

1- ELEMENTOS DE MICROELECTRÓNICA

1.1- Cristal PN sin Excitar

El cristal de tipo P se caracteriza por poseer una gran cantidad de huecos móviles, y un numero limitado de electrones libres, permaneciendo el conjunto eléctricamente neutro; mientras que el tipo N contiene muchos electrones libres, y numero pequeños de huecos quedando eléctricamente neutro. Al realizar la unión de estos cristales, el exceso de electrones libres del cristal N tiende a difundirse hacia el cristal P a través de la unión.

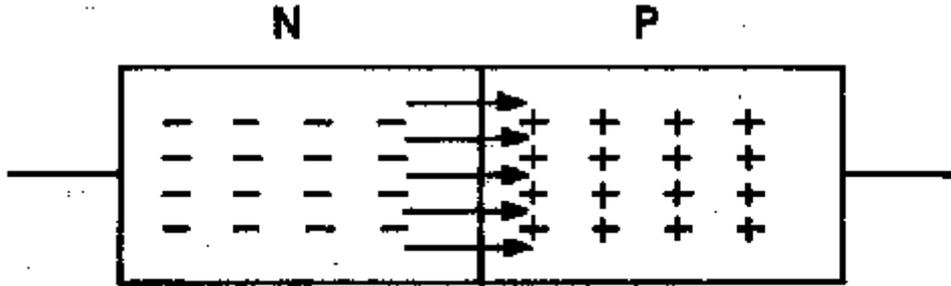
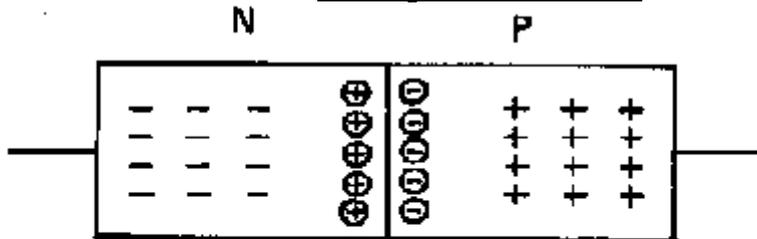


Figura 1 Fenómeno de difusión en un cristal PN.

Cuando un electrón abandona el cristal N, en su lugar aparece una carga eléctrica positiva: Ion positivo. Cuando este electrón penetra en el cristal P se recombina con un hueco, creando una carga negativa: ion negativo. El resultado es que cada vez que un electrón libre de la zona N se difunde a través de la unión hacia la zona P, se forma una pareja de cargas eléctricas de diferente signo. En la figura 2 se muestra mediante un signo positivo + encerrado en un círculo, los iones + creados en la zona N por efecto de la difusión, y con signo negativo - encerrado en un círculo los iones negativos - de la zona P.



Iones positivos y negativos creados por la difusión en la unión PN.

Figura 2

El resultado de este proceso de recombinación es que en la zona de la unión se produce una escasez o agotamiento de electrones libres y de huecos, formándose la capa de agotamiento. Al mismo tiempo, según va aumentando la acumulación de iones en ambas zonas, aparece una diferencia de potencial eléctrico entre las mismas, llamada Barrera de Potencial, que se opone a que continúe la difusión de electrones libres de la zona N a la P, alcanzándose definitivamente un estado de equilibrio en el momento en que las fuerzas que empujan al fenómeno de la difusión son contrarrestadas por la oposición creciente generada por las cargas eléctricas que aparecen en ambos cristales. Así por ejemplo en la figura 3 cada vez que un electrón libre del cristal N se difunde, a través de la capa de agotamiento, hacia el cristal P se encuentra con una barrera de iones negativos que tienden a repelerlo. Mientras la energía de dicho electrón libre sea suficiente, éste podrá superar la barrera de potencial, creando un nuevo ion negativo al caer en un hueco. El aumento de los iones negativos en la zona P provoca un aumento de las fuerzas de repulsión cada vez que un electrón libre se difunde hacia la misma. Cuando se alcanza un equilibrio entre ambas tendencias, la difusión de electrones a través de la unión se detiene.

La tensión formada por la barrera de potencial depende de la temperatura de la unión y de la sustancia empleada para la fabricación del semiconductor. Por ejemplo para una temperatura de 25°C la barrera de potencial para diodos de silicio es de 0,7 volt y de 0,3 volt para los de germanio. (Principios Fundamentales de Electrónica – Pablo Alcalde S. Miguel Edit. Paraninfo, 1995).

1.2- Semiconductor Intrínseco (Microelectrónica – Millman- Grabel Ed.Mc Hill Inc. Edit. Hispano Europea S.A. 1991)

Los tres semiconductores más empleados son el silicio, el germanio y el galio. La estructura cristalina del silicio consiste en una repetición regular tridimensional de una célula unitaria en forma de tetraedro con un átomo en cada vértice. La figura 4 es una representación simbólica de esta estructura en dos dimensiones. Los átomos de Silicio tienen 14 electrones, 4 de los cuales son de valencia, luego el átomo es tetravalente

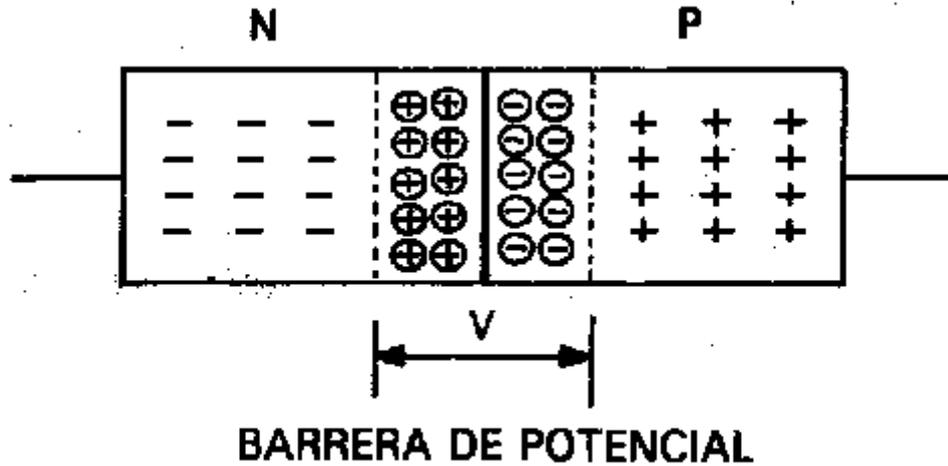


Figura 3 Barrera de potencial en una unión PN.

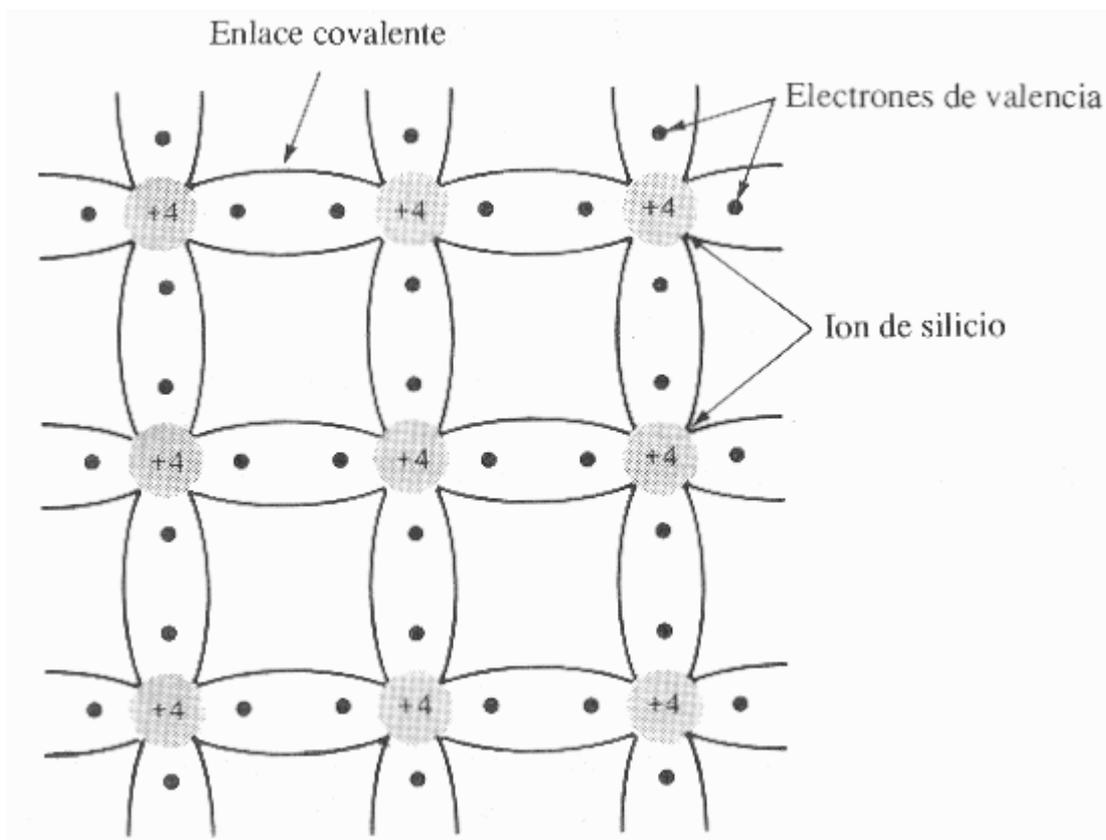


Figura 4 Representación Bidimensional de un Cristal de Silicio

El núcleo iónico inerte del silicio tiene una carga + 4 medida en unidades de carga electrónica. La fuerza de enlace entre átomos vecinos es el resultado del hecho de que cada electrón de valencia de un átomo de silicio es compartido por uno de sus 4 vecinos más próximos. El enlace covalente se representa en la figura 4 por las dos líneas que unen cada ion con cada uno de sus vecinos. Los electrones de valencia sirven de unión de un átomo con el siguiente con los que resulta que estos electrones quedan fuertemente unidos al núcleo. A pesar de la disponibilidad de 4 electrones de valencia, pocos de ellos están libres para contribuir a la conducción.

1.3- El Hueco

A temperatura muy baja digamos 0°K la estructura ideal representada en la figura 4 es bastante aceptable y el cristal se convierte en un aislante ya que no hay disponible ningún portador libre de electricidad. A temperatura ambiente algunos de los enlaces covalentes se rompen debido al suministro de energía térmica al cristal lo que posibilita la conducción. La situación queda representada en la figura 5.

Un electrón que normalmente forma parte de un enlace covalente se ha representado fuera del enlace y por lo tanto libre para circular al azar por el cristal. La energía E_G necesaria para romper el enlace covalente esta representada por un pequeño círculo en la **figura 5** y tal enlace covalente incompleto se denomina Hueco. La importancia del hueco radica en que puede servir de portador de electricidad comparable en su efectividad al electrón libre

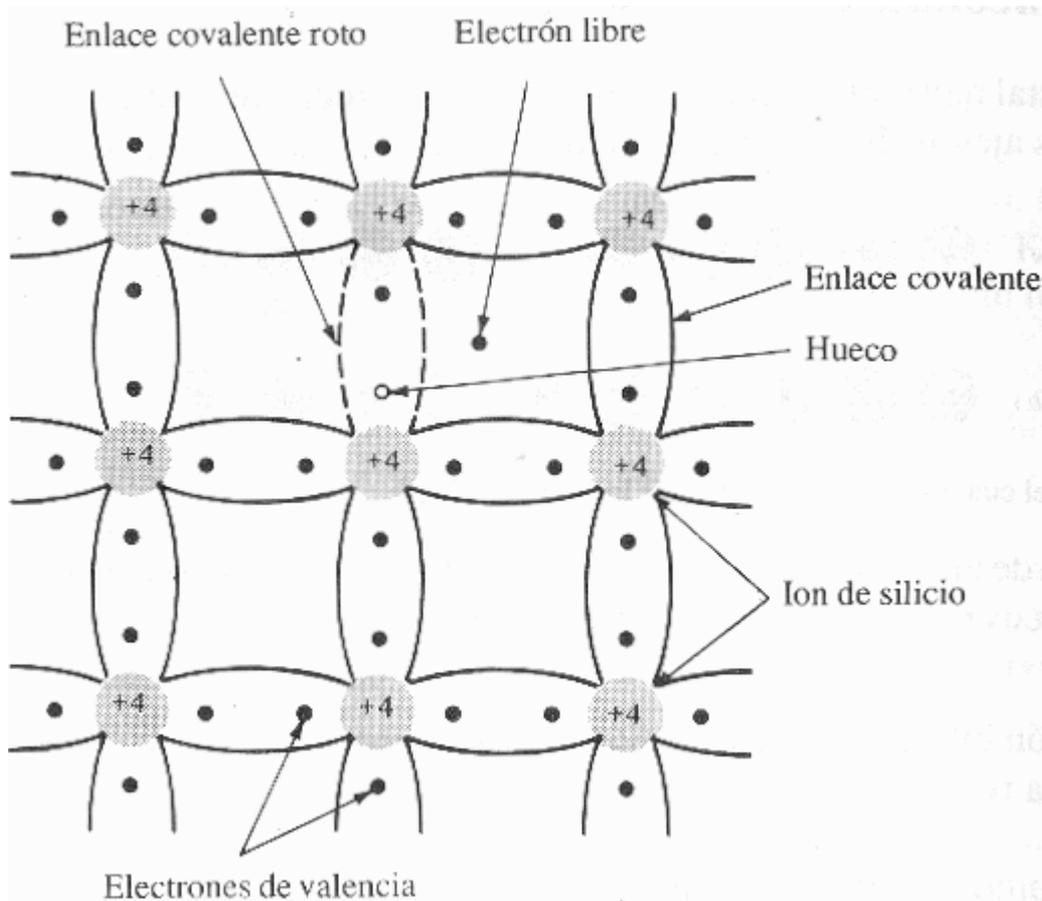


Figura 5. Cristal de Silicio con un Enlace Covalente Roto

El mecanismo por el cual los huecos contribuyen a la conductividad se explica cualitativamente de la siguiente forma: Cuando un enlace está incompleto de forma que haya un hueco, es relativamente fácil que un electrón de valencia de un átomo vecino abandone el enlace covalente para llenar el hueco. Un electrón que deja su enlace para llenar un hueco deja a su vez otro hueco en su posición inicial. El hueco se mueve efectivamente en dirección contraria al electrón. Este hueco en esta nueva posición puede ser llenado por un electrón de otro enlace covalente y por tanto el hueco se desplazará a un lugar en sentido opuesto al movimiento del electrón. He aquí un nuevo mecanismo de conducción de la electricidad que no supone electrones libres. En la figura 6 se representa esquemáticamente este fenómeno: un círculo con un punto representa un enlace completo y un círculo vacío representa un hueco. La **figura 1.6(a)** representa una sucesión de 10 iones con un enlace roto, o hueco en el ion 6. Imaginemos ahora que un electrón del ion 7 pasa al hueco del 6, resultando la configuración de la **figura 1.6(b)**. Si comparamos esta figura con la **figura 1.6(a)**, se ve como si el hueco de esta última hubiera pasado del ion 6 al 7 moviéndose hacia la derecha, y esta observación determina que el movimiento del hueco en una dirección significa el traslado de una carga negativa a igual distancia pero en sentido opuesto. En cuanto a la circulación de corriente eléctrica, los huecos se comportan como cargas positivas + de igual valor que las del electrón. Podemos considerar que los electrones son entidades físicas cuyo movimiento constituye un flujo de corriente. El argumento de que los huecos equivalen a portadores de cargas positivas + libres puede justificarse con la mecánica cuántica.

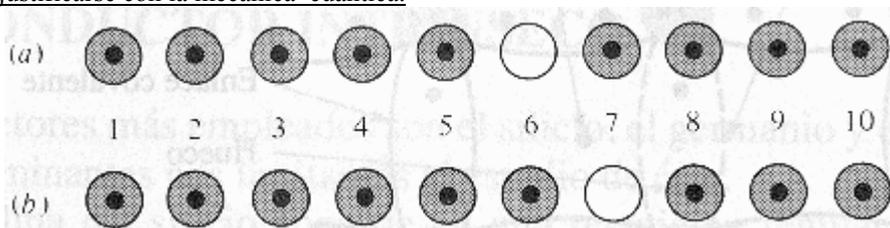


Figura N° 1.6 Mecanismo por el cual un Hueco Contribuye a la Conductividad

1.4- Conducción en Semiconductores Intrínsecos

La estructura del cristal representada en las figuras 4 y 5 supone una muestra de Silicio puro, es decir que no contenga átomos ajenos. Estos cristales puros constituyen un semiconductor Intrínseco. Como se ve en la figura 5 la rotura de un enlace covalente se traduce en un electrón libre y un hueco. En consecuencia la concentración de huecos p y la de electrones n deben ser iguales $p = n = n_i$ siendo n_i la concentración intrínseca. La agitación térmica genera nuevos pares electrón-hueco, mientras desaparecen otros por la recombinación. El valor de n_i depende de la temperatura. Tanto los huecos como los electrones participan en el proceso de conducción. Debido a que los mecanismos por los que se mueven los huecos y los electrones en el cristal difieren entre sí, la movilidad de estos portadores son distintos. Para distinguir los valores de huecos y electrones se emplean los subíndices p y n. Estos

portadores se mueven en direcciones opuestas en un campo eléctrico, pero como son de signo eléctrico contrario, ambas corrientes son en el mismo sentido.. La densidad de corriente J resultante de un campo eléctrico E se deduce de la ecuación

$$J = q \cdot n \cdot v_d \quad ; \quad J = q \cdot n \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (1)$$

en donde:

σ = conductividad en $[\Omega \cdot m]^{-1}$

n = concentración de electrones

μ = movilidad en $[cm^2 / volt \cdot seg]$

v_d = velocidad de desplazamiento.

Dicha ecuación para ambos portadores resulta $J = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot E = \sigma \cdot E \left[\frac{A}{m^2} \right]$ (2)

La conductividad es $\sigma = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) [\Omega \cdot m]^{-1}$ (3)

En un semiconductor intrínseco $p = n = n_i$ la ecuación (3) se convierte en

$$\sigma_i = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) [\Omega \cdot m]^{-1} \quad (4)$$

La tabla 1 da los valores de algunas propiedades importantes del Silicio. Obsérvese que el silicio tiene del orden de 10^{22} átomos / cm^3 , mientras que a temperatura ambiente de 300°K es $n_i = 10^{10} cm^3$. De aquí que solo un átomo de entre 10^{12} de ellos contribuya con un electrón libre y un hueco debido a la rotura de enlace covalente.

Tabla 1 Propiedades del Silicio Intrínseco

Propiedad	Valor
Numero Atómico	14
Peso Atómico	28,1
Densidad (g/cm^3)	2,33
Permitividad Relativa (constante dieléctrica)	11,9
Átomos / cm^3	$5,0 \times 10^{22}$
Energía E_{GO} a 300°K (electrón/volt)	1,21
Energía E_G a 300°K (electrón / volt)	1,12
Resistividad a 300°K ($\Omega \cdot cm$)	$2,30 \times 10^5$
Movilidad electrones μ_n a 300°K [$cm^2 / volt \cdot seg$]	1500
Movilidad de Huecos μ_p a 300°K [$cm^2 / volt \cdot seg$]	475
Concentración intrínseco a 300°K (cm^{-3})	$1,45 \times 10^{10}$
Constante difusión electrones D_n a 300°K (cm^2 / seg)	34
Constante difusión huecos D_p a 300°K (cm^2 / seg)	13
de "VSLI Technology" McGraw-Hill Book Company, NY 1983	

Ejemplo

Una barra de silicio intrínseco tienen 3 mm de longitud y una sección recta rectangular de 50 x 100 micras. Determinar la intensidad del campo eléctrico E en la barra y la tensión a través de ella cuando circula una corriente de 1 μA , a temperatura de 300°K.

Solución

La intensidad de campo se puede deducir de la densidad de corriente y de la conductividad,

$$E = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{S} \times \frac{1}{\sigma} = \frac{I}{S} \cdot \rho [V / m]$$

En tabla 1 los valores de ρ resulta

$$E = \frac{10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \times 2,30 \times 10^5 \times 10^{-2} = 4,6 \times 10^5 \left(\frac{V}{m} \right) = 4,6 \times 10^3 \left[\frac{V}{cm} \right]$$

La tensión a través de la barra es:

$$V = E \cdot l$$

donde l = longitud de la barra en metros,

$$V = 4,6 \times 10^5 \times 3 \times 10^{-3} = 1380v$$

El resultado obtenido en el ejemplo indica que para obtener una pequeña corriente de 1 μA se necesita una tensión alta. Esto es debido a que la concentración de portadores intrínsecos se parece a un aislante que a un conductor. De modo que los semiconductores intrínsecos no son adecuados para dispositivos electrónicos. Es necesario para su empleo aumentar la concentración de portadores.

1.5- Semiconductores Extrínsecos – Dopado

Para aumentar el número de portadores el procedimiento es introducir en un semiconductor intrínseco una pequeña cantidad de impurezas controlada. La adición de impurezas, átomos trivalentes o pentavalentes, forma un semiconductor Extrínseco ó Dopado. Cada tipo de impureza forma un semiconductor con una clase de portadores predominante. El nivel de dopado es del orden de 1 átomo de impurezas por cada 10^6 a 10^8 átomos de silicio. Las propiedades físicas y químicas son esencialmente las mismas del silicio y solo varían las eléctricas

1.5.1- Variaciones en las Propiedades del Silicio

La conductividad de un semiconductor dada en la ecuación (3) depende de la concentración de huecos y electrones y de la movilidad. Los sistemas semiconductores están sometidos a diversas temperaturas de trabajo, que provocan variaciones en los parámetros.

1.5.2- Variación de la Tensión de Ruptura por el Dopado

La tensión de ruptura de diodos integrados esta relacionada con la concentración de impurezas. La tensión de ruptura varía típicamente entre 6 v para el emisor altamente impurificado hasta 100v para el sustrato con pocas impurezas. La menor tensión de ruptura corresponde a la juntura base-emisor y la mayor a la juntura colector-sustrato.

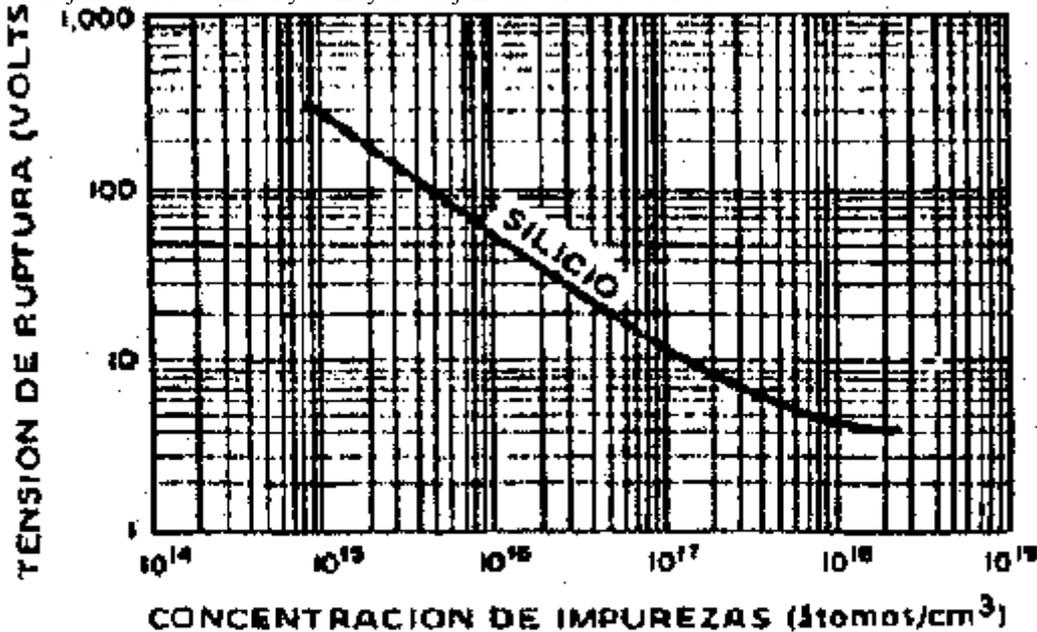


Fig. Tensión de ruptura del silicio como función de la concentración de impurezas

1.5.3- Concentración Intrínseca

En un semiconductor intrínseco la densidad de pares hueco-electrón aumenta con la temperatura. Teóricamente la concentración intrínseca n_i varía con la temperatura T según la ecuación

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_{GO}}{K \cdot T}} \quad (5)$$

donde E_{GO} = energía para romper un enlace covalente a 0°K en (electrón/volt)

K = constante de Boltzmann en [electrón-Volt / °K].

A_0 = constante independiente de T°K.

En los semiconductores extrínsecos el aumento de n_i^2 con la temperatura afecta también a la densidad de cargas.

1.6- Movilidad

Dentro del margen de temperatura entre 100 y 400°K la movilidad de electrones y huecos varía proporcionalmente a T^{-m} . Para el silicio $m = 2,5$ para los electrones, y $2,7$ para los huecos. La movilidad μ decrece con la temperatura porque hay mas portadores y estos son más activos a temperaturas altas. Cada uno de estos factores favorece el número de colisiones y μ decrece. La movilidad es también función de la intensidad del campo eléctrico y del nivel de dopado. En un silicio tipo n, μ es constante a una temperatura dada solo si $E < 10^3$ V/cm, μ_n es inversamente proporcional a E y la velocidad se acerca a los 10^7 cm/seg que es la velocidad de saturación. Entre 10^3 y 10^4 V/cm, μ_n varía como $E^{1/2}$.

1.7- Conductividad σ

La conductividad de un semiconductor intrínseco crece al aumentar la temperatura porque el aumento de pares hueco-electrón es mayor que el descenso de su movilidad. En un semiconductor extrínseco y dentro del campo entre los 100 y 600°K el número de portadores mayoritarios es casi constante, pero la menor movilidad hace que la conductividad decrezca con la temperatura.

1.8- DIFUSIÓN

Además de por una corriente de conducción, el transporte de cargas en un semiconductor puede realizarse por un mecanismo denominado difusión, lo que normalmente no sucede en los metales. Es posible que la concentración de partículas en un

semiconductor no sea uniforme. Tal como se indica en la figura 7 la concentración de huecos p varía con la distancia x en el semiconductor y existe un gradiente de concentración dp/dx en la densidad de portadores. La existencia de ese gradiente implica que si se traza una superficie imaginaria indicada con trazos en la figura 7, la densidad de huecos en un lado de tal superficie es mayor que la del otro lado. Los huecos tienen un movimiento aleatorio motivado por la energía térmica. De acuerdo con esto los huecos se moverán continuamente adelante y atrás a través de esa superficie y cabe esperar que en un cierto intervalo de tiempo, mayor número de ellos crucen la superficie desde el lado de mayor densidad al de menor que no en sentido contrario. Este transporte de huecos constituye una corriente en el sentido positivo $+$ de x . Obsérvese que este transporte de cargas no es el resultado de la repulsión mutua entre cargas del mismo signo sino que es el resultado de un fenómeno estadístico. Esta difusión es exactamente análoga a la que existe en un gas neutro si hay un gradiente de concentración en el mismo. La analogía puede ejemplificarse con el proceso por el cual el aroma de una flor puede extenderse a toda la habitación. La densidad de corriente de difusión de huecos J_p es proporcional al gradiente de concentración, y viene dada por

$$J_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (6)$$

D_p = constante de difusión de los huecos, [m^2 / seg].

En la figura 7 vemos que p decrece al aumentar x , luego dp/dx es negativo y se precisa el signo (-) en la ecuación (6) de forma que J_p será positivo $+$ en la dirección positiva de x . Existe otra ecuación similar para la densidad de corriente de difusión de electrones. Resulta que p es reemplazada por n y el signo (-) por (+) en la ecuación 6.

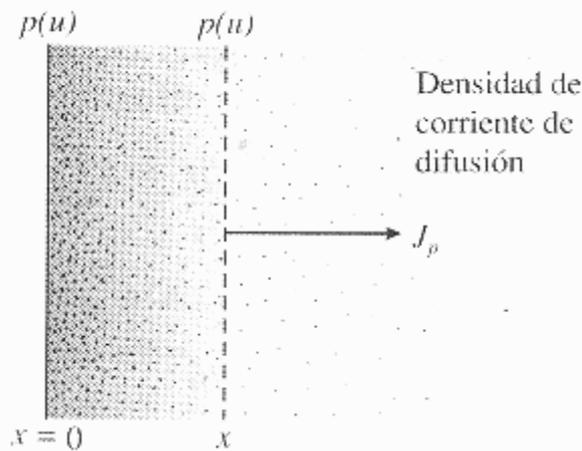


Figura 7 Densidad n Uniforme de Huecos y la Densidad de Corriente de Difusión Resultante

Con las figuras 1; 2 y 7 vimos como se produce la difusión, y veremos como en esa misma zona o región de difusión definimos la **Región de Deplexión**.

1.9- Unión en un Circuito Abierto

Cuando un cristal de semiconductor se dopa se forma una unión PN

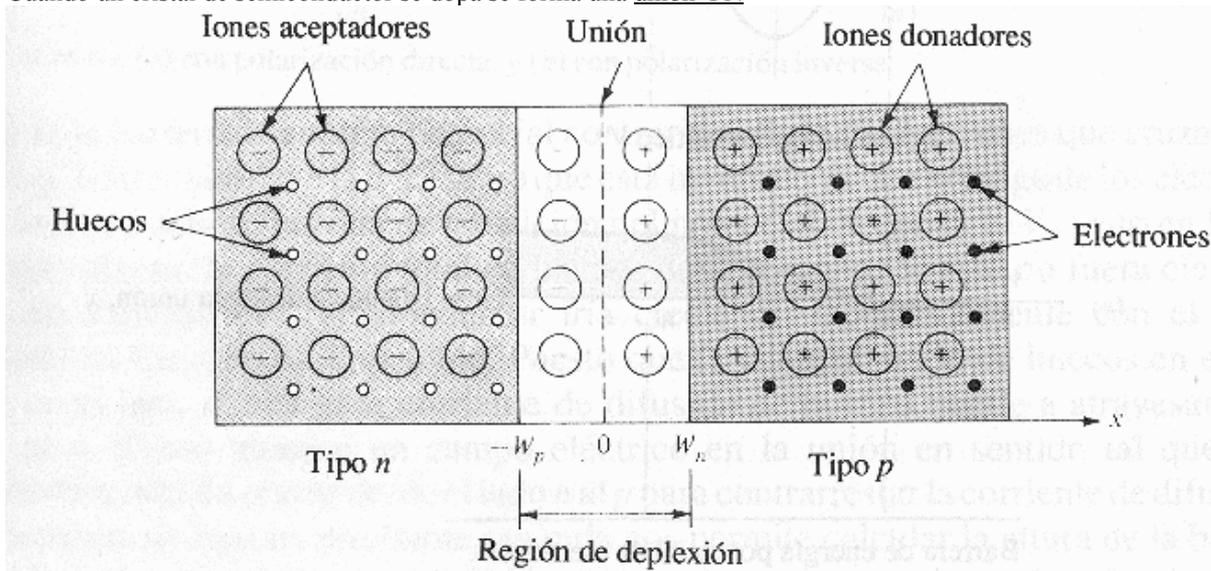
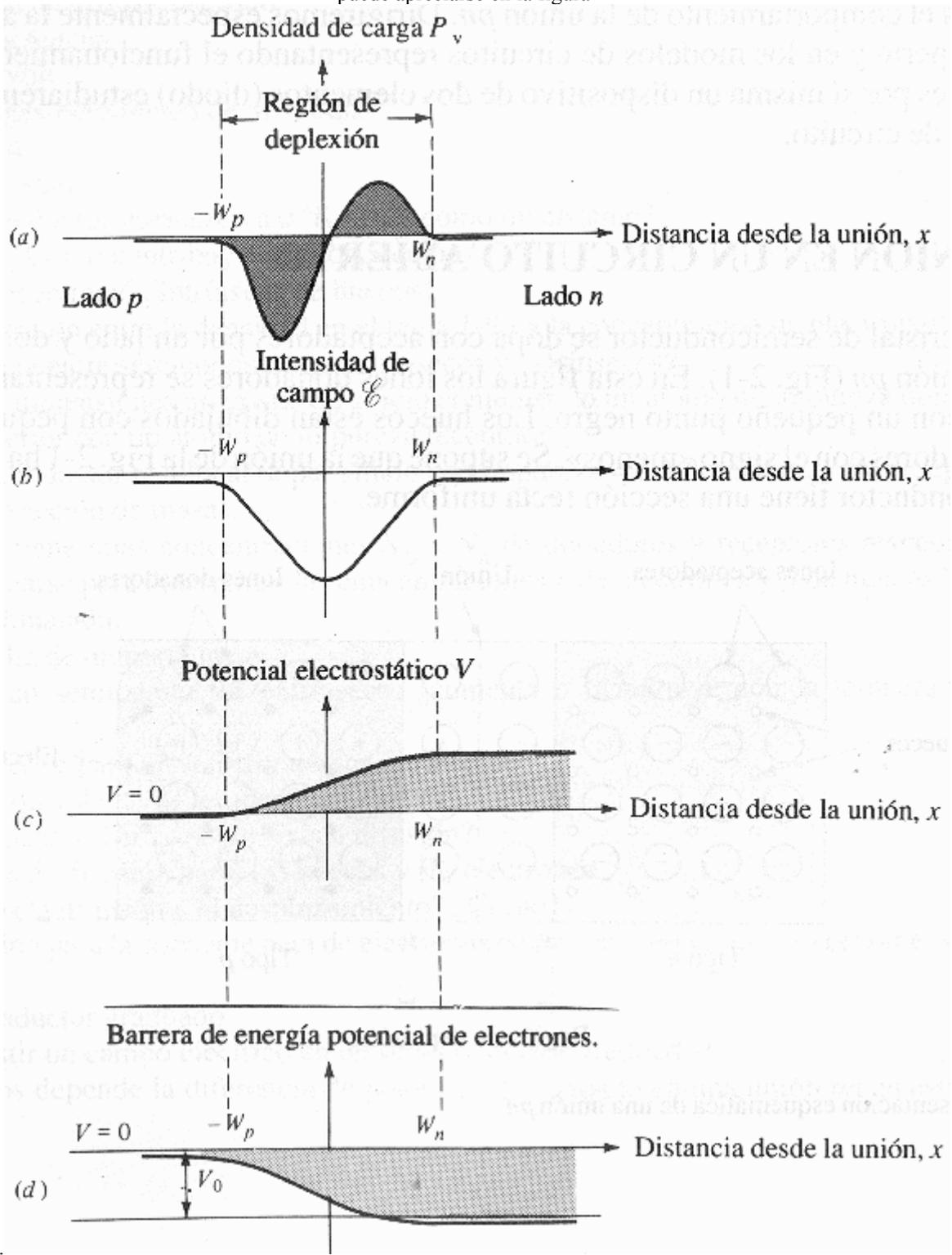


Figura 8 Representación Esquemática de una Unión pn

En la figura 8 los iones donadores se representan con el signo (+) y los electrones con un punto negro. Los huecos están dibujados con círculos pequeños vacíos y los iones aceptadores con el signo (-). Se supone que la unión de la figura 8 ha alcanzado el equilibrio y que el semiconductor tiene una sección recta uniforme.

1.9.1- Región de Carga Espacial

Inicialmente existe un gradiente de concentración a través de la unión lo que hace que los huecos se difundan hacia la derecha y los electrones hacia la izquierda. Vemos que los huecos que neutralizaban los iones aceptadores próximos a la unión en el silicio de tipo p han desaparecido como consecuencia de la combinación con los electrones difundidos a través de la unión. De igual forma los electrones en el silicio de tipo n han combinado con huecos que han cruzado la unión desde el material p. Los iones no neutralizados en las proximidades de la unión se conocen con el nombre de cargas descubiertas y se traducen en una densidad de carga p_v como puede apreciarse en la figura



9a.

Figura 9 (a) Densidad de carga; (b) Intensidad de Campo Eléctrico; (c) Potencial Electroestático; (d) Barrera de Potencial para los Electrones en la Región de Deplexion de una unión pn.

Como la región de la unión no contiene cargas móviles se la denomina región de Deplexión de Carga Espacial o de Transición. El ancho de esta región es del orden de unas pocas décimas de micra (aproximadamente como la longitud de onda de la luz visible). Solo existen portadores fuera de esta región; hacia la izquierda son predominante huecos $p \cong N_A$; y hacia la derecha electrones $n \cong N_D$. De una concentración de cargas no uniformes resulta un campo eléctrico y la diferencia de potencial en la unión. La distribución de carga, que es cero en la unión, forma un dipolo eléctrico, es decir que es negativo en el lado p y positivo en el otro. La forma de la curva de p_v en función de x depende de cómo se gradúa la unión.

1.10.- Efectos Parásitos en Transistores Integrados [1]

Los componentes de CI, como no son dispositivos discretos, interactúan e imponen limitaciones sobre otros componentes. Estas interacciones son previsible en el diseño, pudiéndose utilizarlas ventajosamente.

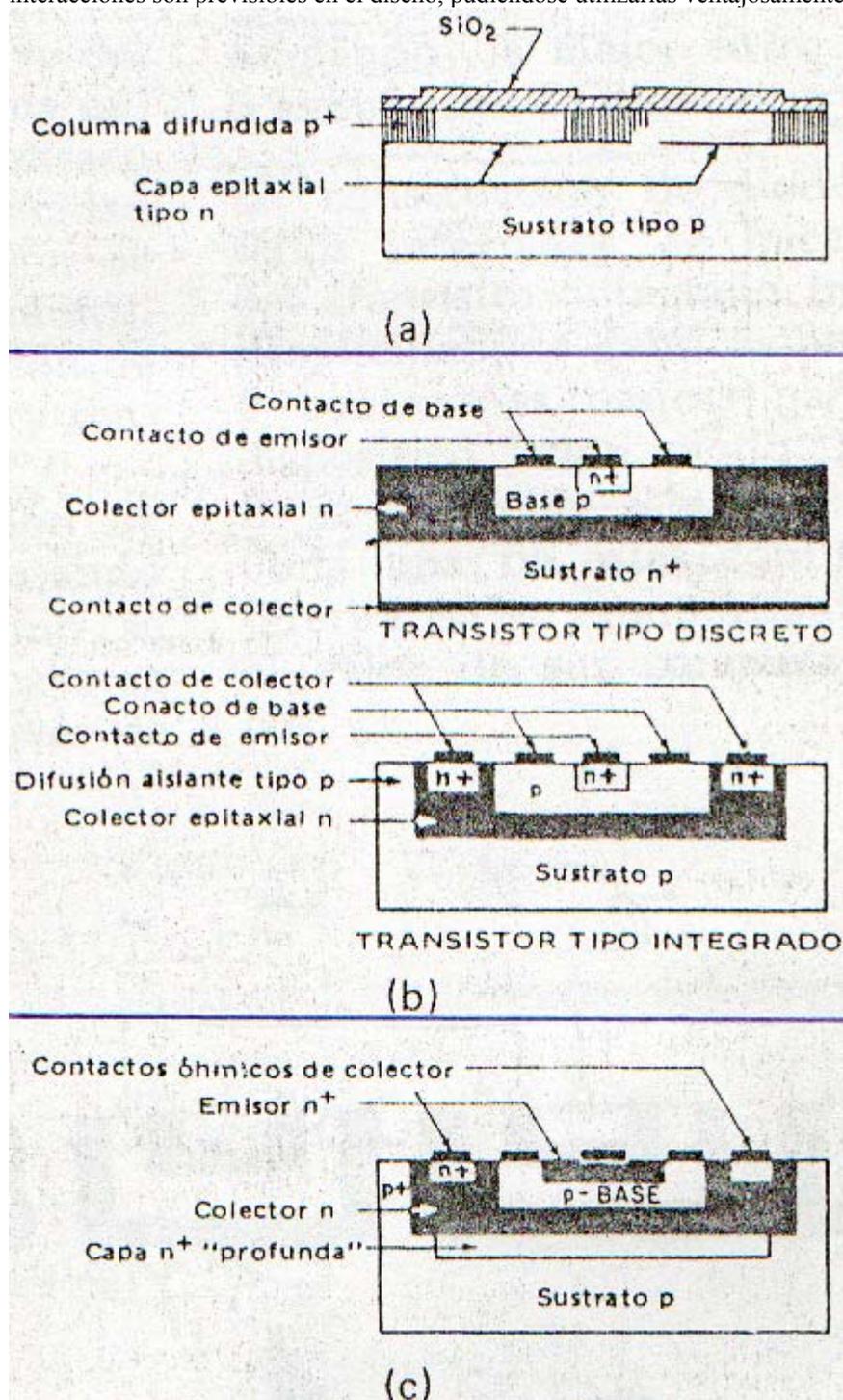


Figura N° 1.10 Aislado dispositivos por medio de la Difusión de Canales (a)

Diferente construcción de TR discretos e Integrados (b)

Efectos aislados usando una capa profunda n⁺ (c)

En la estructura de un circuito integrado se requiere que los elementos constituyentes estén aislados eléctricamente entre sí. Este hecho influye en el diseño y comportamiento de los diodos, transistores, resistores, y capacitores usados en el circuito. Estos dispositivos se aíslan polarizando la estructura de la juntura tal como se muestra en la figura 1.10(a). En la figura 1.10(b) se compara la estructura del transistor integrado con la de un transistor epitaxial discreto convencional. Ambas estructuras son dispositivos de cuatro capas. La mayor diferencia radica en la forma de hacer el contacto con el área del colector. En el caso discreto el sustrato +n es una zona de contacto de baja resistencia ohmica con el colector tipo N, mientras que en el caso integrado es necesario colocar los contactos de colector en la parte superior de la estructura, debido a la aislacion eléctrica entre elementos. esta diferencia estructural hace aparecer dos elementos parásitos característicos de dispositivos integrados.

Elemento Parásito 1: La mayor longitud de camino de colector debido a los contactos en la parte superior, introduce una resistencia serie adicional r_c' , que incrementa la tensión de saturación.

Elemento Parasito 2: La capacidad parásita debida a la juntura en inversa entre el colector y el sustrato, da lugar a una constante de tiempo con r_c' , que reduce f_T . Para reducir a un mínimo esta capacidad y lograr la aislación eléctrica, el sustrato tipo P debe quedar conectado al potencial más negativo del circuito para lograr así la máxima dolarización inversa en el diodo sustrato colector. El valor de esta capacidad parásita varia entre una fracción de pico faradio hasta varios pico faradios, dependiendo de la concentración de impurezas, área de la juntura y tensión aplicada. Es posible reducir la tensión de saturación y aumentar f_T , usando una capa en la figura 1.10©. Esta capa se introduce en el sustrato a través de un proceso de difusión separado antes de hacer crecer la capa epitaxial. Para lograr una capa de baja resistividad se usa una alta concentración de impurezas. En el dispositivo terminado, esta capa queda en paralelo con la resistencia de cuerpo de colector, con lo cual reduce r_c' sin degradar otros parámetros deseados del transistor. Esta técnica permite alcanzar en transistores integrados, valores de tensión de saturación del orden de 100 mV y valores de f_T por encima de 1 GHz.

1.11- Transistores como Diodos

La construcción de diodos en diseños integrados, se hace a partir del transistor integrado básico, por simplicidad de fabricación. Existen 5 conexiones básicas para usar el dispositivo como diodo.

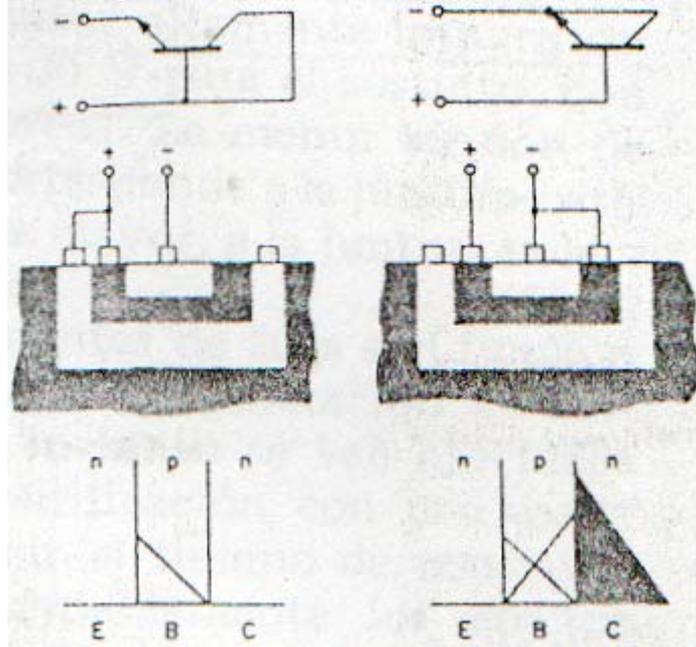


Figura N° 1.11(a) $V_{CB} = 0$; (b) $V_{CE} = 0$

En la figura 1.11 se resumen estas posibilidades. Cada una de estas configuraciones diferirá en su comportamiento y en el valor de sus parámetros eléctricos. El tiempo de conmutación esta vinculado a la distribución de portadores minoritarios. Un diodo no cesa de conducir inmediatamente al conmutarlo de dolarización directa a inversa debido al almacenamiento de portadores minoritarios. Por lo tanto el dispositivo que tenga la menor concentración de portadores minoritarios, como el de la figura 1.11(a), tendrá el tiempo de conmutación más rápido. Se puede enfocar el tema con las distintas curvas como una representación de energía almacenada, por lo tanto la disposición de la figura 1.11(b) es el peor caso. Los tiempos de conmutación varían entre 10 y 100 nseg típicamente. En la mayoría de los casos, estos tiempos de conmutación pueden reducirse aun más, agregando impurezas con oro ó con técnicas de bombardeo, hasta unos pocos nanoseg. En algunos casos, como en los circuitos DTL Lógica Diodo Transistor, son necesarios en los mismos tanto diodos lentos como rápidos.

La tensión de ruptura de diodos integrados esta relacionada con la concentración de impurezas. La tensión de ruptura varia entre 6 volt para el emisor altamente impurificado hasta 100 volt para el sustrato con poca impureza. La menor tensión de ruptura corresponde a la juntura base-emisor, y la mayor a la juntura colector-sustrato. Las corrientes de fuga son función del fenómeno de generación de cargas y por lo tanto se ven afectadas por la impurificación con oro usada para mejorar el tiempo de conmutación. Los efectos son inversos pues a mayor impurificación con oro (tiempo de conmutación más rápido) aumentan las pérdidas. La capacitancia de la estructura de un diodo varia en cada caso, debido a la geometría, concentración de impurezas y tensión aplicada. El margen típico es de 1,5 a 6 pF de capacidad total equivalente terminada. Las características en directa no difieren mucho entre los 5 casos de la figura 1.11. Sin embargo hay que retornar al sustrato tipo P al potencial más negativo del circuito para evitar la conducción en directa en la juntura sustrato-colector. Mas aun la polarización inversa de esta juntura hace mínima su capacidad.

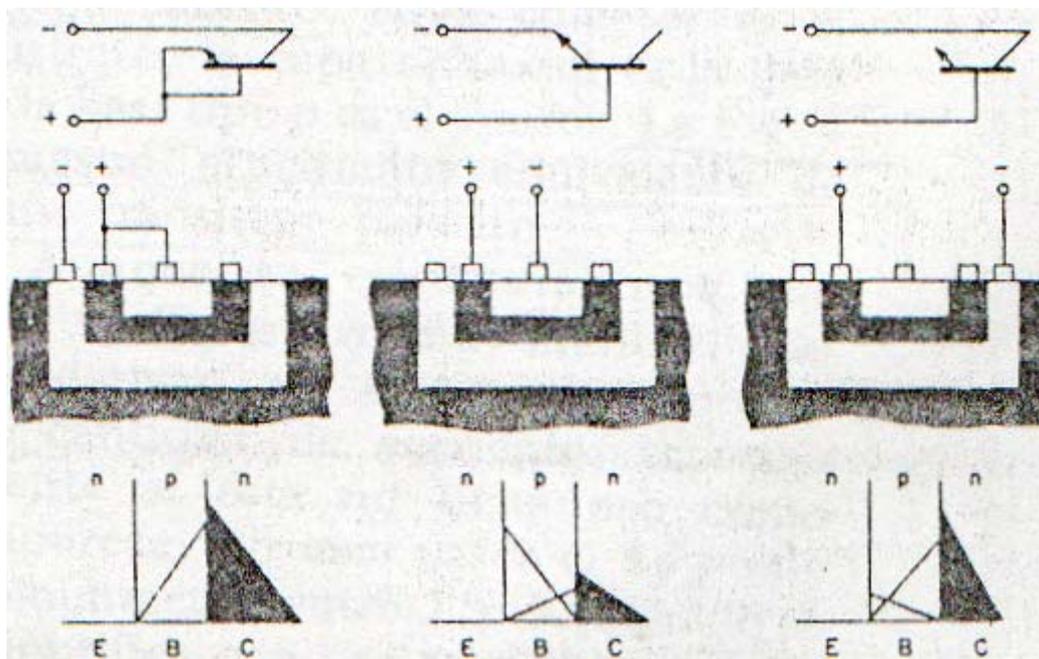


Figura N° 1.11 (c) $V_{BE} = 0$; (d) $I_C = 0$; (e) $I_E = 0$