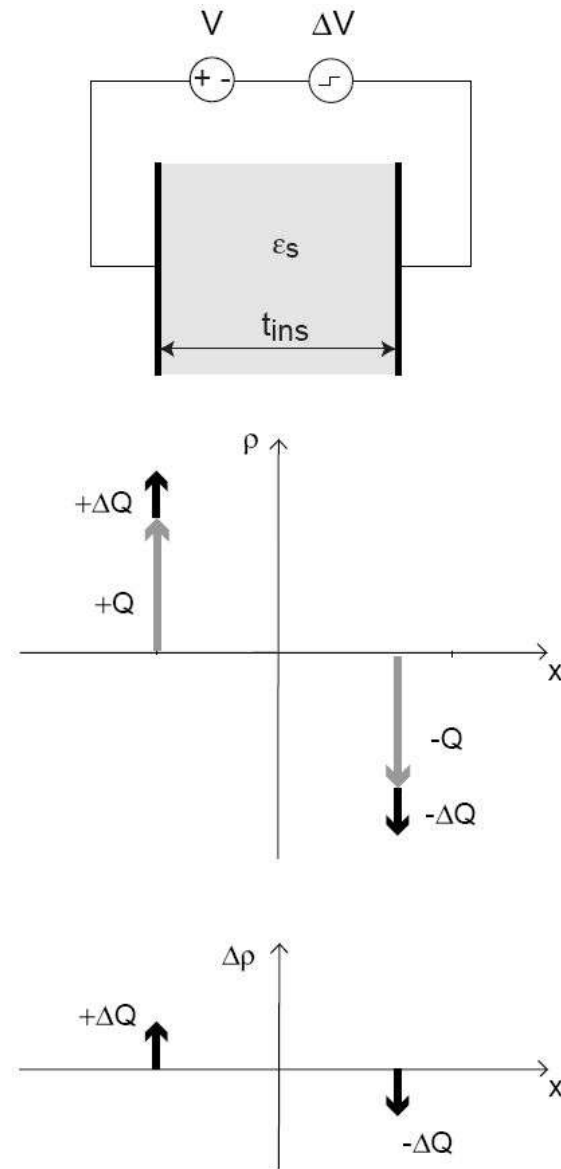


Se produce un cambio en  $\Delta V$  entre los lados de la juntura:

$\Rightarrow$  Cambio de  $\Delta Q_j$  en  $-x_p$

$\Rightarrow$  Cambio de  $-\Delta Q_j$  en  $x_n$

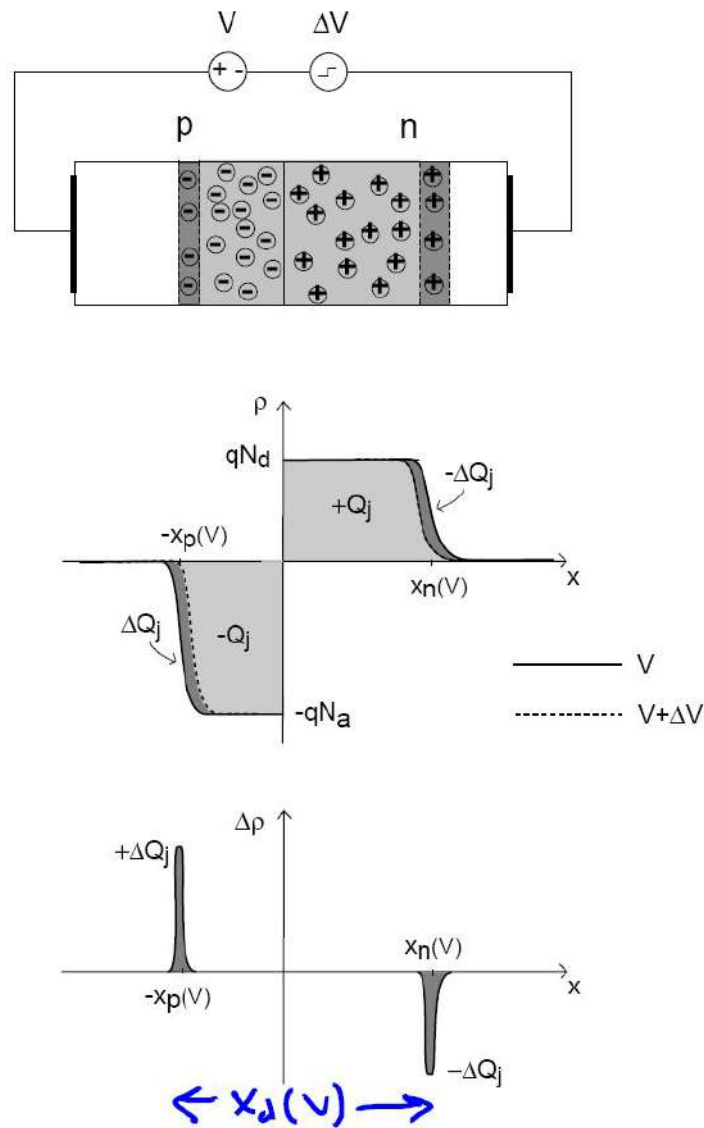
Se parece a un capacitor de placas planas paralelas:



Capacidad por unidad de área:

$$C' = \frac{\epsilon_s}{t_{ins}}$$

Aplicando el modelo del capacitor plano paralelo a la juntura PN se tiene:



Capacidad de Juntura (*Depletion Capacitance*) por unidad de área (usando aprox. de vacimiento):

$$C'_j(V) = \frac{\epsilon_s}{x_d(V)} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_a N_d}{2(\phi_B - V)(N_a + N_d)}} = \frac{C'_{jo}}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}}$$

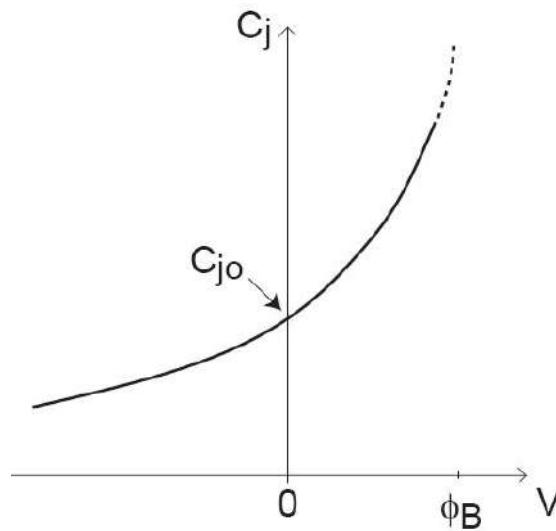
$$C'_j(V) = \frac{\epsilon_s}{x_d(V)} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_a N_d}{2(\phi_B - V)(N_a + N_d)}} = \frac{C'_{jo}}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}}$$

Conociendo el área  $A$  de la juntura, la capacidad es:

$$C_j(V) = A \cdot C'_j(V)$$

Principales dependencias de  $C_j$ :

- $C_j$  depende de la tensión de polarización aplicada (porque  $x_d$  depende)



- $C_j$  depende del dopaje:  $N_a, N_d \uparrow \Rightarrow C_j \uparrow$

- $C_j$  es proporcional al área ( $A$ ) de la juntura.
- En una juntura muy asimétrica (*ej.* juntura  $p^+n$ ):

$$C'_j(V) \simeq \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_d}{2(\phi_B - V)}}$$

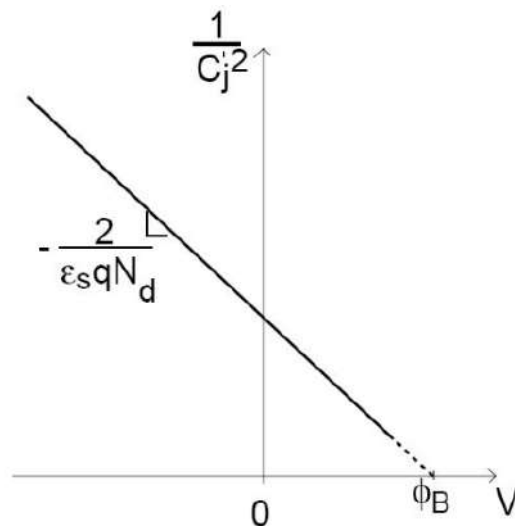
La capacidad está dominada por el lado menos dopado.

Relevancia de la característica capacidad-tensión de una juntura PN:

1.  $C_j$ : influye en la respuesta dinámica de todos los dispositivos y circuitos.
2. Permite caracterizar la juntura:

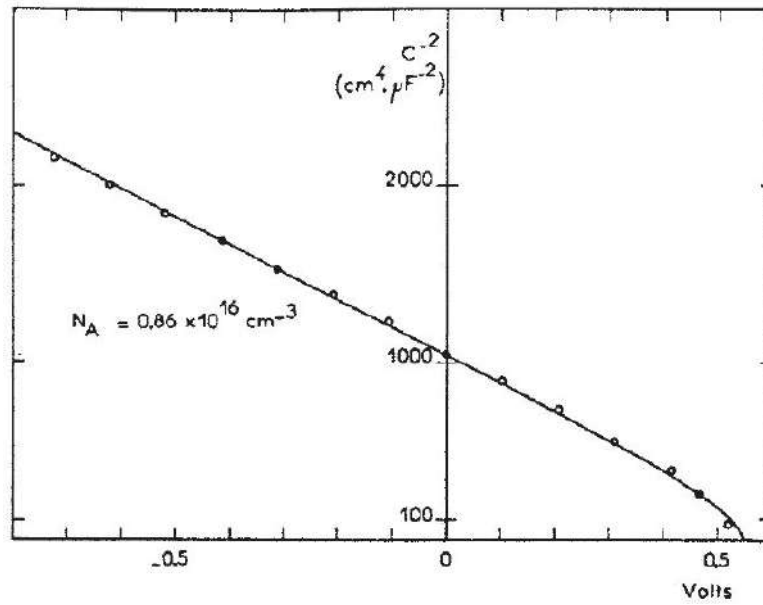
Por ejemplo para una juntura  $p^+n$  (muy asimétrica) se puede medir la curva  $C'_j$  en función de la tensión aplicada. Si luego se calcula  $1/C_j'^2$  se tiene:

$$\frac{1}{C_j'^2} \simeq \frac{2(\phi_B - V)}{q\epsilon_s N_d}$$



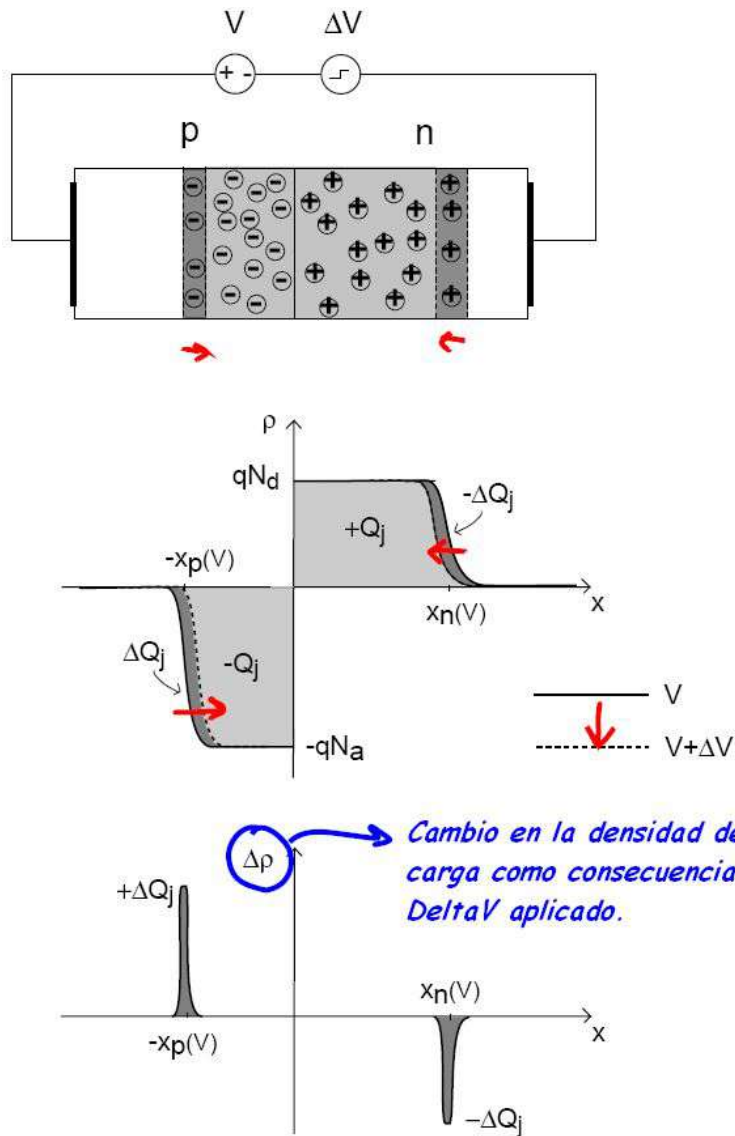
De esta forma es posible estimar  $\phi_B$  y  $N_d$  ajustando los valores medidos con una recta.

Ejemplo: datos experimentales [de *Fortini et al.*, *IEEE Trans. Electron Dev.* ED-29, 1604 (1982)]:





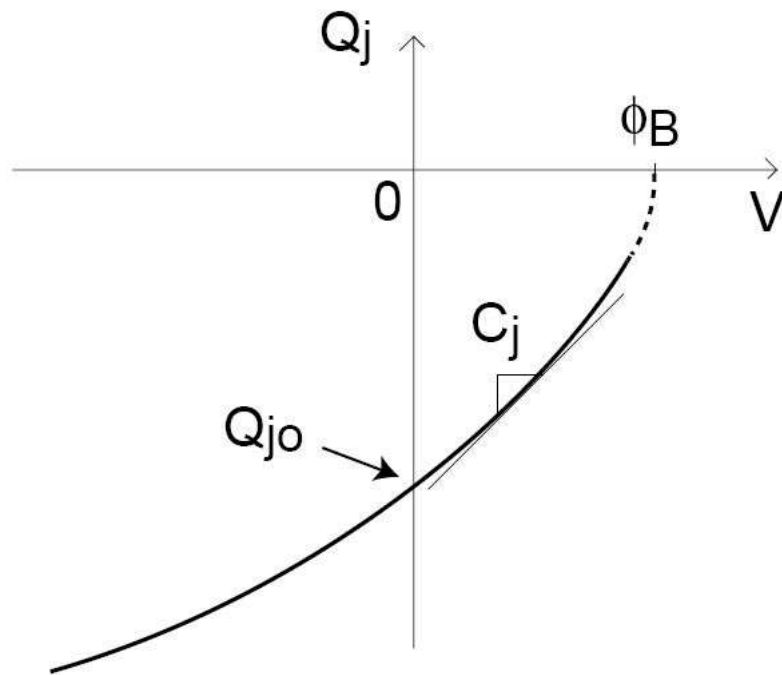
Otra forma alternativa de ver la capacidad: *carga de vaciamiento*



Dentro de la aproximación de vaciamiento:

$$Q_j(V) = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_a N_d (\phi_B - V)}{N_a + N_d}} = Q_{jo} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$

$$Q_j(V) = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_a N_d (\phi_B - V)}{N_a + N_d}} = Q_{jo} \sqrt{1 - \frac{V}{\phi_B}}$$



$C_j$  es la pendiente de la curva  $Q_j$  vs.  $V$  es decir:

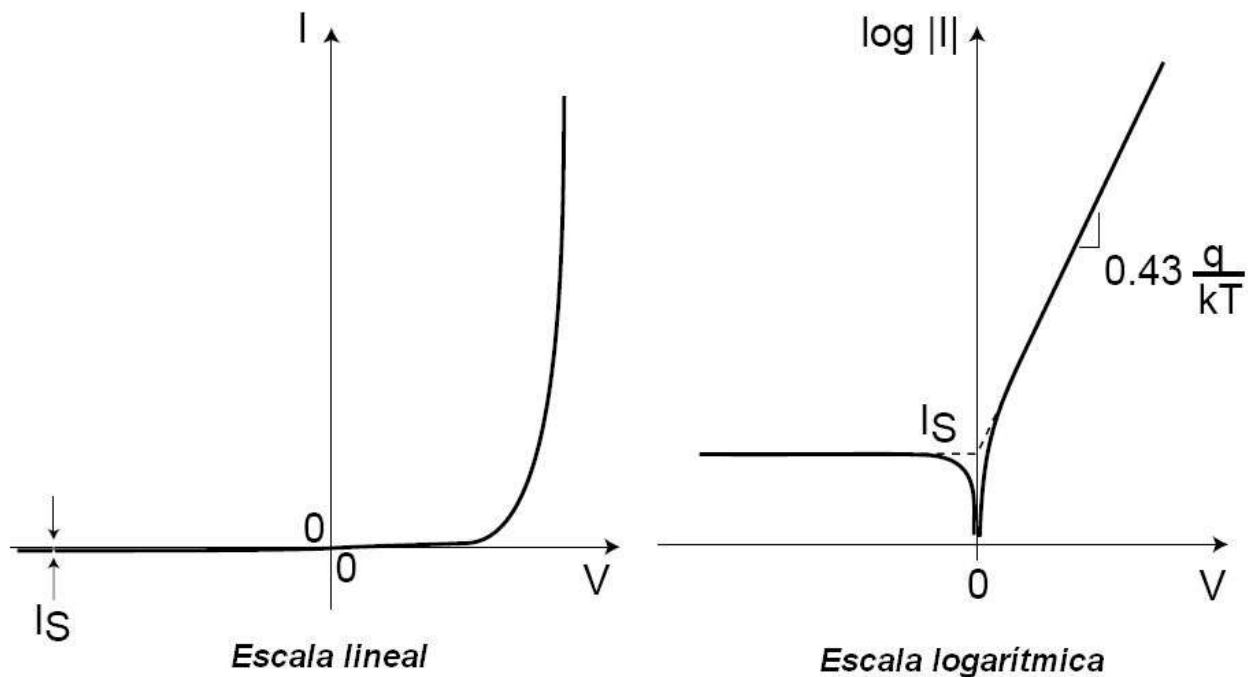
$$C_j = \frac{dQ_j}{dV}$$

### 3. Corriente a través de la juntura

Al aplicar una tensión sobre la juntura PN se observa que circula una corriente.

La expresión de la corriente en función de la tensión la obtendremos más adelante en la clase "El diodo de juntura PN (I)".

Por el momento solo mostraremos que para tensiones negativas la corriente es muy pequeña y para tensiones positivas crece exponencialmente. Esta es la propiedad eléctrica más importante del diodo, motivo por el cual dedicaremos una clase entera para estudiarla en detalle.



## 4. Diagrama de bandas de energía

Consideremos el caso de la juntura sin tensión externa aplicada, es decir en equilibrio térmico y estudiemos como sería su diagrama de bandas.

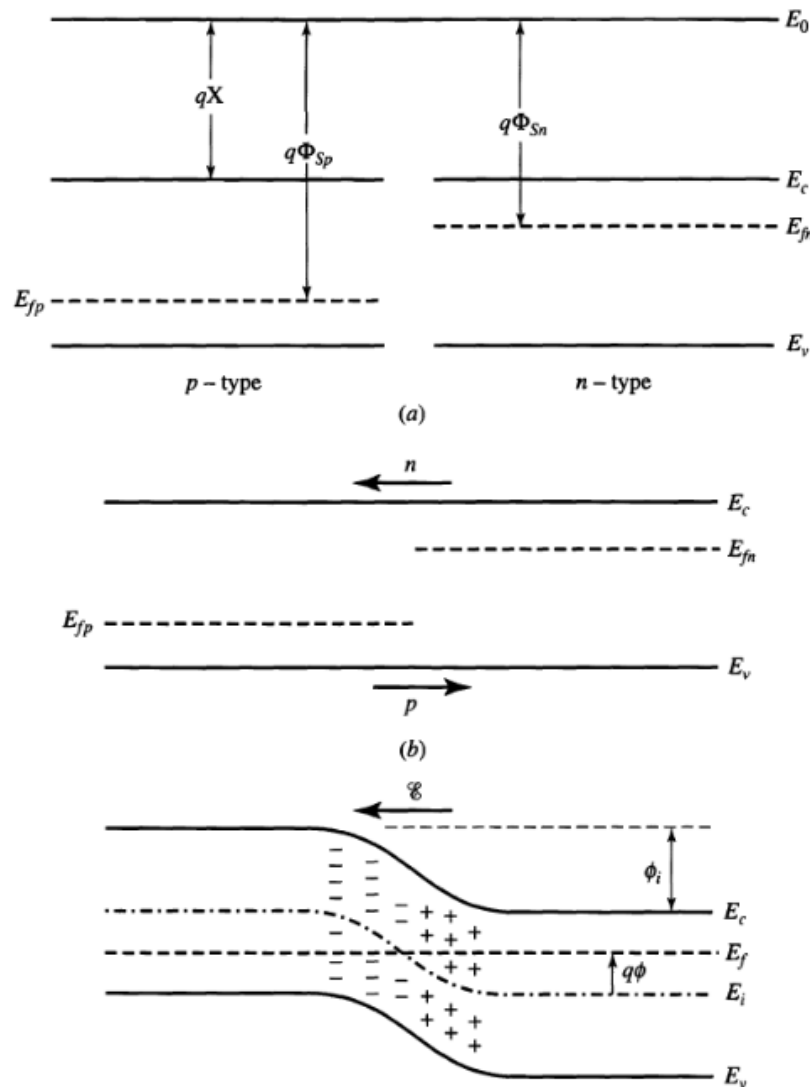


Figura: (a) detalle de dos bloques semiconductores tipo p y n por separado, (b) detalle del instante en el que ambos bloques entran en contacto, (c) sistema luego del alcanzar el equilibrio térmico.

Para entender el diagrama en equilibrio térmico, se debe comenzar por plantear la función de Fermi-Dirac para los materiales tipo p (1) y tipo n (2):

$$f_{D1,2}(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_{f1,2})/kT]}$$

Se puede obtener la densidad de electrones y huecos de cada material considerando:

$$dn_{1,2} = g_{1,2} f_{D1,2} dE \quad dp_{1,2} = g_{1,2} (1 - f_{D1,2}) dE$$

Para el sistema en equilibrio térmico sabemos que en cada punto del material la probabilidad de transición entre estados es proporcional a la densidad de electrones y huecos disponibles. Luego, en  $x = 0$  debe cumplirse que los electrones del material 1 tengan la misma probabilidad de transicionar al material 2, que los electrones del material 2 hacia el material 1. Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$n_1 p_2 = n_2 p_1 \Rightarrow f_{D1} g_1 (1 - f_{D2}) g_2 = f_{D2} g_2 (1 - f_{D1}) g_1 \Rightarrow f_{D1} g_1 g_2 = f_{D2} g_2 g_1$$

Condición que se cumple cuando  $E_{f1} = E_{f2}$ , es decir existe un único nivel de Fermi para un SC en equilibrio térmico.

## Principales conclusiones

- El voltaje aplicado a una juntura PN cae a lo largo de la región SCR:  
 $\Rightarrow$  La electrostática de la región SCR se modifica:
  - en polarización directa:  $x_d \downarrow$ ,  $|E| \downarrow$
  - en polarización inversa:  $x_d \uparrow$ ,  $|E| \uparrow$
- Es válida la formulación analítica de la electrostática de la región SCR en equilibrio térmico mediante:

$$\phi_B \longrightarrow \phi_B - V$$

- Si  $V$  cambia, la carga en la región SCR también cambia:  
 $\Rightarrow$  *Capacidad de juntura*
- La capacidad de juntura del diodo PN depende de la polarización.