

# Índice

---

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b><i>TEMA 5: La unión pn:<br/>concepto y estudio en equilibrio termodinámico</i></b> | <b>5.1</b> |
| 5.1. INTRODUCCIÓN                                                                     | 5.1        |
| 5.2. ESTRUCTURA DE LA UNIÓN pn                                                        | 5.3        |
| 5.2.1. Definición                                                                     | 5.3        |
| 5.2.2. Unión Abrupta Plana                                                            | 5.4        |
| 5.3. UNIÓN pn EN EQUILIBRIO. POTENCIAL TERMODINÁMICO                                  | 5.5        |
| 5.4. ANÁLISIS DE LA ZONA DIPOLAR EN EQUILIBRIO                                        | 5.11       |



# Tema 5

## La unión pn

### Concepto y estudio en Eq. Termodinámico

---

#### 5.1.- INTRODUCCIÓN

*La unión pn es el bloque constructivo básico del que depende el funcionamiento de todo dispositivo semiconductor.*

*Esta estructura da lugar al dispositivo denominado “diodo de unión pn” que no es más que un cristal semiconductor que contiene una unión pn en su interior. A veces, se utilizan indistintamente los términos diodo y unión pn, aunque nosotros denominaremos diodo al dispositivo.*

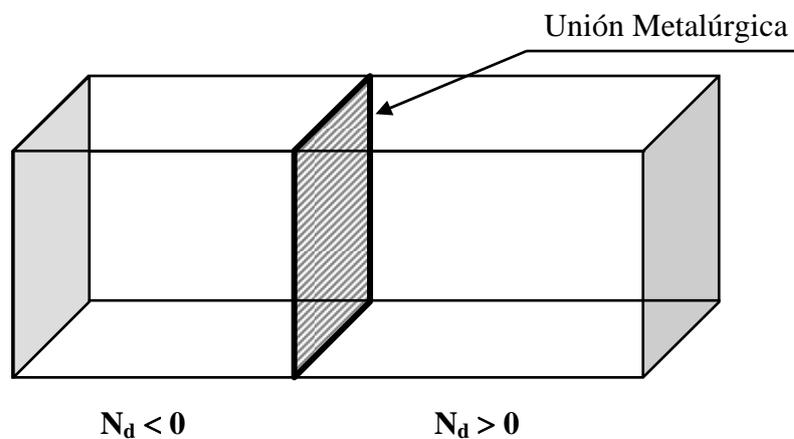
*El objetivo de este tema es estudiar el comportamiento del diodo en equilibrio termodinámico, para ello:*

- 1.- *Estudiaremos la unión pn en situación de equilibrio. En ella distinguiremos dos zonas neutras y una zona de carga espacial, centrandó la atención en esta última.*
  
- 2.- *Deduciremos las expresiones de la densidad de carga ( $\rho$ ), campo eléctrico ( $\vec{\mathcal{E}}$ ) y potencial ( $\varphi$ ) en la zona de carga de espacio.*
  
- 3.- *Una vez establecidas estas magnitudes, se introduce el concepto de Potencial Interno o Potencial Termodinámico,  $V_{bi} \equiv \Phi_T$  (Built-in Potential).*

## 5.2.- ESTRUCTURA DE LA UNIÓN pn

### 5.2.1.- Definición

Se dice que en un monocristal semiconductor existe una unión pn, cuando la concentración neta de impurezas,  $N_d \equiv N_D - N_A$ , (en realidad sería concentración neta de impurezas ionizadas. Ahora bien, suponemos que nos encontramos a temperatura ambiente,  $T_a = 300$  K y que la ionización de las impurezas es total) es variable en dicho material de manera que existe una región tipo n, con  $N_d > 0$ , y otra tipo p con  $N_d < 0$ . Evidentemente, existirá una región en la que  $N_d = 0$  y que denominaremos “Unión Metalúrgica” (ver Figura 5.1).



*Figura 5.1.- Representación esquemática de un cristal semiconductor conteniendo una unión pn.*

Dicho de otra manera: “En un semiconductor existe una unión pn, cuando hay una región llamada Unión Metalúrgica que separa una zona tipo n de una zona tipo p”.

A partir de ahora se desarrollarán siempre análisis unidimensionales eligiendo como dirección de estudio aquella en la que fluye principalmente la corriente, es decir,

la dirección a lo largo de la cual las variables que nos interesan sufren mayores variaciones.

### 5.2.2.- Unión abrupta plana

Las uniones se clasifican atendiendo a la forma de la función  $N_d$  al pasar de la región p a la región n. Así, cuando la transición es extremadamente angosta, se dice que la unión es abrupta. En cambio, la unión gradual es aquella en que la transición se extiende a una distancia mayor (Figura 5.2).

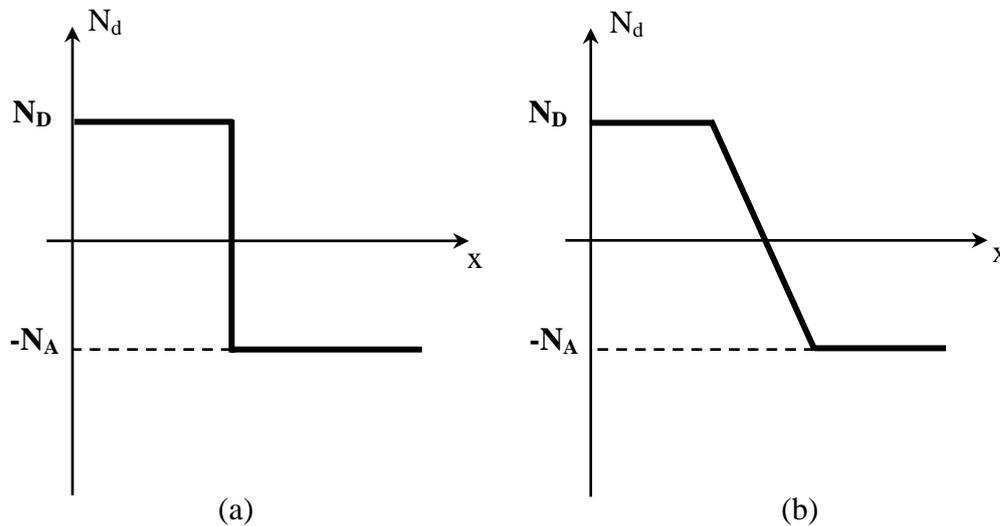


Figura 5.2.- Función perfil de impurezas: a) Unión Abrupta, b) Unión Gradual o Lineal.

Puesto que el análisis de los diferentes tipos de uniones es similar, centraremos nuestro interés en el más sencillo de todas ellas, esto es, la Unión Abrupta Plana.

Entendemos por Unión Abrupta Plana aquella en la que la función  $N_d$  toma valores constantes, aunque de distinto signo, a derecha e izquierda de un plano que constituye la Unión Metalúrgica.

### **5.3.- UNIÓN pn EN EQUILIBRIO. POTENCIAL TERMODINÁMICO.**

Nuestro punto de partida va a ser la situación de “Equilibrio Termodinámico”, esto es, suponemos que no hay tensión aplicada ni iluminación que incida sobre el dispositivo, no existen gradientes térmicos, ni tampoco campos eléctricos o magnéticos aplicados.

Consideremos, entonces, dos muestras de material semiconductor, una de tipo p y otra de tipo n caracterizadas por contener una gran concentración de  $h^+$  y de  $e^-$  respectivamente (Figuras 5.3b y 5.3c). En la unión abrupta o unión escalón que estamos considerando, las regiones p y n son homogéneas. Al poner en contacto estas dos muestras, aparecerán enseguida flujos por difusión de  $e^-$  y de  $h^+$  tendentes a eliminar los grandes gradientes de concentración de portadores existentes en la Unión Metalúrgica. Esto es, aparecerá un flujo de  $h^+$  desde la región p a la región n, y un flujo de  $e^-$  desde la región n a la región p (Figuras 5.3d y 5.3e). Si los  $h^+$  y los  $e^-$  no fueran partículas cargadas, estos flujos continuarían hasta uniformizar las concentraciones de  $h^+$  y de  $e^-$  a lo largo de toda la estructura alcanzando así la situación de equilibrio termodinámico. Sin embargo, al ser los  $h^+$  y los  $e^-$  portadores de carga, a la situación de equilibrio se llega de forma totalmente distinta (Figura 5.3f).

En efecto, cuando los  $h^+$  abandonan la región p dejan tras de sí las impurezas aceptadoras ionizadas no compensadas que fijas a la red cristalina no pueden abandonar su posición. Análogamente, cuando los  $e^-$  abandonan la región n dejan tras de sí las impurezas donadoras ionizadas que clavadas a la red cristalina no pueden abandonar su posición. El resultado neto es que la Unión Metalúrgica se rodea de dos capas con cargas eléctricas fijas aunque de distinto signo. Este dipolo origina un campo eléctrico dirigido desde la zona n a la zona p que, a su vez, actúa sobre los portadores móviles,  $e^-$  y  $h^+$ , impidiendo que éstos abandonen las regiones en las que son mayoritarios. Esto es, este campo eléctrico da lugar a componentes de arrastre de  $e^-$  y de  $h^+$  que se oponen a los flujos por difusión. A la situación de equilibrio termodinámico se llegará, entonces, cuando las componentes de arrastre y de difusión se compensan en cada punto. Esto es:

$$\vec{J}_T = 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{J}_n = 0 = \vec{J}_{a,n} + \vec{J}_{d,n} \Rightarrow \vec{J}_{a,n} = -\vec{J}_{d,n} \\ \vec{J}_p = 0 = \vec{J}_{a,p} + \vec{J}_{d,p} \Rightarrow \vec{J}_{a,p} = -\vec{J}_{d,p} \end{cases} \quad (5.1)$$

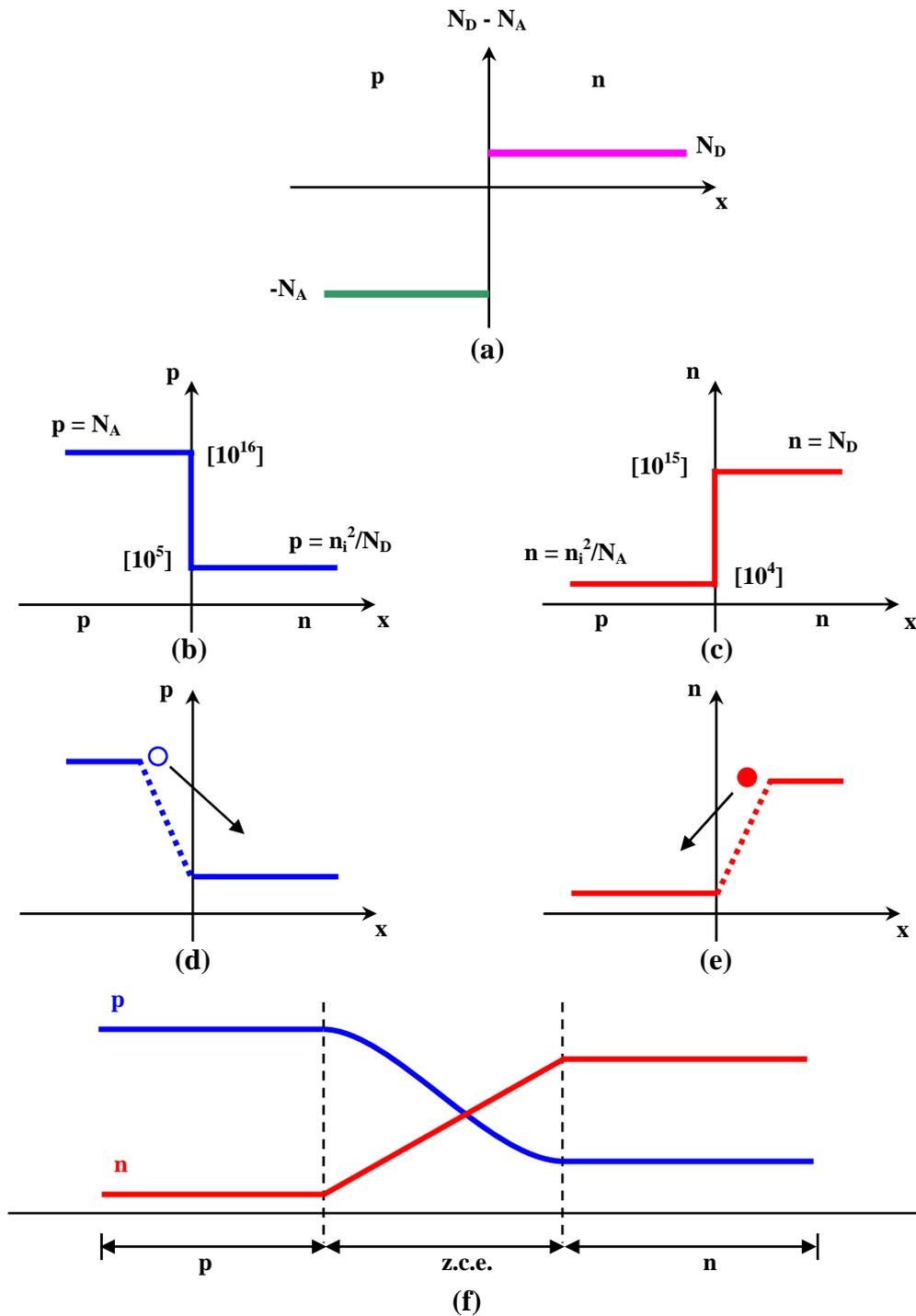


Figura 5.3.- a) Unión Escalón; b) y c) concentraciones hipotéticas de portadores “iniciales”; d) y e) representación aproximada de las concentraciones de portadores en equilibrio; f) diagramas d) y e) combinados. Los números encerrados entre corchetes indican valores típicos.

Por otra parte, dicho campo eléctrico determina un potencial electrostático interno variable desde la región p a la región n, estando la región n a mayor potencial. Este potencial, denominado “Potencial Interno” o “Potencial Termodinámico” (Built-in Potential, se representa por  $V_{bi}$  o  $\Phi_T$  y es una consecuencia del equilibrio termodinámico. Por lo tanto, no puede dar lugar a ninguna corriente.

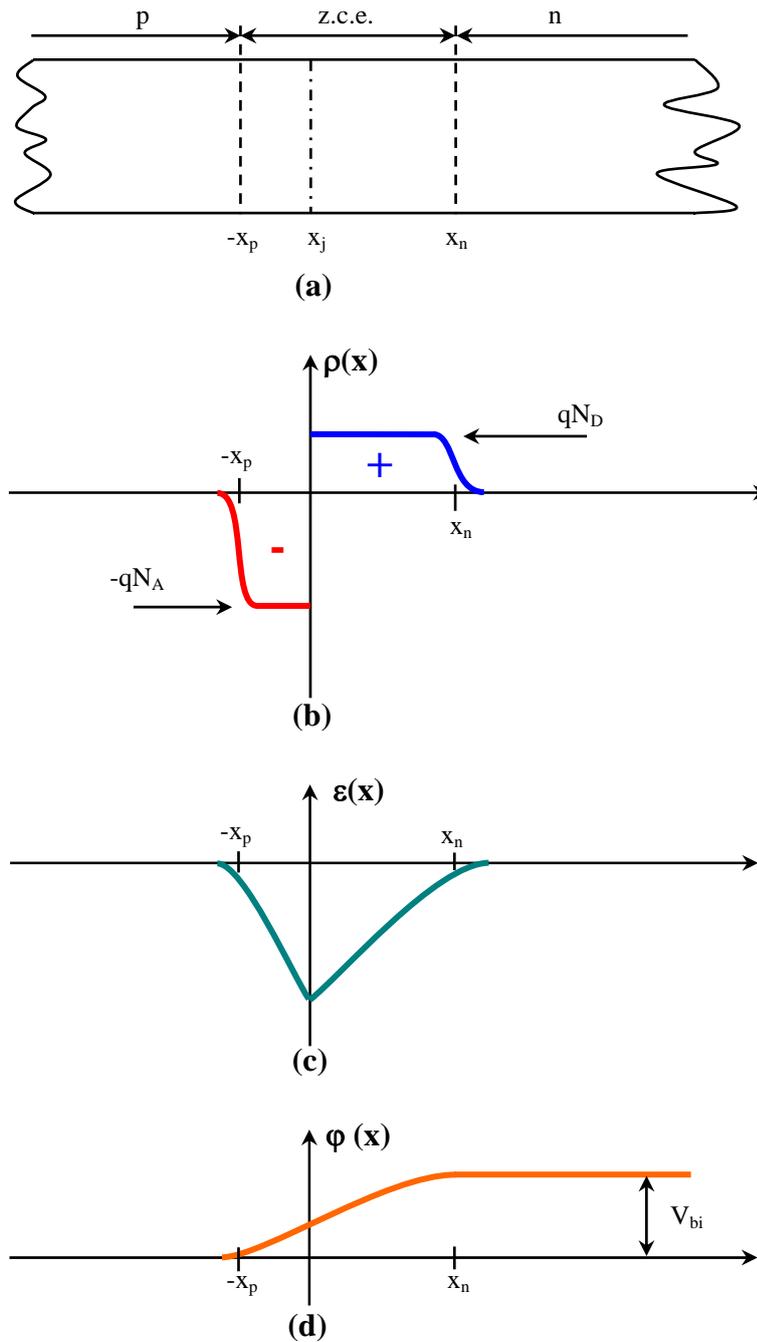


Figura 5.4.- Electrostática de la Región de Vaciamiento

La región que rodea a la Unión Metalúrgica, y en la que las variaciones de la densidad de carga ( $\rho$ ), campo eléctrico ( $\vec{\mathcal{E}}$ ) y potencial ( $\varphi$ ) son importantes, se denomina “Región de Vaciamiento”, “Zona de Deplexión”, “Zona Deplectada”, “Zona Dipolar” o “Zona de Carga de Espacio, (z.c.e.)” y en ella las concentraciones de portadores móviles han caído por debajo de sus valores de equilibrio. En la Figura 5.4, se han representado  $\rho$ ,  $\vec{\mathcal{E}}$  y  $\varphi$  en la Zona Dipolar.

Para el cálculo del Potencial Termodinámico, tomaremos como referencia los electrones. Puesto que el semiconductor está en Equilibrio Termodinámico:

$$\vec{J}_n = \vec{J}_{a,n} + \vec{J}_{d,n} = qn\mu_n\vec{\mathcal{E}} + qD_n\frac{dn}{dx} = 0 \quad (5.2)$$

$$\vec{\mathcal{E}} = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = -\frac{kT}{q} \frac{d(L_n n)}{dx}$$

Por otro lado:

$$\vec{\mathcal{E}} = -\frac{d\varphi}{dx}$$

Sustituyendo:

$$d\varphi = \frac{kT}{q} d(L_n n)$$

En general, si tomamos dos puntos de referencia, tal como se muestra en la Figura 5.5a,

$$\varphi(x_2) - \varphi(x_1) = \frac{kT}{q} L_n \frac{n(x_2)}{n(x_1)}$$

En el caso de haber tomado como referencia los  $h^+$ :

$$\varphi(x_2) - \varphi(x_1) = -\frac{kT}{q} L_n \frac{p(x_2)}{p(x_1)}$$

Extendiendo las líneas de referencia hasta el borde de la z.c.e.:

$$n(x_2) = N_D$$

$$n(x_1) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$\Phi_T = \frac{kT}{q} L_n \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (5.3)$$

Por lo tanto,

- $\Phi_T$  depende de la concentración de impurezas ionizadas y de la temperatura.
- $\Phi_T$  se define siempre en valor absoluto.
- La expresión (5.3) es válida para todo tipo de uniones ya que no depende de cómo se realice la transición desde la región p a la región n. Es decir, no depende de la forma de la función  $N_d(x)$ .
- $\Phi_T$  es una consecuencia del equilibrio termodinámico  $\Rightarrow$  no puede dar lugar a ninguna corriente.
- No puede medirse experimentalmente a través de un voltímetro, ya que en un sistema cerrado el sumatorio de todas las tensiones ha de ser cero.

En la Figura 5.5b, puede observarse el diagrama de bandas de una unión pn en equilibrio termodinámico y del que se desprende que  $\Phi_T < E_G$ .

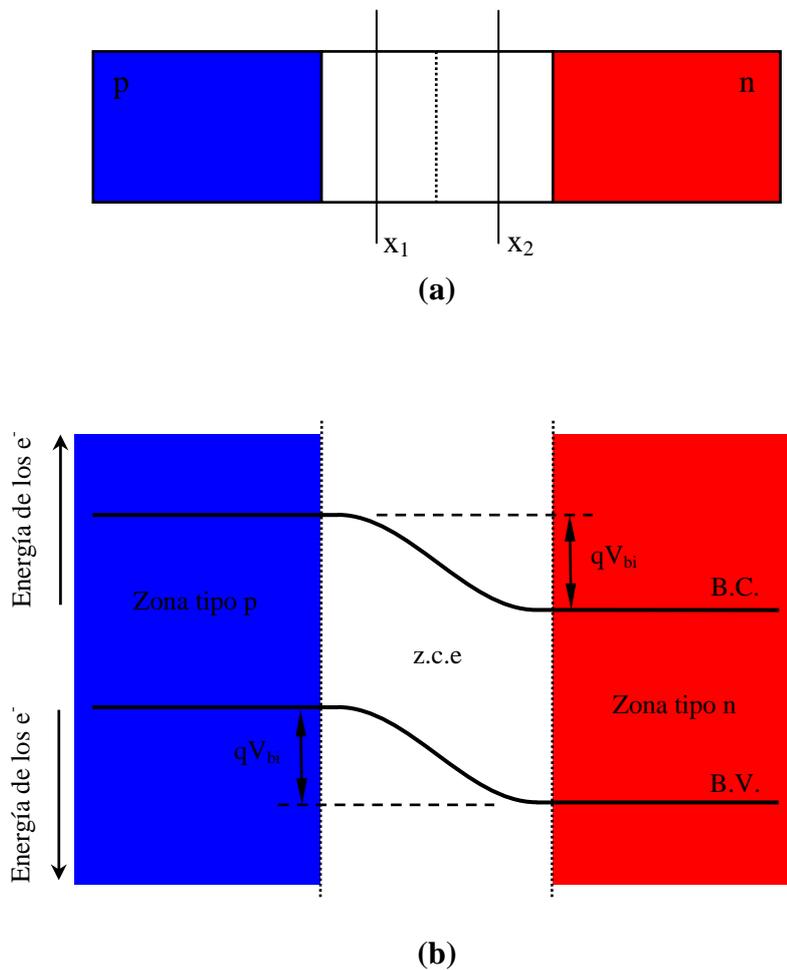


Figura 5.5.- (a) Referencias utilizadas en el cálculo de  $\phi_T$  en una unión; (b) Modelo de Bandas de Energía para la unión pn en equilibrio termodinámico.

### 5.4.- ANÁLISIS DE LA ZONA DIPOLAR EN EQUILIBRIO

De las tres regiones que podemos distinguir en una unión pn, dos regiones neutras (la región p y la región n, en las que podemos considerar los dopajes uniformes) y una Zona de Carga de Espacio, sabemos calcular las concentraciones de portadores en las zonas neutras. Nos falta, por tanto, obtener las expresiones de  $\rho$ ,  $\vec{\mathcal{E}}$ ,  $\varphi$  y la concentración de portadores en la z.c.e.. El método a seguir se ilustra en el siguiente diagrama:

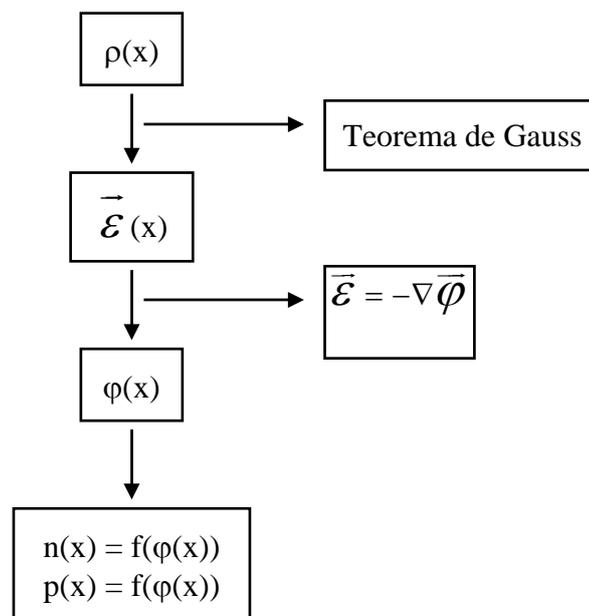


Figura 5.6.- Procedimiento de cálculo de  $\rho$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $\varphi$  y de la concentración de portadores en una unión pn.

El problema que se nos plantea es el siguiente:

$$\rho(x) = q(p + N_D - n - N_A)$$

y las concentraciones de portadores son desconocidas puesto que, a su vez, son función

de la distribución de potencial,  $\varphi(x)$ . Sin embargo, es posible obtener una solución analítica a partir de ciertas hipótesis simplificativas. Los resultados así obtenidos están conformes con los resultados experimentales.

La hipótesis de la que estamos hablando recibe el nombre de **“Hipótesis de Despoblación Total” (H.D.T.)** o **“Aproximación por Vaciamiento”** y, consiste en suponer que la práctica totalidad de la carga existente en la z.c.e. es debida a impurezas ionizadas no compensadas, esto es, consiste en despreciar la carga debida a los portadores móviles ya que sus concentraciones son mucho menores que el dopado. En la Figura 5.7 aparecen representados  $\rho$ ,  $\vec{\mathcal{E}}$ ,  $\varphi$  bajo esta hipótesis.

Entonces las ecuaciones a manejar son:

$$\rho(x) = q(p + N_D - n - N_A) \quad (5.4)$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{1}{\epsilon_s} \rho(x) \quad (5.5)$$

$$\varphi(x) = -\int \mathcal{E}(x) dx \quad (5.6)$$

siendo  $x_n$  y  $-x_p$  los extremos de la z.c.e. (el sentido positivo de las  $x$  se elige desde la región p a la región n, y el origen de coordenadas en la Unión Metalúrgica,  $x_j = 0$ ).

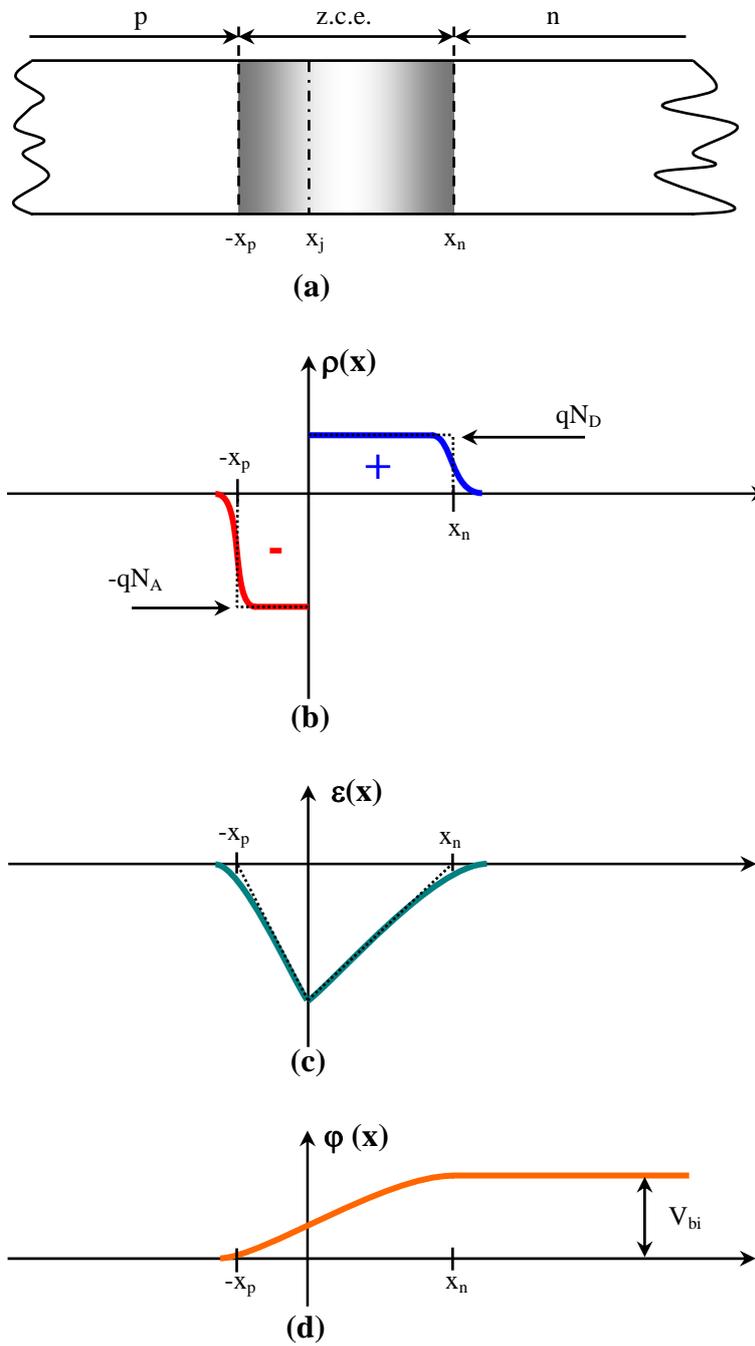


Figura 5.7.- Aproximación por vaciamiento a la unión escalón.

Si aplicamos la H.D.T., la ecuación 5.4 se reduce a:

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 < x < x_n & \Rightarrow qN_D \\ -x_p < x < 0 & \Rightarrow -qN_A \end{cases} \quad (5.7)$$

Introduciendo la expresión de  $\rho(x)$  en la ec.(5.5) resulta:

$$\left. \begin{aligned} 0 < x < x_n & \quad \mathcal{E}(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x + C_1 \\ -x_p < x < 0 & \quad \mathcal{E}(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} x + C_1' \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

Con el fin de calcular  $C_1$  y  $C_1'$  aplicamos las siguientes condiciones de contorno:

- Campo nulo en las zonas neutras:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}(x_n) = 0 = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n + C_1 & \quad \Rightarrow \quad C_1 = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n \\ \mathcal{E}(-x_p) = 0 = \frac{qN_A}{\epsilon_s} x + C_1' & \quad \Rightarrow \quad C_1' = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

Por lo tanto,

$$\mathcal{E}(x) = \begin{cases} 0 < x < x_n & \quad \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - x_n) \\ -x_p < x < 0 & \quad -\frac{qN_A}{\epsilon_s} (x + x_p) \end{cases} \quad (5.10)$$

- Además se verifica la continuidad del campo eléctrico en la Unión Metalúgica, es decir,

$$\frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n = \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p \Rightarrow qN_D x_n = qN_A x_p \quad (5.11)$$

Esto es, la carga total por unidad de área a un lado y otro de la Unión Metalúrgica es la misma, lo que nos indica que la zona de carga positiva iguala en carga a la zona de carga negativa. Por lo tanto, las dos áreas de la Figura 5.7 son iguales.

Por otra parte, el valor máximo del  $\vec{\mathcal{E}}$  se alcanza en la Unión Metalúrgica,

$$|\mathcal{E}_{\max}| = |\mathcal{E}(0)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n = \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p \quad (5.12)$$

Introduciendo el perfil del  $\vec{\mathcal{E}}$  en la ecuación 5.6 obtenemos,

$$\left. \begin{array}{l} 0 < x < x_n \quad \varphi(x) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} (x - x_n)^2 + C_2 \\ -x_p < x < 0 \quad \varphi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 + C_2' \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

Aplicamos las siguientes condiciones de contorno para determinar  $C_2$  y  $C_2'$

- El origen de potenciales es totalmente arbitrario, vamos a elegirlo en la unión metalúrgica. Por tanto,

$$\left. \begin{array}{l} \varphi(0) = 0 = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} x_n^2 + C_2 \Rightarrow C_2 = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} x_n^2 \\ \varphi(0) = 0 = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_p^2 + C_2' \Rightarrow C_2' = -\frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_p^2 \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

Indudablemente, hemos tenido en cuenta la continuidad del  $\varphi$  en  $x_j = 0$ . La distribución de potencial resulta entonces,

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0 < x < x_n & -\frac{qN_D}{2\epsilon_s}(x - 2x_n)x \\ -x_p < x < 0 & \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(x + 2x_p)x \end{cases} \quad (5.15)$$

Por otra parte, la diferencia de potencial entre las regiones n y p es el Potencial Termodinámico, es decir,

$$\Phi_T = \varphi(x_n) - \varphi(-x_p) = \frac{qN_D}{2\epsilon_s}x_n^2 + \frac{qN_A}{2\epsilon_s}x_p^2 \quad (5.16)$$

Cálculo de la anchura de la z.c.e.,  $l$

$\Phi_T$  = área encerrada bajo la curva del  $\overline{\mathcal{E}}$

$$\Phi_T = \frac{1}{2}|\mathcal{E}_{\max}|(x_p + x_n) = \frac{1}{2}|\mathcal{E}_{\max}|l \quad (5.17)$$

Por otra parte, sabemos que:

$$|\mathcal{E}_{\max}| = |\mathcal{E}(0)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s}x_n = \frac{qN_A}{\epsilon_s}x_p = \frac{q}{\epsilon_s} \frac{x_n}{1/N_D} = \frac{q}{\epsilon_s} \frac{x_p}{1/N_A} = \frac{q}{\epsilon_s} \frac{x_n + x_p}{1/N_D + 1/N_A}$$

$$|\mathcal{E}_{\max}| = |\mathcal{E}(0)| = \frac{q}{\epsilon_s} \frac{l}{1/N_A + 1/N_D} \quad (5.18)$$

$$l = \frac{\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) |\mathcal{E}_{\max}| = \frac{\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \frac{2\Phi_T}{l}$$

$$l = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \Phi_T} \quad (5.19)$$

De la ecuación 5.18,

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{1}{N_A} \frac{l}{N_A + N_D} N_A N_D \quad \Rightarrow \quad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} l \\ x_n &= \frac{1}{N_D} \frac{l}{N_A + N_D} N_D N_A \quad \Rightarrow \quad x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} l \end{aligned} \quad (5.20)$$

La ec. 5.19 pone de manifiesto que cuanto mayor sea el dopaje, menor será  $l$ . Además, de las ec. 5.20 se deduce que la z.c.e. se extiende fundamentalmente por el lado menos dopado.

**RESUMEN DE LAS CONSIDERACIONES EN LA UNIÓN pn EN EQ. TERMODINÁMICO**

1. Existe una zona dipolar en la unión que está totalmente despoblada de portadores de corriente a efectos de cálculo de la densidad espacial de carga (H.D.T.).
2. La carga espacial viene dada simplemente por los átomos de impurezas ionizados en la zona dipolar (H.D.T.)
3. Fuera de la zona dipolar el campo eléctrico es nulo y el semiconductor neutro.
4. La variación total de potencial de un extremo al otro de la zona dipolar es igual al potencial Termodinámico  $\Phi_T$ .
5. El campo eléctrico y el potencial se obtienen llevando los puntos (2), (3) y (4) a la Ecuación de Poisson.