

## Diodo Zenner

Existe una particularidad de la característica voltiampérica del diodo que no se ha tratado aún y que se presenta cuando el voltaje inverso en la unión llega a un valor suficientemente grande (llamado **voltaje de ruptura**,  $V_{BR}$ ) y que consiste en que la corriente de ruptura inversa comienza a aumentar de manera rápida, formándose un ángulo casi recto en la región inversa de la característica voltiampérica. Esto es debido a uno de dos fenómenos: el efecto zenner y el efecto avalancha.

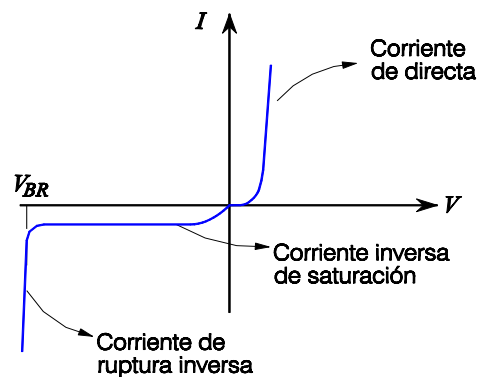


Figura 91. Voltaje de ruptura inversa en una unión PN.

### ▪ Efecto Zenner

Ocurre cuando la unión está compuesta por regiones de altos dopajes, y se presenta a bajos voltajes inversos. Existe una buena probabilidad que esto ocurra, cuando la diferencia entre la energía de la banda de valencia ( $E_v$ ) y la energía de la banda de conducción ( $E_c$ ) es tan pequeña, que un voltaje inverso de no muchos voltios es capaz de romper los enlaces covalentes del semiconductor, lo que hace que se presente un flujo de electrones del lado P al lado N y de huecos de N a P. Este fenómeno es conocido como **efecto zenner**.

En el diagrama de bandas de la unión PN mostrado en la figura, la banda de valencia y el nivel de Fermi del lado P ( $E_{vp}$  y  $E_{fp}$ ) se ubican por encima respecto a la banda de conducción y el nivel de Fermi del lado N ( $E_{vn}$  y  $E_{fn}$ ), lo que hace que se estrechen las bandas y se forme una

barrera de potencial de distancia  $d$ . Así, cuando el ancho de la barrera de la unión PN es reducido debido a que ambas regiones son dopadas fuertemente ( $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). La situación es similar a la que se presenta en el caso de la barrera de potencial. Los electrones pueden atravesar la región de transición por efecto túnel de la manera mostrada:

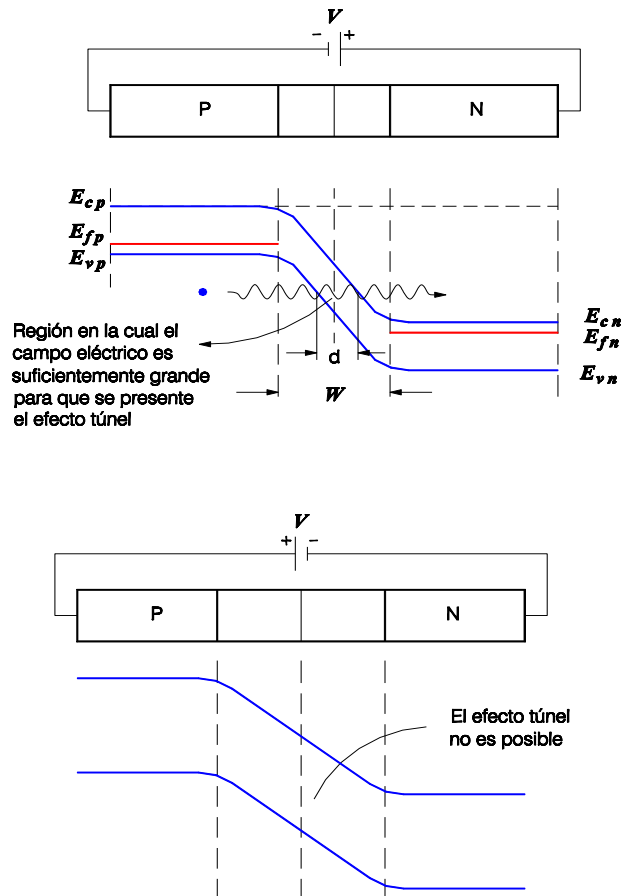


Figura 92. (a) Efecto de túnel para un diodo polarizado inversamente. (b) El efecto de túnel no es posible para un diodo polarizado directamente.

A medida que crece la polarización inversa las bandas de energía se deflecan, pero como el semiconductor es muy dopado, la región de transición no se ensancha demasiado.

Desde el punto de vista de la mecánica clásica, esta función de potencial indica una situación en la que, un electrón en la banda de valencia del lado P de la unión no puede alcanzar el nivel de energía  $E$  suficiente para salir de esta región. **El efecto de túnel** tiene lugar cuando los electrones pasan a través de la barrera a estados vacíos en el mismo nivel de energía en la banda

de conducción del lado N de la unión. Mientras más grande sea la polarización inversa, más grande será el flujo de electrones de P a N y por lo tanto mayor la corriente inversa de túnel.

De lo anterior, se tiene que para que ocurra efecto de túnel, se debe cumplir:

- Existencia de estados llenos en un lado de la barrera y estados vacíos en el otro lado de la barrera. El efecto de túnel no puede tomar lugar en una región sin estados permitidos.
- El ancho de la barrera,  $d$ , debe ser muy delgada. El efecto de túnel llega a ser significativo solo si  $d = 100 \text{ \AA} = 10^{-6} \text{ cm}$ .

Una simulación del efecto zenner en una unión PN polarizada inversamente, puede ser vista ejecutando el programa `ezener`. Figura 93

<sup>TM</sup> En la unión PN en equilibrio,  $E_{fp}$  coincide con  $E_{fn}$ , y  $E_{vp}$  esta por debajo respecto a  $E_{vn}$ , aún no es posible que los electrones del lado P atraviesen la unión, debido a que la barrera de potencial es muy grande.

<sup>TM</sup> Es necesario polarizar la unión inversamente unos pocos voltios, para que se presenta efecto de túnel.

`ezener`;

### Efecto Avalancha

Cuando el voltaje al que se presenta la ruptura es alto (del orden de  $6E_g / e$ ), no es muy probable que el causante haya sido el efecto zenner, sino que existe otra causa que hace que se presente el gran aumento de la corriente. Este aumento ocurre cuando los dopajes son bajos y lo que sucede es que debido al gran potencial en bornes de la unión, los electrones libres ganan suficiente energía como para liberar electrones inmersos en la estructura del cristal por medio de lo que se llama "impactos de ionización", lo que origina una "multiplicación de portadores", llegándose finalmente al estado de "avalancha".

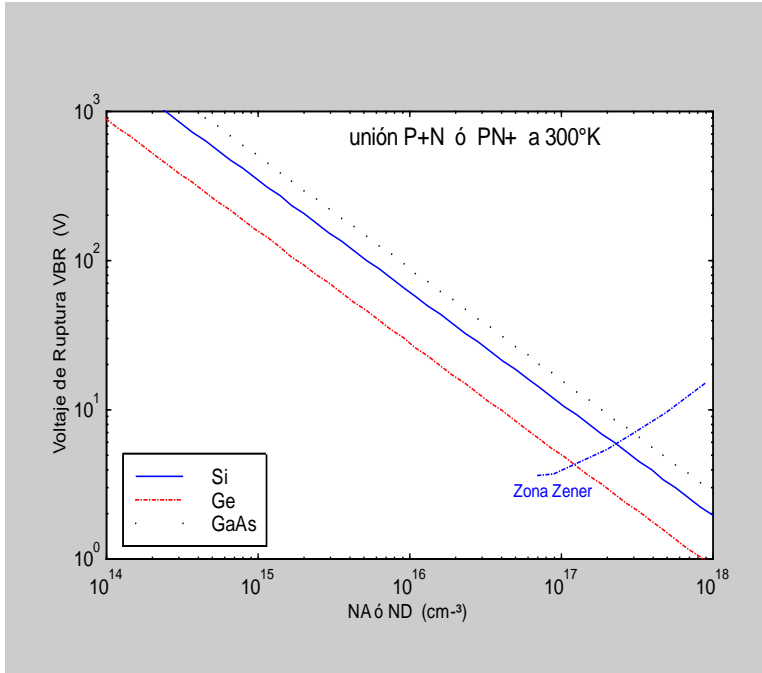
En el caso del efecto de avalancha, el voltaje de ruptura estará dado por el campo eléctrico necesario para darle al electrón libre una energía tal que pueda producir los impactos de ionización.

Una expresión empírica para el voltaje de avalancha en uniones abruptas es:

$$V_{BR} = 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{3/2} \left( \frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-3/4} \quad (2.49)$$

Donde  $N_B$  es la concentración de impurezas en el lado levemente dopado. Resultados de  $V_{BR}$  con respecto a la concentración se muestran en la figura 94. La línea punteada indica el dopaje máximo para el cual la ruptura por avalancha es válida. Esta limitación es basada en el criterio  $6E_g / e$ . Por encima de estos valores el mecanismo de túnel (zenner) también contribuirá al proceso de ruptura y eventualmente dominará.

$V_{br\_g}$ ;

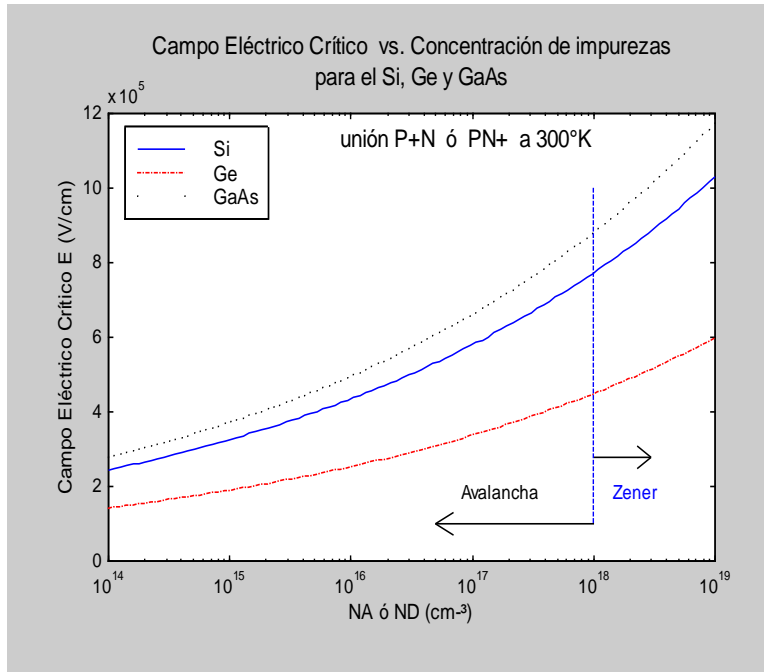


De la misma forma se puede mostrar el campo crítico en función de la concentración de impurezas en la figura 95. Este campo crítico  $\mathcal{E}_{CR}$  se relaciona con el voltaje de ruptura  $V_{BR}$  así:

$$\mathcal{E}_{CR}^2 = \frac{2e}{\epsilon_0 \epsilon_r} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) V_{BR} \quad (2.50)$$

$$\mathcal{E}_{CR}^2 = \frac{2e}{\epsilon_0 \epsilon_r} N_B V_{BR} \quad (2.51)$$

**Ecri\_g;**



Sea cual sea el efecto que produce el aumento de la corriente inversa. Todos los diodos presentan este fenómeno que es llamado *breakdown*. Cuando el voltaje al que se presenta es muy bien determinado, lo que se puede lograr por medio de las características constructivas del dispositivo, el diodo se llama **diodo zenner** y se usa muy a menudo como referencia de voltaje en algunos circuitos electrónicos.

La característica voltiamperica completa del diodo tiene entonces la siguiente forma:

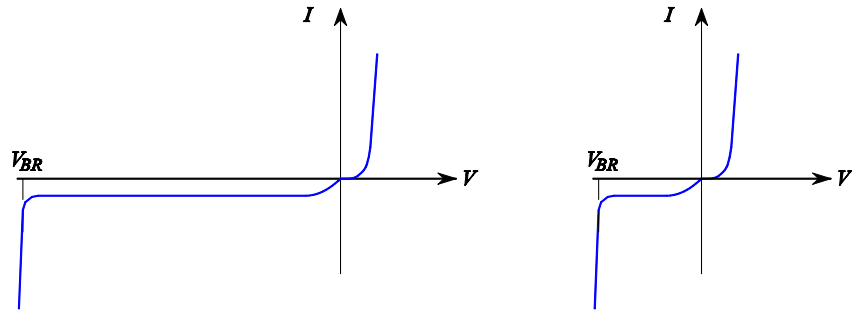


Figura 96. Característica voltiamperica de: (a) un diodo normal, (b) un diodo zenner.

En el siguiente programa se requiere introducir los valores para  $N_A$ ,  $N_D$ ,  $\tau_n$ ,  $\tau_p$ ,  $T$ ,  $V$  y  $A$ , y retorna los resultados más importantes para una unión PN de Silicio<sup>1</sup>, tales como concentraciones, voltajes, corrientes, entre otros. Figura 97.

Al correr tabla por primera vez se presentan las respuestas para el caso en que:  $N_A = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_n = \tau_p = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$ ,  $T = 300^\circ \text{ K}$ ,  $V_A = 0 \text{ V}$  y  $A = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ , se puede cambiar cualquiera de dichos valores mediante los menús desplegables.

`tablapn;`

<sup>1</sup> SZE, S.M. Semiconductor devices : physics and technology. Nueva York : John Wiley & Sons, 1985. p.103.

<sup>1</sup> El programa `tablapn` únicamente entrega los resultados para una unión construida con **Silicio**, puesto que algunos cálculos incluidos en el programa, fueron tomados a partir de expresiones empíricas para este material, incluidas en el Anexo E.