

2.- Semiconductores:

Para comprender cómo funcionan los diodos, transistores y circuitos integrados es necesario estudiar los materiales semiconductores: materiales que no se comportan ni como conductores ni como aislantes. Los semiconductores poseen algunos electrones libres, pero lo que les confiere un carácter especial es la presencia de huecos.

La estructura de los semiconductores es monocristalina, igual que la de los materiales aislantes. Entre los materiales semiconductores, los más utilizados en electrónica son el silicio y el germanio. El silicio es un elemento abundante en la naturaleza, y su coste es bajo, aunque resulta encarecido por el proceso de purificación al que se debe ser sometido. Otros semiconductores son elementos compuestos, como el arseniuro de galio, el fosfuro de indio o el sulfuro de plomo.

2.1.- Conductores:

El cobre es un buen conductor. La razón es evidente si se tiene en cuenta su estructura atómica, como se ve en la figura adjunta. El núcleo o centro del átomo contiene 29 protones (cargas positivas). Cuando un átomo de cobre tiene una carga neutra, 29 electrones (cargas negativas) circulan alrededor del núcleo, como los planetas alrededor del Sol.

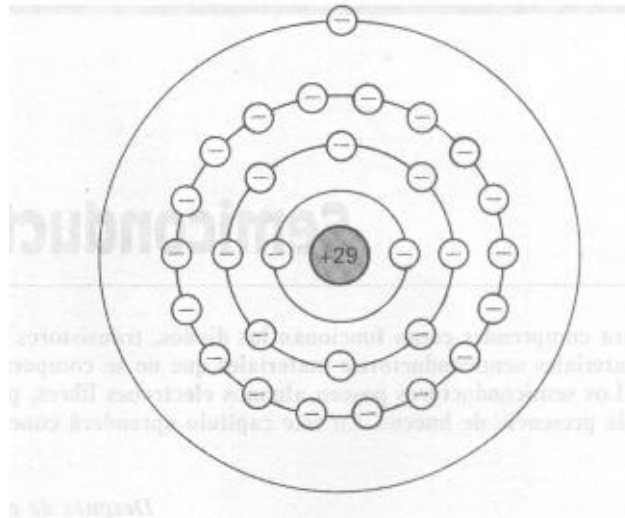


Figura 1. Átomos de cobre

2.1.1.- Órbitas estables

El núcleo positivo en la figura 1 atrae los electrones orbitales. Éstos no caen hacia el núcleo debido a la fuerza centrífuga (hacia fuera) creada por su movimiento orbital. Cuando un electrón se halla en una órbita estable, la fuerza centrífuga equilibra exactamente la atracción eléctrica ejercida por el núcleo. La fuerza centrífuga es menor en los electrones más lentos. Los electrones de las órbitas más alejadas del centro se mueven a menor velocidad que los electrones de las órbitas más cercanas. Se necesita menos fuerza centrífuga para contrarrestar la atracción del núcleo.

2.1.2.- La parte interna del átomo y el electrón libre

Como se puede apreciar en la figura 1, el núcleo y los electrones de órbitas internas son de poco interés en el estudio de la electrónica. Nuestro interés estará puesto en la órbita exterior, también llamada *órbita de valencia*. Es esta órbita exterior la que determina las propiedades eléctricas del átomo. Para subrayar la importancia de la órbita exterior, se define la parte interna (*core*) de un átomo como el núcleo más todas las órbitas internas.

Para un átomo de cobre, la parte interna es el núcleo (+29) y las tres primeras órbitas (-28).

La parte interna de un átomo de cobre tiene una carga resultante de +1, porque tiene 29 protones y 28 electrones internos. Como el electrón de valencia se encuentra en una órbita exterior alrededor de la parte interna con una carga resultante de +1, la atracción que sufre este electrón es muy pequeña. Como la atracción es tan débil, este electrón recibe el nombre de *electrón libre*.

2.1.3.- Idea principal

La idea más importante que debemos recordar acerca de un átomo de cobre es ésta: como el electrón de valencia es atraído muy débilmente por la parte interna, una fuerza externa puede arrancar fácilmente este electrón libre del átomo. A ello se debe que el cobre sea buen conductor. Aun la tensión más pequeña puede hacer que los electrones libres de un conductor de cobre se muevan de un átomo al siguiente. Los mejores conductores (plata, cobre y oro) tienen un único electrón de valencia.

2.2.- Aislantes eléctricos

Una vez visto los conductores repasemos los aislantes para entender la posición intermedia de los semiconductores.

El aislante perfecto para las aplicaciones eléctricas sería un material absolutamente no conductor, pero ese material no existe. Los materiales empleados como aislantes siempre conducen algo la electricidad, pero presentan una resistencia al paso de corriente eléctrica hasta $2,5 \times 10^{24}$ veces mayor que la de los buenos conductores eléctricos como la plata o el cobre. Estos materiales conductores tienen un gran número de electrones que pueden transportar la corriente; los buenos aislantes apenas poseen estos electrones. Algunos materiales, como el silicio o el germanio, que tienen un número limitado de electrones libres, se comportan como materiales semiconductores, tratados en este apartado del trabajo.

2.3.- Semiconductores: Estructura atómica del silicio y del germanio

El átomo, como hemos visto antes, está constituido por un núcleo rodeado de electrones. El núcleo atrae a los electrones, pues tiene una carga positiva, pero, gracias a la fuerza centrífuga, el electrón se mueve en una órbita estable.

Basándonos en la teoría de Bohr y Sommerfeld sobre la estructura atómica, analizaremos la distribución de protones, electrones y neutrones en los átomos del silicio y del germanio.

2.3.1.- El germanio

El germanio es un ejemplo de semiconductor. En la figura 2 se muestra un átomo de germanio. En el centro se halla un núcleo con 32 protones. En este caso los electrones se distribuyen como sigue: 2 electrones en la primera órbita, 8 en la segunda y 18 en la tercera. Los últimos 4 electrones se localizan en la órbita exterior o de valencia.

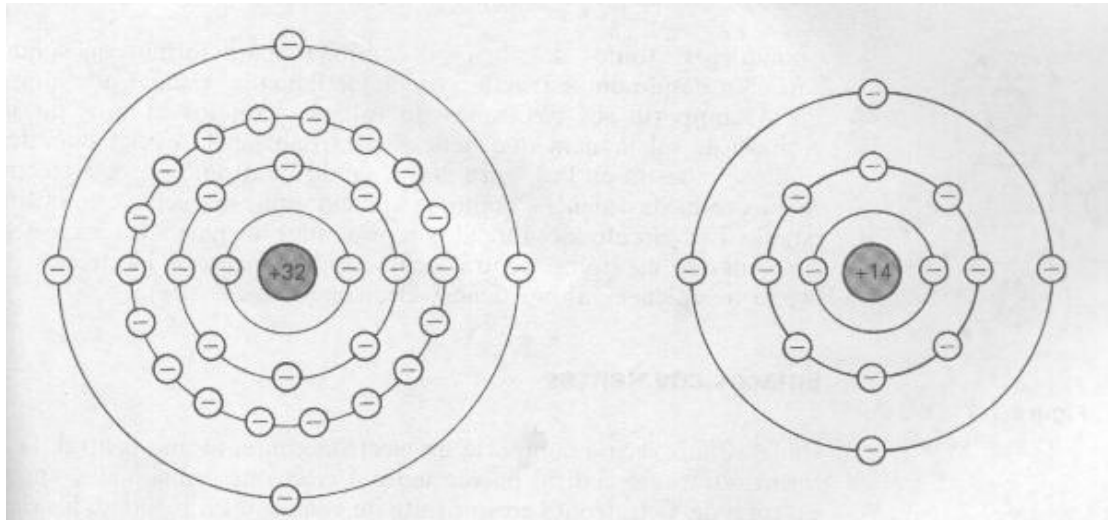


Figura 2. Átomo de germanio

Figura 2.1. Átomo de silicio

2.3.2.- El silicio

El material semiconductor más ampliamente utilizado es el silicio. Un átomo aislado de silicio tiene 14 protones y 14 electrones. Como puede apreciarse en la figura 2.1, la primera órbita contiene 2 electrones, y la segunda contiene 8. Los 4 electrones restantes se hallan en la órbita exterior.

En la figura 2.1, el núcleo y las dos primeras órbitas constituyen la parte interna del átomo de silicio. Esta parte interna tiene una carga resultante de +4 debido a los 14 protones en el núcleo y los 10 electrones de las dos primeras órbitas. Obsérvese que hay 4 electrones en la órbita exterior o de valencia; por este motivo, el silicio es un semiconductor.

2.3.2.1.- Cristales de silicio

Cuando los átomos de silicio se combinan para formar un sólido, lo hacen formando una estructura ordenada llamada *cristal*. Cada átomo de silicio comparte sus electrones de valencia con los átomos de silicio vecinos, de tal manera que tiene 8 electrones en la órbita de valencia, como se muestra en la figura 3. Cuando un átomo posee 8 electrones en su órbita de valencia, como se aprecia aquí, se vuelve químicamente estable. Los círculos sobreadados representan las partes internas del silicio. Aunque el átomo central tenía originalmente 4 electrones en su órbita de valencia, ahora tiene 8 electrones en esa órbita.

2.3.2.2.- Enlaces covalentes

Cada átomo vecino comparte un electrón con el átomo central. De esta forma, el átomo central parece tener 4 electrones adicionales, sumando un total de 8 electrones en su órbita de valencia. En realidad, los electrones dejan de pertenecer a un sólo átomo, ya que ahora están compartidos por átomos adyacentes.

En la figura anterior, cada parte interna presenta una carga de +4. Podemos observar la parte interna central y la que está a su derecha. Estas dos partes mantienen el par de electrones entre ellas atrayéndolos con fuerzas iguales y opuestas. Este equilibrio entre las fuerzas es el que mantiene unidos a los átomos de silicio. La idea es similar a la del juego de tirar de la cuerda. Mientras los equipos tiren con fuerzas iguales y opuestas, permanecerán unidos.

Como cada uno de los electrones compartidos en la figura 3 está siendo atraído en direcciones opuestas, el electrón constituye un enlace entre las partes internas opuestas. A este tipo de enlace químico se le da el nombre de *enlace covalente*. En un cristal de silicio hay miles de millones de átomos de silicio, cada uno con 8 electrones de valencia. Estos electrones de valencia son los enlaces covalentes que mantienen unido el cristal, dándole solidez.

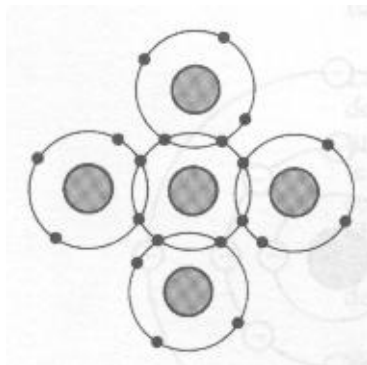


Figura 3. Enlaces covalentes

2.4.- Las bandas de energía

Además de la ya mencionada *banda de valencia*, la física cuántica explica que los electrones están distribuidos en diferentes capas y subniveles alrededor del núcleo. Distinguimos:

- . Banda saturada: Es la banda o nivel más próximo al núcleo. Los electrones de esta banda apenas tienen movilidad.
- . Banda de valencia: Está más separada del núcleo y, en ella, los electrones son semilibres.
- . Banda de conducción: Es la zona más alejada del núcleo y, en ella, los electrones tienen la suficiente energía para moverse por el cuerpo.

Estas bandas están definidas por su radio, y están separadas *por bandas prohibidas* donde los electrones no pueden viajar, aunque tuviesen la energía suficiente. Un material conductor tiene solapadas las bandas de valencia y de conducción y, en cambio, un material aislante tiene una gran separación entre ambas bandas. Puede deducirse que en un material semiconductor existe una separación entre ambas bandas inferior a la de un material aislante. Normalmente, la separación entre la banda de conducción y de valencia en un material semiconductor es de 1eV.

Para que los electrones realicen el salto de una capa a otra requieren de una aportación de energía, traducible a un incremento de temperatura. Los semiconductores intrínsecos son aislantes perfectos a la temperatura del cero absoluto (-276 °C). En el cero absoluto, la banda de conducción del semiconductor estará vacía y no podrá existir ninguna corriente. A medida que aumente la temperatura, se irán rompiendo enlaces covalentes, y algunos electrones de la banda de valencia pasarán a la conducción. A la temperatura ambiente (25°C), el silicio se comporta como un semiconductor: no es ni buen aislante, ni buen conductor.

2.5.- Comportamiento eléctrico

El núcleo atrae a los electrones, por tanto para que un electrón vaya de una órbita pequeña a una más grande debe efectuar un trabajo para no ser atraído por el núcleo. Así, los electrones más alejados del núcleo poseerán más energía potencial.

Cuando un electrón salta de la banda de valencia a la de conducción, se libera del enlace covalente y se convierte en un portador de carga; así facilita la conducción de la corriente.

El electrón que salta deja un hueco (carga positiva), que será rellenado por un electrón que pertenezca a un átomo próximo. Ese hueco será rellenado por otro electrón y así sucesivamente.

2.6.- Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor intrínseco es un semiconductor puro. Un cristal de silicio es un semiconductor intrínseco si cada átomo del cristal es un átomo de silicio. A temperatura ambiente, un cristal de silicio se comporta más o menos como un aislante, ya que tiene solamente unos cuantos electrones libres y sus huecos producidos por excitación térmica.

2.6.1.- Flujo de electrones libres

La figura 4 muestra parte de un cristal de silicio entre dos placas metálicas cargadas. Supóngase que la energía térmica ha producido un electrón libre y un hueco. El electrón libre se halla en una órbita grande en el extremo derecho del cristal. Debido a la placa cargada negativamente, el electrón libre es repelido hacia la izquierda. Este electrón puede pasar de una órbita grande a la siguiente hasta alcanzar la placa positiva.

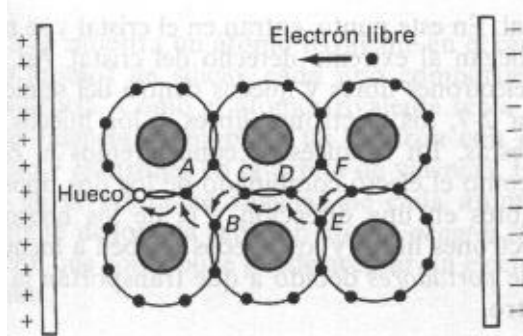


Figura 4. Flujo de huecos

2.6.2.- Flujo de huecos

Obsérvese el hueco a la izquierda de la figura 4. Este hueco atrae al electrón de valencia del punto A, lo que provoca que el electrón de valencia se mueva hacia el hueco. Esta acción no es la misma que la recombinación, en la cual un electrón libre, cae en un hueco. En vez de un electrón libre se tiene un electrón de valencia moviéndose hacia un hueco.

Cuando el electrón de valencia en el punto A se mueve hacia la izquierda, crea un nuevo hueco en el punto A. El efecto es el mismo que si el hueco original se desplazara hacia la derecha. El nuevo hueco en el punto A puede atraer y capturar otro electrón de valencia. De esta forma los electrones de valencia pueden desplazarse a lo largo de la trayectoria indicada por las flechas. Esto quiere decir que el hueco se puede mover en el sentido opuesto a lo largo de la trayectoria A-B-C-D-E-F.

2.7.- Dos tipos de flujo

La figura 4.1 muestra un semiconductor intrínseco. Obsérvese que tiene el mismo número de electrones libres que de huecos. Esto se debe a que por acción de la energía térmica se producen los electrones libres y los huecos por pares. La tensión aplicada forzará a los electrones libres a circular hacia la izquierda y a los huecos hacia la

derecha. Cuando los electrones libres llegan al extremo izquierdo del cristal, entran al conductor externo y circulan hacia el terminal positivo de la batería. Por otra parte, los electrones libres en el terminal negativo de la batería fluirán hacia el extremo derecho del cristal. En este punto, entran en el cristal y se recombinan con los huecos que llegan al extremo derecho del cristal. Así, se produce un flujo estable de electrones libres y huecos dentro del semiconductor.

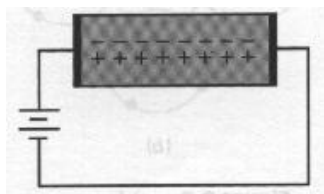


Figura 4.1. Semiconductor intrínseco

En la figura 4.1, los electrones libres y los huecos se mueven en direcciones opuestas. A partir de ahora concebiremos la corriente en un semiconductor como el efecto combinado de los dos tipos de flujo: el de los electrones libres en una dirección y el de los huecos en dirección opuesta. Los electrones libres y los huecos reciben a menudo la denominación común de portadores debido a que transportan la carga eléctrica de un lugar a otro.

2.8.- Dopado de un semiconductor: Semiconductores extrínsecos

Una forma de aumentar la conductividad de un semiconductor es mediante el dopado. El dopado supone que deliberadamente se añadan átomos de impurezas a un cristal intrínseco para modificar su conductividad eléctrica. Un semiconductor dopado se llama semiconductor extrínseco.

2.8.1.- Aumento del número de electrones libres

A continuación comentaremos el proceso de dopado de un cristal de silicio. El primer paso consiste en fundir un cristal puro de silicio para romper los enlaces covalentes y cambiar el estado del silicio de sólido. Con el fin de aumentar el número de electrones libres, se añaden átomos pentavalentes al silicio fundido. Los átomos pentavalentes tienen 5 electrones en la órbita de valencia. El arsénico, antimonio y el fósforo son ejemplos de átomos pentavalentes. Como estos materiales donarán un electrón extra al cristal de silicio se les conoce como impurezas *donadoras*.

La figura 5.1 muestra cómo queda el cristal de silicio después de enfriarse y volver a tomar su estructura de cristal sólido. En el centro se halla un átomo pentavalente rodeado por cuatro átomos de silicio. Como antes, los átomos vecinos comparten un electrón con el átomo central. Pero en este caso queda un electrón adicional. Recuérdese que cada átomo pentavalente tiene 5 electrones de valencia. Como únicamente pueden situarse 8 electrones en la órbita de valencia, el electrón adicional queda en una órbita mayor. En otras palabras, se trata de un electrón libre.

Cada átomo pentavalente, o donador, en un cristal de silicio produce un electrón libre. Un fabricante controla así la conductividad de un semiconductor dopado. Cuantas más impurezas se añadan, mayor será la conductividad. Así, un semiconductor se puede dopar ligeramente o fuertemente. Un semiconductor dopado ligeramente tiene una gran resistencia eléctrica y uno fuertemente dopado tiene resistencia pequeña.

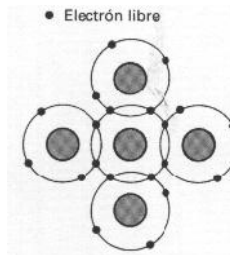


Figura 5.1. Incremento del número de electrones

2.8.2.- Aumento del número de huecos

Para dopar un cristal de silicio y obtener un exceso de huecos debemos utilizar una impureza trivalente; es decir, una impureza cuyos átomos tengan sólo 3 electrones de valencia, como, por ejemplo, el aluminio, el boro o el galio.

La figura 5.2 muestra un átomo trivalente en el centro. Está rodeado por cuatro átomos de silicio, cada uno compartiendo uno de sus electrones de valencia. Como el átomo trivalente tenía al principio sólo 3 electrones de valencia y comparte un electrón con cada uno de sus vecinos, hay sólo 7 electrones en la órbita de valencia. Esto significa que hay un hueco en la órbita de valencia de cada átomo trivalente. Un átomo trivalente se denomina también átomo *aceptor*, porque cada uno de los huecos con que contribuye puede aceptar un electrón libre durante la recombinación. Por recombinación se entiende la unión de un electrón libre y un hueco.

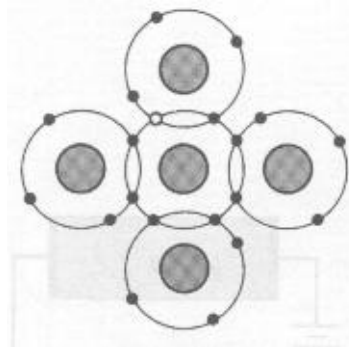


Figura 5.2. Incremento del número de huecos

2.9.- Dos tipos de semiconductores extrínsecos.

Un semiconductor se puede dopar para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos. Debido a ello, existen dos tipos de semiconductores dopados.

2.9.1.- Semiconductor tipo *n*

El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se llama semiconductor tipo *n*. Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo *n*, reciben el nombre de *portadores mayoritarios*, mientras que a los huecos se les denomina *portadores minoritarios*.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres dentro del semiconductor se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

Los electrones libres mostrados en la figura 6.1 circulan hacia el extremo izquierdo, donde entran al conductor y fluyen hacia el terminal positivo de la batería. Además de los electrones libres, algún electrón de valencia abandona ocasionalmente el extremo

izquierdo del cristal. La salida de este electrón de valencia crea un hueco en el extremo izquierdo de cristal.

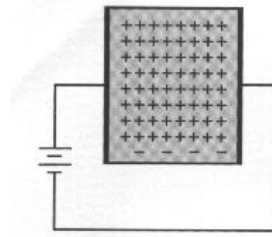


Figura 6.1. Semiconductor tipo n

2.9.2.- Semiconductor tipo p

El silicio que ha sido dopado con impurezas trivalentes se llama semiconductor tipo p , donde p hace referencia a positivo. La Figura 6.2 representa un semiconductor tipo p . Como el número de huecos supera el número de electrones libres, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los minoritarios.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. En la Figura 6.2, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.

En el diagrama de la Figura 6.2 hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como hay muy pocos portadores minoritarios, su efecto es casi despreciable en este circuito.

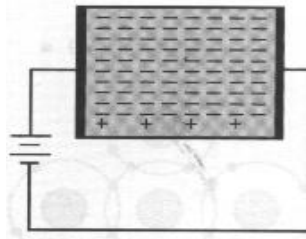


Figura 6.2. Semiconductor tipo p

2.9.- Unión PN

Si se produce un cristal que tenga una mitad de tipo p y la otra de tipo n , conseguiremos una unión donde se encuentran las regiones p y n .

Recordemos que el lado p tiene un exceso de huecos, mientras que el lado n tiene muchos electrones libres. En el lado n existirá una repulsión entre todos los electrones, que hará que se difundan en todas las direcciones. Si un electrón libre abandona esta región n , dejará un ion positivo (átomo cargado positivamente) en la región n . Cuando el electrón entre la zona p , encontrará muchos huecos y rápidamente caerá en uno de ellos. En este momento desaparecerá el hueco y aparecerá un ion negativo (átomo cargado negativamente).

Vemos que en este proceso se genera un par de iones. Los iones quedan fijos en la estructura covalente del cristal y no pueden moverse. Llega el momento que los pares de iones son cada vez más numerosos e impiden que haya movimiento entre los electrones libres y huecos. La región cerca de la unión que se agota de electrones libres y huecos recibe el nombre de *barrera de potencial*. Tenemos así una carga positiva en la región n y una negativa en la región de tipo p . Recibe el nombre de barrera, porque en ausencia de polarización repele los electrones de la región n y los huecos de la región p , manteniendo a ambos alejados de la unión como se puede observar en la figura 7.

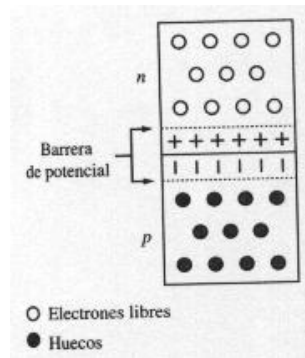


Figura 7. Unión pn

2.9.1.- Polarización de una unión pn

Veamos ahora qué sucede cuando a una unión pn se le conecta una pila. Dependiendo de donde se coloque el polo positivo de la pila, existen dos tipos de polarizaciones:

. Polarización directa de la unión pn : Se obtiene conectando el polo positivo de una pila al semiconductor tipo p y el polo negativo al semiconductor tipo n . Cuando la tensión de la pila aumenta a partir de cero, un gran número de electrones es empujado hacia la unión. Este hecho consigue disminuir la barrera de potencial, reduciéndose tanto más cuanto mayor sea la tensión aplicada. Ello consigue que a través de la unión aparezca una corriente que aumenta rápidamente, aunque los incrementos de tensión sean pequeños. En la figura 8.1 puede apreciarse que el flujo de electrones se mantiene gracias a la pila y que circula con el sentido eléctrico real, que es el contrario al convencional indicado por I . Esta corriente puede llegar a fundirse. Para evitarlo, habrá que conectar una resistencia limitadora en serie y controlar la tensión aplicada mediante la pila.

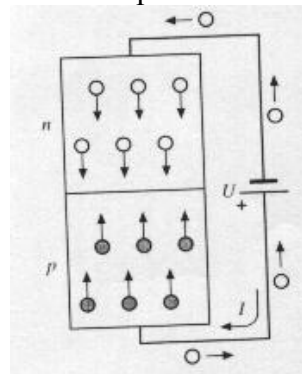


Figura 8.1. Unión pn polarizada en directo

. Polarización inversa de la unión pn . Esta polarización se conseguirá cuando se inviertan los polos de la pila (Figura 8.2). Los electrones de la región n se alejarán de la zona de unión hacia el polo positivo de la pila y, por su parte, los huecos de la región p se alejarán dirigiéndose al polo negativo de la pila. Los electrones que se han alejado dejarán iones positivos a la unión, mientras que los huecos dejan más iones negativos. Como consecuencia, la barrera de potencial se ensanchará, a medida que aumente la tensión de la pila. La barrera impedirá la circulación de electrones y huecos a partir de la unión. No obstante, la energía térmica crea un número limitado de electrones libres y huecos a cada lado de la unión, que hará que exista una pequeñísima corriente, que recibe el nombre de corriente de saturación. Si se aumenta el voltaje inverso sobrepasando el denominado voltaje de ruptura, el

diodo puede conducir intensamente. El electrón es atraído al polo positivo de la pila y, a medida que aumenta la tensión, el electrón gana velocidad a la vez que gana energía. Si la energía es la suficiente, puede llegar a desprender un electrón de valencia, con lo que habrá dos electrones libres. Este proceso hará aumentar el número de electrones libres y producir una avalancha, y aumentará excesivamente la conducción, existiendo el peligro de destrucción por una elevada disipación de potencia.

A modo de conclusión, podemos decir que una unión pn actúa como un buen conductor cuando se polariza en directo y como un buen aislante cuando se polariza en inverso.

2.9.2.- La unión pn y la luz

Cuando a una unión pn se le aplica energía luminosa, se produce un incremento de los pares electrón-hueco. Esto hace que el comportamiento sea diferente al hasta aquí explicado.

Las aplicaciones que nos interesan son cuando la unión pn se polariza en inverso y en ausencia de polarización.

- Polarización inversa. También existe una corriente inversa, pero su valor es proporcional a la intensidad luminosa que se recibe, y casi independiente de las variaciones de tensión que se apliquen.
- Ausencia de polarización. Sin aplicar ninguna polarización, esto es, sin alimentar mediante generador el semiconductor, conseguimos, al incidir energía luminosa, la aparición de una tensión entre los terminales de una unión pn. Es decir, conseguimos transformar, mediante la unión pn, energía luminosa en eléctrica a través de una carga (resistencia). En esta propiedad se basa la fabricación de células solares.

3.- El Diodo

El diodo (Figura 9) es el dispositivo más sencillo construido con una unión pn. Tiene dos terminales, uno conectado a la unión p y otro conectado a la unión n, y un encapsulado que lo protege. Su comportamiento es idéntico al de una unión pn.

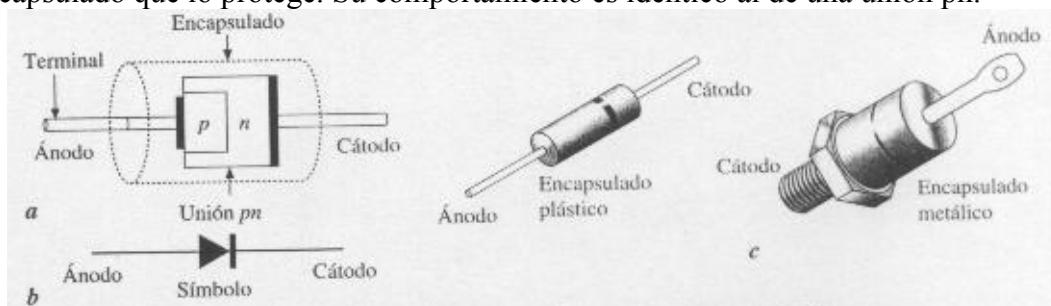


Figura 9. Diodos. a)Estructura. b)Símbolo. c)Encapsulados.

3.1.- El símbolo eléctrico

Algunos dispositivos electrónicos son lineales; es decir, su corriente es directamente proporcional a su tensión. La razón por la cual se les llama lineales es que la representación de la corriente en función de la tensión es una línea recta. El ejemplo más sencillo de un dispositivo lineal es una resistencia. Si se dibuja su corriente en función de su tensión, se obtiene una línea recta.

Un diodo es diferente. Debido a la barrera de potencial existente, no se comporta como lo hace una resistencia. Como se verá, la representación de la corriente en función de la tensión para un diodo es una curva y, por tanto, no es lineal.

La figura 9 muestra el símbolo eléctrico de un diodo rectificador. El lado p se llama ánodo y el lado n es el cátodo. El símbolo del diodo es una flecha que apunta del lado p al lado n, del ánodo al cátodo. Por ello, la flecha del diodo recuerda que la corriente convencional circula con facilidad del lado p al lado n. Si se trabaja con el flujo de electrones, hay que tener en cuenta que éstos fluyen en dirección opuesta a la de la flecha del diodo.

3.2.- La curva del diodo

Cuando un fabricante diseña un diodo para convertir corriente alterna en corriente continua, el diodo recibe el nombre de diodo rectificador. Una de sus aplicaciones principales se halla en las fuentes de alimentación, circuitos que convierten la tensión alterna de la red en tensión continua.

En la figura 10 se muestra uno de los circuitos más sencillos con diodos. Para determinar si el diodo está polarizado directa o inversamente debemos comprobar si la corriente convencional está en la misma dirección que la flecha del diodo. Si es éste el caso sabremos que el diodo está polarizado directamente.

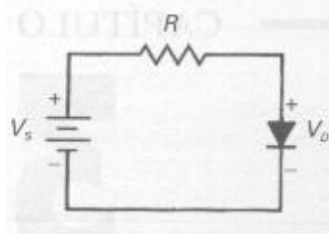


Figura 10. Polarización directa

3.3.- La zona directa

La figura 10, vista en el apartado anterior, es un circuito que hemos montado en el laboratorio. Tras conectarlo pudimos medir la tensión en el diodo y la corriente que el atraviesa. Esto nos permitió obtener valores de V e I con los que posteriormente dibujamos la gráfica.

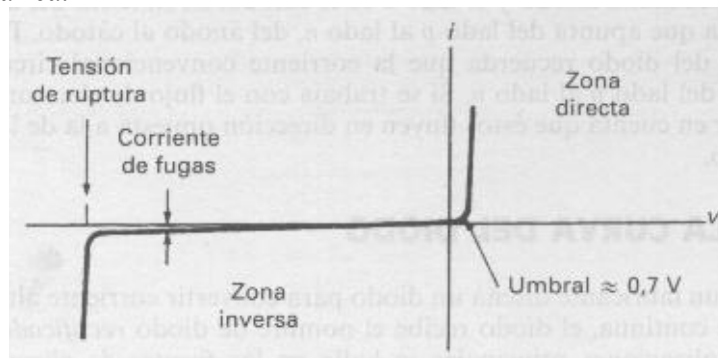


Figura 11. Curva del diodo

3.3.1.- Tensión umbral

La figura 11 muestra la curva para un diodo de silicio con polarización directa. La gráfica nos indica, en primer lugar, que la corriente es pequeña para las primeras décimas de voltio. A medida que nos acercamos a $0,7\text{ V}$, los electrones libres comienzan a cruzar la unión en grandes cantidades. Para tensiones mayores de $0,7\text{ V}$, el menor incremento en la tensión del diodo produce un gran aumento en la corriente. La tensión para la que la corriente empieza a aumentar rápidamente se llama tensión umbral del diodo. Para un diodo de silicio, la tensión umbral puede aproximarse a la barrera de

potencial, aproximadamente 0,7 V. Un diodo de germanio, por otra parte, tiene una tensión umbral de aproximadamente 0,3 V.

3.3.2.- Dispositivo no lineal

Un diodo es un dispositivo no lineal. Por debajo de 0,7 V, por el diodo circula muy poca corriente. Por encima de los 0,7 V, la corriente aumenta rápidamente. Este efecto es muy diferente al que se da en una resistencia en la que la corriente aumenta en proporción directa a la tensión. La razón de que el diodo sea diferente es que éste tiene una barrera de potencial producida en su zona de deplexión. Recordemos que la zona de deplexión es la zona de la unión pn que contiene pares de iones con cargas opuestas en cada lado de la citada unión.

3.3.3.- Resistencia interna.

Para tensiones mayores que la tensión umbral, la corriente del diodo aumenta rápidamente. Esto quiere decir que aumentos pequeños en la tensión del diodo originarán grandes aumentos en su corriente. La causa es la siguiente: después de superada la barrera de potencial, lo único que se opone a la corriente es la resistencia de las zonas p y n. A la suma de estas resistencias se le llama resistencia interna del diodo. O sea,

$$r_B = r_p + r_n$$

El valor de la resistencia interna depende del nivel de dopado y del tamaño de las zonas p y n. Normalmente, la resistencia interna de los diodos rectificadores es menor de 1Ω .

3.3.4.- Máxima corriente continua con polarización directa

Si la corriente en un diodo es demasiado grande, el calor excesivo destruirá el diodo. Basta acercarse al valor del calor máximo, aun cuando no se alcance, para acortar la vida del diodo y degradar otras propiedades. Por esta razón, la hoja de características que proporcionan los fabricantes especifica la corriente máxima que un diodo puede soportar sin peligro de acortar su vida o degradar sus propiedades.

La corriente máxima con polarización directa es una de las limitaciones dadas en una hoja de características. Esta corriente puede aparecer como $I_{F(max)}$, I_O , etc; dependiendo del fabricante. Por ejemplo un 1N456 tiene una corriente máxima de 135 mA. Este dato significa que puede conducir con seguridad una corriente continua con polarización directa igual a 135 mA.

3.3.5.- Resistencia para limitación de corriente

En la figura 10, la resistencia que aparece se conoce como resistencia limitadora de corriente. Cuanto mayor sea la resistencia, menor será la corriente en el diodo. Como mínimo, la resistencia de limitación de corriente tiene que mantener la corriente del diodo menor que la máxima corriente

La corriente por el diodo viene dada por

$$I = \frac{V_S - V_D}{R}$$

donde V_S es la tensión de la fuente y V_D es la tensión en el diodo. Esta ecuación es la ley de Ohm aplicada a la resistencia limitadora de corriente. En otras palabras, la tensión en la resistencia es igual a $V_S - V_D$. Dividiendo esta tensión entre la resistencia se obtiene la corriente en la resistencia. Como este es un circuito en serie, la corriente del diodo tiene el mismo valor que la corriente en la resistencia.

3.3.6.- Disipación máxima de la potencia

La disipación máxima de la potencia está estrechamente relacionada con la máxima corriente continua con polarización directa. Como sucede con una resistencia, un diodo tiene una limitación de potencia. Ésta indica cuánta potencia puede disipar el diodo sin peligro de acortar su vida ni degradar sus propiedades. Cuando la corriente es continua, el producto de la tensión en el diodo y la corriente en el diodo es igual a la potencia disipada por éste.

3.4.- La zona inversa

Cuando un diodo se polariza en inverso, fluye una pequeña corriente de fugas. Midiendo la tensión y la corriente del diodo puede trazarse la curva para la polarización inversa; será más o menos como la zona inversa de la figura 11. La corriente del diodo es muy pequeña para todas las tensiones inversas menores que la tensión de ruptura. En la ruptura la corriente aumenta rápidamente con pequeños incrementos de tensión.

La figura 11 indica el valor de la corriente por el diodo en función de la tensión en sus bornas. Incluso cuando se midan la corriente y la tensión en el circuito de la figura 10, la curva de la figura 11 se puede emplear para cualquier circuito con diodo. Esto se debe a que la relación entre la corriente y la tensión en el diodo es la misma, sin importar cómo esté conectado el diodo.

3.5.- Aproximaciones

A modo de ampliación introduciremos ahora las tres aproximaciones utilizadas ampliamente para los diodos de silicio. Cada una de ellas es útil en ciertas condiciones. Para saber qué aproximación hay que usar hemos de tener en cuenta si se están detectando averías o si se está haciendo un análisis preliminar. Si éste es el caso son aceptables errores grandes, mientras que si el circuito contiene resistencias de precisión con una tolerancia de ± 1 por 100, puede ser necesario utilizar la tercera aproximación. Aún así en la mayor parte de los casos, la segunda aproximación resulta el mejor compromiso.

3.5.1.- El diodo ideal

Como hemos visto, un diodo rectificador conduce bien en la zona directa y conduce mal en la zona inversa. En teoría, un diodo rectificador se comporta como un conductor perfecto (resistencia cero) cuando tiene polarización directa, y lo hace como un aislante perfecto (resistencia infinita) cuando tiene polarización inversa.

En la figura 8 se ofrece la gráfica corriente-tensión de un diodo ideal. Refleja lo que se acaba de decir: resistencia cero con polarización directa y resistencia infinita con polarización inversa. A decir verdad, es imposible construir un dispositivo con esas características, pero es lo que los fabricantes haría si pudiesen.

Sólo existe un dispositivo real que actúe como un diodo ideal. Se trata de un interruptor ya que éste tiene resistencia cero al estar cerrado, y resistencia infinita al estar abierto. Por tanto, un diodo ideal actúa como un interruptor que se cierra al tener polarización directa y se abre con polarización inversa. En la figura 12.1 se resume esta idea del interruptor.

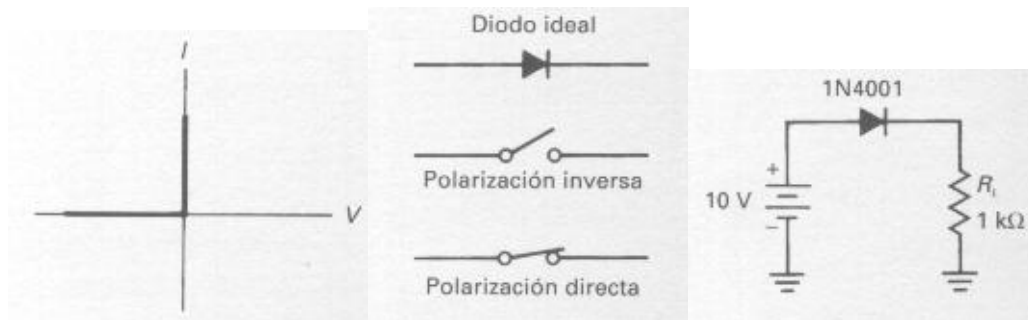


Figura 12.1. Curva, funcionamiento y ejemplo de un diodo ideal

3.5.2.- La segunda aproximación

La figura 12.2 contiene el gráfico de la corriente en función de la tensión para la segunda aproximación. El dibujo indica que no hay corriente hasta que aparecen 0,7 V en el diodo. En este punto el diodo se activa. De ahí en adelante sólo aparecerán 0,7 V en el diodo, independientemente del valor de la corriente.

La figura muestra también el circuito equivalente para la segunda aproximación. El diodo se asemeja a un interruptor en serie con una pila de 0,7 V. Si la tensión de la fuente es por lo menos de 0,7 V, el interruptor cerrará. En ese caso, la tensión en el dispositivo será de 0,7 V para cualquier valor de la corriente con polarización directa.

Por otra parte, si la tensión de la fuente es menor de 0,7 V o si la tensión de la fuente es negativa (polaridad invertida), el interruptor se abre. Entonces la barrera de potencial no tiene ningún efecto y el diodo puede considerarse como un interruptor abierto.

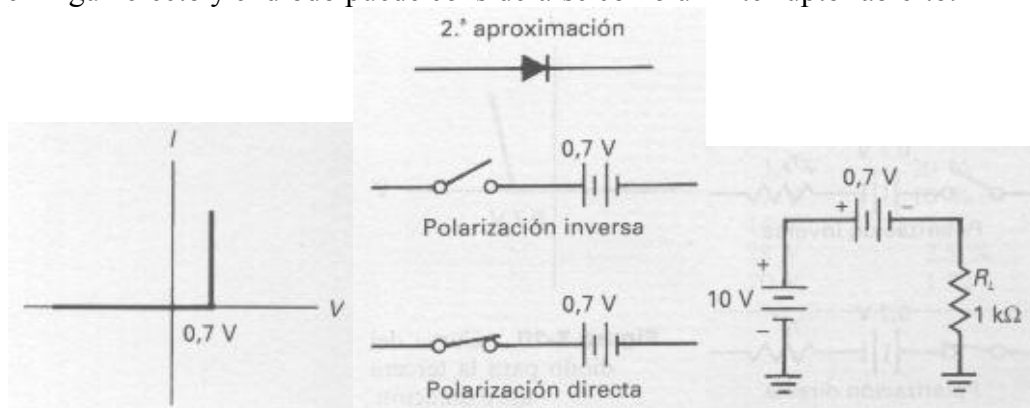


Figura 12.2. Curva, comportamiento y ejemplo de circuito de la segunda aproximación

3.5.3.- La tercera aproximación

En la tercera aproximación de un diodo se incluye la resistencia interna r_B . La figura 13.3 muestra el efecto que r_B tiene sobre la curva del diodo. Después de que el diodo de silicio comienza a conducir, la tensión aumenta lineal o proporcionalmente con los aumentos de la corriente. Cuanto mayor sea la corriente, mayor es la tensión, al tener que incluirse la caída de tensión de r_B a la tensión total del diodo.

El circuito equivalente para la tercera aproximación es un interruptor en serie con una barrera de potencial de 0,7 V y una resistencia r_B . Cuando la tensión aplicada es mayor que 0,7 V, el diodo conduce. La tensión total en el diodo es igual a

$$V_D = 0,7 + I_D r_B$$

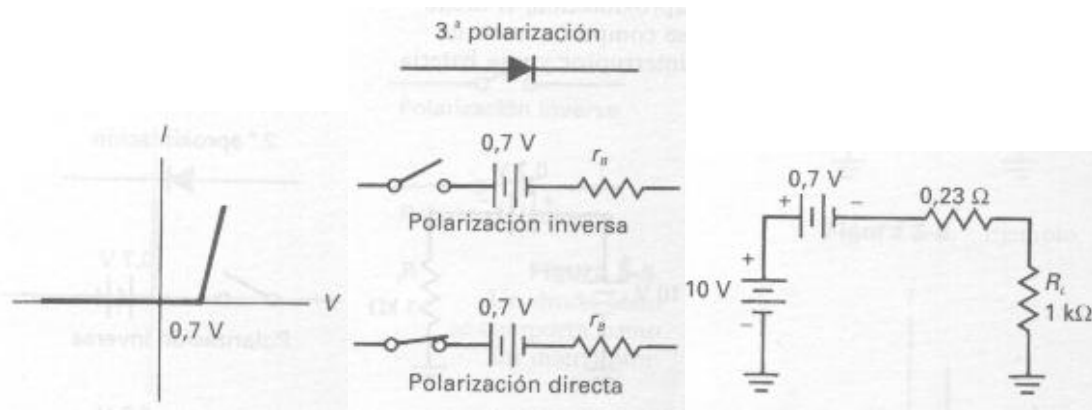


Figura 12.3. Curva, circuito equivalente y ejemplo de para la tercera aproximación

4.- Clases de diodos

Ya hemos visto que un diodo es un dispositivo basado en la unión pn. La unión tiene propiedades, como la rectificación, la conducción en inversa en el voltaje de ruptura y la detección y emisión de luz. Todas estas propiedades se utilizan en la fabricación de diodos, potenciando una u otras características según sea la función del diodo. Distinguimos básicamente cuatro clases de diodos: los diodos de unión, los diodos túnel, los fotodiodos y los diodos emisores de luz.

4.1.- Diodos de unión

Los diodos de unión son los basados en las propiedades ya descritas de la unión pn. En este grupo se incluyen los diodos rectificadores, los diodos de conmutación, los diodos de ruptura (*zener*) y los varactores.

4.1.1.- Rectificadores (*Rectifiers*)

La propiedad más obvia de la unión pn es su carácter unilateral, es decir, la corriente sólo puede ir en una dirección. Recordemos que un diodo ideal es un interruptor, y un buen rectificador debe acercarse a esta característica. La corriente inversa debe ser casi despreciable, y la tensión inversa de ruptura debe ser grande, mientras que la tensión umbral debe ser lo más pequeña posible.

A la hora de diseñar un diodo rectificador, habrá que tener en cuenta la amplitud de la banda prohibida (entre la banda de valencia y la de conducción). La corriente inversa de saturación decrementa cuando se incrementa la banda. También la temperatura afecta menos al semiconductor cuanto mayor es la banda. Como los rectificadores a menudo se someten a altas corrientes directas, la temperatura sube, y por eso, interesa una banda grande, a pesar del inconveniente de la tensión umbral. El silicio se prefiere al germanio por su banda prohibida más amplia, sus bajas corrientes de fuga y su alta tensión de ruptura.

El encapsulado también se tiene en cuenta. Para los diodos rectificadores que se usen en circuitos con bajas corrientes se puede utilizar el cristal o plástico. Sin embargo, para corrientes altas donde se debe disipar mucho calor se requieren encapsulados especiales. Un rectificador típico de silicio para corrientes altas es el que se monta en un disco de tungsteno o molibdeno.

4.1.2.- Diodos de conmutación (*Switching diodes*)

Cuando nos referíamos a los diodos rectificadores, decíamos que era importante minimizar la corriente inversa y la tensión umbral. En muchas aplicaciones, el tiempo

de respuesta es muy importante. Un diodo de unión puede ser usado como interruptor, y el tiempo entre conexión y desconexión debe ser casi cero. Para que el diodo tenga estas propiedades debe tener muy pocas cargas fijas o portadores con un tiempo de vida muy corto, o ambas características.

Para este propósito, la técnica más utilizada para fabricar diodos de conmutación es añadir al semiconductor un metal que sea eficaz para disminuir los portadores. En el caso de los diodos de silicio, se suele dopar con oro.

4.1.3.- Diodo de ruptura (*Breakdown diodes*)

La tensión de ruptura puede variar según el tipo de dopaje realizado. Existen dos técnicas: un fuerte dopado llamado efecto *zener*, o una alta ionización *I* llamado efecto avalancha. Cuando un diodo se diseña para un específico voltaje de ruptura, recibe el nombre de diodo de ruptura. A estos diodos se les suele llamar diodos zener, pero hay que matizar que sólo lo serán cuando el método de fabricación sea el del alto dopado. Actualmente, la mayoría de diodos de ruptura están contruidos basándose en el efecto avalancha. Este error en la terminología se debe a que la tensión de ruptura se representa por U_Z utilizando la abreviatura de zener. Estos diodos se utilizan como reguladores de tensión en circuitos con entradas variables.

4.1.4.- Diodos varactor

Al aumentar la tensión inversa, aumenta la barrera de potencial y, por consiguiente, hay una disminución de la capacidad de la unión pn. Esta característica se aprovecha para modular la frecuencia de los transistores de FM, para generación de armónicos y filtros activos.

4.2.- Diodos túnel

Los diodos túnel están formados básicamente por una unión pn, pero a diferencia del diodo semiconductor básico, las dos partes de germanio tienen un dopado fortísimo.

Cuando se polariza el diodo directamente y se somete a pocos voltios (por debajo de la tensión umbral de un diodo normal), la corriente asciende rápidamente. Llegado un punto máximo, la corriente disminuye a medida que la tensión va aumentando. Luego sigue el comportamiento de un diodo normal.

El trozo de curva comprendido entre la cresta y el descenso de corriente nos interesa porque corresponde a un dispositivo con resistencia negativa (en una corriente negativa, la pendiente será negativa).

La resistencia negativa de un diodo túnel puede ser utilizada en numerosas aplicaciones: para conmutaciones, osciladores y amplificación. Este amplio margen de aplicaciones concuerda con el hecho de que este diodo no presenta retardos y, por eso, se utiliza mucho para conmutadores muy rápidos. Sin embargo, presenta el inconveniente de no soportar altas corrientes, y esto hace que se prefieran otros dispositivos más lentos en multitud de ocasiones.

4.3.- Fotodiodos

Recordemos que podemos estudiar tres comportamientos cuando aplicamos luz a una unión pn: el de la polarización directa, inversa y la generación de corriente continua. El primer comportamiento nos lleva a la construcción de diodos fotoemisores, el segundo a los fotodetectores y, por último, la generación de corriente continua corresponde a las células solares.

4.3.1.- Diodos fotoemisores

(Figura 11). Es una unión pn que tiene la propiedad de emitir la energía en forma de radiaciones luminosas, además de en forma de calor, cuando conduce.

Según el material semiconductor que se utilice, la radiación puede ser visible o invisible. En el primer caso hablamos de diodos LED, en los que la luz puede ser roja, verde o amarilla, y en el segundo de IRED, en los que se emiten infrarrojos.

Sus aplicaciones son numerosas y muy cotidianas: señalizadores individuales, o visualizadores alfanuméricos, para representar símbolos y letras (en las calculadoras antiguas se utilizaban de color verde). Tienen la ventaja de tener una gran visibilidad y el inconveniente de que necesitan corrientes elevadas. Por eso, han sido sustituidos por los fabricados con LCD (indicador de cristal líquido), aunque estos últimos tengan mucha menos visibilidad y sean más sensibles a cualquier colisión.

4.3.2.- Diodos fotodetectores

Cuando el diodo opera en el tercer cuadrante (polarización inversa), la corriente es independiente del voltaje, pero es proporcional a la energía luminosa. Como dispositivo podemos medir mediante la corriente los niveles de iluminación o convertir las variaciones de señales ópticas.

En muchas de las aplicaciones, la velocidad de la respuesta es crítica. Por ejemplo, si el fotodiodo tiene que responder a una serie de impulsos luminosos separados por 1 ns, el tiempo de respuesta del fotodetector tiene que ser mucho menor que 1 ns.

4.3.3.- Células solares

Recordemos que una unión pn puede convertir la energía solar en energía eléctrica. En el diodo de silicio, la tensión umbral es menor de 1 V, la corriente generada dependerá del área iluminada, pero típicamente la corriente generada (en sentido inverso, está en la gráfica en el cuarto cuadrante) es de 10-100 mA para un área de aproximadamente 1 cm².

5.- Transistores bipolares

5.1.- Introducción

En 1948 Bardeen y Brattain anunciaron el descubrimiento de un nuevo componente electrónico, al que dieron el nombre de transistor, contracción de los vocablos transfer y resistor. Al igual que la válvula electrónica, el transistor puede amplificar la energía eléctrica, pero el principio en que se basa es completamente distinto.

El funcionamiento del transistor difiere tanto del de la válvula electrónica que podría decirse que toda semejanza con los elementos de amplificación existentes es puramente casual y no deliberada.

El descubrimiento del transistor al que puede considerarse como un perfeccionamiento del detector de cristal, despertó un enorme interés en los medios técnicos. No sólo los científicos, sino también los industriales de todas las ramas de la electrónica se preguntaban si este descubrimiento iba a suponer una revolución en el diseño de sus productos. Muchos usuarios de válvulas electrónicas esperaban que el transistor, aun sin llegar a sustituirlas por completo, tuviera un gran número de nuevas aplicaciones.

El hecho de que el transistor tuviera un desarrollo muy rápido se debe principalmente a las profundas investigaciones llevadas a cabo en los laboratorios Bell bajo la dirección de Shockley.

5.2.- Comparaciones entre el transistor y la válvula electrónica

Antes de 1951, las válvulas eran el elemento principal empleado para amplificar señales débiles. A pesar de que amplifican muy bien, estas válvulas tienen varias desventajas. Estos inconvenientes fueron superados con la invención del transistor, el cual posee las siguientes ventajas:

- . En general, el transistor es mucho más pequeño que la válvula electrónica. Por tanto, los aparatos provistos de transistores pueden ser mucho más compactos, a condición de que los demás componentes también sea miniatura.
- . No se necesita ninguna energía para la calefacción del cátodo. Además, gracias a sus propiedades eléctricas, los transistores se pueden usar con mayor rendimiento (mayor impedancia de carga) que las válvulas electrónicas. Todo esto hace que el consumo total de energía sea mucho menor, permitiendo equipar con baterías más pequeñas y económicas los aparatos portátiles. Otra ventaja es su pequeño desarrollo de calor, por lo que no presenta ningún problema la disipación térmica en un montaje lo más compacto posible. Sobre todo, en lo que respecta a los grandes aparatos, esto significa un enorme ahorro de espacio y de energía. Las tensiones necesarias son más bajas por lo que se elimina el riesgo de descargas, calambres, etc.
- . Su duración es muy larga. También esto es muy importante, sobre todo en los grandes aparatos, en los que se usaban centenares de válvulas.
- . Se suprime la microfónica. La resistencia a los golpes es también muy grande.
- . Por último, gracias al transistor se han logrado muchos otros inventos, incluyendo el circuito integrado (CI), pequeño dispositivo que contiene miles de resistencias y transistores. Las computadoras modernas y otros milagros de la electrónica son posibles gracias al CI.

Sin embargo, contra estas ventajas descritas, existen una serie de inconvenientes que describimos a continuación:

- . Las propiedades del transistor dependen grandemente de la temperatura. Por ello, han de tomarse medidas especiales para evitar sus efectos en los circuitos.
- . La amplificación de baja frecuencia que puede obtenerse con un transistor es inferior a la de una válvula. La relación entre transistor y válvula viene a ser de 2:1 a 3:2, por lo que para una amplificación determinada, se necesitan más transistores.

5.3.- El transistor sin polarización

Un transistor tiene tres zonas de dopado, como se muestra en la figura 13. La zona inferior es el emisor, la zona central es la base y la zona superior es el colector. Este transistor en particular es un dispositivo npn. También existen transistores pnp.

5.3.1.- Diodos de emisor y de colector

El transistor de la figura 13.1 tiene dos uniones: Una entre el emisor y la base y otra entre la base y el colector. Por tanto, un transistor es similar a dos diodos. El emisor y la base forman uno de los diodos, mientras que el colector y la base forman el otro. De aquí en adelante, nos referiremos a estos diodos como diodo de emisor (inferior) y diodo de colector (superior).

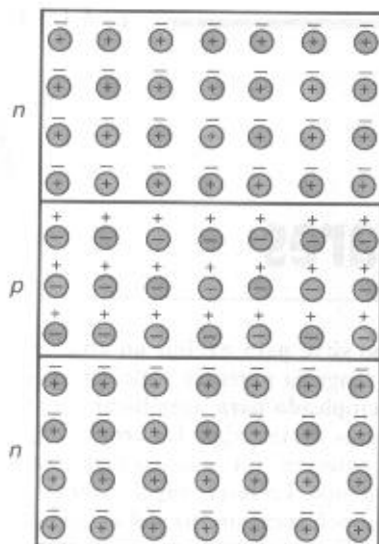


Figura 13.1. Estructura de un transistor

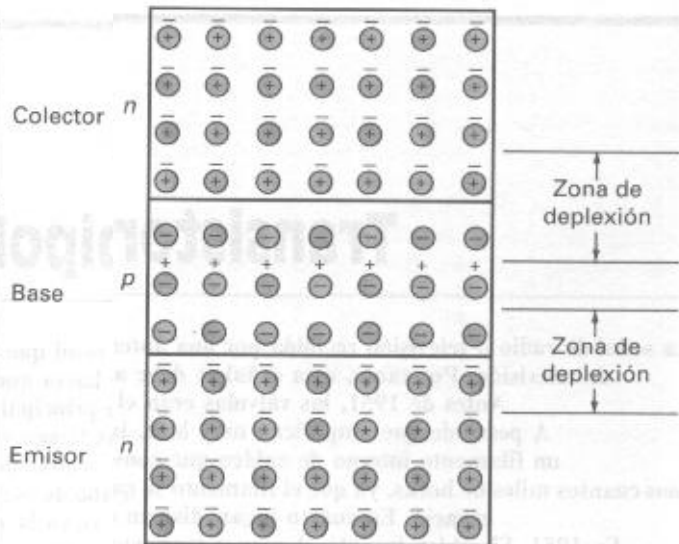


Figura 13.2. Zonas de deplexión

5.3.2.- Antes y después de la difusión

La figura 13.1 muestra las zonas del transistor antes de que ocurra la difusión. Como se vio anteriormente, los electrones libres de la zona n se difunden a través de la unión y se recombinan con los huecos del lado p. Imagínese los electrones libres de cada zona n atravesando la unión y recombinándose con los huecos. El resultado son las dos zonas de deplexión mostradas en la figura 13.2. En cada una de estas zonas de deplexión la barrera de potencial es aproximadamente de 0,7 V a 25 °C. Como en capítulos anteriores, nos centraremos en los dispositivos de silicio, ya que se utilizan mucho más que los dispositivos de germanio.

5.4.- El transistor polarizado

Un transistor sin polarización es similar a dos diodos contrapuestos. Cada diodo tiene una barrera de potencial de 0,7 V, aproximadamente. Si se conectan fuentes de tensión externas para polarizar al transistor, se obtienen resultados nuevos e inesperados.

5.4.1.- Electrones del emisor

En la figura 14 se muestra un transistor polarizado. Los signos menos (-) representan electrones libres. El emisor está fuertemente dopado; su función consiste en emitir o inyectar electrones libres a la base. Esta es muy estrecha y tiene un dopado muy ligero; deja pasar hacia el colector la mayor parte de los electrones inyectados por el emisor. El nivel de dopado del colector es un valor intermedio entre el fuerte dopado del emisor y el ligero dopado de la base. El colector se llama así porque colecta o recoge electrones provenientes de la base.

La fuente de la izquierda en la figura 13.2 polariza directamente el diodo de emisor, mientras que la fuente de la derecha polariza inversamente el diodo de colector.

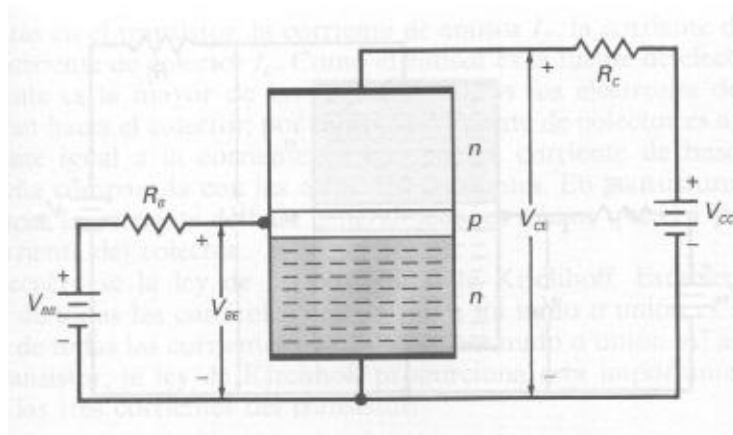


Figura 14. Transistor polarizado

5.4.2.- Electrones de la base

Si V_{BB} es mayor que la barrera de potencial, fluirá una elevada corriente de electrones del emisor hacia la base, como se observa en la figura 15.1. Estos electrones libres pueden circular en cualquiera de las dos direcciones siguientes: por una parte, pueden circular hacia la izquierda saliendo de la base, pasando a través de R_B en su camino hacia el terminal positivo de la fuente. Por otra parte, los electrones libres pueden circular hacia el colector.

La mayoría de los electrones seguirá el camino hacia el colector por dos razones; la primera es el débil dopado de la base. Por esta causa, los electrones libres tienen una larga vida en la zona de la base; por tanto, tienen tiempo suficiente para llegar al colector. (Hay que tener en cuenta que los electrones son minoritarios en la base y, por tanto, atraviesan con mucha facilidad la unión base-colector que está polarizada en inversa.)

En otras palabras, los electrones libres, para fluir desde la base a la resistencia externa, deben primero recombinarse con los huecos de la base. Entonces, ya como electrones de valencia, pueden fluir hacia la izquierda hasta salir de la base y entrar en el conductor externo de conexión. Como la base está ligeramente dopada y es muy estrecha, muy pocos electrones pueden recombinarse y escapar por la conexión externa.

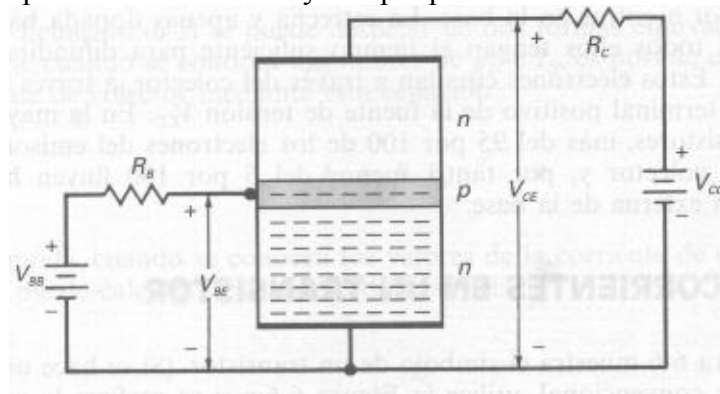


Figura 15.1. Electrones que entran en la base

5.4.3.- Electrones del colector

Casi todos los electrones libres van hacia el colector, como se ven en la figura 15.2. Estando ya en el colector, son atraídos por la fuente de tensión V_{CC} . Como consecuencia de ello, los electrones libres fluyen a través del colector y a través de R_C hasta que alcanzan el terminal positivo de la fuente de tensión del colector.

Resumiendo brevemente lo que sucede, se tiene lo siguiente: En la figura 15.2, V_{BB} polariza directamente el diodo emisor, obligando a los electrones libres del emisor a entrar en la base. La estrecha y apenas dopada base hace que casi todos ellos tengan el tiempo suficiente para difundirse en el colector. Estos electrones circulan a través del colector, a través de R_C y hacia el terminal positivo de la fuente de tensión V_{CC} . En la mayoría de los transistores, más del 95 por 100 de los electrones del emisor fluyen hacia el colector y, por tanto, menos del 5 por 100 fluyen hacia la conexión externa de la base.

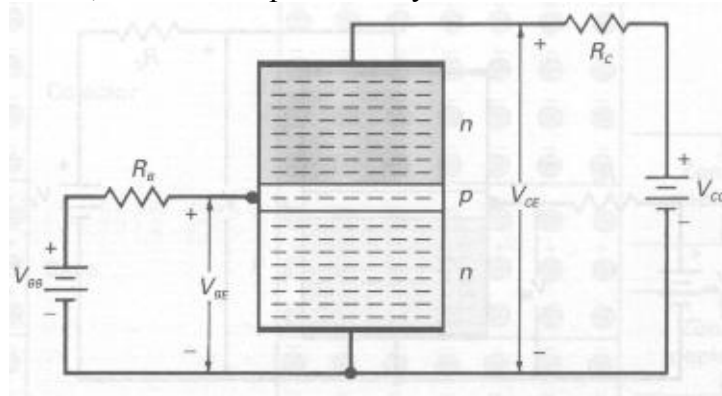


Figura 15.2. Electrones que entran al colector

5.5.- Corrientes en un transistor

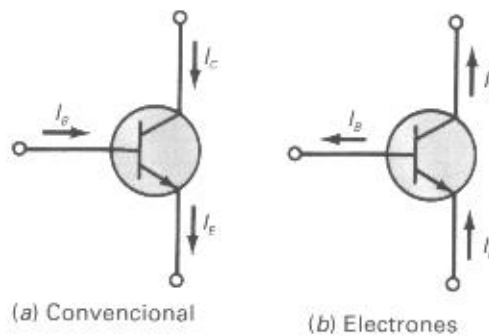


Figura 16. Símbolo de un transistor

La figura 16 muestra el símbolo de un transistor. (Si hacemos uso de la corriente convencional, utilizaremos la figura 16a; si se preferimos la corriente de electrones, usaremos la figura 16b.) En la figura 16 hay tres corrientes distintas en el transistor: la corriente de emisor I_E , la corriente de base I_B y la corriente de colector I_C . Como el emisor es la fuente de electrones, su corriente es la mayor de las tres. Casi todos los electrones del emisor circulan hacia el colector; por tanto, la corriente de colector es aproximadamente igual a la corriente de emisor. La corriente de base es muy pequeña comparada con las otras dos corrientes. En transistores de baja potencia, la corriente de base generalmente es menor que el 1 por 100 de la corriente del colector.

Recuérdese la ley de las corrientes de Kirchhoff. Establece que la suma de todas las corrientes que entran a un nudo o unión es igual a la suma de todas las corrientes que salen de ese nudo o unión. Al aplicarse a un transistor, la ley de Kirchhoff proporciona esta importante relación entre las tres corrientes del transistor.

$$I_E = I_C + I_B$$

Esta ecuación indica que la corriente de emisor es la suma de la corriente de colector y la corriente de base. Teniendo en cuenta que la corriente de base es mucho menor que la

corriente de colector, es habitual hacer la siguiente aproximación: la corriente de colector es igual a la corriente de emisor.

Una de las cosas que hacen que el transistor sea útil es que la corriente de colector es mucho mayor que la corriente de base. La ganancia de corriente β_{cc} de un transistor se define como la corriente de colector dividida entre la corriente de base. Esta relación se expresa:

$$\beta_{cc} = \frac{I_C}{I_B}$$

Para transistores de baja potencia, la ganancia de corriente generalmente oscila entre 100 y 300. Incluso algunos transistores de alta potencia tienen ganancias de corriente entre 20 y 100. Este dato significa que el 95 por 100 o más de los electrones del emisor pasan hacia el colector, mientras que menos del 5 por 100 escapan a través de la conexión de la base.

La ecuación anterior se puede despejar de dos formas equivalentes. La primera, cuando se conocen los valores de β_{cc} e I_B , es posible calcular la corriente de colector mediante esta ecuación:

$$I_C = \beta_{cc} I_B$$

La segunda, cuando se conocen los valores de la corriente de colector y β_{cc} , se puede calcular la corriente de base así:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{cc}}$$

Existe otro parámetro utilizado y que expresa la relación entre la corriente de colector y la corriente de emisor. Su valor es muy cercano a la unidad y se representa mediante la letra α . Al igual que la ganancia de corriente, este parámetro también es adimensional (aquel que no se expresa en ninguna unidad).

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

De las ecuaciones vistas anteriormente se deducen las dos siguientes ecuaciones que nos dan la relación entre los parámetros α y β :

$$\alpha = \frac{\beta}{(\beta + 1)}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$$

5.6.- La conexión en EC

En la figura 17, el lado común o masa de cada fuente de tensión está conectado al emisor. Debido a esto, el circuito se conoce como configuración en emisor común (en EC). Se puede observar que el circuito tiene dos mallas. La malla de la izquierda es el circuito de base y la malla de la derecha es el circuito de colector. Por lo general, V_{BB} está comprendido entre 5 y 15 V en la mayor parte de las aplicaciones de baja potencia. Usando diferentes valores de V_{BB} y/o R_B , se puede controlar la corriente de

base. Dicha corriente controla a su vez la corriente de colector. Así, cualquier cambio en la corriente de base produce un cambio en la corriente de colector.

En el circuito de colector hay una fuente de tensión de valor V_{CC} y una resistencia limitadora de corriente R_C . La tensión entre el colector y el emisor se simboliza con V_{CE} . La fuente de tensión V_{CC} debe polarizar inversamente el diodo de colector, o de lo contrario el transistor no funcionaría adecuadamente. Esta condición, por lo general, se satisface si V_{CE} es mayor que 1 V. Un intervalo típico de V_{CE} es mayor que 1 V en circuitos de baja potencia.

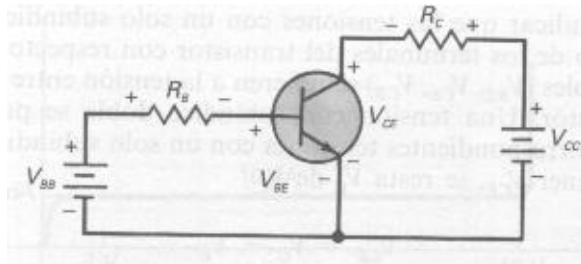


Figura 17. Conexión en EC

5.7.- Curva característica de entrada

La curva de I_B en función de V_{BE} es como la curva de un diodo rectificador normal, como se puede ver en la figura 18. Esto se debe a que estamos hablando acerca de la corriente de base y la tensión del diodo de emisor, por lo que sería de esperar el ver una curva similar a la característica de corriente en función de la tensión de un diodo. Lo que esto significa es que podemos usar cualquiera de las tres aproximaciones de un diodo analizadas con anterioridad.

La mayor parte de las veces, ya sea que se están detectando fallos o se esté diseñando, la segunda aproximación resultará ser el mejor compromiso entre la rapidez que da la aproximación ideal y la precisión de la tercera aproximación. Lo único que se necesita recordar para la segunda aproximación es que V_{BE} es 0,7 V como se ve en la figura comentada.

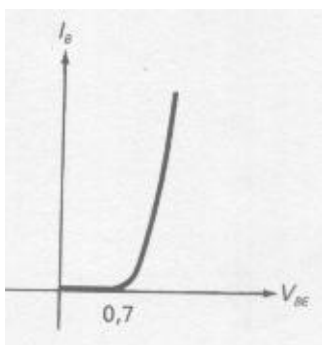


Figura 18. Curva característica de entrada

A continuación se indicará cómo calcular la corriente de base para la figura 17. La tensión en la resistencia de base es igual a la diferencia entre la tensión de la fuente V_{BB} y la tensión base-emisor V_{BE} .

Aplicando la ley de Ohm a la resistencia de base para hallar la corriente de base:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

Hay que indicar que las tensiones con un solo subíndice (V_C , V_B , V_E) son las de uno de los terminales del transistor con respecto a la masa. Los subíndices dobles (V_{BE} , V_{CE} ,

V_{CB}) se refieren a la tensión entre dos terminales del transistor. Una tensión con subíndice doble se puede calcular restando las correspondientes tensiones con un solo subíndice. Por ejemplo, para obtener V_{CE} , se resta V_E de V_C :

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Para obtener V_{CB} , se resta V_B de V_C :

$$V_{CB} = V_C - V_B$$

Para obtener V_{BE} , se resta V_E de V_B :

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

5.8.- Curva característica de salida

En la figura 17 se puede variar V_{BB} y V_{CC} para establecer diferentes tensiones y corrientes en el transistor. Midiendo I_C y V_{CE} se obtienen los datos para una curva de I_C en función de V_{CE} . Por ejemplo, se puede suponer que se fija I_B en $10 \mu A$. Entonces se puede variar V_{CC} y medir los valores resultantes de I_C y V_{CE} . Trazando los datos, se obtiene la curva que se muestra en la figura siguiente (Figura 19).

Cuando V_{CE} es cero, el diodo de colector no tiene polarización inversa y la corriente de colector vale cero. Para V_{CE} entre cero y aproximadamente 1 V, la corriente de colector se eleva rápidamente y luego se mantiene casi constante. Esto concuerda con la idea de la polarización inversa del diodo de colector. Se requieren cerca de 0,7 V para polarizar inversamente el diodo de colector. Una vez alcanzado este nivel, el colector recoge todos los electrones que lleguen a su zona de deplexión.

Para tensiones mayores de 0,7 V, el valor exacto de V_{CE} no es muy importante, ya que incluso un valor pequeño de polarización inversa es suficiente para reunir todos los electrones disponibles de la base. Esta es la razón por la que la curva se hace horizontal cuando V_{CE} es mayor que aproximadamente 1 V. La horizontalidad de la curva indica que la corriente de colector es constante y aproximadamente igual a 1mA para cualquier tensión de colector-emisor entre 1 y 40 V. (La curva representada es similar a la del transistor 2N3904, un transistor de baja potencia muy utilizado.)

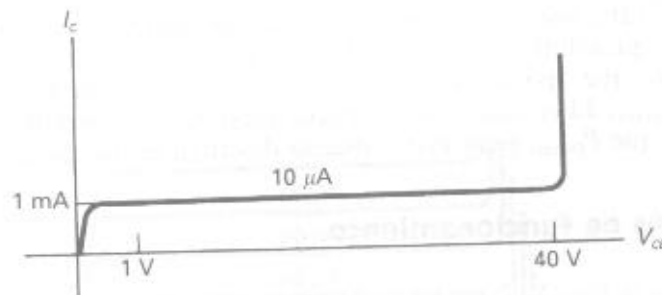


Figura 19. Curva de salida

5.8.1.- Tensión de colector y potencia

La ley de Kirchhoff señala que la suma de todas las tensiones a lo largo de una malla o trayectoria cerrada es igual a cero. Si se aplica al circuito de colector de la figura 17, la ley de las tensiones de Kirchhoff nos da esta importante ecuación:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Esta ecuación indica que la tensión colector-emisor es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector (V_{CC}) menos la tensión que hay en la resistencia de colector. Esta ecuación es esencial para la detección de averías y para el diseño.

En la figura 17, el transistor presenta una disipación de potencia aproximada de

$$P_D = V_{CE} I_C$$

Esta ecuación dice que la potencia disipada por el transistor es igual a la tensión colector-emisor multiplicada por la corriente de colector. Es esta la potencia, la que hace que aumente la temperatura de la unión del diodo de colector. Cuanto mayor sea la potencia, mayor será la temperatura de la unión. El transistor se quemará si la temperatura de la unión llega a valores comprendidos entre 150 y 200 °C. Una de las informaciones más importantes que aparece en las hojas de características es la potencia máxima $P_{D(máx)}$. El consumo de potencia dado por la ecuación anterior debe ser menor que $P_{D(máx)}$ para evitar que se destruya el transistor.

5.8.2.- Tres zonas de funcionamiento

La curva de la figura 14.2 exhibe tres zonas o regiones, en cada una de las cuales el funcionamiento del transistor es diferente

. Primero tenemos la zona central, en la que el valor de V_{CE} puede estar entre 1 y 40 V, aproximadamente. Esta es la zona más importante, ya que representa el funcionamiento normal del transistor. En ella el diodo de emisor está polarizado en directa y el diodo de colector tiene polarización inversa. Además el colector, se encuentra recogiendo casi todos los electrones que el emisor ha enviado a la base.

Por ello, los cambios en la tensión de colector no tienen efecto sobre la corriente de colector. A esta zona se le da el nombre de zona activa o de amplificación, donde el transistor es gobernado por una pequeña corriente de I_B , que puede controlar corrientes mucho mayores en colector y emisor. Gráficamente, la zona activa es la parte horizontal de la curva.

. Otra de las zonas de funcionamiento es la zona de ruptura. El transistor nunca debe funcionar en ella, ya que en tal caso sería altamente probable su destrucción o bien su degradación. A diferencia del diodo Zener, que está adaptado para la zona de ruptura, un transistor no está diseñado para funcionar en dicha zona.

. Finalmente, tenemos la parte ascendente de la curva, donde V_{CE} está comprendida entre cero y aproximadamente 1 V. Esta parte inclinada de la curva se llama zona de saturación. En esta zona, el diodo de colector no está polarizado inversamente.

En resumen, la curva de la figura 19 tiene una zona de saturación, una zona activa y una zona de ruptura. Un transistor puede funcionar sin peligro en la zona de saturación o en la zona activa, pero no en la de ruptura. En aplicaciones en las que el transistor amplifique señales débiles de radio y televisión, siempre estará funcionando en la zona activa.

5.8.3.- Más curvas

Si se miden I_C y V_{CE} para $I_B = 20 \mu A$, se puede trazar la segunda curva de la figura 20. Esta curva es similar a la primera, excepto que la corriente de colector es de 2mA en la zona activa. De nuevo, la corriente de colector es prácticamente constante en la zona activa.

Cuando se trazan varias curvas sobre los mismos ejes, se obtiene una familia de curvas de colector como las de la figura que se muestra a continuación (Figura 20). Otra forma de obtener esta familia de curvas es utilizar un trazador de curvas (instrumento de prueba con una pantalla de vídeo). En la zona activa de la figura comentada, cada

corriente de colector es 100 veces mayor que la corriente de base que le corresponde. Por ejemplo, la curva superior tiene una corriente de colector de 7 mA y una corriente de base de 70 μ A, lo que representa una ganancia de corriente igual a

$$\beta_{cc} = \frac{7 \text{ mA}}{70 \mu\text{A}}$$

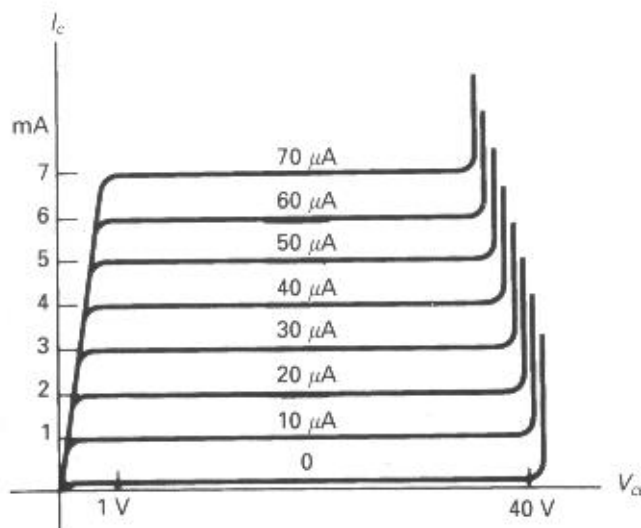


Figura 20. Familia de curvas de salida

5.8.4.- Zona de corte

La figura 20 tiene una curva no esperada que se halla en la parte inferior. Se puede observar que la corriente de base es cero, aunque todavía hay cierta corriente de colector. En un trazador de curvas, esta corriente, por lo general, es tan pequeña que no se ve. La curva inferior se ha exagerado dibujándola mayor de lo que es en realidad. Esta curva recibe el nombre de zona de corte del transistor, y la pequeña corriente de colector es la corriente de corte de colector.

Esta corriente existe porque el diodo colector, como cualquier otro diodo, tiene una corriente inversa de portadores minoritarios y una corriente de fugas superficial. La corriente de corte de colector se puede ignorar si la corriente de colector es mucho mayor. Por ejemplo, un 2N3904 tiene una corriente de corte de colector de 50 nA. Estos 50 nA se pueden ignorar si la corriente que circula normalmente por el colector es por lo menos 20 veces mayor que 5 nA, es decir, 1 μ A. Esto garantiza un error de cálculo menor del 5 por 100.

5.9.- Aproximaciones para el transistor

Como ya vimos en los diodos, en la mayor parte del trabajo en electrónica, las respuestas exactas son solamente una pérdida de tiempo. Casi todos usan aproximaciones, ya que las respuestas así obtenidas son adecuadas en la mayoría de las aplicaciones. No explicaremos las características de cada aproximación pero si cabe destacar que el transistor ideal es útil en la detección de fallos, la tercera aproximación en el diseño con precisión y la segunda aproximación es un término medio entre la detección de fallos y el diseño.

5.10.- Conexión en base común

Polaricemos directamente el diodo de emisor e inversamente el diodo de colector y veamos lo que sucede. En la figura 21a es de esperar una gran corriente de emisor porque el diodo de emisor tiene polarización directa. Pero no es de esperar una gran corriente de colector al tener el diodo de colector polarización inversa. No obstante, la corriente de colector es casi tan grande como la de emisor.

A continuación explicaremos por qué se obtiene una gran corriente de colector en la figura 21. En el instante en que se aplique la polarización directa al diodo de emisor, los electrones del emisor aún no habrán entrado en la zona de la base (figura 21b). Si V_{BE} es mayor que la tensión umbral del diodo base-emisor (de 0,6 a 0,7 V para transistores de silicio), muchos electrones del emisor entrarán en la zona de base, como se ve en la figura 21c. Estos electrones en la base pueden circular en una de las dos direcciones: descendiendo por la base estrecha hacia la conexión externa de la base o bien a través de la unión de colector hacia la zona de colector. El componente descendiente de la corriente de base recibe el nombre de corriente de recombinación. Es pequeño porque la base está ligeramente dopada sólo con algunos huecos.

Una segunda idea crucial acerca del funcionamiento del transistor es que la base es muy estrecha. En la figura 15c, la base está cargada de electrones inyectados en la banda de conducción, originando una difusión hacia la zona de depleción del colector (figura 21d). Estos electrones del colector pueden fluir hacia la conexión externa del colector, como se muestra en la figura.

Resumiendo, en la figura 21d observamos una corriente de electrones abandonando el terminal negativo de la fuente y entrando en la zona de emisor. Estos electrones se ven obligados a entrar en la base, que al ser estrecha y apenas dopada, los deja a casi todos el tiempo de vida suficiente para difundirse hacia la zona del colector.

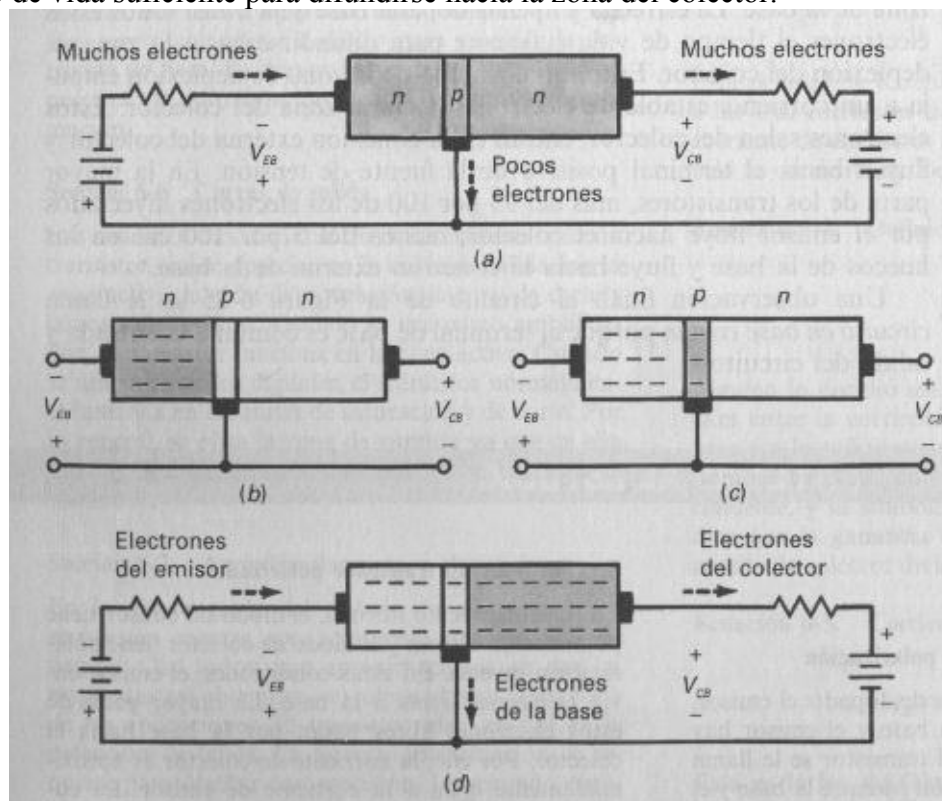


Figura 21. Conexión en base común

6.- Fundamentos de los transistores

En este apartado trataremos las fluctuaciones de la ganancia de corriente a causa de los cambios en la corriente de colector, cambios de temperatura o la sustitución del transistor con que se esté trabajando. Además de tratar la naturaleza del problema estudiaremos las posibles soluciones a esta cuestión.

6.1.- Variaciones de la ganancia de corriente

A consecuencia de las tolerancias de fabricación, la ganancia de corriente de un transistor puede tener un intervalo de variación hasta de 3 a 1 cuando se cambia de un transistor a otro del mismo tipo. Por ejemplo, la hoja de características de un 2N3904 indica una h_{FE} mínima de 100 y una h_{FE} máxima de 300 cuando la corriente de colector es de 10 mA. Si se producen en serie miles de circuitos que usen el transistor 2N3904, se verá que algunos de los transistores tienen una ganancia de corriente de apenas 100, mientras que en otros la ganancia de corriente llega a ser hasta de 300.

Hay otros dos factores que también afectan a la ganancia de corriente de un transistor. La Figura 16 muestra la gráfica de la ganancia de corriente mínima para un 2N3904. Se puede observar que el valor de la ganancia de corriente depende del valor de la corriente de colector y de la temperatura de la unión. Como puede apreciarse, las fluctuaciones en la ganancia de corriente son muy grandes.

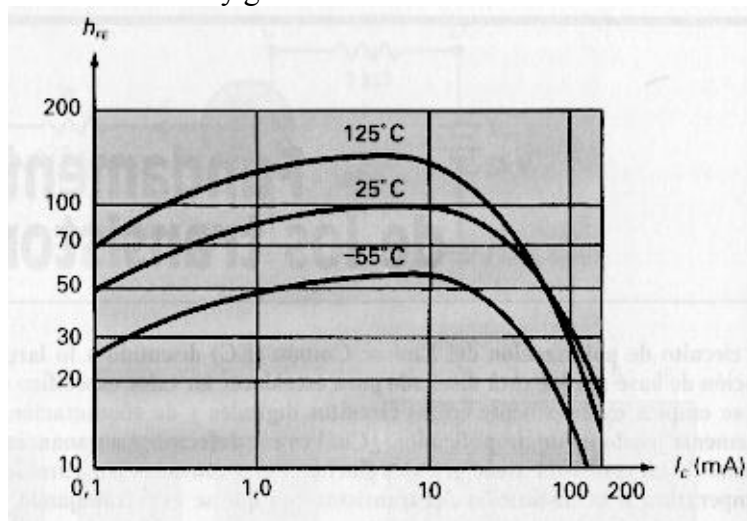


Figura 22. Ganancia de corriente

6.2.- La recta de carga

La recta de carga en continua es una recta trazada sobre las curvas de salida del transistor para mostrar todos y cada uno de los puntos de trabajo posibles del transistor. La figura 23, por ejemplo, ofrece un circuito con polarización de base, con un valor de tensión de la fuente de polarización de colector de 15 V y una resistencia de colector de 3 k Ω . A la derecha del circuito hay una gráfica de las curvas de salida. La recta de carga es la recta dibujada entre 5 mA sobre el eje vertical y 15 V sobre el eje horizontal.

La recta de carga es útil porque contiene todos los puntos de trabajo posibles para el circuito. Dicho de otra forma, cuando la resistencia de base cambia de cero a infinito, la corriente de colector y la tensión colector-emisor también cambian. Si se dibuja cada par de valores I_C y V_{CE} , lo que se obtiene es una serie de puntos de trabajo localizados sobre la recta de carga. Por tanto, la recta de carga es un resumen visual de los posibles puntos de trabajo.

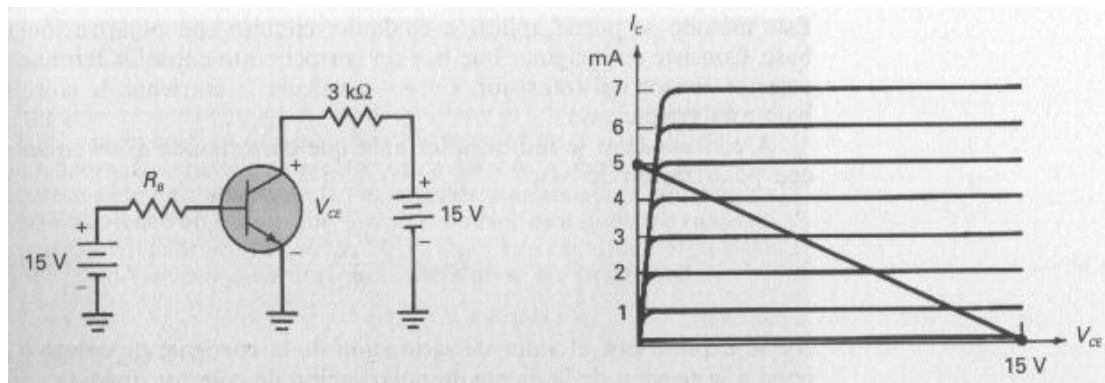


Figura 23. Recta de carga

6.2.1.- El punto de saturación

El punto de saturación es el punto en que la recta de carga corta a la zona de saturación de las curvas de salida. Como la tensión colector-emisor en saturación es muy pequeña, el punto de saturación es casi idéntico al extremo superior de la recta de carga. En lo sucesivo, tomaremos el punto de saturación como aproximadamente igual al extremo superior de la recta de carga, pero recordando siempre que esa aproximación implica un pequeño error.

El punto de saturación indica la máxima corriente de colector que es posible alcanzar en el circuito. En este ejemplo, la máxima corriente de colector posible en la figura 23 es aproximadamente de 5 mA. Si se cambia el valor de tensión de la fuente de polarización de colector o bien la resistencia de colector, se obtiene un punto de saturación diferente. Hay una forma fácil de hallar la corriente en el punto de saturación. Podemos imaginar un cortocircuito entre el colector y el emisor en la Figura 23, entonces V_{CE} valdrá cero. Los 15 V de la fuente de colector aparecerán en la resistencia de 3 kΩ; por tanto, la corriente en la resistencia de colector es

$$I_C = \frac{15 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

Este método se puede aplicar a cualquier circuito con polarización de base. Consiste en imaginar que hay un cortocircuito entre los terminales colector-emisor del transistor. Luego se calcula la corriente de colector bajo esas condiciones.

A continuación se indica la fórmula que corresponde a los circuitos con polarización de base:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Así se expresa que el valor de saturación de la corriente de colector es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector dividida entre la resistencia de colector. Recuerde que esta fórmula solo se aplica al circuito con polarización de base mostrado en la figura comentada anteriormente (Figura 23).

6.2.3.- El punto de corte

El punto de corte es el punto en el que la recta de carga corta a la zona de corte de las curvas de salida. Como la corriente de colector en corte es muy pequeña, el punto de

corte es casi idéntico al extremo inferior de la recta de carga. En lo sucesivo, supondremos que el punto de corte es aproximadamente igual al extremo inferior de la recta de carga.

El punto de corte indica la máxima tensión colector-emisor que es posible alcanzar en el circuito. En la Figura 23, la máxima tensión posible colector-emisor es aproximadamente 15 V, que es el valor de la fuente de tensión del colector. Si en esta figura se cambia la fuente de tensión de polarización de colector, se obtiene un punto de corte diferente.

Hay un proceso simple para hallar la tensión de corte. En el transistor de la figura 23 visualicemos un circuito abierto interno entre el colector y el emisor. Como no circula corriente en la resistencia de colector para esta situación de circuito abierto, los 15 V de la fuente de polarización de colector aparecerán en el terminal del colector. Así, la tensión entre el colector y masa será igual a 15 V. Como el emisor está puesto a masa, la tensión colector-emisor tiene el mismo valor que la tensión colector a masa:

$$V_{CE} = 15 \text{ V}$$

La fórmula para la tensión de corte en la figura descrita es

$$V_{CE(\text{corte})} = V_{CC}$$

6.3.- El punto de trabajo

Cada circuito con transistores tiene su propia recta de carga. Dado un circuito, se pueden calcular la corriente de saturación y la tensión de corte. Estos valores se dibujan en los ejes vertical y horizontal. Luego se traza una recta a través de estos dos puntos para obtener la recta de carga.

6.3.1.- Determinación del punto Q

La Figura 24 muestra un circuito con polarización de base cuya resistencia de base es de 500 kΩ. La corriente de saturación y la tensión de corte se obtienen mediante el proceso indicado anteriormente. En primer lugar, podemos imaginar un cortocircuito entre los terminales colector-emisor. Entonces toda la tensión de la fuente de polarización de colector aparece en la resistencia de colector, lo cual da una corriente de saturación de 5 mA. En segundo lugar, imaginemos que los terminales colector-emisor están abiertos. En ese caso no hay corriente, y toda la tensión de fuente aparece en los terminales colector-emisor, lo que da una tensión de corte de 15 V. Si se halla la corriente de saturación y la tensión de corte, se puede dibujar la recta de carga que se ve en la Figura 24.

Para simplificar las cosas, supongamos por el momento que el transistor es ideal. Tal suposición implica que toda la tensión de la fuente de la base aparecerá entre los extremos de la resistencia de base. Por tanto, la corriente de base es

$$I_B = \frac{15 \text{ V}}{500 \text{ k}\Omega} = 30 \text{ }\mu\text{A}$$

No podemos continuar si no disponemos de un valor para la ganancia de corriente. Supondremos que la ganancia de corriente de este transistor es de 100. Entonces la corriente de colector vale

$$I_C = 100(30 \text{ }\mu\text{A}) = 3 \text{ mA}$$

Esta corriente, al circular por los 3 kΩ, produce una tensión de 9 V en la resistencia de colector. Cuando esta cifra se resta del valor de la fuente de tensión de colector, se obtiene la tensión colector-emisor del transistor. Los cálculos son estos:

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ V}$$

Llevando a la gráfica las coordenadas 3 mA y 6 V (la corriente y la tensión de colector), se obtiene el punto de trabajo mostrado en la recta de carga de la figura 24. El punto de trabajo se indica mediante una Q.

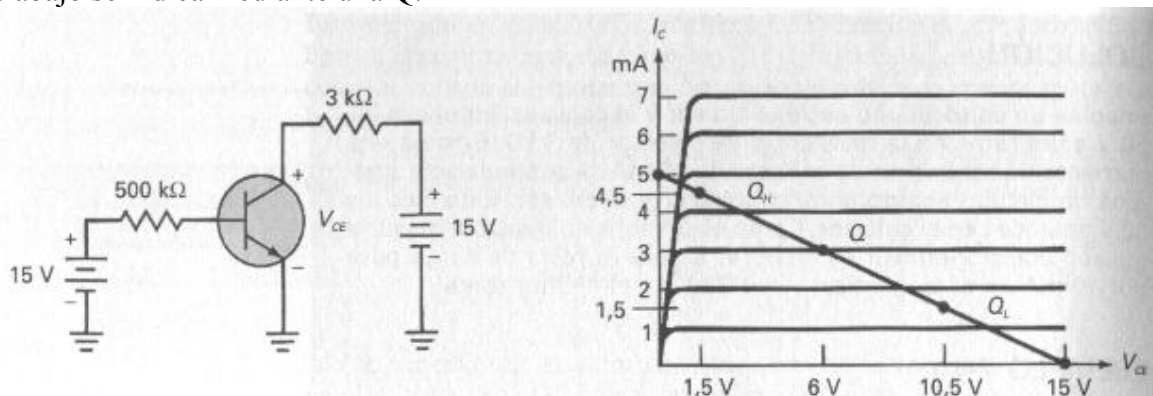


Figura 24. Obtención del punto Q

6.3.2.- La fluctuación del punto Q

Se supuso una ganancia de corriente igual a 100. Si esta ganancia fuera de 50 o 150, por poner un ejemplo, la corriente de base no cambia porque en este circuito la ganancia de corriente no tiene efecto sobre la corriente de base. En teoría, la corriente de base es de 30 μ A. Si la ganancia de corriente es de 50 entonces.

$$I_C = 50(30 \mu A) = 1,5 \text{ mA}$$

y la tensión colector-emisor es

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (1,5 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 10,5 \text{ V}$$

Trazando los valores se obtiene el punto Q_L que se ve en la figura 24.

Si la ganancia de corriente es de 150, el proceso es idéntico

$$I_C = 150(30 \mu A) = 4,5 \text{ mA}$$

y la tensión colector-emisor es

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (4,5 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 1,5 \text{ V}$$

Trazando estos valores se obtiene el punto Q_H que se ve en la figura utilizada.

Resumiendo, las fórmulas utilizadas para calcular el punto q son las siguientes:

$$I_{BB} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta_{cc} I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

6.4.- Reconocimiento de la saturación

Cuando se mira por vez primera un circuito con transistores, no es posible decir si están saturados o funcionando en la zona activa. En esta sección se exponen dos métodos para reconocer la saturación.

6.4.1.- Reducción al absurdo

He aquí un método para analizar un circuito nuevo. Consiste en suponer que el transistor funciona en la zona activa, y, a continuación, se investiga si esta suposición lleva a una contradicción. Quienes detectan averías, los diseñadores, emplean esta poderosa técnica,

conocida como reducción al absurdo, porque indica con rapidez la zona de funcionamiento. El proceso es el que sigue:

1. Suponemos que la zona es la activa.
2. Efectuamos los cálculos.
3. Si surge una respuesta absurda, la suposición será falsa.

Por ejemplo, la Figura 25 muestra un circuito con polarización de base. Suponemos que se desea conocer la tensión colector-emisor. Entonces se procede así: idealmente, la corriente de base es de 0,1 mA. La ganancia de corriente de 50 se aplica sólo a la zona activa. Suponiendo que el transistor funciona en la zona activa, la corriente de colector debe ser

$$I_C = 50(0,1 \text{ mA}) = 5 \text{ mA}$$

y la tensión colector-emisor debe ser

$$V_{CE} = 20 \text{ V} - (5 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega) = -30 \text{ V}$$

Esta respuesta es imposible. La tensión colector-emisor no puede ser negativa si el transistor está funcionando en la zona activa. Este resultado absurdo se obtuvo porque se supuso que la zona era la activa. En realidad el transistor está en saturación.

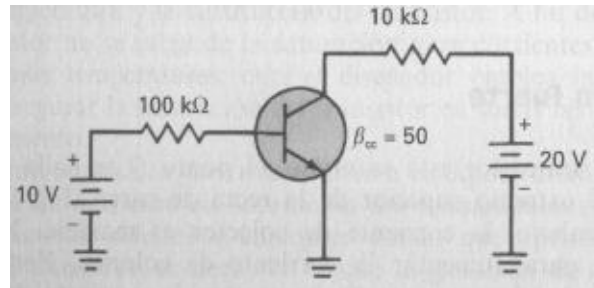


Figura 25. Cómo conocer la saturación

6.4.2.- Otro método

Se comienza calculando la corriente de saturación de colector en la Figura 25:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

Éste es el máximo valor posible porque ocurre en el extremo superior de la recta de carga.

En teoría, la corriente de base debe ser de 0,1 mA, que ha sido calculada anteriormente. Suponiendo que la ganancia de corriente es de 50, como se ve, la corriente de colector es

$$I_C = 50(0,1 \text{ mA}) = 5 \text{ mA}$$

Pero ésta es mayor que el valor de saturación de 2 mA. Por tanto, el transistor debe estar saturado.

6.5.- El transistor en conmutación

La polarización de base es útil en los circuitos digitales, ya que, por lo general, estos circuitos se diseñan para funcionar en saturación y en corte. Por ello, tienen una tensión de salida baja o alta. Dicho con otras palabras, no se emplea ningún punto Q entre saturación y corte. Debido a este motivo, las variaciones en el punto Q no importan, ya que el transistor se mantiene en saturación o en corte al cambiar la ganancia de corriente.

A continuación, comprobaremos esto con un ejemplo de cómo se usa un circuito con polarización de base para conmutar (cambiar) entre saturación y corte. La figura 26

muestra un ejemplo de un transistor en saturación fuerte. En consecuencia, la tensión de salida es aproximadamente de 0 V. Esto implica que el punto Q se halla en el extremo superior de la recta de carga.

Cuando el conmutador se abre, la corriente de base se hace cero, por lo que la corriente de colector también se hace cero. Al no haber corriente en la resistencia de 1 k Ω , toda la tensión de la fuente de colector aparece entre los terminales colector-emisor. Por tanto, la tensión de salida se eleva a 10 V.

El circuito sólo puede tener dos tensiones de salida: 0 V o + 10 V. Así es como se puede reconocer un circuito digital. Sólo tiene dos niveles de salida: bajo o alto. Los valores exactos de las dos tensiones de salida no son importantes. Lo que importa es que las tensiones se puedan diferenciar en su nivel, bajo o alto.

A los circuitos digitales a menudo se les llama circuitos de conmutación porque su punto Q conmuta o cambia entre dos puntos de la recta de carga. En la mayor parte de los diseños esos dos puntos son el de saturación y el de corte. Otro nombre que también se acostumbra a darles es el de circuitos de dos estados, refiriéndose a las salidas a nivel alto y bajo.

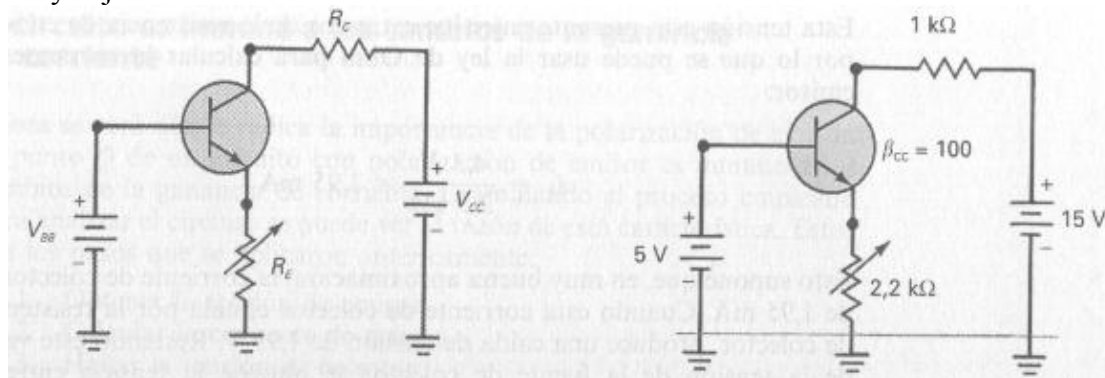


Figura 26. Polarización de emisor y ejemplo

6.6.- Polarización de emisor

Los circuitos digitales son el tipo de circuitos que se emplean en las computadoras. En esta aplicación, la polarización de base y los circuitos derivados de ella son inútiles. Pero cuando se trata de amplificadores, se necesitan circuitos cuyos puntos Q sean inmunes a los cambios en la ganancia de corriente.

La Figura 26 muestra la polarización de emisor. Como se puede ver, la resistencia se ha cambiado del circuito de base al circuito emisor. Ese único cambio provoca una enorme diferencia. El punto Q para este nuevo circuito es ahora inamovible. Cuando la ganancia de corriente cambia de 50 a 150, el punto Q casi no se desplaza sobre la recta de carga.

6.6.1.- Idea básica

La fuente de polarización de la base se aplica ahora directamente a la base. Por tanto, hallaremos V_{BB} entre la base y la masa. El emisor ya no está puesto a tierra. Ahora la tensión de emisor es mayor que la de masa y esta dada por

$$V_E = V_{BB} - V_{BE}$$

6.6.2.- Cómo hallar el punto Q

Analicemos el circuito con polarización de emisor de la Figura 26. La fuente de polarización de base es sólo de 5 V. La tensión entre la base y masa es de 5 V. De ahora en adelante, nos referiremos a esta tensión base-masa simplemente como la tensión de la

base; o sea, V_B . La tensión entre los terminales base-emisor es de 0,7 V. A esta tensión la llamaremos tensión base-emisor, o V_{BE} .

La tensión entre el emisor y masa será llamada tensión de emisor. Es igual a

$$V_E = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

Esta tensión está presente entre los extremos de la resistencia de emisor, por lo que se puede usar la ley de Ohm para calcular la corriente de emisor:

$$I_E = \frac{4,3 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega}$$

Esto supone que, en muy buena aproximación, la corriente de colector es de 1,95 mA. Cuando esta corriente de colector circula por la resistencia de colector, produce una caída de tensión de 1,95 V. Restando este valor de la tensión de la fuente de colector se obtiene la tensión entre el colector y masa:

$$V_C = 15 \text{ V} - (1,95 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 13,1 \text{ V}$$

A partir de aquí, nos referiremos a esta tensión de colector a masa simplemente como tensión de colector.

Esta es la tensión que un detector de averías mediría al probar un circuito transistorizado. Se puede observar que uno de los terminales del voltímetro se conectaría al colector, mientras que el otro terminal se conectaría a masa. Si se desea la tensión colector-emisor, hay que restar la tensión de emisor a la tensión de colector, como sigue:

$$V_{CE} = 13,1 \text{ V} - 4,3 \text{ V} = 8,8 \text{ V}$$

Así, el circuito con polarización de emisor de la Figura 26 tiene un punto Q con estas coordenadas:

$$I_C = 1,95 \text{ mA} \text{ y } V_{CE} = 8,8 \text{ V}.$$

La tensión colector-emisor es la tensión empleada para dibujar las rectas de carga y para leer las hojas de características del transistor. Como fórmula:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Normalmente un detector de averías no mide la tensión colector-emisor directamente, ya que la conexión común en muchos voltímetros está puesta a masa internamente. Esto es un problema porque al conectar el terminal positivo del voltímetro al colector y el terminal común al emisor pondrá al emisor en cortocircuito con la masa, de lo que resultará una lectura incorrecta.

Por tanto, la forma usual en la que un detector de averías determina la tensión colector-emisor se desarrolla mediante un proceso de tres pasos:

1. Medir la tensión de colector a masa, V_C .
2. Medir la tensión de emisor a masa, V_E .
3. Restar V_E , de V_C para obtener V_{CE} .

Ahora se verá donde radica la importancia de la polarización de emisor. El punto Q de un circuito con polarización de emisor es inmune a los cambios de la ganancia de corriente. Examinando el proceso empleado para analizar el circuito se puede ver la razón de esta característica. Estos son los pasos que se aplicaron anteriormente:

1. Obtener la tensión de emisor.
2. Calcular la corriente de emisor.
3. Hallar la tensión de colector.
4. Restar la tensión de emisor de la tensión de colector para obtener V_{CE} .

En ningún momento hubo necesidad de utilizar la ganancia de corriente en el proceso anterior. Como ésta no se emplea para calcular la corriente de emisor, la corriente de colector, etc., su valor exacto ya no es importante.

Al cambiar la resistencia del circuito de base al circuito de emisor, se obliga a que la tensión de la base a masa sea igual a la tensión de la fuente de base. Anteriormente, casi toda esta tensión aparecía en la resistencia de base, estableciendo una corriente fija en la base. Ahora, toda esta tensión de la fuente menos 0,7 V aparece en la resistencia de emisor, estableciendo una corriente fija en el emisor.

La ganancia de corriente tiene un efecto muy pequeño sobre la corriente de colector. En todas las condiciones de funcionamiento las tres corrientes están relacionadas por la ecuación:

$$I_E = I_C + I_B$$

que se puede reescribir como

$$I_E = I_C + \frac{I_C}{\beta_{cc}}$$

Esta ecuación se resuelve para la corriente de colector y se obtiene

$$I_C = \frac{\beta_{cc}}{\beta_{cc} + 1} I_E$$

La cantidad que multiplica I_E recibe el nombre de factor de corrección. Es un indicador de cuanto difiere I_C de I_E . Si la ganancia de corriente es de 100, el factor de corrección es

$$\frac{\beta_{cc}}{\beta_{cc} + 1} = \frac{100}{100 + 1} = 0,99$$

Lo cual quiere decir que la corriente de colector es igual al 99 por 100 de la corriente de emisor. Por tanto, se comete un error sólo del 1 por 100 si se ignora el factor de corrección y se dice que la corriente de colector es igual a la corriente de emisor.

7.- Polarización de los transistores.

Hasta ahora hemos estudiado la polarización de base, utilizada en circuitos digitales y la polarización de emisor, usada en el diseño de circuitos amplificadores. A partir de aquí veremos los circuitos derivados de la polarización de emisor.

7.1.- Polarización por división de tensión

7.1.1.- Introducción

El circuito de polarización más extensamente utilizado es el llamado polarización por divisor de tensión. A continuación se indica cómo se obtiene a partir del circuito de polarización de emisor. En la figura 27 se muestra el prototipo de polarización de emisor.

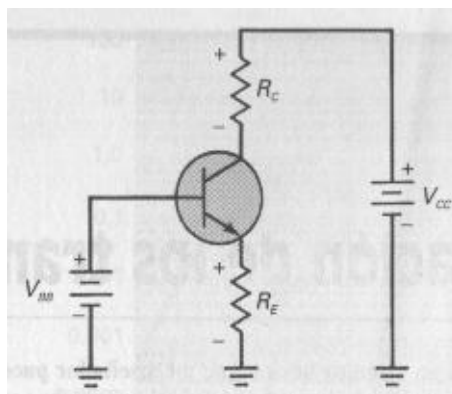


Figura 27. Prototipo de polarización de emisor

A veces, la tensión de una fuente de alimentación es demasiado elevada para aplicarse directamente a la base, como se muestra en la Figura 27. Se puede reducir esa tensión si insertamos un divisor de tensión, como se muestra en la figura 28. Eligiendo valores apropiados para R_1 y R_2 , la tensión se puede reducir al valor que sea adecuado para el diseño.

La tensión en R_2 es V_2 . Ésta se aplica directamente a la base; lo que implica que $V_B = V_2$. El proceso de análisis es el mismo que antes excepto que en este caso se empieza por calcular la tensión en R_2 . Una vez obtenida, se le resta 0,7 V para determinar la tensión de emisor, y entonces se está en camino de lograr una solución.

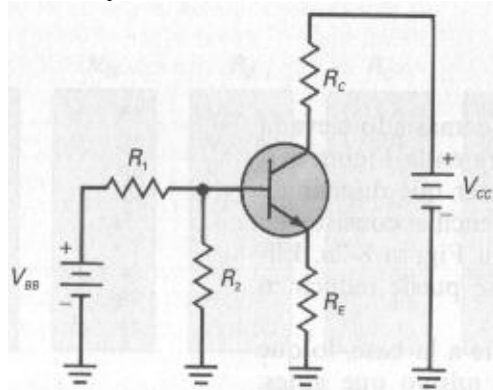


Figura 28. Modificación a la polarización de emisor

7.1.2.- Análisis de un circuito por polarización por tensión

En la Figura 29 se muestra un circuito polarizado por divisor de tensión con unos valores específicos. Para analizarlo se comenzará por hallar la tensión de base. Después, el resto del proceso es el mismo que el mostrado al hablar de la polarización de emisor.

Quien diseña un circuito como el de la anterior necesita respuestas más exactas que quien va a detectar averías, pero aun así es posible asumir compromisos lógicos. Como el diseño es un proceso abierto en el que existen muchas respuestas correctas, no puede haber reglas formales que abarquen todos los casos. En algunos diseños pueden ser permisibles errores de cálculo hasta el 20 por 100, mientras que en otros, quizá los errores tengan que ser menores del 1 por 100.

Lo que utilizaremos aquí es el diseño típico que permite errores del 5 por 100 o menos.

El proceso comienza hallando la tensión de base. Para lograrlo, hay que hacer una suposición: la corriente de base es tan pequeña que no tiene ningún efecto sobre el divisor de tensión. En ese caso, se puede calcular la corriente existente en el divisor de tensión de la Figura 29 como sigue:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

Esta es la ley de Ohm aplicada a la resistencia total del divisor de tensión. En la Figura 29 la tensión de la fuente de polarización de colector es de 10 V, mientras que la resistencia total del divisor es de 12,2 k Ω . Por tanto, la corriente en el divisor de tensión es aproximadamente de

$$I = \frac{10 \text{ V}}{12,2 \text{ k}\Omega} = 0,82 \text{ mA}$$

La corriente de base debe ser por lo menos 20 veces menor que la corriente del divisor de tensión. En el ejemplo utilizado la corriente debe ser menor que

$$I_B = \frac{0,82 \text{ mA}}{20} = 41 \mu\text{A}$$

Si esta condición se satisface, se puede calcular la tensión de base de la siguiente manera:

$$V_B = IR_2$$

Esta es la tensión en R_2 . Como la base está conectada a la parte superior de R_2 , la tensión de base también es de 1,8 V.

$$V_B = (0,82 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) = 1,8 \text{ V}$$

A continuación determinaremos la tensión y la corriente de emisor en el circuito.

La tensión de emisor la calculamos mediante la fórmula

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Esta ecuación indica que la tensión de emisor es igual a la de base menos la caída de tensión en el diodo de emisor. Usando la segunda aproximación se obtiene

$$V_E = 1,8 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,1 \text{ V}$$

La corriente de emisor se obtiene mediante la ley de Ohm:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

Es decir, la corriente de emisor es igual a la tensión de emisor dividida entre la resistencia de emisor. Como hay 1,1 V en 1 k Ω , la corriente de emisor es

$$I_E = \frac{1,1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,1 \text{ mA}$$

Y por último veremos la tensión de colector y la tensión colector-emisor:

La tensión de colector se calcula mediante la siguiente ecuación

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

Esta ecuación nos indica que la tensión de colector es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector menos la caída de tensión en la resistencia de colector. Como la corriente de colector es aproximadamente igual a la corriente de emisor,

$$V_C = 10 \text{ V} - (1,1 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 6,04 \text{ V}$$

Puesto que la tensión de emisor es superior a la tensión de masa, se tiene que emplear la siguiente ecuación para determinar la tensión colector-emisor:

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Esta ecuación indica que debe restarse la tensión de emisor a la de colector para obtener la tensión colector-emisor. Por tanto, realizamos el cálculo:

$$V_{CE} = 6,04 \text{ V} - 1,1 \text{ V} = 4,94 \text{ V}$$

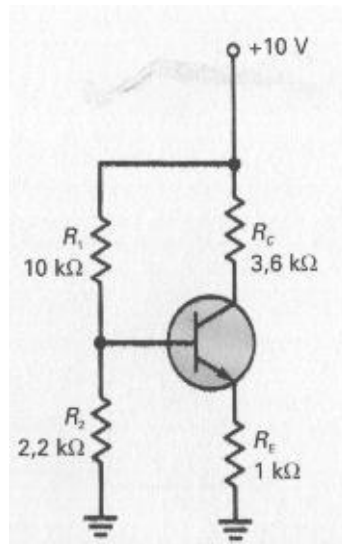


Figura 29. Ejemplo de polarización por divisor de tensión

7.1.3.- El punto Q

Mantener la corriente de base pequeña facilita el análisis de la polarización a través de un divisor de tensión. Pero lo que es aún más importante, hace que el punto Q sea inmune a los cambios de la ganancia de corriente. La razón es la siguiente. Si la corriente de base es tan pequeña que no tiene ningún efecto sobre la tensión de base, entonces los cambios de la ganancia de corriente no tendrán efecto sobre la tensión de base. Pero una tensión de base constante implica una tensión de emisor constante, una corriente de emisor constante, una corriente de colector constante y una tensión de colector constante. Podemos decir, entonces, que el punto Q no se ve afectado por los cambios en la ganancia de corriente. Si esta última cambia, lo único que cambia es la corriente de base. Ésta puede aumentar o disminuir. Pero este dato no es importante porque la corriente de base está fuera del proceso.

De hecho, la polarización a través de un divisor de tensión es en realidad una polarización de emisor disfrazada. Si el divisor de tensión es constante, produce una tensión muy estable en la base. Pero eso es equivalente a un circuito con polarización de emisor. Por tanto, un circuito de polarización a través de un divisor de tensión tiene un funcionamiento similar al de un circuito de polarización de emisor.

Si deseamos mover el punto Q a través de la recta de carga podemos variar la resistencia de emisor.

7.2.- Polarización de emisor con dos fuentes de alimentación

Algunos equipos electrónicos tienen una fuente de alimentación que produce tensiones positivas y negativas. Por ejemplo, en la Figura 30 se muestra un circuito con dos fuentes de alimentación: + 10 V y - 2 V. La fuente negativa polariza directamente el diodo de emisor. La fuente positiva polariza inversamente el diodo de colector. Este circuito se deriva del circuito de polarización de emisor. Por esta razón, nos referimos a él simplemente como de polarización de emisor con dos fuentes.

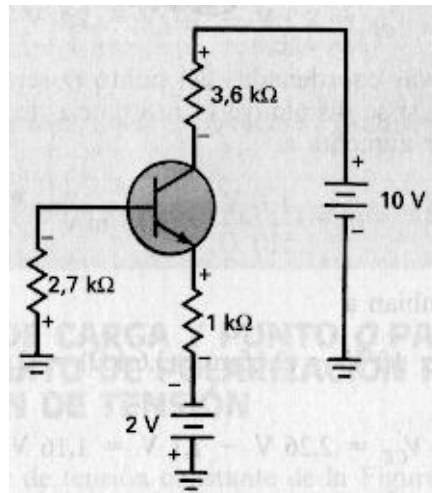


Figura 30. Polarización de emisor con dos fuentes.

7.2.1.- Análisis de un ejemplo

Lo primero que hay que hacer es dibujar de nuevo el circuito como aparece habitualmente en los esquemas. Tal hecho es necesario en los esquemas porque por lo general no aparecen símbolos de batería en los esquemas complicados. Toda la información sigue estando en el circuito, sólo que en forma condensada. Es decir, hay una tensión de polarización de -2 V aplicada a la parte inferior de la resistencia de $1\text{ k}\Omega$, y una tensión de polarización de $+10\text{ V}$ aplicada a la parte superior de la resistencia de $3,6\text{ k}\Omega$.

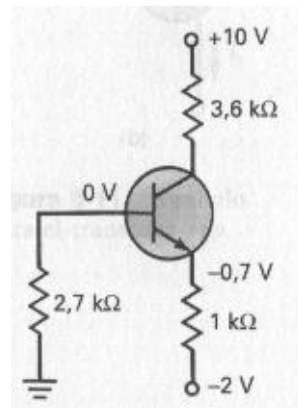


Figura 31. Ejemplo de polarización de emisor con dos fuentes

Cuando este tipo de circuitos está diseñado correctamente, la corriente de base será insuficientemente pequeña como para ser ignorada. Esto equivale a decir que la tensión de base es de 0 V aproximadamente, como se ve en la Figura 31.

La tensión en el diodo de emisor es de $0,7\text{ V}$, y por eso aparece $-0,7\text{ V}$ en el emisor. Hay una caída de más a menos de $0,7\text{ V}$ al ir de la base al emisor. Si la tensión de base es de 0 V , la tensión de emisor no puede ser de $+0,7\text{ V}$, tiene que ser de $-0,7\text{ V}$.

En la Figura 31, la resistencia de emisor de nuevo desempeña el papel clave a la hora de establecer la corriente de emisor. Para hallar esta corriente, se aplica la ley de Ohm a la resistencia de emisor como sigue: la parte superior de la resistencia de emisor tiene una tensión de $-0,7\text{ V}$ y la parte inferior tiene una tensión de -2 V . Por tanto, la tensión en la resistencia de emisor es igual a la diferencia entre estas dos tensiones. Para llegar a la respuesta correcta, se resta el valor más negativo del valor más positivo. En este caso, el valor más negativo es -2 , por lo que

$$V_{RE} = -0,7 \text{ V} - (-2 \text{ V}) = 1,3 \text{ V}$$

Una vez calculada la tensión en la resistencia de emisor, se calcula la corriente de emisor con ayuda de la ley de Ohm:

$$I_E = \frac{1,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,3 \text{ mA}$$

Esta corriente circula a través de la resistencia de $3,6 \text{ k}\Omega$ produciendo una caída de tensión que se resta de $+10 \text{ V}$ como sigue:

$$V_C = 10 \text{ V} - (1,3 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 5,32 \text{ V}$$

La tensión colector-emisor es la diferencia entre la tensión de colector y la tensión del emisor:

$$V_{CE} = 5,32 \text{ V} - (-0,7 \text{ V}) = 6,02 \text{ V}$$

7.3.- Otros tipos de polarización

Por último examinaremos algunos tipos diferentes de polarización. No se requiere un análisis detallado de los mismos, pues su uso es poco frecuente.

7.3.1.- Polarización con realimentación de emisor

7.3.1.1.- Concepto de realimentación

La realimentación negativa consiste en que la corriente de base es una señal de entrada para el transistor, mientras que las corrientes de colector y de emisor son corrientes de salida. Cuando la ganancia de corriente aumenta, hace que se incremente una variable de salida (la corriente de emisor).

Ésta circula por la resistencia de emisor, lo que hace que decrezca una variable de entrada (la corriente de base). Esto es muy importante: la salida ha hecho que cambie la entrada. Este fenómeno se denomina realimentación y se refiere al hecho de que la salida controla la entrada, al menos parcialmente. Como un aumento en la corriente de emisor produce una disminución en la corriente de base, a este tipo de realimentación se le llama realimentación negativa.

7.3.1.2.- Análisis de la polarización con realimentación de emisor

La polarización con realimentación de emisor nunca ha llegado a ser popular. La realimentación negativa sí reduce los desplazamientos del punto Q con respecto a los cambios de la ganancia de corriente, pero no los elimina de la forma en que lo hace la polarización con un divisor de tensión. El desplazamiento del punto Q sigue siendo demasiado grande en la mayor parte de las aplicaciones.

Las formulas exactas son las siguientes:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B/(\beta_{cc} + 1)}$$

y

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

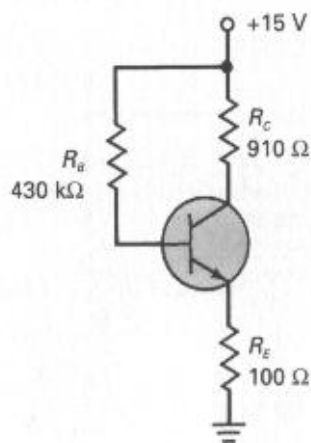


Figura 32. Polarización con realimentación de emisor

7.3.2.- Polarización con realimentación de colector

En la Figura 32 se muestra la polarización con realimentación de colector. Históricamente, éste fue otro intento de estabilizar el punto Q empleando la realimentación negativa. El inventor supuso que la ganancia de corriente aumenta debido a un aumento de la temperatura. Esto haría que se elevara la corriente de colector, provocándose una disminución de la tensión de colector. Una disminución en la tensión de colector origina una menor tensión en bornas de la resistencia de base, lo que implica una menor corriente de base. Pero menor corriente de base significa menor corriente de colector. Por tanto, la resistencia que se halla con realimentación entre el colector y la base produce realimentación negativa de colector.

Escribiendo dos ecuaciones de mallas es posible deducir las fórmulas exactas:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B/(\beta_{cc} + 1)}$$

y

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

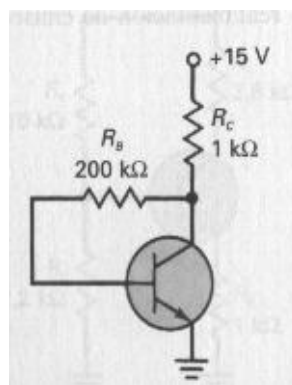


Figura 33. Polarización con realimentación de colector.

Posteriormente, se intentaron polarizaciones con realimentación de colector y emisor, que igualmente se quedaron a medio camino. Por último se llegó a la polarización por división de tensión, que es lo que el inventor buscaba desde un principio. En la polarización por división de tensión la realimentación negativa funciona extremadamente bien.

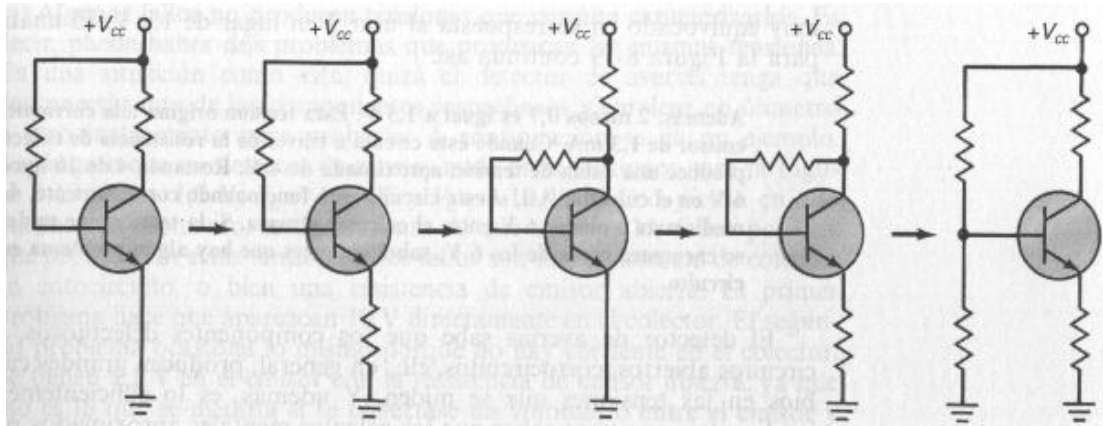


Figura 33. Evolución de la polarización del transistor

7.4.- Transistores *pnp*

En la Figura 33 se muestra la estructura de un transistor *pnp* y su símbolo eléctrico. Como las zonas dopadas son de tipo opuesto, es necesario invertir la forma de considerar su funcionamiento. Específicamente, tal cambio quiere decir que los huecos son los portadores mayoritarios en el emisor en vez de serlo los electrones libres.

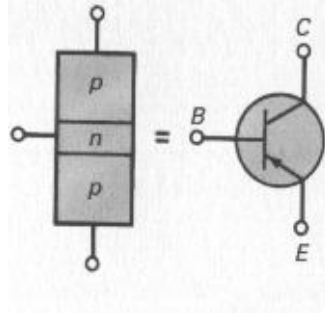


Figura 34. Transistor *pnp*

7.4.1.- Ideas básicas

De manera breve, la explicación de lo que sucede a nivel atómico es la siguiente. El emisor inyecta huecos en la base. La mayor parte de éstos fluyen hacia el colector. Por esta razón, la corriente de colector es casi igual a la corriente de emisor. La corriente de base es mucho menor que cualquiera de las dos anteriores. Como en el otro caso, la ganancia de corriente del transistor es igual a la corriente de colector dividida entre la corriente de la base. Igual que con los transistores *nnp*, la ganancia de corriente varía muchísimo con la corriente de colector, la temperatura y la sustitución de un transistor por otro.

En la Figura 35 se ven las tres corrientes del transistor indicadas según el flujo convencional y también desde el punto de vista del flujo de electrones. Como antes, la relación entre la corriente es

$$I_E = I_C + I_B$$

La ganancia de corriente se expresa como

$$\beta_{cc} = \frac{I_C}{I_B}$$

que tiene las formas equivalentes

$$I_C$$

$$I_C = \beta_{cc} I_B \quad I_B = \frac{I_C}{\beta_{cc}}$$

Si se tiene un circuito con transistores *npn*, se puede emplear el mismo circuito con una fuente de alimentación negativa y transistores *pnp*.

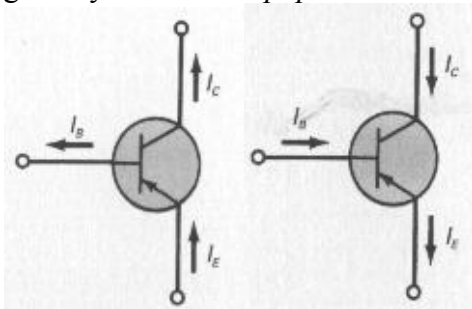


Figura 35. Símbolo y corrientes para un transistor *pnp*

8.- El transistor de efecto de campo

El transistor de efecto de campo, a diferencia del transistor bipolar, se basa en un solo tipo de carga, que puede ser electrones o huecos; de ahí que se trate de un transistor unipolar.

Existen tres transistores de efecto de campo básicos: el FET de unión o simplemente FET, el MOSFET de enriquecimiento y el MOSFET de empobrecimiento. A continuación se detallan las características más relevantes de cada uno de ellos

8.1.- El FET de unión

El FET de unión, o simplemente FET, guarda muchas similitudes con el transistor bipolar. Al igual que éste, posee tres terminales: fuente, puerta y drenador. Éstos son análogos al emisor, base y colector, respectivamente. En la figura 36 se muestra el símbolo eléctrico de FET, en este caso de canal N, porque el canal entre las zonas de depleción está hecho de semiconductor tipo N.

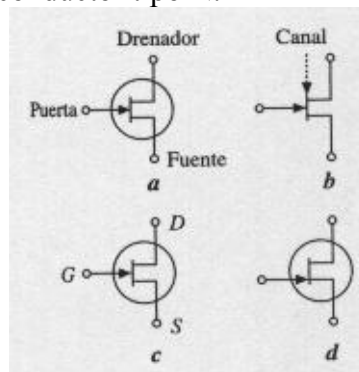


Figura 36. Símbolo eléctrico del FET de canal N.

El FET tiene dos diodos internos: el diodo de puerta-fuente y el diodo de puerta-drenador. Estos diodos conducirán si están polarizados con más de 0,7 V.

A diferencia del transistor bipolar, donde el diodo base-emisor está polarizado en directo, el diodo de puerta-drenador está polarizado en inverso en funcionamiento normal.

La ventaja principal del FET respecto a un transistor bipolar es que tiene una resistencia de entrada en continua que tiende a infinito (un FET típico tiene una resistencia de entrada del orden de cientos de megohmios).

Esto es posible gracias a que la corriente de puerta es prácticamente nula. Debido a la polarización inversa, sólo existe una corriente inversa muy pequeña en el terminal de conexión de la puerta. Como contrapartida, tiene mucha menor ganancia de tensión que un transistor bipolar, ya que es menos sensible a cambios en la tensión de entrada. Las curvas de salida de un FET son semejantes a las de un transistor bipolar, excepto que la entrada de control es V_{GS} en lugar de ser I_B . Estas curvas se muestran en la figura siguiente (Figura 37.1)

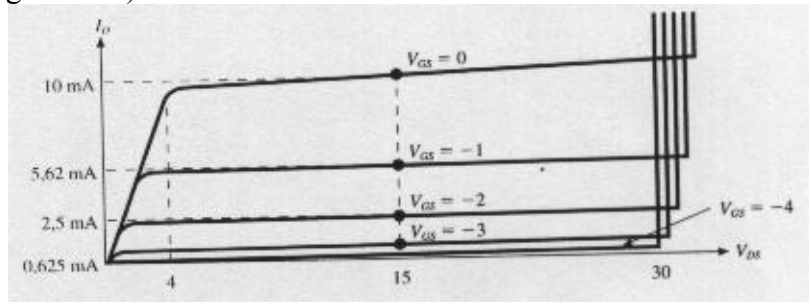


Figura 37.1. Características de salida

El FET actúa como una fuente de corriente a lo largo de la parte horizontal de las curvas de salida y como una resistencia a lo largo de las partes casi verticales de la curva de salida.

La característica de transferencia es la gráfica de la corriente de drenador en función de la tensión de la puerta. La curva no es lineal, es parte de una parábola (figura 37.2).

Los FET tienen su aplicación en unos circuitos de comunicaciones llamados mezcladores.

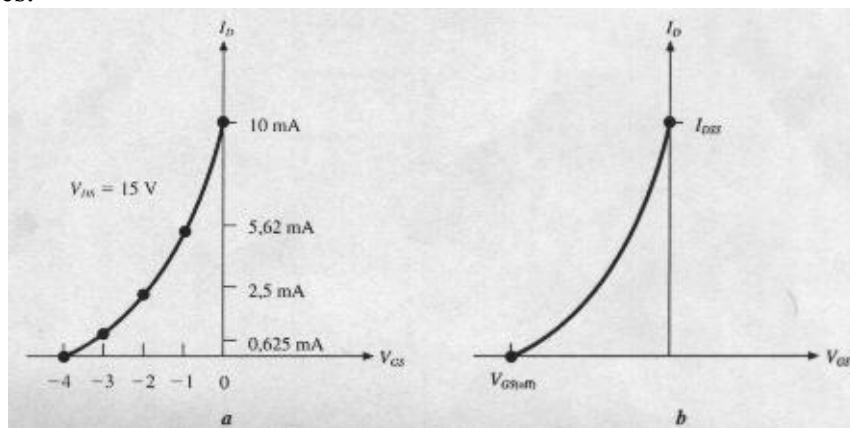


Figura 37.2. Característica de transferencia

8.2.- El MOSFET de empobrecimiento

El transistor de efecto de campo semiconductor de metal-óxido se abrevia MOSFET. Al igual que el FET de unión comprende una fuente, una puerta y un drenador. Su simbología se muestra en la figura 38

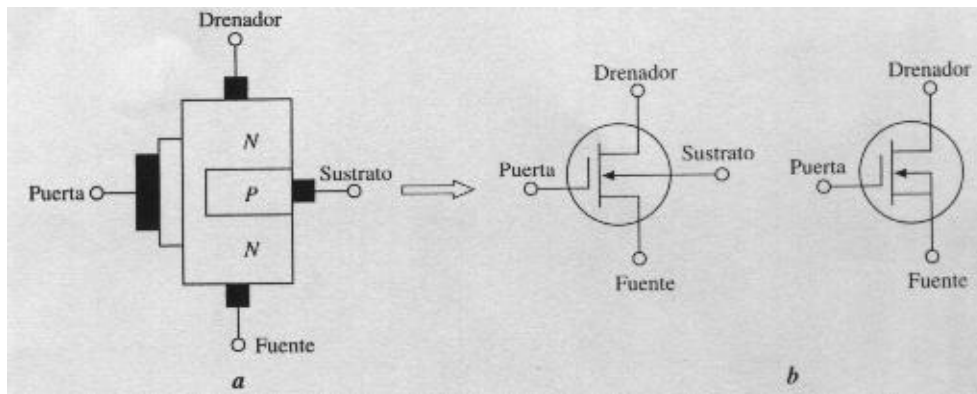


Figura 38. Símbolos eléctricos del MOSFET de empobrecimiento

La puerta está aislada eléctricamente del canal. Por ello, la resistencia de entrada en continua es aún mayor que la de un FET.

El MOSFET de empobrecimiento está normalmente conduciendo cuando V_{GS} es nula. Tiene curvas de salida y circuitos semejantes al FET. La única diferencia es que puede funcionar con tensiones de puerta tanto positivas como negativas.

En la figura 39 se muestran las curvas de salida y de transferencia para un MOSFET de empobrecimiento.

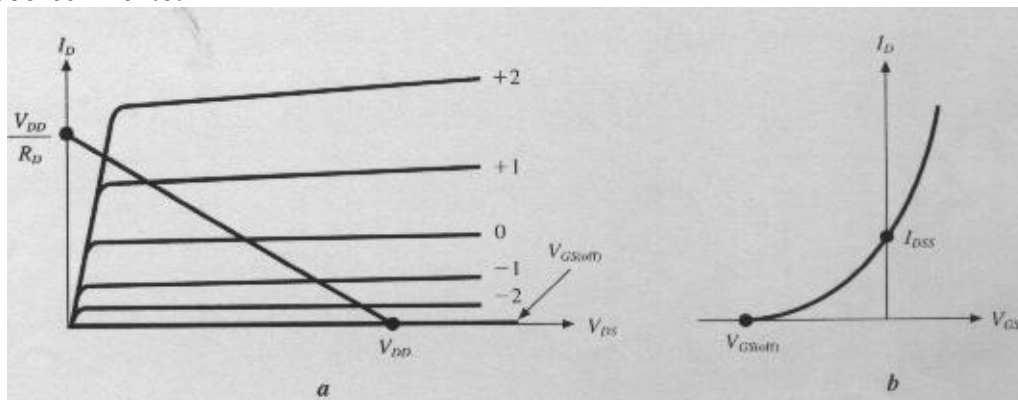


Figura 39. a)Curvas de salida. b)Curva de transferencia.

8.3.- El MOSFET de enriquecimiento

El MOSFET de enriquecimiento ha revolucionado la industria electrónica, teniendo una enorme importancia en la electrónica digital y en el área de los ordenadores.

Al igual que el FET de unión y el MOSFET de empobrecimiento tiene tres terminales de conexión: puerta, fuente y drenador. Los símbolos eléctricos se muestran en la figura 40.

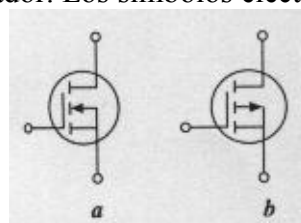


Figura 40. Símbolos eléctricos. a)Canal N. b)Canal P.

Este dispositivo está normalmente cortado cuando la tensión de puerta es cero. Para activarlo, se tiene que aplicar una tensión suficientemente positiva a la puerta. La tensión umbral es la de puerta que lo hace conducir.

El dispositivo actúa como fuente de corriente o como resistencia.

A continuación, en la figura 41, se muestran las curvas de salida y de transferencia para un MOSFET de enriquecimiento.

La entrada de control, al igual que en los otros transistores de efecto de campo, es V_{GS} , en lugar de la corriente de base I_B como en los transistores bipolares.

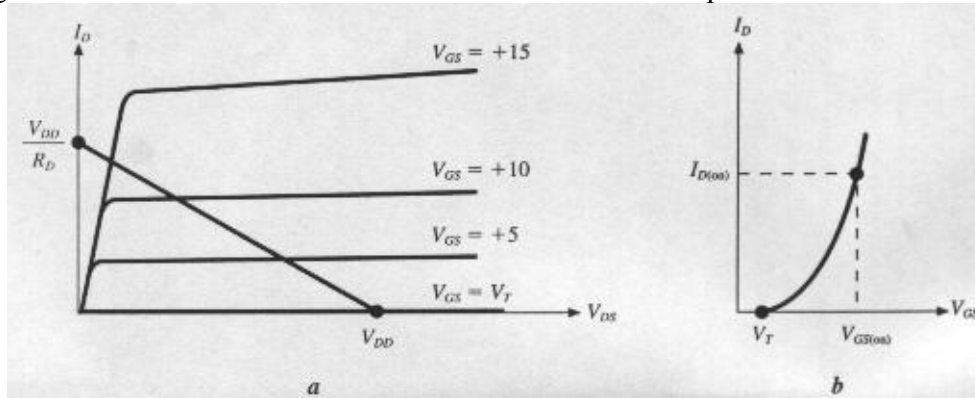


Figura 41. a)Curvas de salida. b)Curva de transferencia

Los transistores tienen limitaciones máximas con respecto a sus tensiones, corrientes y potencias.

El conocimiento de los valores de estas limitaciones es de vital importancia a la hora de hacer cualquier diseño.

Su desconocimiento haría que, con toda seguridad, se sobrepasarán dichos valores y por lo tanto se produciría la consecuente destrucción del dispositivo afectado. Las hojas de características que nos facilita el fabricante indican estas especificaciones máximas. Debido a su importancia, es necesario saber interpretarlas con precisión.