
EL EFECTO TRANSISTOR: UN ENFOQUE INTUITIVO

CARLOS MARIO IDARRAGA MONTOYA

INTRODUCCION

Los primeros sistemas de control o de computación fabricados a mediados del siglo, tenían serios problemas de diseño, los cuales eran insalvables para las técnicas existentes en la época; un ejemplo de éstas contingencias era el calor debido a una gran disipación de potencia, y evidentemente el tamaño, el cual era causa de dificultades a la hora de instalar el equipo.

La solución a estos problemas apareció en forma de unos "pedacitos negros" de un mineral llamado silicio (o germanio) los cuales lograban, como por "magia", conjugar el verbo de moda en esa época: Amplificar.

Estos resultaron ser los impulsores de la carrera desenfrenada en que aún vive la electrónica, en la que algo que se inventa y se alaba hoy, cae en desuso mañana, debido a un nuevo descubrimiento que opaca al anterior.

Los pedacitos mencionados resultaron ser los TRANSISTORES, que junto con los FET que aparecieron en escena posteriormente, solucionaban los problemas mencionados, y además permitían que se les "integrara" en una sola pastilla de silicio, conjuntamente con todas las demás partes que constituyeran un circuito cualquiera, logrando con

ello, el elemento que ahora conocemos como "chip" (que en español significa: "pedacito").

En este artículo nos ocuparemos de darle forma al más importante de los dos dispositivos mencionados (el transistor) y dejaremos el otro para un artículo posterior, aunque sí nombraremos algunas de las diferencias más notorias entre uno y otro elemento. Se debe tener en cuenta que vamos a suponer que el lector está familiarizado con ciertos términos que se van a usar en este ensayo tales como: unión p-n, portadores de carga (electrones y "huecos"), banda de valencia, banda de conducción, región de transición, emisor, base, colector, polarización directa, polarización inversa y muchos otros términos propios de la jerga electrónica que sería saludable conocer para aprovechar el artículo en toda su dimensión.

1. EL TRANSISTOR BIPOLAR

El dispositivo que evaluaremos a continuación fue el primero que apareció de todos los ya mencionados. Su descubrimiento causó gran revuelo en una época en que el mundo estaba en transición. Recién acabada la segunda guerra mundial ya era noticia conocida la energía nuclear con el holocausto

CARLOS MARIO IDARRAGA MONTOYA. Profesor del Departamento de Producción de la Universidad EAFIT.

de Hiroshima y Nagasaki, y todos los países estaban ya en la plataforma de lanzamiento, rumbo a un desarrollo tecnológico mucho mayor que el logrado por el hombre juntando toda la historia escrita hasta ese momento.

En tal panorama vió la luz el transistor, en los laboratorios de la Bell Telephone en 1948, debido a los esfuerzos, coronados con el Premio Nobel de Física, de los físicos William Schockley, Walter Brahain y Bardeen.

Este descubrimiento, como hemos dicho muchas veces, marcó el paso en el ulterior desarrollo de la electrónica, el cual nos permite "vivir" de la forma que conocemos actualmente.

Estos resultaron ser los impulsores de la carrera desenfrenada en que aún vive la electrónica, en la que algo que se inventa y se alaba hoy y cae en desuso mañana, debido a un nuevo descubrimiento que opaca al anterior.

Los transistores de efecto de campo (*fets*) llegaron como una herramienta más, basados en el principio de funcionamiento descubierto inicialmente pero con marcadas diferencias, que se harán más claras a medida que profundicemos en los principios físicos del dispositivo que nos ocupa. Sin embargo, enunciaremos algunas someramente, tratando de introducir al lector, poco a poco, en esta nueva etapa de nuestro estudio.

La primera diferencia notoria, se deriva de la palabra "bipolar", e implica que este tipo de transistor tiene dos uniones p-n de diferente configuración. De ahí el nombre de transistor BJT (*Bipolar Junction Transistor*). La otra diferencia grande consiste en que, en este caso, la corriente del dispositivo está formada por los dos tipos de portadores libres que conocemos (electrones y huecos), distinto de los FETS ya mencionados que sólo usan un tipo de portadores dependiendo de qué naturaleza sea la "barra" de silicio (llamada comúnmente "el canal") con que se construyó el dispositivo ("n" para electrones y "p" para huecos). En este artículo sólo nos dedicaremos a observar el fenómeno "efecto transistor"-

que sirvió de sustento al dispositivo físico, cada paso será representado en las figuras tratando de obtener la mayor claridad posible, pero el análisis se llevará a cabo de una manera totalmente intuitiva para evitar al lector el complejo desarrollo matemático que esto implica.

2. EFECTO TRANSISTOR

Para lograr el entendimiento completo de este fenómeno, plantearemos dos análisis separados para dos tipos de uniones p-n; luego juntaremos los efectos observados, llegando así, al transistor total.

2.1 Dispositivo p⁺-n en polarización directa

Supongamos ahora que necesitamos una unión p-n, polarizada directamente, con una condición importante: El número de huecos que fluyen de "p" a "n" debe ser mucho mayor que el número de electrones que fluyen de "n" a "p".

Una unión p⁺-n satisface dicha condición, indicando con el signo " + " que el lado P está más dopado que el lado N. Supongamos ahora que a la unión mencionada le agregamos un elemento hipotético, que consiste en una "caja mágica" cuya función es atraer los huecos que el material p inyectó en el lado n. El dispositivo total se observa en la **Figura 1**, en el cual no se considera el efecto de la región de transición por ser un fenómeno que no tendrá trascendencia en la explicación posterior.

En nuestro dispositivo, que de ahora en adelante llamaremos "ladrón", analizaremos varias cosas:

Primero que todo, es necesario aclarar que nuestra caja mágica, sólo atrae huecos, lo que equivale a decir, que sólo suministra electrones de Valencia. Si el lector se está preguntando, como hace la caja para poder diferenciar electrones de Valencia de electrones de conducción, la respuesta es simple: No olvide que la caja es mágica (¡ah!). Cuando lleguemos a la realidad, la caja verdadera suministrará simplemente electrones, y ellos mismos "decidirán" si brincan por la banda de Valencia o corren por la banda de conducción. Pero se observará también, que la mayoría (en una relación de 100 a 1) escogen el primero de estos dos "senderos", y en su momento será claro el por qué de esta elección. Los terminales que conectan al lado n y al material p con las fuentes, requieren también cierta aclaración.

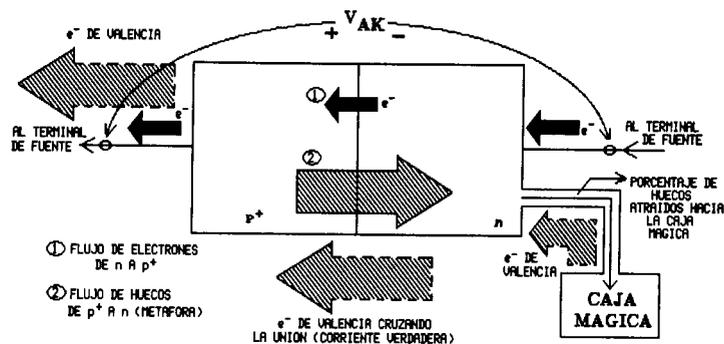


FIGURA 1
DISPOSITIVO HIPOTETICO "LADRON DE HUECOS"

No nos es posible colocar una sola batería de modo que el lado p quede conectado en el borne positivo y el lado n en el negativo, porque violaríamos la ley de las corrientes de Kirchoff, debido al efecto de la "caja mágica", es decir, la corriente que entra por el borne positivo no sería la misma que sale por el borne negativo, violando la sumatoria de corrientes en cualquiera de esos nodos. Para evitar esto, asumimos simplemente que hay una diferencia de potencial VAK entre los terminales de la unión, de tal modo que ésta quede polarizada directamente, sin especificar que se trata de una sola batería.

Ahora bien, ya sabemos que los electrones que entran o salen por el terminal del lado p de cualquier unión p-n son electrones de banda de Valencia. Es decir, metafóricamente son huecos y, obviamente, el total de cargas observadas en ese terminal de salida (entrando o saliendo) es igual a la suma de electrones y huecos detectados, atravesando (entrando o saliendo) la unión. Análogamente, sucederá lo mismo para el lado n, con la diferencia que los electrones detectados en su terminal, son electrones de conducción. Es bueno aclararle al lector que esta diferencia es nuestra, no del mundo de las partículas, y sólo sirve para aterrizar un poco el tema. Preguntémonos ahora, ¿cómo operarán las diversas cargas a uno u otro lado de la unión? Para encontrar la respuesta analicemos por separado electrones y huecos.

3. COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRONES Y LOS HUECOS

3.1 Electrones

Los electrones que fluyen de n a p+ dejarán una impureza aceptora descompensada en el lado p, y

una donante de la misma condición, en el lado n. Cada lado recuperará su neutralidad, atrayendo, un electrón en el caso del lado n, el cual entrará por el terminal de la fuente, y atrayendo un hueco, o sea repeliendo un electrón de Valencia, el cual sale también por su respectivo terminal, en el caso del material p. ¿Qué se observa en el par de bornes de la unión p+-n?

Un observador vería un electrón entrando por n y saliendo por p. Continuando así, tendríamos un pequeño flujo de electrones entrando y saliendo de la unión p+-n, el cual está representado en la figura anterior, por la flecha llena (→).

La palabra "pequeño" es debida, como ya sabemos, a la diferencia de dopajes.

3.2 Huecos

Evaluemos ahora lo que sucede con los huecos. ¿Qué pasa cuando un hueco fluye de p a n?. La verdadera historia sería como si un electrón de Valencia del lado n salta hacia un hueco en el lado p. Analicemos primero qué le pasa a ese electrón de Valencia en el material p. Sabemos ya que el resultado será una impureza aceptora descompensada, que recuperará su neutralidad expulsando un electrón (que era de Valencia) por su terminal, el cual dejará un hueco, compensando la falta inicial de carga positiva. Ahora bien, al saltar ese electrón de Valencia de n a p, tenemos un hueco en el lado n. En una unión normal el resultado final sería que ese hueco se recombinara con un electrón de conducción propio del material n, dejando una impureza donante descompensada, la cual atraería un electrón de conducción de la fuente. En este

caso, sin embargo, existe algo a lo que le encanta robar huecos, ¡la caja mágica! Por tanto, y antes que el hueco se recombinen, éste (u otro hueco cualquiera del material n, recuerde que es lo mismo porque son indistinguibles) es atraído por la caja, recuperando así el material n su neutralidad. Es decir, el hueco de exceso desapareció, y el lado n no gastó ninguno de sus electrones de conducción ni ninguna impureza donante quedó descompensada. ¿Cómo se logra esto? Pues la caja mágica introdujo un electrón de Valencia (recuerde que ella sólo introduce electrones de Valencia), el cual "mató" un hueco cualquiera en el material n, dejando dicho lado de la unión neutro de nuevo. ¿Qué se observó en el terminal que une al lado n con la fuente?, ¡Nada!, ningún electrón entró o salió por allí. La carga positiva de exceso fue absorbida por la caja mágica, por tanto el flujo total de cargas es como se observó en la **Figura 1** donde la corriente de huecos es mucho mayor que la de electrones.

Vamos a hacer ahora unos cambios importantes en nuestro dispositivo "ladrón" de modo que demos un paso más hacia nuestro objetivo. Pedimos absoluta atención porque, en este momento, comienza a correr peligro la vida del artista.

Suponemos que el lector sabe que el fenómeno de las corrientes en un semiconductor no se inicia en la unión. El orden verdadero, para una unión polarizada directamente, es que un electrón entra al semiconductor por el lado n. Una vez allí genera obviamente, un exceso de carga negativa en el material, el cual reacciona expulsando un electrón, a través de la unión, hacia el lado p. El electrón que entró en el material n será de conducción, mientras que el electrón expulsado puede ser de Valencia o de conducción, pero en ambos casos el resultado final es que se pierde un electrón libre (en el segundo modo el intercambio es directo: entra uno de conducción y sale uno de conducción; en el primer método, el electrón de Valencia deja un hueco, que es minoritario en un material n, entonces, se recombinará con un electrón de conducción propio de este lado y el resultado será idéntico: la pérdida o expulsión de un electrón de conducción).

3.3 Condiciones de Funcionamiento del Dispositivo

Lo que sigue ahora es analizar nuevamente nuestro dispositivo, pero empezando por el principio,

es decir, con un electrón entrando de la fuente, hacia el terminal del lado n. Vamos a suponer también dos cosas, a saber:

1a. La caja mágica no es 100% eficiente, lo cual significa que no todos los huecos son atraídos por ella. Algunos se logran recombinar con electrones propios del lado n. Esto se deberá a que el fenómeno de la recombinación es manejado por un parámetro definido como "tiempo de vida promedio" de las partículas. En nuestro caso, definiremos como τ_p el tiempo de vida de los huecos, y a τ_n el de los electrones. El tiempo de vida es un parámetro estadístico (por eso se habla de "promedio") como casi todo lo que se define en el mundo cuántico, y se refiere al tiempo que logra "vivir" un electrón sin recombinarse con un hueco (y viceversa para el hueco). Para el análisis que nos ocupa, es factible suponer que:

$$\tau_n \cong \tau_p = \tau \quad (1)$$

Esto es debido principalmente a que la cantidad de huecos que entraron al lado n es tan grande, que ahora tienen tantas probabilidades de sobrevivir allí como las tienen los electrones propios de ese lado de la unión.

En una unión p-n normal, un hueco que llegara al lado n no tendría posibilidades de sobrevivir, es decir $\tau_n \gg \tau_p$. Ahora, como son tantos huecos, es igualmente factible para ambos tipos de partículas (electrones libres y huecos) morir recombinándose y por esto $\tau_n = \tau_p$.

Ahora bien, si los huecos acelerados hacia la caja mágica (son "halados" por ella), recorren el material n, desde la unión hasta la "boquilla" de la caja (es decir, de punta a punta del lado n) en un tiempo, que denominaremos τ_t (tiempo de tránsito), el cual es mucho menor que τ , tendremos un efecto esplendoroso como veremos dentro de poco, que explicará de paso por qué es realmente imposible que la caja mágica sea 100% eficiente (es más, si así lo fuera ¡nuestro dispositivo sería un fracaso!).

2a. Aunque sabemos que el material n tiene dos formas de recuperar su neutralidad cuando se le introduce un electrón de exceso, vamos a suponer que éste sólo usará el método de expulsar un electrón de Valencia. Es decir, no vamos a considerar, por el momento por lo menos, el efecto de expulsar un electrón de conducción,

porque, como se verá enseguida, es mucho más significativo el fenómeno de la recombinación en el material n, en el cual también se pierden electrones libres.

Además, como habíamos dicho antes, la relación entre el flujo por Valencia y el flujo por conducción es 100 a 1 aproximadamente (por ser una unión p⁺-n), por lo cual no incurriremos en un error significativo al no considerar ese 1%. Analicemos ahora al dispositivo, bajo la lente de estas premisas.

3.4 Efecto de la "Caja Mágica"

Iniciemos nuestro estudio con un electrón que sale de una fuente y penetra en el lado n, ¿qué sucede?. El material intenta recuperar su neutralidad, expulsando un electrón, que según la segunda suposición que hicimos, será de Valencia, y por tanto dejará un hueco en su átomo padre. El recorrido que inicia ese electrón en el lado p no nos interesa. Ya sabemos que este material recupera su neutralidad expulsando un electrón, que

también es de Valencia, por su terminal de salida, verificándose el efecto de corriente de electrones a través de la unión p⁺-n, desde un terminal al otro. La pregunta verdaderamente importante ahora es: ¿qué le pasa al hueco que ha aparecido en el lado n, debido a la expulsión del electrón de Valencia?.

Note el lector, que en este punto de la discusión, ¡el material n está nuevamente neutro!. ¡Sí!, porque si un electrón entró, ¡otro ya salió!. El problema que tenemos es que el hueco que quedó, no puede permanecer un tiempo mayor a τ sin recombinarse con un electrón de conducción, y si sucede ésto último, tenemos al material n en la situación inicial, es decir, antes que hubiera entrado un electrón procedente de la batería, o sea, con el mismo número de huecos y de electrones que tenía al empezar.

Sin embargo esto no ocurre. Vamos a ver por qué pero, para lograrlo, debemos dejar volar un poco nuestra imaginación hacia ese mundo. "Cerremos los ojos" y empecemos observando la **Figura 2**.

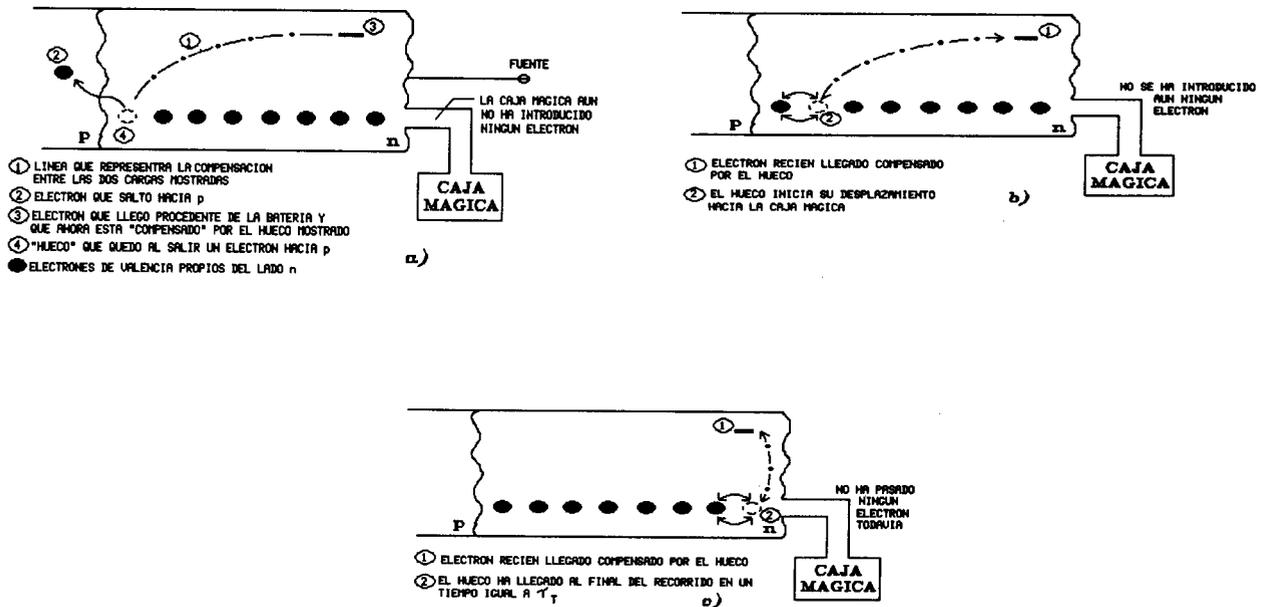


FIGURA 2
EFECTOS DEBIDOS A LA CAJA MÁGICA

Como se observa en dicha figura, el resultado final es que el material n quedó con el mismo electrón recién llegado, sin compensación, como cuando iniciamos el proceso con él llegando desde la fuente, a través del terminal.

¿Qué "siente" el material n? A pesar del esfuerzo que hizo por recuperar su neutralidad, expulsando un electrón, "un gracioso" volvió y le colocó un nuevo electrón, en un tiempo igual a τ_T , obligándolo a repetir el proceso de expulsión, si quiere conservar su neutralidad. El lado n entonces expulsa otro electrón de Valencia, el cual saldrá (ya sabemos como) por el terminal del lado p, y dejará un hueco en el lado n. Para este nuevo hueco se repetirá la misma película que para el anterior. Llegará a la caja mágica en un tiempo igual a τ_T , y desaparecerá de escena, tal como le sucedió a su congénere en la ocasión anterior. ¿Qué estaría viendo un observador, colocado en los terminales del dispositivo? Vería un electrón que entró por el lado n y dos electrones que salieron por el lado p. Es decir que el primer electrón recién llegado al material n ha causado la expulsión de, hasta ahora, dos electrones, y lo peor de todo es que sigue descompensado, pues el segundo hueco corrió la misma suerte que el primero: ¡fue "tragado" por la caja mágica!.

Hasta este momento, hemos gastado un tiempo igual a $2\tau_T$. Supongamos que $\tau = 10\tau_T$, esto implicará que este proceso de robo de huecos podrá repetirse 8 veces más, hasta completar 10 en total. Como el material n sigue buscando su compensación, seguirá expulsando electrones de Valencia, es decir, huecos que serán atraídos hacia la caja mágica. Cuando desaparece el décimo hueco, y teniendo en cuenta que $\tau = 10\tau_T$, ya ha transcurrido el tiempo necesario para que los electrones propios del lado n busquen huecos con quien recombinarse. Por tanto, casi inmediatamente que nace el onceavo hueco, éste "muere" recombinándose con un electrón propio del lado n, como si se tratara de una unión p-n cualquiera, quedando el material neutro de nuevo, como estaba antes de que llegara el electrón de la batería. Es importante que el lector tenga en cuenta que el tiempo τ de recombinación empieza a contar, para los electrones propios del lado n, tan pronto como el primer hueco aparece. Los 10 primeros huecos viven cada uno, dentro del lado n, un tiempo igual a τ_T (mientras recorren el material de punta a punta), pero el onceavo no alcanza a vivir nada debido a que cuando nace los

electrones propios de este lado de la unión ya llevan mucho rato "aguantando hambre" y están listos para la recombinación. Para el ejemplo hipotético descrito anteriormente, por cada electrón que llega de la batería por el lado n salen 10 por el terminal del lado p. En general, podríamos decir que la relación de electrones entrando por n y saliendo por p estaría dada por:

$$\text{Relación de electrones} = \tau/\tau_T \quad (2)$$

Esta relación tendrá nombre y tomará más forma cuando profundicemos un poco más en el tema.

La explicación anterior se podría resumir diciendo que los electrones que entran por el lado n, provenientes de la batería, controlan el proceso de expulsión por el lado p, en "confabulación" con la caja mágica, que se encarga de "robar" los huecos que aparecen producto del exceso de carga creada por los electrones recién llegados de la batería.

Si la corriente de electrones de la batería se interrumpe, se corta el proceso de expulsión, debido a que el material n permanecerá neutro y por tanto no creará huecos, al no tener que expulsar electrones de Valencia. Entonces, la caja mágica no tendrá qué "comer" (pobrecita) y el dispositivo quedará pasivo.

Si la corriente de la batería aumenta, es obvio que aumentará el número de cargas expulsadas. La caja mágica "engordará" por el aumento de huecos generados y, por tanto, la corriente total que sale por el terminal de p, aumentará según la relación entre τ y τ_T ya establecida, la cual permanece constante, a no ser que se cambie la fisiología de la unión p⁺-n.

Nótese además el por qué la caja mágica no puede ser 100% eficiente. Si así lo fuera, ningún hueco creado por el proceso de expulsión de electrones de Valencia, que se genera en el material n al buscar su neutralidad, se podría recombinar, porque siempre sería robado por la caja. Esto implicaría que los electrones propios del lado n tendrían que tener un tiempo de vida infinito para que nunca "mataran" un hueco recién creado, lo cual no es posible en el mundo de esas partículas. Se puede lograr, eso sí, que la relación entre τ y τ_T sea muy grande haciendo que τ_T sea muy pequeño. ¿Cómo? pues acortando el camino que recorren los huecos desde la unión hasta la caja

mágica, reduciendo el ancho de la zona del material n. De este modo casi todos los huecos serán atrapados por la caja, pero siempre es posible que alguno se recombine, antes de ser robado, permitiendo con ésto que el dispositivo pueda ser real y no una fantasía nuestra.

Resumiendo, para que el elemento descrito trabaje bien necesitamos lo siguiente:

- 1º. Una corriente de electrones entrando por el lado n, procedente de la batería. Si ésta aumenta, la corriente de salida del lado p aumentará y si disminuye, la corriente total disminuirá en consecuencia.
- 2º. La zona n debe ser estrecha para disminuir lo más posible a τ_T , y aumentar así la relación de electrones entrando por n y saliendo por p.
- 3º. La caja mágica no es 100% eficiente, debido a la recombinación que debe ocurrir en el material n por el tiempo de vida finito de los electrones (τ).

4. EL FENOMENO DE LA CORRIENTE DE BASE

En las figuras anteriores observamos el proceso de creación de un hueco y su posterior "carrera" atraído por la caja mágica, mientras que el electrón recién llegado de la batería, por el terminal del lado n, espera tranquilo la oportunidad de recombinarse. En ese momento, el material n es eléctricamente neutro como ya dijimos. Nos podríamos preguntar entonces, ¿qué pasaría si en ese momento, entra otro electrón procedente de la batería?, obviamente se generará un nuevo hueco que iniciará su viaje en la misma dirección del anterior pero con un poco de retraso respecto a éste. Si seguimos así, podríamos llegar a tener simultáneamente muchos electrones recién llegados esperando por recombinarse, generando con esto una "masa" de huecos que fluyen todos hacia la caja mágica. Debe ser obvio para el lector, que debido a que los electrones no llegaron al mismo tiempo, su tiempo de vida (τ) no comienza a contar simultáneamente para todos. El tiempo de vida es como "algo personal" de cada partícula.

Sin embargo, en el mundo cuántico sólo es posible hablar de promedios estadísticos, por ésto sólo podemos decir que τ es el tiempo promedio de

vida de los electrones, dando la posibilidad de que varios de ellos lleguen a recombinarse simultáneamente. Del mismo modo para los huecos, pueden darse "nacimientos" y "muertes" simultáneas.

Como se observa, cada electrón puede generar hasta τ/τ_T huecos, creando una "procesión" de huecos viajando por n. Lo que sucedió es que los electrones están llegando cada intervalo de tiempo (llamémoslo τ'), de modo que se esté dando la siguiente desigualdad:

$$\tau > \tau_T > \tau' \quad (3)$$

¿Cómo hicimos para que ésto sucediera?. Simplemente se aumentó la corriente de electrones de la batería, y como se dijo antes y se pudo observar ahora, ésto hará aumentar la corriente que sale por p. Nótese que si la corriente disminuye (como se plantea en la **Figura 2**) tal que se cumpla, por ejemplo:

$$\tau > \tau' > \tau_T \quad (4)$$

o también para:

$$\tau' > \tau > \tau_T \quad (5)$$

Se seguirá observando que por cada electrón que entre de la batería, saldrán τ/τ_T huecos por el terminal del lado p. Esta relación depende sólo del dopaje de p y de lo estrecho que sea el lado n. La variación en la corriente que viene de la batería no afecta para nada este parámetro.

La pregunta obvia ahora es: ¿qué es la caja mágica? ¿cómo hace para suministrar sólo electrones de Valencia (o sea absorber huecos)?. Veamos: ¿Qué sucede en una unión p-n polarizada inversamente? Sabemos que en este caso, existe una pequeña corriente (de saturación) debida a los pocos electrones libres que hay en p y que intentan pasar al lado n, y a los pocos huecos de n que intentan llegar a p (en realidad son los electrones de Valencia de p que intentan pasar "brincando" por los pocos huecos del material n), es decir, en una unión en esas condiciones, se observa un movimiento de cargas de p hacia n, de electrones de conducción y de electrones de Valencia (o sea huecos de n a p), el cual es contrario al que ocurre en polarización directa. Ahora bien, ¿qué tendríamos que agregarle a esta unión para que la componente de la corriente debida a

los electrones de Valencia sea mucho más notoria que la de los electrones de conducción?. Supongamos que es posible aumentar el número de huecos en el material n, entonces cuando un electrón de exceso llegara al lado p proveniente de la batería (recuérdese que estamos en polarización inversa), este lado de la unión escogería el camino de Valencia para deshacerse del exceso de carga negativa (el electrón recién llegado), debido al incremento en el número de huecos del lado n, y expulsaría así un electrón quedando neutro de nuevo.

Si introdujéramos una gran masa de huecos en el material n, éstos iniciarían un viaje hacia el material atraídos por el terminal negativo de la batería que polariza inversamente la unión. Viéndolo de la otra forma, es como si todos los electrones de Valencia fueran atraídos por el terminal positivo de esa misma fuente inversa hacia el lado n, de modo que, al usar los huecos como trampolín, éstos últimos van siendo "relegados" hacia la zona de la unión, atraviesan ésta metafóricamente

hablando y salen por el terminal del lado p, basados más o menos en la misma forma intuitiva mostrada en la **Figura 3**.

Tenemos entonces que la caja mágica, es una zona de material p, de modo que al agregársela al lado n, de la unión p⁺-n descrita en el primer aparte, obtendremos un dispositivo de forma p⁺-n-p, en el cual, la unión de la izquierda se encarga de generar una corriente más que todo por Valencia y de gran magnitud, debido a la diferencia de dopajes entre p⁺ y n. Los huecos así generados en n, en vez de recombinarse como sucedería en cualquier unión sencilla, son atraídos, o sea que sirven de trampolín a los electrones de Valencia de p, los cuales brincan hacia n, atraídos inicialmente por el voltaje de polarización inversa de la parte n-p. Una vez hayan llegado al material n, se ven sumergidos en el efecto de polarización positiva de la parte p⁺-n y continúan su camino hacia p⁺, como si fueran electrones propios del lado n, olvidando que hasta hace poco, pertenecían al material p.

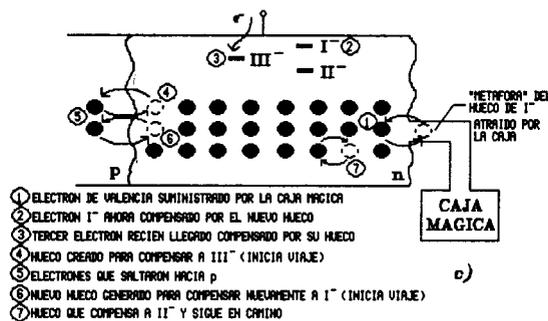
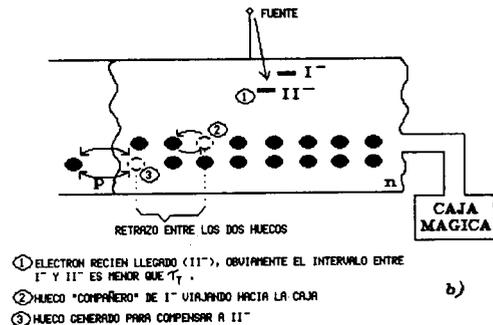
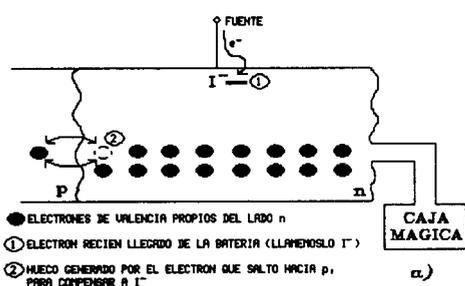


FIGURA 3
INTERPRETACION DE UN INCREMENTO DE CORRIENTE EN LA BASE

5. REPRESENTACION REAL DEL DISPOSITIVO

Tratemos ahora de interpretar lo que está ocurriendo en el dispositivo completo. En este análisis, vamos a prescindir de los flujos de electrones de conducción que pueden ocurrir cuando las cargas intentan ir de p hacia n y de n hacia p*. Luego agregaremos estos fenómenos y estudiaremos sus consecuencias en el dispositivo real.

Todo el proceso lo iniciaremos con la llegada de una serie de electrones por el terminal que une a n con la batería, es decir, estamos suponiendo que τ' cumple con la desigualdad mostrada en 3. Ver la **Figura 4**, en la cual vamos a suponer que sólo llegan dos electrones por el terminal del lado n (I', II'), y veremos lo que sucede asumiendo que $\tau/\tau_T=2$. ¡Ojo pues!, porque como se requiere seguir cada secuencia, necesitamos la colaboración del lector, así como su malicia.

Resultado del experimento:

Dos electrones que entraron por B (I_B).
Seis electrones que salieron por E (I_E).
Cuatro electrones que entraron por C (I_C).

$$I_A = I_B + I_C \quad (6)$$

NOTA: Recuerde que la corriente I_B no es sólo causada por dos electrones que llegaron (I' y II'). Es evidente que más electrones van a llegar, pero nuestros ojos sólo "mirarán" lo que sucede con los dos electrones mencionados (¿por qué? ¡Obviamente por sencillez!).

En los dibujos de la **Figura 4** se observa paso a paso el efecto transistor. En ella hemos representado los electrones de Valencia pertenecientes a átomos neutros, como esferas negras (●), y la ausencia de éstos, o sea los huecos, como esferas punteadas rayadas (○).

El fenómeno completo del efecto transistor, puede verse como dos corrientes de carga "que no saben ninguna de las dos, que la otra existe":

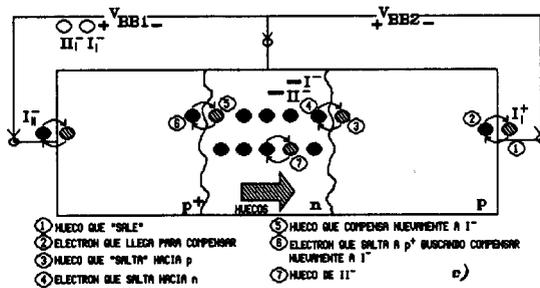
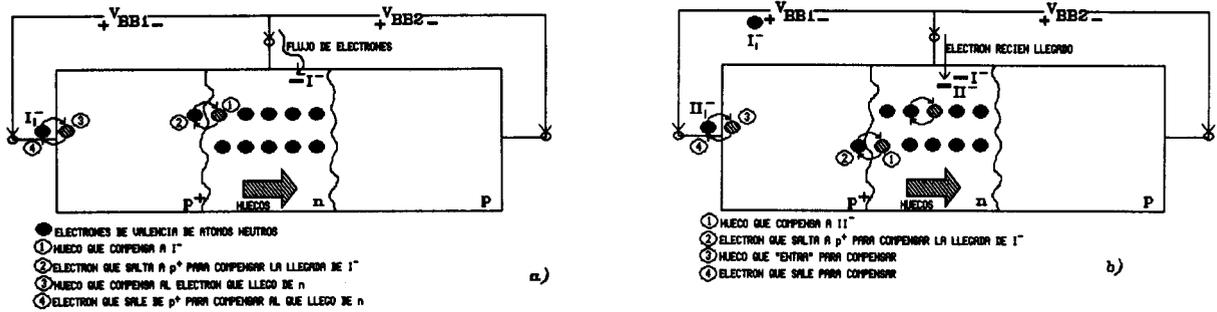
La corriente de electrones de Valencia de p hacia n, es debida a la polarización inversa de V_{BB2} . Cuando los electrones llegan a los huecos de n, pasan a pertenecer a la estructura de este material. Podríamos pensar que el lado n reaccionaría,

como en cualquier unión p-n inversa, expulsando el exceso de carga por su terminal. Sin embargo, dicho material está "sufriendo" una tremenda atracción por la polarización directa de V_{BB1} , y sus electrones de Valencia (propios y recién llegados) están desplazándose y brincando hacia el material p*, tratando de llegar al borne positivo de V_{BB1} .

Como se observó en la figura anterior, cuando los electrones salen del borne negativo de V_{BB1} intentando crear la corriente de polarización directa esperada, el efecto de desbalance de cargas que crean en n es solucionado mucho más rápido por el lado de la unión de n con p. Creando confusión en la corriente que hemos llamado I_B . La zona de p* lo único que hace es recibir cuanto carga de exceso viene de n, debida tanto a I_B como a I_C y la llamamos I_E . Se podría pensar que I_E es extraña debido a que la corriente directa que se intenta establecer con I_B es mucho más pequeña que ella. Lo que ésta no sabe es que existe una corriente I_C debida a una polarización inversa distinta, que se está encargando de crear esa confusión. En la explicación que acabamos de realizar, es importante notar que el movimiento de huecos en n, desde la frontera con p* hasta el límite con p, es debido al movimiento de electrones de Valencia, propios de este lado, y es causado por la polarización directa de V_{BB1} y la inversa de V_{BB2} . Si hiciéramos una sumatoria de voltajes, ambas baterías se estarían sumando y sería como si un electrón de p es empujado hacia n, primero por V_{BB2} , y una vez en n, es impulsado hacia p* por V_{BB1} , terminando así el recorrido, en el cual, la función de la corriente de electrones llamada I_B es "reponer" las cargas que recombinan cuando pasan por la zona central de material n.

6. CORRIENTES MENORES EN EL EFECTO TRANSISTOR

En el análisis que hemos hecho del efecto transistor, no hemos tenido en cuenta dos flujos posibles de electrones de conducción, que ocurren en las uniones p*-n y n-p. Se suponía que estos flujos eran muy pequeños comparados con las corrientes por la banda de Valencia, debido a la diferencia de dopajes en el caso de la unión p*-n, y a la existencia de gran cantidad de huecos en n, para la situación en la unión n-p. Sin embargo, para tener conciencia de todo el dispositivo es necesario evaluar cada uno de estos efectos. Su evaluación puede hacerse por separado puesto que son generados por efectos independientes.



Un paréntesis: esperamos que la filosofía y la nomenclatura se esté entendiendo, porque para no complicar los dibujos evitaremos los "diálogos" explicativos de cada movimiento de cargas. Sigamos entonces:

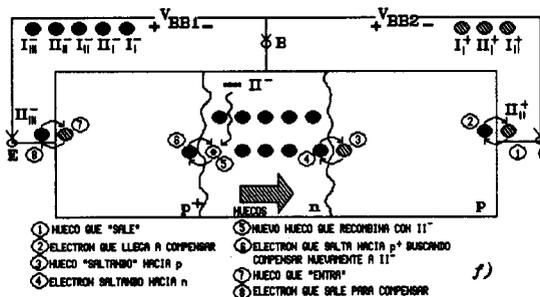
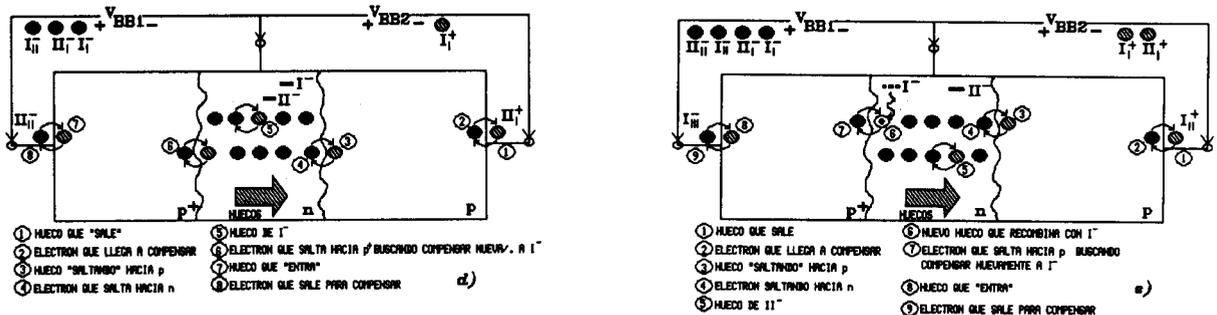


FIGURA 4
MOVIMIENTO DE CARGAS EN UNA UNION P⁺ - N - P

Veamos el caso del flujo en p⁺-n: Cuando un electrón entra al material n procedente de la batería (I_B) (ya sabemos que debe ser de conducción por la naturaleza del cristal tipo n) genera un exceso de carga que se soluciona con la expulsión de un electrón hacia p⁺. Si esta expulsión es por Valencia se generará un hueco que será aprovechado por las cargas que vienen desde p. Pero si se repele hacia p⁺ un electrón de conducción, no se genera hueco en n y por tanto se cumpliría el proceso normal en un material de este tipo. Es decir, si entra una carga, ésta será de conducción, y si sale, no deja hueco porque también es de conducción (recuerde los apartes de capítulos anteriores sobre como son las corrientes normalmente en un cristal tipo n y en uno tipo p). En resumen, si el electrón de exceso es expulsado por conducción, la corriente que llamamos I_C se beneficia y, por tanto, el electrón que llegó a n procedente de la batería no producirá efecto transistor, es una carga que se desperdicia. En este caso, no se puede hablar de relación entre τ y τ_T porque no habrá recombinación entre electrón y hueco, debido a que éste último no fue creado en el proceso de expulsión hacia p⁺. En otras palabras: "un electrón entró a n, un electrón salió de allí y nadie notó!". Como se observa, este flujo por conducción es indeseable en un transistor real porque esos electrones desperdiciados de la corriente I_B , no cumplen la relación τ/τ_T que da origen a la corriente I_C y, por tanto, son considerados como corrientes de pérdida.

En el flujo de P a N, el fenómeno es un poco distinto, veamos: Cuando un electrón entra al material p procedente de la batería, éste expulsará un electrón hacia n. De la forma en que esto se ejecute dependerá el éxito en el efecto transistor. Si el salto es por Valencia, tendremos el fenómeno deseado, pero si el material p repele hacia n un electrón de conducción, éste pasará a formar parte de los electrones libres propios de este material y su función será por tanto, engrosar las filas de las cargas que esperan un tiempo τ para recombinar (como los electrones II y I de la Figura 4). Nótese que en este caso, éste tipo de cargas en p no tienen que esperar a que el hueco en n esté "cerquita" de la unión porque no necesitan de él (del hueco) para saltar hacia dicho material. Como se observa, estos electrones pasarán a formar parte de las cargas de conducción propias del material n, las cuales se recombinan cada τ segundos. Obviamente, no tendría sentido afirmar que toda la corriente de p hacia n está conformada por electrones de conducción, cuando se tiene la certeza que el lado n se deshace del

exceso de carga hacia p⁺ usando la banda de Valencia.

Sabemos que este último método originará gran cantidad de huecos en n, lo cual hará que la corriente de p hacia éste sea en su mayoría de electrones de Valencia. Lo anterior significa que para que el flujo de p a n sea por conducción, es necesario que el de n hacia p⁺ también sea de esa misma naturaleza, lo cual anularía por completo el efecto transistor, debido a que la corriente I_C sólo tendría la dimensión normal de una unión polarizada inversamente, como resultado de la ausencia de huecos extra en el material n. Un flujo de electrones que no hemos considerado ni mencionado hasta ahora es el que se verifica entre las regiones p y n por la polarización inversa, y tiene lugar cuando los electrones de Valencia del lado p, saltan hacia los huecos "naturales" del lado n (es decir, los que no son propios del material y no tienen nada que ver con los huecos creados en la unión con la región p⁺). Este flujo, aunque engrosa la corriente que entra al lado p, no puede considerarse controlado por la corriente que entra al lado n, es decir, no pertenece al flujo de huecos que están saliendo de p⁺ y que luego de cruzar n llegan a p. Por tanto, no se puede incluir en las fórmulas de amplificación dadas en el análisis que sigue a continuación, lo que lo convierte en un flujo de "pérdida", a pesar de estar conformado por huecos.

En la fabricación de un transistor, se tratan de evitar estos flujos indeseables incrementando la diferencia de dopajes entre el material p⁺ y el lado n y haciendo este último más estrecho con el fin de disminuir el tiempo de tránsito τ_T . Sin embargo, estas corrientes de pérdida siguen existiendo, si bien, en un porcentaje muy pequeño que no afecta el funcionamiento adecuado del dispositivo.

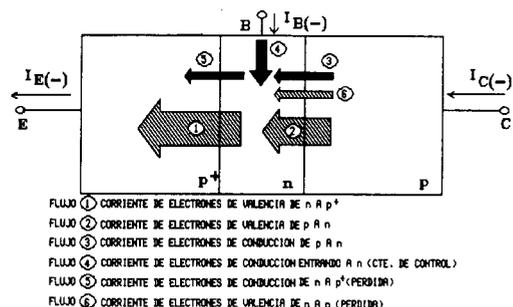


FIGURA 5
FLUJOS DE CORRIENTES DE ELECTRONES EN UN TRANSISTOR P - N - P

En la Figura 5 vemos todas las corrientes que se dan para un transistor p-n-p. En esta figura se debe tener en cuenta que la corriente de huecos está representada en los flujos 1 y 2, pero tendría sentido contrario. También se observa que las corrientes en los terminales cumplen con las siguientes expresiones:

$$I_E (-) = \text{flujo 1} + \text{flujo 5} \quad (7)$$

$$I_B (-) = \text{flujo 4} \quad (8)$$

$$I_C (-) = \text{flujo 2} + \text{flujo 3} \quad (9)$$

Por tanto:

$$r_i = 0 \Rightarrow 1 + 5 = 4 + 3 + 2 \quad (10)$$

Como todas las corrientes mostradas tienen naturaleza negativa, por ser debida a electrones (por eso se les coloca un signo menos), los sentidos verdaderos en los terminales del dispositivo son contrarios a los mostrados en la Figura 5, tal como se observa en la Figura 6, en donde se muestra que la sumatoria de corrientes obviamente se sigue cumpliendo:

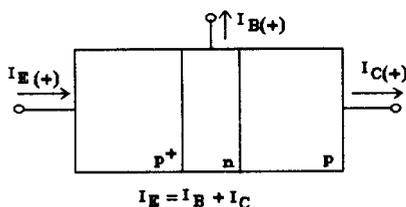


FIGURA 6
CORRIENTES POSITIVAS EN UN TRANSISTOR
P - N - P

Tal como debe estar sospechando el lector, el transistor n-p-n será dejado como ejercicio para el lector curioso (y que no tenga nada mejor que hacer). Sin embargo, su solución es incluso más sencilla, debido a que el flujo principal es de electrones de conducción, lo cual hace que sea más fácil manipular su análisis que cuando se trata de huecos como en el caso de su primo el p-n-p.

BIBLIOGRAFIA

Coblentz, Abraham, Owens, Harry L., "Transistor Theory and Applications". Primera Edición, New York, McGraw - Hill Book Company Inc., 1955.

Dealtry Bevitt, William, "Transistor Handbook", New York, Prentice -Hall, Inc., 1957.

Fontaine, G. "Los transistores en régimen de impulsos", Madrid, Biblioteca Técnica Philips, 1973.

Kiver, Milton S., "Transistors", Tokyo, McGraw - Hill Book Company, 1962.

Malvino, Albert Paul. "Principios de Electrónica". Tercera Edición. México, McGraw-Hill, 1986.

Nanavati, Rajendra P. "Semiconductor Devices: BJTS, JFETS, MOSFETS and Integrates Circuits", New York, Intext Educational Publishers, 1975.

Streetman, Ben G., "Solid State Electronic Devices", New Jersey, Prentice-Hall Inc. 1972.

Willman, Jacob y Halkias, Christos, C. "Electrónica Integrada". Séptima Edición. New York, McGraw - Hill Book. 1986.