# Capítulo 8

# EL DIODO DE UNION

- 1. La unión pn en equilibrio
  - 2. La unión pn polarizada
- 3. Corriente de electrones y huecos en un diodo de unión
- 4. Características tensión-corriente en
  - un diodo de unión
  - 5. El diodo como rectificador
  - 6. Diodo Zéner y diodo túnel

## 1. La unión pn en equilibrio

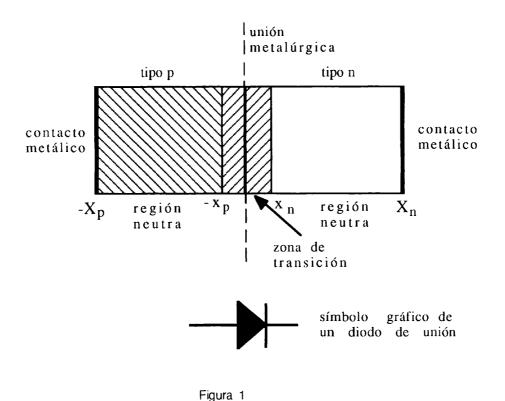
La unión de un semiconductor de tipo p con un semiconductor de tipo n forma un **diodo de unión** (unión pn).

Vamos a estudiar lo que sucede cuando situamos en contacto dos muestras del mismo material semiconductor, pero una de ellas de tipo p y la otra de tipo n. Para ello es importante introducir una serie de conceptos (figura 1):

- (a) *Unión metalúrgica:* plano matemático que separa las zonas correspondientes a los tipos p y n.
- (b) Zona de transición o de carga espacial: región reducida (~10-6 a  $10^{-4}$  cm de espesor) adyacente por el lado p y por el lado n a la unión metalúrgica (su anchura es W =  $x_n + x_p$ ).
- (c) Regiones neutras: Región comprendida entre los bordes de la

zona de transición y los planos donde terminan los semiconductores tipos p y n (sus anchuras son  $W_p = X_p - x_p$  y  $W_n = X_n - x_n$ ).

(d) Contactos metálicos u óhmicos: Planos donde finalizan las regiones neutras.



En nuestro estudio nos vamos a ocupar únicamente de la **unión abrupta** en la que la densidad de átomos dopantes sufre un cambio brusco de un valor  $N_a$  en la zona p a otro valor estacionario  $N_d$  en el lado n. Se dice que dicha unión es simétrica si  $N_a = N_d$ , y asimétrica cuando  $N_a \neq N_d$ . En esta última situación, si  $N_a > N_d$  la unión es pn+, y si  $N_a < N_d$  se trata de una unión p+n.

En primer lugar estudiaremos la **unión pn en equilibrio**, es decir, cuando no está sometida a ninguna acción externa.

Si los dos semiconductores, el tipo p y el tipo n, se ponen en contacto (figura 2), se produce un flujo de huecos de la zona p a la zona n, y un flujo de electrones de la zona n a la zona p. Este doble flujo da lugar a una doble capa de cargas positivas y negativas a ambos lados de la unión, en la región de transición, de modo que se crea en ésta un campo eléctrico, E, y, por tanto, se establece una diferencia de potencial en dicha región, la cual, al llegarse al equilibrio, se opone al flujo de huecos y electrones a través de la unión. Esta d.d.p. se denomina barrera de potencial, V<sub>O</sub>.

Fijémonos en el movimiento de los huecos (subíndice p); la situación para los electrones es igual y opuesta. A causa del acercamiento de los electrones y los huecos se produce una recombinación de éstos, por lo que el número de huecos en el semiconductor tipo n tiende a disminuir, y esto permite que una pequeña corriente  $I_{1p}$  fluya continuamente desde el lado p al lado n (corriente de difusión). Al mismo tiempo, debido a la excitación térmica, se producen pares electrón-hueco en el semiconductor tipo n, y estos huecos pueden fluir a través de la unión al lado p con una intensidad  $I_{2p}$  (corriente de arrastre). En el equilibrio  $I_{1p} = I_{2p}$ . Análogamente, para los electrones (subíndice n) se obtendría  $I_{1n} = I_{2n}$ , por lo que si  $I_1 = I_{1p} + I_{1n}$ , y  $I_2 = I_{2p} + I_{2n}$ , entonces  $I_1 = I_2$ .

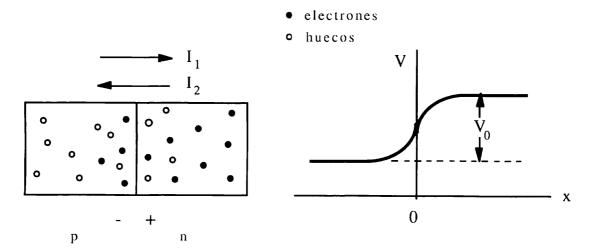
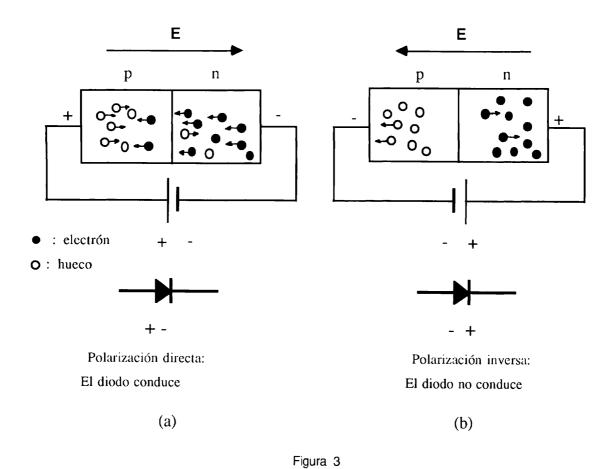


Figura 2

## 2. La unión pn polarizada

Fijémonos en las figura 3. Al aplicar una d.d.p. entre los extremos del diodo, si la polaridad es la correspondiente a la figura 3 (a), los electrones de la capa n y los huecos de la capa p son impulsados hacia el centro del cristal. La gran cantidad de portadores que se acumula en la zona fronteriza origina un intenso intercambio de electrones y de huecos y, por tanto, circula una corriente intensa (**Polarización directa**).

En cambio, si la polaridad de la pila se invierte, figura 3 (b), tanto los electrones como los huecos se alejarán de la frontera de separación, dando lugar a la producción de un campo eléctrico dentro del cristal que anulará el campo aplicado y circulará una corriente muy débil (**Polarización inversa**).



La explicación de estos dos fenómenos es sencilla. En el caso de la **polarización directa**, y fijándonos en el movimiento de los huecos, (figura 4), al aplicar una d.d.p. V, con el lado p unido al terminal positivo y el lado n al negativo, la d.d.p. a través de la unión disminuye, siendo ahora,  $V_0$  - V. Esto permite una mayor corriente  $I_{1p}$  hacia la derecha, sin afectar sustancialmente a la corriente  $I_{2p}$  que va hacia la izquierda, generada por excitación térmica ( $I_{1p} > I_{2p}$ ). De este modo se obtiene como resultado una corriente neta de huecos  $I_{1p} - I_{2p}$  a través de la unión hacia la derecha, corriente que aumenta muy rápidamente con V, a causa del mayor suministro de huecos desde el lado p al n. Para los electrones se tendría una corriente hacia la derecha,  $I_{1n} - I_{2n}$ , por lo que la corriente total de electrones y huecos será  $I_1 - I_2$ , hacia la derecha.

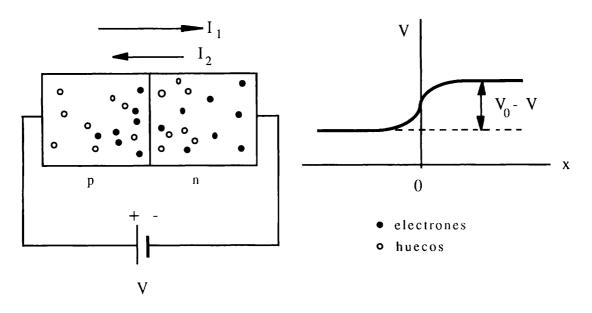


Figura 4

En el caso de la **polarización inversa**, y fijándonos de nuevo en el movimiento de los huecos, (figura 5), al aplicar una d.d.p. V, con el lado p unido al terminal negativo y el lado n al positivo, la d.d.p. a través de la unión aumenta,

siendo ahora,  $V_O + V$ . Esto reduce el valor de  $I_{1p}$ , sin cambiar realmente la corriente  $I_{2p}$  hacia la izquierda, generada térmicamente. Luego, al disminuir  $I_{1p}$  conforme aumenta V, la corriente neta hacia la izquierda,  $I_{2p} - I_{1p}$ , a través de la unión se aproximará al valor constante  $I_{2p}$  a medida que la d.d.p. V aumenta. Para los electrones se obtendría,  $I_{2n} - I_{1n}$ , y la corriente neta total hacia la izquierda será  $I_2 - I_1$ , que se aproxima a  $I_2$  al disminuir  $I_1$ .

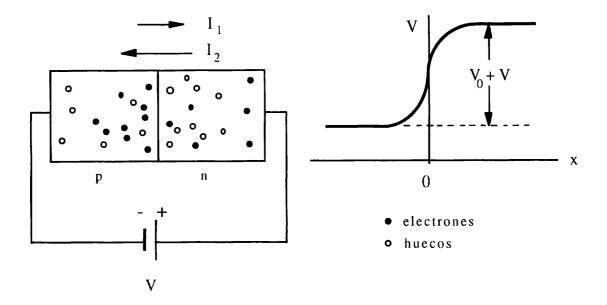


Figura 5

La figura 6 muestra la gráfica de la corriente neta hacia la izquierda a través de la unión en función de V, considerando V como positiva cuando estamos en el caso de la polarización directa y negativa si es la inversa. La corriente neta está expresada en forma muy precisa por la ecuación:

$$| = |_1 - |_2 = |_2 [exp(eV/kT) - 1]$$

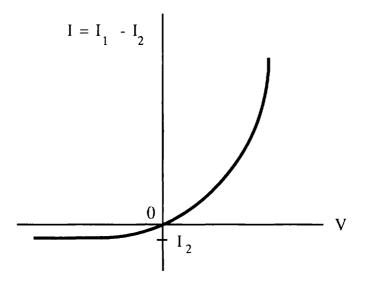


Figura 6

Resumiendo, una tensión V de polarización directa da origen a una corriente directa apreciablemente intensa. La misma tensión V de polarización inversa da lugar a una corriente inversa muy débil. Este efecto es similar al que se presenta en los diodos de vacío, los cuales conducen cuando la polarización hace positiva la placa frente al cátodo y no conducen si la polarización es de sentido contrario.

En consecuencia, si se aplica una d.d.p. alterna entre p y n, el sistema sólo dejará pasar corriente en el caso de la polarización directa y, por tanto, actuará de **rectificador de la corriente alterna**, pues favorece el paso de la corriente en la dirección  $p \rightarrow n$ .

# 3. Corrientes de electrones y huecos en un diodo de unión

En la siguiente tabla se han esquematizado los procesos descritos en el apartado anterior tanto para electrones (subíndice n) como para huecos (subíndice p).

EN EL EQUILIBRIO COEXISTEN EN EL MATERIAL CUATRO TIPOS DISTINTOS DE MOVIMIENTOS DE CARGAS A TRAVES DE LA UNION pn

Símbolo	Proceso	Sentido y tipo de corriente eléctrica
I <sub>1p</sub>	Corriente debida a huecos de la zona p, con energía suficiente para atravesar la barrera de potencial y que pasan por difusión a la zona n	corriente de difusión
Iln	Corriente debida a electrones de la zona p, con energía suficiente para atravesar la barrera de potencial y que pasan por difusión a la zona p	n corriente de difusión

I 2 p	Huecos producidos por agitación térmica en la zona n que, hallándose cerca de la unión, son desplazados por efecto del campo E hacia la zona p	corriente de arrastre
I <sub>2n</sub>	Electrones producidos por agitación térmica en la zona n que, hallándose cerca de la unión, son desplazados por efecto del campo E hacia la zona <b>p</b>	corriente de arrastre

CORRIENTE DE DIFUSION	$I_{1} = I_{1p} + I_{1n}$
CORRIENTE DE ARRASTRE	$I_2 = I_{2p} + I_{2n}$
CORRIENTE TOTAL QUE ATRAVIESA LA ZONA DE TRANSICION	$I_{T} = I_{1} - I_{2}$

UNION pn EN EQUILIBRIO	$I_T = 0$
$I_1 - I_2 = 0$	$I_1 = I_2$

UNION pn POLARIZADA	I <sub>T</sub> ≠ 0
Polarización directa I <sub>1</sub> > I <sub>2</sub>	$I_{T} = I_{1} - I_{2}$ $n$
Polarización directa I <sub>1</sub> < I <sub>2</sub>	$I_{T} = I_{2} - I_{1}$

# Características tensión-corriente de un diodo de unión

#### 4.1.- CARACTERISTICAS ESTATICA Y DINAMICA

En la figura 7 se muestra la curva característica de estos diodos con la de una resistencia óhmica para su comparación. En la resistencia se cumple la ley de Ohm, pero en el diodo no. La ecuación que nos da la intensidad de corriente, I, en función del voltaje, V, recibe el nombre de Ecuación del diodo o de Shockley:

$$I = I_0 [\exp(V/V_T) - 1]$$

donde  $I_0$  es la **intensidad de saturación** (correspondiente a la intensidad  $I_2$  del apartado anterior) y  $V_T$  el potencial equivalente de temperatura que vale kT/e, donde T la temperatura, e la carga del electrón y k la constante de Boltzmann.

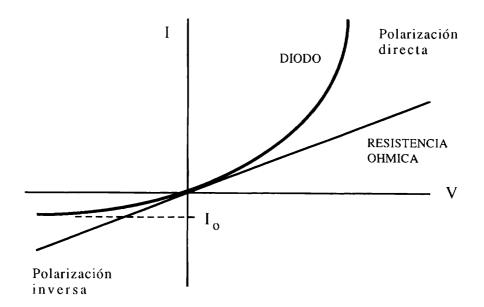


Figura 7

La expresión anterior configura el modelo analítico del diodo, y describe con precisión el comportamiento interno del dispositivo para corrientes directas y polarizaciones inversas moderadas, pues para polarizaciones inversas grandes existe un valor del potencial a partir del cual la intensidad de polarización inversa deja de ser constante y decae de una forma brusca.

La gráfica de la intensidad en función de la tensión aplicada recibe el nombre de característica dinámica del circuito. La característica estática, que no es sino la curva intensidad-tensión del diodo, y la característica dinámica se diferencian en la caída de tensión en la resistencia de carga. La caída de tensión hace disminuir la tensión entre ánodo y cátodo correspondiente a una tensión de entrada dada.

#### 4.2.- LINEA DE CARGA

Si consideramos un circuito como el de la figura 8, la intensidad de la corriente que circula por el circuito está determinada por la ecuación de la tensión:  $V = IR_L + V_D$ , donde  $V_D$  es la tensión en el diodo. Despejando la intensidad I:

$$I = \frac{V - V_D}{R_I}$$

Para encontrar la intensidad hay que resolver el sistema de ecuaciones constituido por esta ecuación y la ecuación característica del diodo (gráfica intensidad-tensión, I-V<sub>D</sub>). En realidad, la solución se obtiene gráficamente, puesto que la característica intensidad-tensión del diodo en ocasiones se determina de forma experimental. Partiendo de un valor V de la tensión de entrada se representa gráficamente la ecuación anterior junto con la curva característica del diodo. La gráfica de la ecuación anterior es una recta de

pendiente -1/ $R_L$  que corta a los ejes coordenados en  $V_D = V$  y en  $I = V/R_L$ . La intersección de esta llamada **línea de carga** con la característica del diodo da la intensidad de la corriente cuando la intensidad aplicada es  $V_1$  (figura 9). Asimismo, puede calcularse gráficamente la d.d.p. entre los extremos del diodo,  $V_D$ .

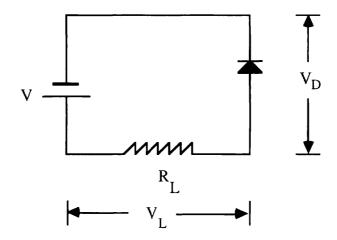


Figura 8

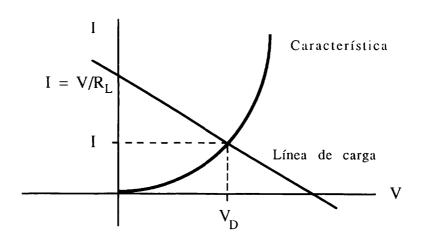


Figura 9

### 5. El diodo como rectificador

La union pn constituye un dispositivo rectificador de la corriente alterna pues permite el flujo fácil de cargas en una dirección (polarización directa) pero se opone al paso de la corriente en la dirección opuesta (polarización inversa). El diodo de unión actúa, en este sentido, como el diodo de vacío analizado en el capítulo anterior.

Tendremos una rectificación de **media onda** si se utiliza el dispositivo de la figura 10.

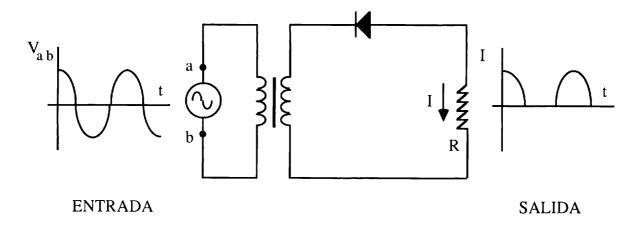


Figura 10

Es posible conseguir una rectificación más completa acoplando dos diodos tal y como se ve en la figura 11. La rectificación es ahora de **onda completa**.

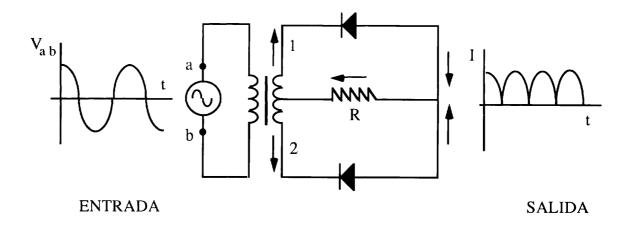


Figura 11

Asimismo es posible obtener una corriente continua situando un condensador, C, (figura 11), que se carga en las alternancias correspondientes a la polarización directa y se descarga en polarización inversa.

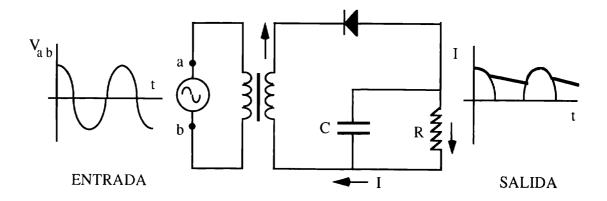


Figura 12

## 6. Diodo Zéner y diodo túnel

#### 6.1.- DIODO ZENER

Ya hemos indicado que la ecuación de Shockley, para polarización inversa, es válida para valores de V no muy grandes en módulo, en cuyo caso la corriente tiende a  $-I_O$ . Sin embargo, en la práctica, esta ecuación no describe el comportamiento del diodo para valores de V muy negativos pues en este caso el comportamiento del diodo es el que se presenta en la figura 13. La tensión  $V_r$  recibe el nombre de **tensión de ruptura**.

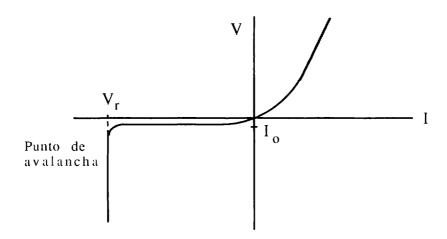


Figura 13

La explicación de este fenómeno, denominado efecto Zener, es la siguiente: Conforme aumenta la d.d.p. inversa que se aplica a un diodo, los electrones y los huecos, que atraviesan la unión pn por efecto del campo eléctrico E, cada vez tienen mayor energía, por lo que llega el momento en que dicha energía es suficiente para arrancar nuevas cargas de los átomos creando pares electrón-hueco, que a su vez pueden ionizar nuevos átomos, por lo que

se produce una fuerte corriente en este sentido inverso. El fenómeno es acumulativo, dando lugar a la liberación de electrones en una escala rápidamente creciente, conocida como avalancha.

Este efecto Zener también puede conseguirse a tensiones inversas bajas mediante el dopado de una zona del semiconductor mucho más que otra. Los diodos se fabrican con tensiones de ruptura o de avalancha, desde casi 1 V hasta unos 200 V. A este dispositivo compuesto por una unión pn con el dopado que se ha dicho, se le denomina **diodo Zener**, se simboliza como se indica en la figura 14, y su curva característica tensión-corriente es la de la figura 13.



Figura 14

Es interesante señalar que, en el punto de ruptura o de avalancha, la corriente inversa varía considerablemente con sólo un pequeño cambio de tensión, por lo que el diodo puede utilizarse para regular o mantener constante la tensión de una fuente de alimentación (figura 15). Al suministrar una tensión conocida y estable estos diodos también se llaman diodos de referencia.

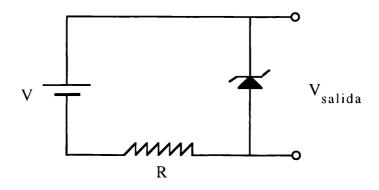


Figura 15

#### 6.2.- DIODO TUNEL

En un diodo existe un número de cargas que aún sin tener energía suficiente para atravesar la zona de transición lo hacen por efecto túnel. Es posible fabricar diodos en los que el efecto túnel es importante dopando fuertemente ambos lados de la unión de forma que la zona de transición sea muy estrecha.

La característica tensión-corriente de un diodo túnel, correspondiente a tensiones de polarización directa, y su símbolo, se han representado en la figura 16.

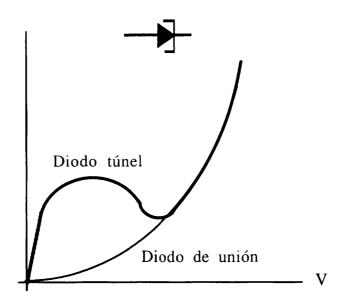


Figura 16

- ALONSO, M. y FINN, E. J. "Física. Tomo III: Fundamentos cuánticos y estadísticos". Addison-Wesley Iberoamericana (México). 1986.
- BELENDEZ, A., BERNABEU, J. G., VERA, J., PASTOR, C. y
   MARTIN, A. "Prácticas de Física". Universidad Politécnica de Valencia (Valencia). 1988.
- BONET, E., CRUZ, J. M., MAS, J., MESEGUER, J. M., PAGE, A., ROBLES, M. y ROMERO, F. "Prácticas de Física". Universidad Politécnica de Valencia (Valencia). 1987.
- BUECHE, F. J. "Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería.

  Tomo II". Mc Graw-Hill (México). 1988.
- CARTUJO, P., RUBIO, F., HERNANDEZ, A., MIRA, J., SERRA, F. y BAILON, L. A. "Electrónica I (Física)". UNED (Madrid). 1976.
- CATALA, J. "Física". Saber (Valencia). 1988.
- EISBERG, R. y RESNICK, R. "Física Cuántica". Limusa (México).
   1986.
- FERNANDEZ, J. y PUJAL, M. "Iniciación a la Física. Tomo II".
   Reverté (Barcelona). 1985.

- GALINDO, A. y PASCUAL, P. "Mecánica Cuántica". Alhambra (Madrid). 1978.
- GARCIA, N. y DAMASK, A. C. "Physics for computer science students". John Wiley & Sons (New York). 1986.
- HAFFORD, W. E. y McWHORTER, E. W. "A fondo: Electrónica del estado sólido I". Anaya Multimedia (Madrid). 1988.
- LLINARES, J. y PAGE, A. "Curso de Física Aplicada:
   Electromagnetismo y Semiconductores". Universidad
   Politécnica de Valencia (Valencia). 1988.
- NEGRO, J. L. y ESTEBAN, J. M. "Cerca de la Química". Alhambra (Madrid). 1977.
- ROSADO, L. "Electrónica Física y Microelectrónica". Paraninfo (Madrid). 1987.
- TIPLER, P. A. "Física. Tomo II". Reverté (Barcelona). 1986.