

CARACTERISTICA VOLTIAMPERICA DE LA UNIÓN PN

El primer y más básico de los dispositivos a tratar es el diodo de unión. Su funcionamiento está basado principalmente en el comportamiento de la unión PN, cuyo comportamiento básico ya se conoce, en equilibrio y ante condiciones de polarización directa e inversa.

Se ha visto ya cómo la polarización de la unión PN afecta la distribución de portadores en los bordes de la región de transición y que la corriente a través de ella está regida por los fenómenos de arrastre y difusión. Ahora se busca explicar cualitativamente el comportamiento de esta corriente en polarización directa e inversa y encontrar una expresión cuantitativa para ello.

2.4.1 Polarización Directa

Recuérdese que la polarización de la unión PN en sentido directo (voltaje positivo en el lado P de la unión con respecto al lado N) ocasiona varios efectos:

- Disminución del potencial neto a través de la unión (V_j), dado que el campo eléctrico asociado al voltaje de la unión en equilibrio se opone al campo eléctrico asociado al voltaje aplicado
- Disminución del ancho de la región de transición (W) como consecuencia de la reducción del voltaje neto a través de la unión.
- Disminución de las pendientes de las bandas o de la diferencia entre los niveles de energía a cada lado de la unión. Recuerde que la altura de la barrera de la energía disminuye de eV_0 a $e(V_0 - V)$
- Incremento de la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la región de transición a ambos lados de la unión.

Debido al incremento de la concentración de electrones en el borde de la región de transición en el lado P, éstos tienden a difundirse en el sentido indicado en la figura 75. Los electrones que sirven para sostener esta corriente provienen del lado N, de donde son inyectados al lado P debido a que, según se recuerda, la región de transición se vuelve más estrecha ante la polarización directa aplicada, haciendo más fácil el paso de portadores por difusión. Argumentos análogos explican el aumento de las corrientes debidas a la difusión de los huecos en la unión.

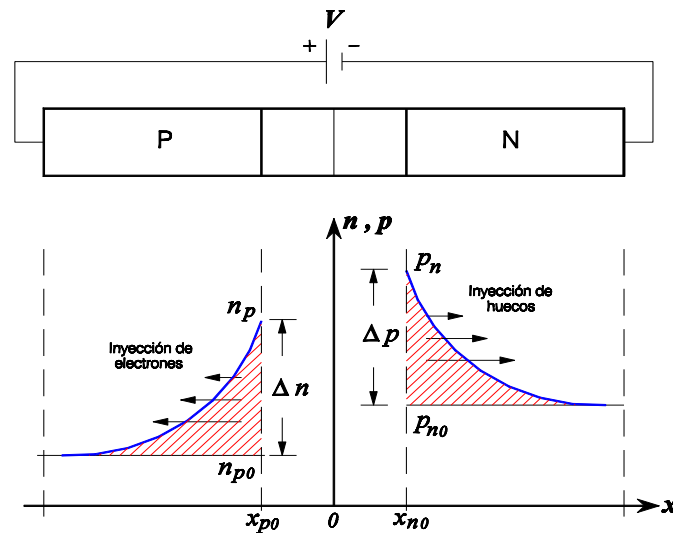


Figura 75. Concentración de electrones y huecos en los bordes de la región de transición para una polarización directa.ⁱ

Recuérdese, que la corriente total a través de la unión esta conformada por un elemento de difusión y un elemento de arrastre. En el estado de equilibrio, la suma de estas corrientes es netamente igual a cero; en el caso de la polarización directa, la componente de difusión aumenta mucho, como ya vió, debido al incremento de los portadores minoritarios en los bordes de la región de transición, en tanto la componente de conducción o arrastre permanece esencialmente igual, con un pequeño decremento debido a la disminución del valor neto del campo externo aplicado. Esto tiene como resultado que en polarización directa se presenta una corriente neta directa (suma de la corriente de huecos y electrones) debida principalmente a la difusión de electrones y huecos a través de la unión.

2.4.2 Polarización Inversa

La polarización inversa de la unión provoca los siguientes efectos:

- Aumento del potencial neto a través de la unión (V_j), dado que se refuerzan el potencial de contacto y el voltaje aplicado, pues tiene su misma polaridad.
- Aumento del ancho de la región de transición (W), debido al incremento del potencial neto a través de la unión bajo polarización inversa.
- Aumento de la pendiente de las bandas de energía en la región de transición. Recuerde que la altura de la barrera de la energía aumenta de eV_0 a $e(V_0 + V)$.
- Decremento de la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la región de transición a ambos lados de la unión.

El aumento de la región de transición como consecuencia de la polarización inversa aplicada a la unión, provoca que la corriente de difusión debida a la diferencia de concentraciones, disminuya hasta un nivel por debajo del que tendría en estado de equilibrio. Como el potencial de contacto aumenta, la corriente de arrastre debería aumentar en la misma medida, sin embargo, esta componente de la corriente está limitada por la cantidad de portadores disponibles, que, según se ve en la figura 76, son los portadores minoritarios de cada lado de la unión y estos sólo pueden ser generados térmicamente, y nunca por encima del nivel mostrado. Entonces la corriente de arrastre permanecerá aproximadamente estable alrededor del nivel que presenta en el estado de equilibrio.

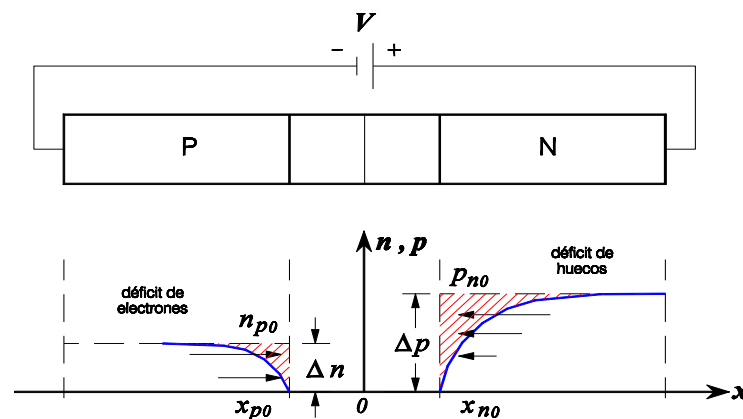


Figura 76. Concentración de electrones y huecos en los bordes de la región de transición para una polarización inversa.ⁱⁱ

Es claro, entonces, que la corriente neta en polarización inversa será debida fundamentalmente a la difusión de huecos del lado N al lado P y de electrones del lado P al lado N.

Para un mejor análisis y comprensión de la magnitud y dirección de las corrientes se presentan las figuras 77 y 78.

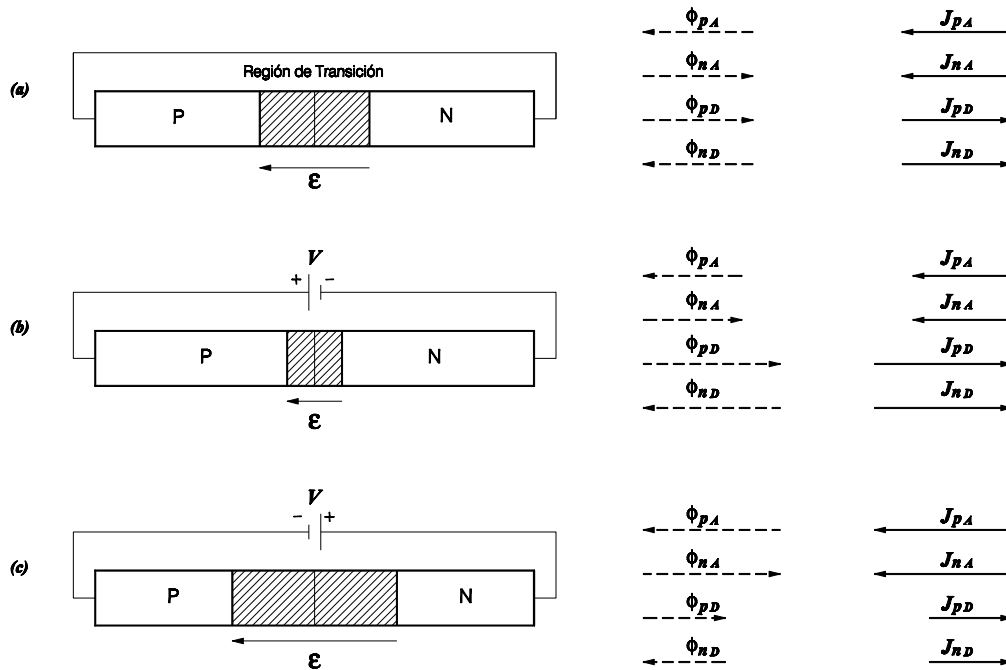


Figura 77. Dirección del campo eléctrico, flujo de portadores y corrientes de una unión PN. (a) Equilibrio. (b) Voltaje directo. (c) Voltaje inverso.

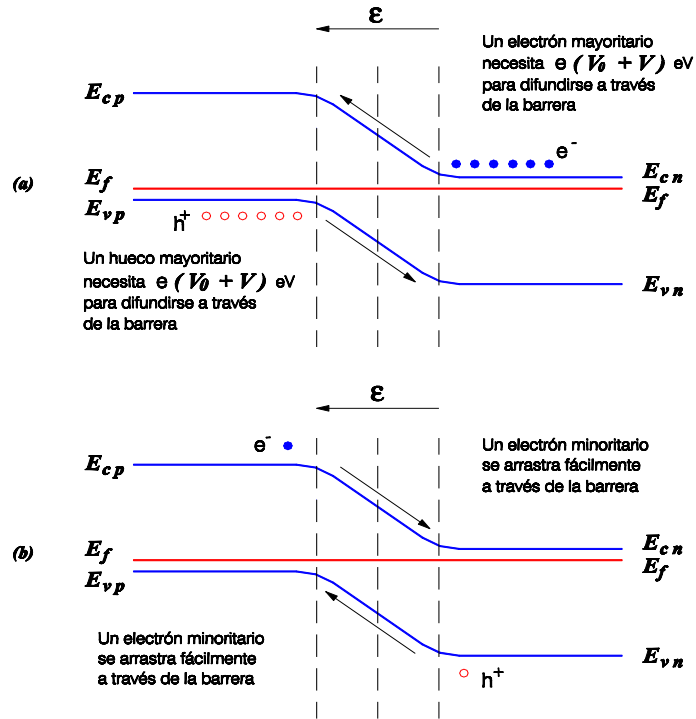


Figura 78. Diagrama que ilustra la difusión y el arrastre bajo polarización inversa.ⁱⁱⁱ

2.4.3 Expresión Cuantitativa para la Característica Voltiampérica Ideal de una Unión PN

Para simplificar las cosas desde el punto de vista formal, se define unas nuevas coordenadas espaciales así :

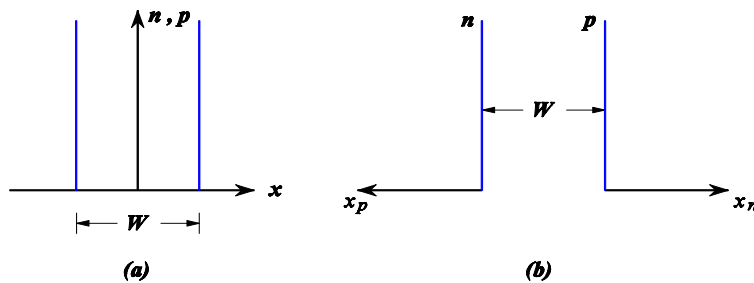


Figura 79. Transformación a nuevos ejes coordenados.

Interesa encontrar cómo se relaciona la corriente que atraviesa la unión en un determinado momento con el voltaje aplicado a ella.

Para esto, se concentra la atención en el comportamiento de los huecos. Según las ecuaciones de transporte, la corriente de huecos total en un semiconductor se puede escribir así:

$$J_p = e\mu_p p \mathcal{E} - eD_p \frac{dp}{dx}$$

En la región N, el incremento de huecos hace que la concentración de portadores tipo hueco en esta región deba escribirse así:

$$p(x_n) = p_n + p_n(e^{eV/kT} - 1) e^{-x_n/L_p} \quad (2.34)$$

En donde $p(x_n)$ será la concentración de huecos total en el lado N, p_n es la concentración de huecos existente antes de la polarización, $p_n(e^{eV/kT} - 1)$ es el incremento o inyección de portadores tipo hueco en el borde de la región N bajo polarización (Δp) que ya se había hallado en la ecuación (2.32), L_p es la longitud media de difusión de los huecos en la región N y e^{-x_n/L_p} es un término debido a que Δp origina una corriente de difusión.

Si se desprecia la corriente de arrastre ó conducción, se llega a:

$$J_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} p_n(e^{eV/kT} - 1) e^{-x_n/L_p}$$

y en el borde de la región de transición en el lado N ($x_n = 0$), se llega a:

$$J_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} p_n(e^{eV/kT} - 1) \quad (2.35)$$

Por el mismo camino, se puede hallar la densidad de corriente de electrones en el borde de la región de transición del lado P ($x_p = 0$).

$$J_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} n_p(e^{eV/kT} - 1) \quad (2.36)$$

Recuérdese ahora que una de las condiciones establecidas para estudiar la unión PN fué que la región de transición sería lo suficientemente estrecha como para que no hubiera recombinación. Entonces, se puede considerar que la densidad de corriente se conservará constante entre uno y otro lado de la región de transición y que será la suma de las corrientes de huecos y electrones.

$$J = J_p(x_n) + J_n(x_p) = e \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) (e^{eV/kT} - 1) \quad (2.37)$$

En esta expresión, se debe tener en cuenta que V es el voltaje aplicado a través de la unión.

Para el diodo, un dispositivo electrónico cuya base de funcionamiento es la unión PN, puede entonces definirse una característica voltiamperica multiplicando la densidad de corriente hallada por el área transversal ($I = JA$).

$$I = eA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) (e^{eV/kT} - 1) \quad (2.38)$$

$$I = eA \left(\frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \right) (e^{eV/kT} - 1) \quad (2.39)$$

Entonces cuando V es positivo, se tendrá una función para la corriente que aumenta rápidamente de manera exponencial. Figura 80 (a).

Cuando V es negativo, el término exponencial decrece rápidamente a cero, quedando la expresión para la corriente reducida a:

$$I = -eA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) = I_0 \quad (2.40)$$

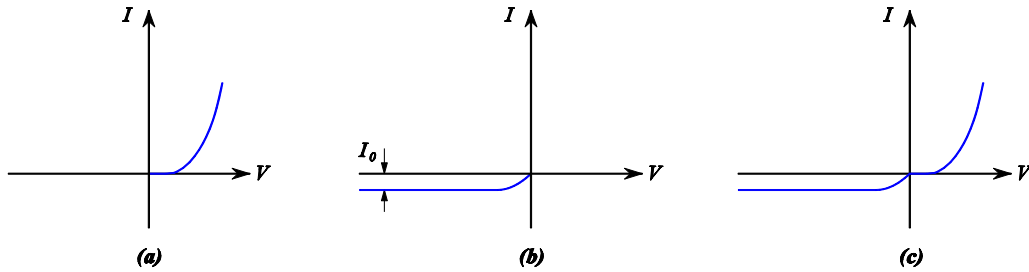


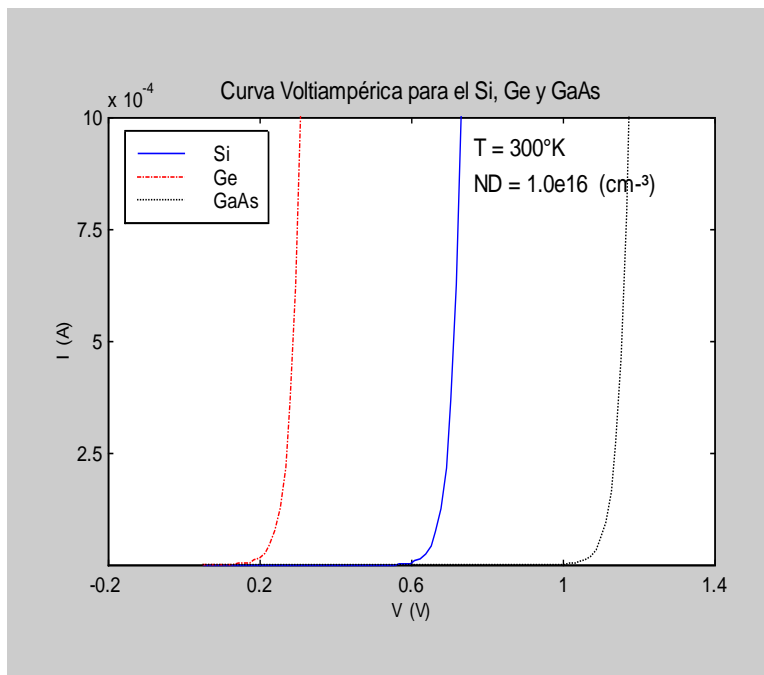
Figura 80. Característica voltamperica del diodo. (a) Polarización directa. (b) Polarización inversa. (c) total.

Este pequeño valor de corriente resultante se llama **Corriente de Saturación** I_0 . La forma usual en que se escribe la relación voltamperica para el diodo es:

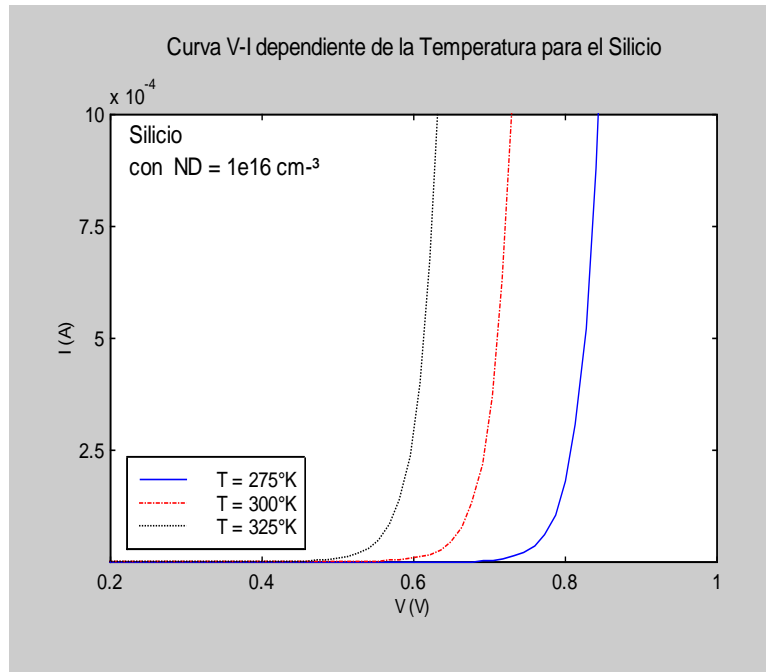
$$I = I_0(e^{eV/kT} - 1) \quad (2.41)$$

A continuación se muestran gráficas que representan variaciones posibles a la curva voltamperica con el material, la temperatura y el dopaje. Figuras 81, 82 y 83.

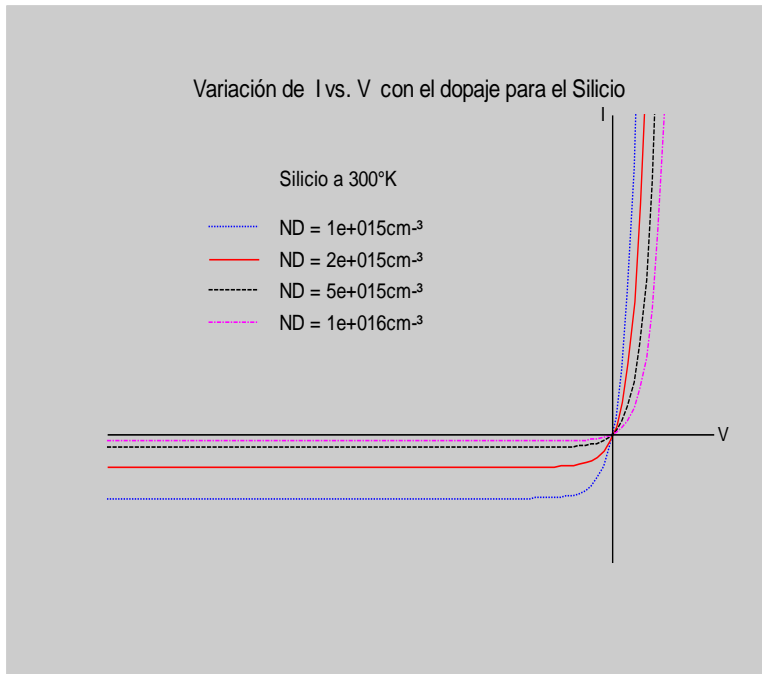
VI3_g;



`VISiT_g;`



`Volamp_g;`



El siguiente programa muestra la distribución de portadores minoritarios y la densidad de corriente a lo largo de la unión PN polarizada directa e inversamente. Figura 84.

TM Al principio se expone el caso de la densidad de corriente y la distribución de portadores minoritarios con $N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $V = 0.2\text{V}$ y $A = 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

TM Se pueden modificar las condiciones de dopaje e incluso aplicar voltajes negativos.

densI;

ⁱ Ibid., p.159.

ⁱⁱ Ibid., p.159.

ⁱⁱⁱ EDWARDS-SHEA, Linda. The essence of solid state electronics. Nueva Jersey : Prentice Hall, 1996.