

## 2.1 LA UNIÓN PN ABRUPTA

Una unión PN consiste en dos porciones de semiconductor, dopadas complementariamente, que se colocan en estrecho contacto entre sí.

Para efectos del análisis, se considerará la **unión PN abrupta**, que consiste en que el cambio de dopaje tiene lugar en una región muy pequeña, de suerte que puede considerarse despreciable respecto al tamaño total de la unión. En realidad, esta unión no es abrupta, es gradual y depende del tipo de fabricación utilizada.

La unión abrupta no es característica de los dispositivos actuales, especialmente de los integrados. Sin embargo, permite obtener un análisis suficientemente claro y con aproximación numérica aceptable del funcionamiento de la unión PN (Figura 57).

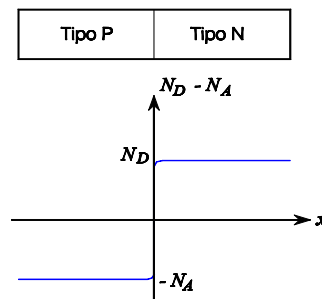


Figura 57. Unión PN abrupta o escalón.

En la unión abrupta se supone que la **región P** está dopada con una concentración uniforme  $N_A$  de aceptores y la **región N** con una concentración uniforme  $N_D$  de donantes. La unión es simétrica si  $N_A = N_D$  y asimétrica si  $N_A \neq N_D$ , en este caso, si  $N_A < N_D$  la unión es **PN<sup>+</sup>**, y si  $N_A > N_D$  la unión es **P<sup>+</sup>N** (que es el caso más común).

## 2.2 LA UNIÓN PN EN ESTADO DE EQUILIBRIO

A continuación se estudiará la unión PN en equilibrio térmico sin ser sometida a acción externa alguna, como lo puede ser un voltaje aplicado. Se obtendrán modelos matemáticos para el potencial de contacto, el ancho de la región de transición, el campo interno máximo y la densidad de carga.

Supóngase que en un momento dado, se ponen en contacto dos trozos de semiconductor dopados de manera complementaria, donde la mitad izquierda, es un material **tipo P**, dopado fuertemente con impurezas aceptoras (pertenecientes al grupo III, como el **Ga, B, In**, etc.) que han entregado huecos, es decir, portadores de carga positiva, por lo que ellas mismas se han cargado negativamente ( $N_A^-$ ), mientras que la mitad derecha, esta formada por un material **tipo N**, dopado con impurezas donantes (grupo V, como el **P, As, Sb**, etc.); éstas han entregado electrones que pueden moverse libremente, quedando cargadas positivamente ( $N_D^+$ ). Figura 58 (a).

En este primer instante existen diferencias muy grandes de concentración entre las dos regiones, como se observa en la figura 58 (b):

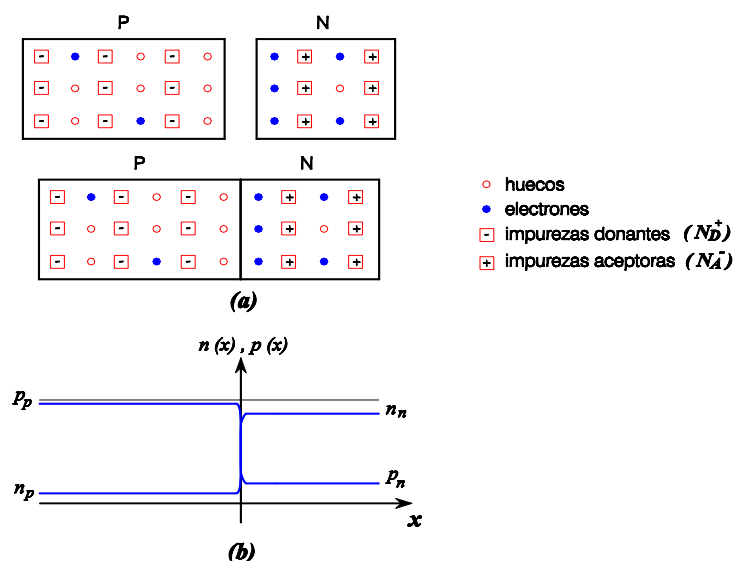


Figura 58. (a) Semiconductor tipo P y tipo N antes y después de la unión. (b) Variación de la concentración de electrones y huecos en el instante de contacto.

Entonces comienza un proceso de difusión tendiente a “emparejar” las concentraciones.

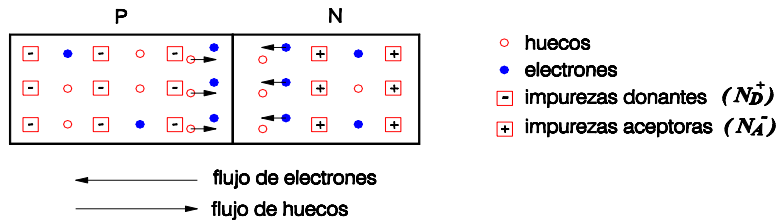


Figura 59. Difusión de portadores después del contacto. Los huecos se mueven de P a N y los electrones de N a P.

La tendencia inicial, según el fenómeno de difusión, es "equilibrar" las condiciones de concentración. Este proceso involucra a los portadores libres (electrones y huecos), pero no a los iones que están inmersos en la estructura. Así, los huecos se desplazan de la región P, donde son mayoritarios, a la región N, donde son minoritarios. Análogamente, los electrones se mueven de la región N a la región P.

Este fenómeno continuaría hasta que las concentraciones se emparejaran, si no fuera porque cuando los huecos pasan del lado P al N, encuentran allí una gran concentración de electrones, lo cual facilita enormemente que ocurra el fenómeno de recombinación en las regiones cercanas a la unión, análogamente, los electrones que se han difundido de la región N a la región P, se recombinan con los huecos del lado P cercanos a la unión. La consecuencia final de este proceso es que los portadores desaparecen en los alrededores de la unión.

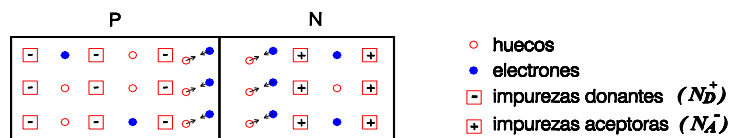


Figura 60. Fenómeno de recombinación. Los electrones que migran del lado N se recombinan con los huecos del lado P y viceversa.

Se sabe que un semiconductor cualquiera contiene tres tipos de cargas: iones, electrones y huecos originados en las impurezas introducidas en el material. Al desaparecer los portadores, quedan los iones, que no pueden moverse pues están incrustados en la estructura del cristal.

Como los materiales son complementarios, en la región contigua a la unión en el lado P, se crea una zona cargada negativamente (los iones de las impurezas aceptoras,  $N_A^-$ ) y en la región contigua a la unión en el lado N, se crea una zona cargada positivamente (los iones de las impurezas donantes,  $N_D^+$ ); estas zonas con ausencia de portadores de carga, forman una única zona llamada **región de transición**.

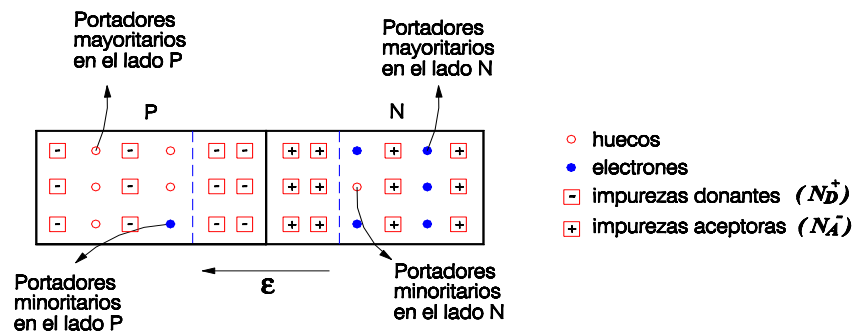


Figura 61. Reestablecimiento del equilibrio y sentido del campo eléctrico.

Obsérvese que en esta región se presenta una separación de cargas que ocasiona la aparición de una diferencia de potencial que se traduce en un campo eléctrico con el sentido mostrado en la figura 61. Este campo, según se observa, se opone al paso de portadores libres a través de la unión. En realidad, lo que ocurre es que este campo interno genera corrientes de arrastre que se oponen a las corrientes de difusión y las equilibran. Por lo tanto en una unión PN en equilibrio se cumple

$$J_p = J_n = 0 \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Potencial de Contacto

La presencia del campo eléctrico en la región de transición se traduce en una deficiencia de potencial entre sus bornes que tiene por nombre **Potencial de Contacto** ( $V_0$ ).

Si se supone que el campo eléctrico en el interior de la región de transición es constante, y se recuerda además que  $\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$  se puede entonces graficar la variación del potencial en la región de transición.

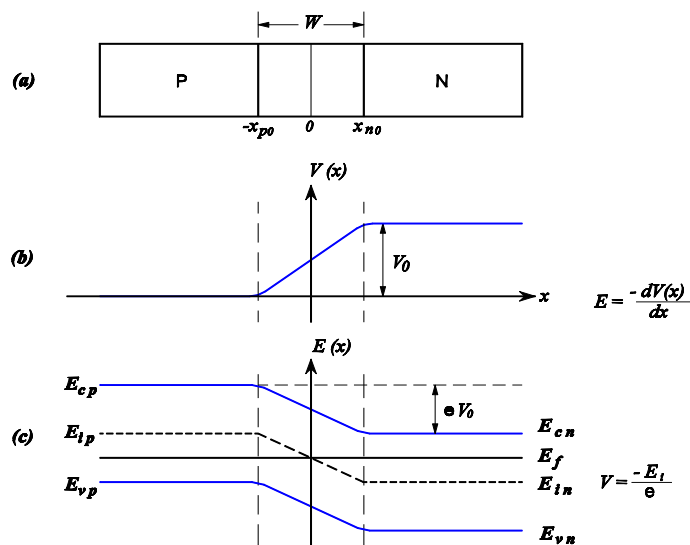


Figura 62. Diagrama de potencial electrostático y de bandas de energía para una unión PN en equilibrio térmico.

Adicionalmente en la figura 62 (c) se muestra el diagrama de bandas de energía para unión PN en equilibrio. La notación usada para este caso es:

$E_{cp}$  : Energía de la banda de conducción en el lado P

$E_{vp}$  : Energía de la banda de valencia en el lado P

$E_{cn}$  : Energía de la banda de conducción en el lado N

$E_{vn}$  : Energía de la banda de valencia en el lado N

La desviación de las bandas en el interior de la **región de transición** es debida a la diferencia

de potencial (Recuérdese que  $V(x) = -\frac{E_f}{e}$ ).

Además, obsérvese cómo ésta desviación permite representar el cambio en la naturaleza del material (de N a P) respetando la continuidad del diagrama de bandas y el nivel de Fermi.

Debido a que en la región de transición la carga es diferente de cero, también se conoce como **Región de Carga Espacial**. El ancho de esa zona se denota  $W$ .

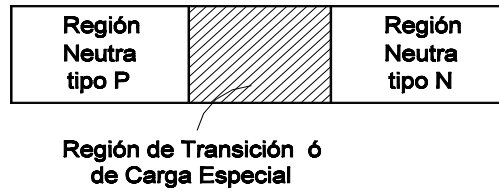


Figura 63. Regiones que se forman al poner en contacto dos semiconductores dopados en forma complementaria.

La corriente a través de la unión en equilibrio es igual a cero. Si se usa la **ley de Ohm modificada** con  $J_p = J_n = 0$ .

$$J_p = \sigma_p \frac{dE_p}{dx} = 0 \qquad J_n = \sigma_n \frac{dE_n}{dx} = 0$$

Esto implica que tanto  $E_p$  como  $E_n$  (los cuasiniveles de Fermi) deben ser constantes.

Se estableció, entonces, cualitativamente la existencia de un potencial interno en la unión PN debido a la separación de cargas que tiene su origen en la difusión de portadores. Se hallará ahora una expresión para este potencial.

Se sabe que existe una relación entre el potencial y la energía dada por  $V(x) = \frac{-E(x)}{e}$

Entonces, si  $V_0$  es la diferencia de potencial entre los bordes de la región de transición, se puede escribir:

$$eV_0 = -(E_{vn} - E_{vp}) = E_{vp} - E_{vn} \qquad (2.2)$$

En la unión PN pueden definirse las siguientes categorías de portadores:

$p_p$ : Concentración de huecos, portadores mayoritarios en el material tipo P

$p_n$ : Concentración de huecos, portadores minoritarios en el material tipo N

$n_n$  : Concentración de electrones, portadores mayoritarios en el material tipo N

$n_p$  : Concentración de electrones, portadores minoritarios en el material tipo P

Si se supone que toda la unión PN está formada en el mismo material semiconductor (lo cual es usualmente valido por fabricación), se cumple que:

$$p_p n_p = n_n p_n = n_i^2$$

En el material tipo N:

$$n_n \approx N_D \quad (2.3)$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.4)$$

En el material tipo P:

$$p_p \approx N_A \quad (2.5)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.6)$$

Se puede relacionar la concentración de portadores (en este caso, huecos) con los niveles de energía en cada lado de la unión PN, así:

$$p_p = N_V e^{(E_{vp} - E_f)/kT} \quad (2.7)$$

$$p_n = N_V e^{(E_{vn} - E_f)/kT} \quad (2.8)$$

De la ecuación (2.7) se obtiene:  $E_{vp} = kT \ln\left(\frac{p_p}{N_V}\right) + E_f$

y de (2.8):  $E_{vn} = kT \ln\left(\frac{p_n}{N_V}\right) + E_f$

Restando las ecuaciones:

$$E_{vp} - E_{vn} = kT \ln\left(\frac{p_p}{N_V}\right) + E_f - kT \ln\left(\frac{p_n}{N_V}\right) - E_f$$

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) \quad (2.9)$$

$V_0$  también puede expresarse como:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_p n_n}{n_i^2}\right) \quad (2.10)$$

Esta última forma es muy utilizada debido a que  $p_p$ ,  $n_n$ ,  $n_i$  suelen ser bien conocidos.

Si se tiene en cuenta que la unión posee  $N_A$  aceptores/cm<sup>3</sup> en el lado P y  $N_D$  donantes/cm<sup>3</sup> en el lado N, se puede escribir las ecuaciones (2.9) y (2.10), como:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (2.11)$$