

Cuestión 156

Enunciado: “Cuando una unión p-n de semiconductores se polariza inversamente:

1. La corriente que circula por la unión es proporcional al voltaje aplicado, es decir la unión se comporta como una resistencia óhmica.
2. Se produce una ruptura dieléctrica con el consiguiente deterioro del dispositivo cuando el voltaje de polarización es del orden de unos 30 V.
3. No circula ninguna corriente.
4. La corriente que circula es menor que la que circula en polarización directa.”

Respuesta dada por correcta: **Opción 4.**

Impugnación:

La respuesta que dan por correcta (opción 4) no es necesariamente cierta siempre. En el caso de polarización inversa de una unión p-n, a partir de cierto valor del voltaje aplicado (*voltaje Zener*), la intensidad de corriente que circula se incrementa muy rápido, pudiendo llegar a arrancar portadores secundarios en lo que se conoce como *ruptura en avalancha*, y pudiendo alcanzar valores mayores que en el caso de polarización directa.

A partir de la explicación anterior y tomando como referencia las páginas 10 a 15 del libro “Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos”, Boylestad & Nashelsky, Ed. Pearson Educación, 2003 (se adjuntan al final de este documento).

Conclusión:

Solicito la anulación de la pregunta.



Portadores mayoritarios y minoritarios

En el estado intrínseco, el número de electrones libres en el Ge o en el Si se debe únicamente a los pocos electrones en la banda de valencia que adquirieron energía de fuentes térmicas o luminosas suficiente para romper el enlace covalente, o a las escasas impurezas que no se pudieron eliminar. Las vacantes que se dejaron atrás en la estructura de enlace covalente representan nuestro limitado suministro de huecos. En un material de tipo *n*, el número de huecos no ha cambiado de forma importante desde este nivel intrínseco. El resultado total, por lo tanto, será que el número de electrones excede por mucho al número de huecos. Por esta razón:

En un material de tipo *n* (figura 1.13a) el electrón se denomina portador mayoritario y el hueco, portador minoritario.

Para el material tipo *p*, el número de huecos sobrepasa por mucho al número de electrones como se muestra en la figura 1.13b. Por lo tanto:

En un material de tipo *p* el hueco es el portador mayoritario y el electrón es el portador minoritario.

Cuando el quinto electrón de un átomo donador abandona a su átomo, el átomo restante adquiere una carga neta positiva; de aquí el signo positivo en la representación ión donador. Por razones similares, aparece el signo negativo en el ión aceptor.

Los materiales tipo *n* y tipo *p* representan los componentes básicos de construcción para los dispositivos semiconductores. En la siguiente sección veremos que la "unión" de un material tipo *n* con un material tipo *p* tiene como resultado un elemento semiconductor de importancia considerable para los sistemas electrónicos.

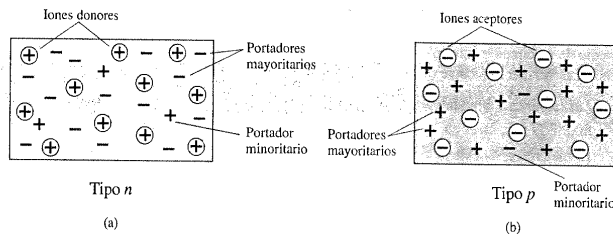


Figura 1.13 (a) material tipo *n*; (b) material tipo *p*.

1.6 DIODO SEMICONDUCTOR

En la sección 1.5 se presentaron los materiales tipo *n* y tipo *p*. El diodo semiconductor se forma al unir estos materiales (construidos a partir de la misma base: Ge o Si), como se muestra en la figura 1.14, mediante la aplicación de técnicas que se describirán en el capítulo 19. En el momento en que los dos materiales se "unan", los electrones y los huecos en la región de unión se combinarán, y como consecuencia se originará una carencia de portadores en la región cercana a la unión.

Esta región de iones positivos y negativos descubiertos se denomina región de agotamiento debido a la disminución de portadores en ella.

Ya que el diodo es un dispositivo de dos terminales, la aplicación de un voltaje a través de sus terminales ofrece tres posibilidades: *sin polarización* ($V_D = 0$ V), *polarización directa* ($V_D > 0$ V), y *polarización inversa* ($V_D < 0$ V). Cada posibilidad es una condición que implica una respuesta, ésta se debe entender claramente por el usuario si es que se desea aplicar el dispositivo de manera efectiva.

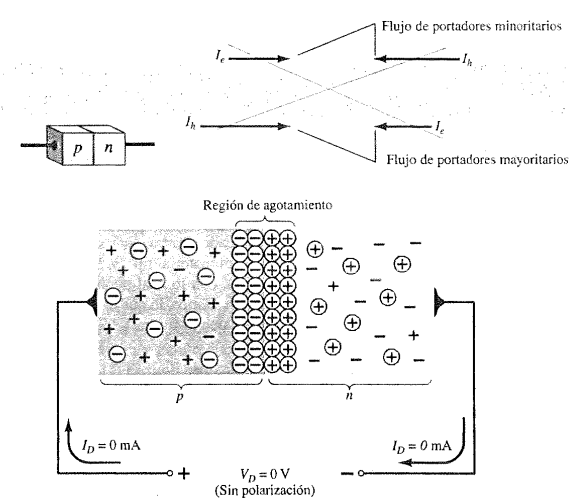


Figura 1.14 Unión p-n sin polarización externa.

Sin aplicación de polarización ($V_D = 0$ V)

Bajo condiciones sin polarización (sin un voltaje aplicado), cualquier portador minoritario (hueco) en el material tipo *n* que se encuentre dentro de la región de agotamiento fluirá directamente hacia el material tipo *p*. Mientras más cercano se encuentre el portador minoritario a la unión, mayor será la atracción hacia la capa de iones negativos y menor la oposición de los iones positivos de la región de agotamiento del material tipo *n*. Con el propósito de servir para exposiciones futuras, tendremos que asumir que todos los portadores minoritarios del material tipo *n* que se encuentren en la región de agotamiento por causa de su movimiento aleatorio, fluirán directamente hacia el material tipo *p*. Una exposición similar puede aplicarse para el caso de los portadores minoritarios (electrones) de un material tipo *p*. Este flujo de portadores se indica en la figura 1.14 para los portadores minoritarios de cada material.

Los portadores mayoritarios (electrones) del material tipo *n* deben superar tanto a las fuerzas de atracción de la capa de iones positivos de material tipo *p* como al escudo de iones negativos del material tipo *p*, para poder migrar al área del material tipo *p* que se encuentra más allá de la región de agotamiento. Sin embargo, dado que el número de portadores mayoritarios es tan grande en el material tipo *n*, existirá invariablemente un número pequeño de portadores mayoritarios con suficiente energía cinética para pasar a través de la región de agotamiento hacia el material tipo *p*. Nuevamente el mismo razonamiento se aplica a los portadores mayoritarios (huecos) del material tipo *p*. El flujo resultante por los portadores mayoritarios también se muestra en la figura 1.14.

Una observación más cercana de la figura 1.14 nos revela que las magnitudes relativas de los vectores de flujo son tales, que el flujo neto en cualquier dirección es cero. Esta cancelación de los vectores se indica mediante las líneas cruzadas. La longitud del vector que representa el flujo de huecos se dibujó mayor que la del flujo de electrones para demostrar que la magnitud de cada uno no tiene que ser la misma para que puedan cancelarse y que además, los niveles de dopado de cada material pueden ocasionar un flujo desigual de huecos y de electrones. En resumen, entonces:

En ausencia de un voltaje de polarización aplicado, el flujo neto de carga en cualquier dirección para un diodo semiconductor es cero.

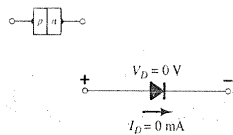


Figura 1.15 Situación sin polarización para un diodo semiconductor.

En la figura 1.15 se repite el símbolo de un diodo pero ahora éste muestra sus regiones tipo n y tipo p asociadas. Observe que la flecha se asocia con el componente tipo p y que la barra con la región tipo n . Como se indicó, $V_D = 0$ V y la corriente en cualquier dirección es 0 mA.

Situación de polarización inversa ($V_D < 0$ V)

Si se aplica un potencial externo de V volts a través de la unión p - n de tal forma que la terminal positiva se conecta al material tipo n y la terminal negativa al material tipo p como se muestra en la figura 1.16, el número de iones descubiertos positivos en la región de agotamiento del material tipo n se incrementará debido al gran número de electrones "libres" atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. Por razones similares, el número de iones descubiertos negativos se incrementará en el material tipo p . El efecto neto será, por lo tanto, un crecimiento del área de agotamiento, con lo cual también se establecerá una barrera que detendrá el paso de los portadores mayoritarios, lo que da como resultado una reducción a cero del flujo de éstos como se muestra en la figura 1.16.

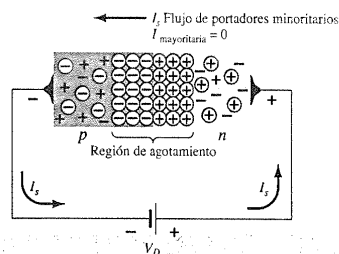


Figura 1.16 Unión p - n bajo polarización inversa.

Sin embargo, el número de portadores minoritarios que entran en la región de agotamiento no cambia, con lo que resultan vectores de flujo de portadores minoritarios que tienen la misma magnitud, como se indica en la figura 1.14, sin voltaje aplicado.

La corriente que se forma bajo una situación de polarización inversa se denomina corriente de saturación inversa y se representa por I_s .

La corriente de saturación inversa rara vez es mayor a unos cuantos microamperes excepto para el caso de dispositivos de alta potencia. De hecho, en años recientes su nivel se encuentra en el rango de los nanoamperes para los dispositivos de silicio y en el rango bajo de los microamperes para el germanio. El término *saturación* proviene del hecho de que alcanza rápidamente su máximo nivel y de que no cambia de forma importante con incrementos del potencial de polarización inversa, como se muestra en las características del diodo de la figura 1.19 cuando $V_D < 0$ V. Las situaciones para una polarización inversa se muestran en la figura 1.17 tanto para el símbolo del diodo como de la unión p - n . Observe en particular que la dirección de I_s es contraria a la flecha del símbolo. Advierta también que el potencial negativo se encuentra conectado al material tipo p y que el potencial positivo al material tipo n , la diferencia en las letras subrayadas de cada región indican la condición de polarización inversa.

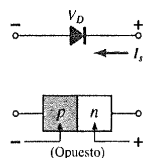


Figura 1.17 Situación de polarización inversa para un diodo semiconductor.

Situación de polarización directa ($V_D > 0$ V)

Se establece una situación de *polarización directa* o de "encendido" cuando se aplica un potencial positivo a un material tipo p y un potencial negativo a un material tipo n como se muestra en la figura 1.18. Entonces, como regla futura:

Un diodo semiconductor se encuentra en polarización directa cuando se establece una asociación tipo p con positivo y tipo n con negativo.

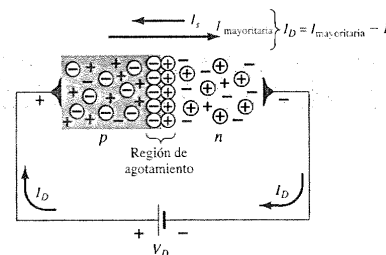


Figura 1.18 Unión p - n bajo polarización directa.

La aplicación de un potencial con polarización directa V_D "presionará" a los electrones del material tipo n y a los huecos del material tipo p para que se recombinen con los iones cercanos a la frontera y para reducir el ancho de la región de agotamiento como se muestra en la figura 1.18. El flujo resultante de portadores minoritarios del material tipo p hacia el material tipo n (y el de los huecos del material tipo n hacia el material tipo p) no varió en magnitud (ya que el nivel de conducción se controla principalmente por el nivel de impurezas en el material); sin embargo, la reducción en el ancho de la región de agotamiento provoca un fuerte flujo de portadores mayoritarios sobre la unión. Un electrón del material tipo n ahora "advierde" una barrera más reducida en la unión debido a una región de agotamiento reducida y una fuerte atracción ocasionada por el potencial positivo aplicado al material tipo p . A medida que la magnitud de la polarización aplicada se incrementa, la región de agotamiento continuará disminuyendo su amplitud hasta que un grupo de electrones pueda atravesar la unión, con un incremento exponencial de la corriente como resultado, de la forma en que se muestra en la región de polarización directa en las características de la figura 1.19. Observe que el eje vertical de la figura 1.19 se expresa en miliamperes (aunque existen algunos diodos semiconductores que poseen ejes verticales expresados en amperes) y que el eje horizontal para la región de polarización directa tiene un nivel máximo de 1 V, sin embargo, normalmente el voltaje a través del diodo bajo polarización directa será menor que 1 V. Observe también la rapidez con la que se incrementa la corriente una vez que se pasa el punto de inflexión de la curva.

Es posible demostrar mediante el empleo de la física del estado sólido que las características generales de un diodo semiconductor se pueden definir con la siguiente ecuación, tanto para la región de polarización inversa como para la directa:

$$I_D = I_s(e^{kV_D/T_k} - 1) \quad (1.4)$$

donde I_s = corriente de saturación inversa
 $k = 11,600/\eta$ donde $\eta = 1$ para el Ge y $\eta = 2$ para el Si para niveles relativamente bajos de corriente del diodo (en o abajo del punto de inflexión de la curva) y $\eta = 1$ tanto para el Ge como para el Si para niveles mayores de corriente del diodo (para la sección de rápido crecimiento de la curva)
 $T_k = T_C + 273^\circ$

En la figura 1.19 se presenta una gráfica de la ecuación 1.4. Si expandimos la ecuación 1.4 de la siguiente forma, los componentes de cada región de la figura 1.19 se podrán describir de forma más fácil.

$$I_D = I_s e^{kV_D/T_k} - I_s$$

Para valores de V_D positivos, el primer término de la ecuación anterior crecerá de forma muy rápida y superará el efecto contrario del segundo término. El resultado de esto es que para valores positivos de V_D , I_D será positiva y crecerá a un ritmo equivalente de $y = e^x$ que aparece en la figura 1.20. Para el caso cuando $V_D = 0$ V, la ecuación 1.4 se convierte en $I_D = I_s(e^0 - 1) = I_s(1 - 1) = 0$ mA como aparece en la figura 1.19. Para el caso de valores negativos de V_D , el primer término de la ecuación rápidamente caerá hacia niveles

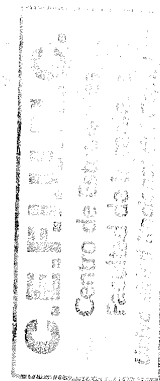
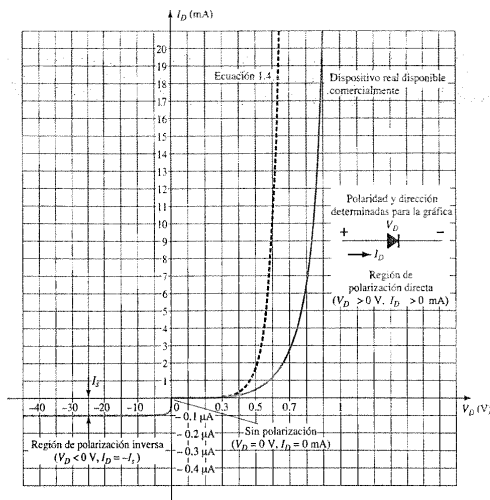




Figura 1.19 Características del diodo semiconductor de silicio.



inferiores de I_s con lo que se obtiene: $I_D = -I_s$, lo cual se representa con la línea horizontal de la figura 1.19. La discontinuidad para la condición $V_D = 0$ V aparece de esa forma en la gráfica debido al cambio dramático de escala de mA a μ A.

Observe en la figura 1.19 que el dispositivo comercialmente disponible tiene sus características desplazadas hacia la derecha con una magnitud de algunos décimos de volt. Esto se debe a la resistencia interna del "cuerpo" del diodo y a la resistencia externa del "contacto" del mismo. Cada una de estas resistencias contribuye a obtener un voltaje adicional con el mismo nivel de corriente como lo determina la ley de Ohm ($V = IR$). Con el tiempo, y a medida que los métodos de fabricación mejoren, esta diferencia será menor y las características reales se aproximarán a las de la ecuación 1.4.

Es importante prestar atención al cambio en la escala del eje vertical y el horizontal. Para valores positivos de I_D la escala se encuentra en miliamperes y la escala bajo el eje en microamperes (o posiblemente en nanoamperes). Para el caso de V_D , la escala para los valores positivos se encuentra en décimos de volt y para los valores negativos en decenas del mismo.

A simple vista, la ecuación 1.4 podría parecer compleja y alguien podría temer que su utilización sea necesaria para todas las aplicaciones subsiguientes del diodo; sin embargo, posteriormente en esta sección se realizarán varias aproximaciones, que evitarán el uso de esta ecuación, y nos facilitarán una solución con un mínimo de dificultad matemática.

Antes de abandonar el tema del estado de polarización directa, se repite en la figura 1.21 la situación de conductividad (estado "encendido") con las polaridades requeridas y la dirección del flujo de portadores mayoritarios resultante. Observe en particular la forma en que la dirección de la conducción es la misma que la que indica la flecha del símbolo (según se mostró para el diodo ideal).

Región Zener

A pesar de que la escala utilizada en la figura 1.19 se encuentra en decenas de volts para la región negativa, existe un punto donde al aplicar un exceso mayor de voltaje se ocasiona un cambio drástico en las características, como se muestra en la figura 1.22. En este punto, la corriente se incrementa a un ritmo muy rápido con una dirección opuesta a la que tiene la región de voltaje positivo. El potencial de polarización inversa que provoca este

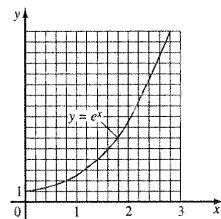


Figura 1.20 Gráfica de e^x .

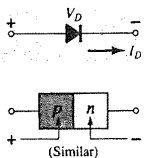


Figura 1.21 Situación de polarización directa para un diodo semiconductor.

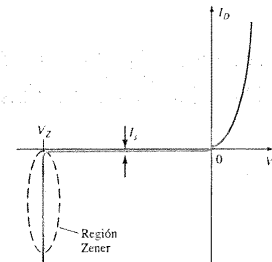


Figura 1.22 Región Zener.

cambio dramático de las características del diodo se denomina *potencial Zener* y se le asigna el símbolo V_Z .

A medida que el voltaje a través del diodo se incrementa sobre la región de polarización inversa, también se incrementa la velocidad de los portadores minoritarios que son los responsables de la corriente de saturación inversa I_s . En algunas ocasiones, su velocidad y su energía cinética asociada ($W_K = \frac{1}{2}mv^2$) serán lo suficientemente grandes como para liberar portadores adicionales mediante colisiones con estructuras atómicas que en otro caso serían estables. Esto es, cuando los electrones de valencia absorban tanta energía como para abandonar su átomo, se provocará un proceso de *ionización*. Estos portadores adicionales pueden entonces apoyar al proceso de ionización al punto donde se establezca un alta corriente de *avalancha* y se determine la región de *ruptura en avalancha*.

La región de avalancha (V_Z) se puede acercar al eje vertical mediante el incremento en los niveles de dopado tanto para el material tipo n como para el tipo p . Sin embargo, a medida que V_Z disminuye a niveles muy bajos, como -5 V, existe otro mecanismo llamado *ruptura Zener*, el cual contribuirá al cambio severo en la característica. Esto sucede debido a que existe un campo eléctrico fuerte en la región de unión que es capaz de romper las fuerzas internas de enlace del átomo y "generar" portadores. A pesar de que el mecanismo de ruptura Zener contribuye de manera importante sólo a bajos niveles de V_Z , este cambio severo en la característica en cualquier nivel se denomina *región Zener*, y los diodos que aprovechan esta porción única de la característica de la unión $p-n$ se designan como *diodos Zener*, los cuales se describen en la sección 1.15.

La región Zener descrita para un diodo semiconductor deberá de evitarse si la respuesta del sistema no debe ser completamente alterada por el cambio severo en las características para esta región de voltaje inverso.

El potencial máximo de polarización inversa que puede aplicarse antes de ingresar en la región Zener se denomina *voltaje pico inverso* (referido simplemente como el valor PIV, por las iniciales en inglés de *Peak Inverse Voltage*) o como *voltaje PRV* (por las iniciales en inglés de *Peak Reverse Voltage*).

Si una aplicación específica requiere un nivel de PIV mayor que el que puede ofrecer una sola unidad, es posible conectar en serie un conjunto de diodos con las mismas características. Los diodos también se pueden conectar en paralelo con el objetivo de incrementar la capacidad para conducir corriente.

Comparación entre el silicio y el germanio

Por lo general, los diodos de silicio cuentan con un PIV y un índice de corriente mayores, así como un rango de temperatura más amplio que los diodos de germanio. Los niveles de PIV para el caso del silicio se encuentran cercanos a 1000 V, mientras que el valor máximo para el caso del germanio se encuentra alrededor de 400 V. El silicio puede utilizarse para aplicaciones en las cuales la temperatura puede elevarse hasta 200°C (400°F), mientras que el germanio posee un nivel máximo mucho menor (100°C). La desventaja que tiene el silicio comparado con el germanio, como se indica en la figura 1.23, es la del mayor