

UNIDAD 4: TRANSISTORES

Tipos de transistores. Transistor bipolar (BJT). Configuración. Regiones de trabajo. Configuración base común. Configuración emisor común. Transistores unipolares o de efecto de campo. Transistor FET. Regiones de trabajo. Compuertas lógicas. Tecnología bipolar. Tecnología unipolar.

INTRODUCCIÓN

El transistor es, sin duda, el dispositivo más conocido de los fabricados con materiales semiconductores. Fue inventado en los laboratorios de Bell Telephone Co en 1948, por tres físicos norteamericanos que ganaron el premio Nobel por ello. Las consecuencias de este invento fueron enormes, no sólo porque se reemplazaron las válvulas termoiónicas -de extensa utilización en ese momento- con grandes ventajas de costo, confiabilidad, tamaño, consumo de energía, etc., sino porque abrió el camino de la electrónica hacia rumbos insospechados hasta ese entonces. Ni las comunicaciones, ni la computación, ni la medicina, ni la conquista del espacio, ni el transporte, ni los procesos de fabricación en general, ni la efectividad de las armas, hubiesen sido posibles en un nivel siquiera parecido al actual sin este diminuto componente.

La invención del transistor fue sólo un modesto punto de partida si se lo compara con los desarrollos posteriores. En 1959 J.S. Kilby, de Texas Instruments, consigue fabricar un circuito flip-flop de 25 transistores totalmente incluidos en el mismo cristal de silicio, lo que marca el nacimiento de los circuitos integrados. Éstos son dispositivos que realizan las mismas funciones que un circuito convencional con transistores, diodos, capacitores y resistencias pero con tamaño, costo y performance optimizados a un nivel casi increíble. En la actualidad los circuitos integrados se acercan a los mil millones de transistores.

La primera computadora electrónica, basada en válvulas, competiría desfavorablemente con una calculadora programable de bolsillo de las actuales. Ocupaba el volumen de varias habitaciones, tenía requerimientos de energía desmesurados y fallaba frecuentemente.... Una válvula termoiónica muy pequeña ocupaba unos quince centímetros cúbicos, contra aproximadamente 10^{-10} cm^3 de un transistor integrado en un chip. El tema de la miniaturización es uno de los componentes claves de la industria de los semiconductores, pues equipos electrónicos más pequeños redundan en mayores posibilidades misilísticas y satelitales, p.ej. y además los transistores más pequeños son más baratos y más veloces, -cuestión de indudable importancia en el desarrollo de las técnicas de computación-, pues la velocidad de respuesta de un circuito, está determinada por el tiempo que tarda en recorrerlo una señal eléctrica y entonces, por sus dimensiones.

TIPOS DE TRANSISTOR

Podemos dividir a los transistores en dos grandes grupos en los que, a su vez hay varios subtipos:

- Bipolares, o de unión, conocidos como BJT (Bipolar Junction Transistor)
- Unipolares, o de efecto campo, FET (Field Effect Transistor)

Los bipolares son los que se desarrollaron comercialmente en primer término y revolucionaron la electrónica analógica. Deben su nombre, por un lado, a que los portadores de corriente son tanto positivos como negativos, y por otro a que están basados en la combinación de uniones **p-n**. Su estructura básica es muy simple, pues está formado por dos uniones muy próximas, o sea por un "sandwich" **n - p - n** o **p - n - p**, donde la zona central es de un espesor muy pequeño. El dispositivo se fabrica a partir de un monocristal en el que se crean los semiconductores extrínsecos correspondientes por procedimientos similares a los vistos para los diodos.

Cada semiconductor cumple una función distinta y recibe un nombre diferente. En la fig.14.1 se muestra un esquema de la disposición real que pueden presentar las distintas zonas de un transistor **p-n-p**.

El *emisor* está muy fuertemente dopado, sus propiedades eléctricas se acercan a las de un metal y su función, como su nombre sugiere, es emitir portadores hacia el siguiente, llamado *base*, que está apenas dopado y que, como está dicho, es de muy pequeño espesor. El otro extremo, donde llegan *casi* todos los portadores emitidos, recibe el nombre de *colector*. Los tres semiconductores están conectados al circuito exterior. Se trata entonces de un componente de tres patas

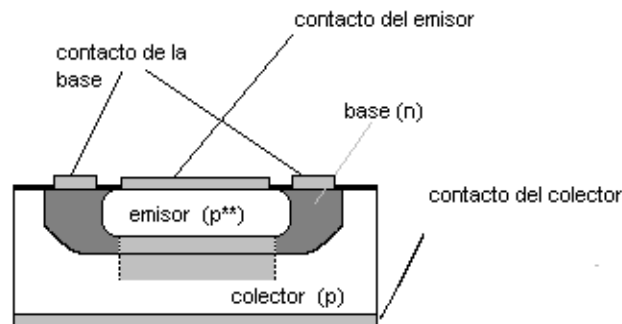


Fig.14.1

Separada por línea de puntos y en un gris claro, se destaca la zona donde ocurren los fenómenos que determinan las propiedades del componente.

En la fig.14.2 se reproducen los símbolos de los dos tipos posibles de transistores bipolares. De un examen atento de los mismos, y relacionando con el diodo, puede deducirse el significado de cada elemento.

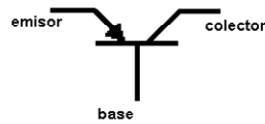


Fig.14.2.a

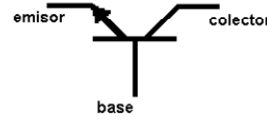
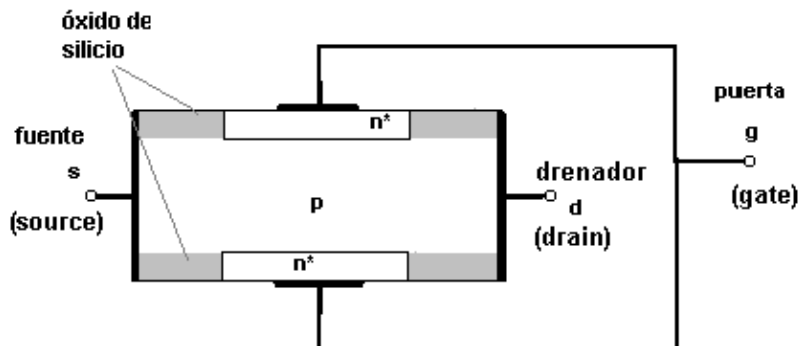


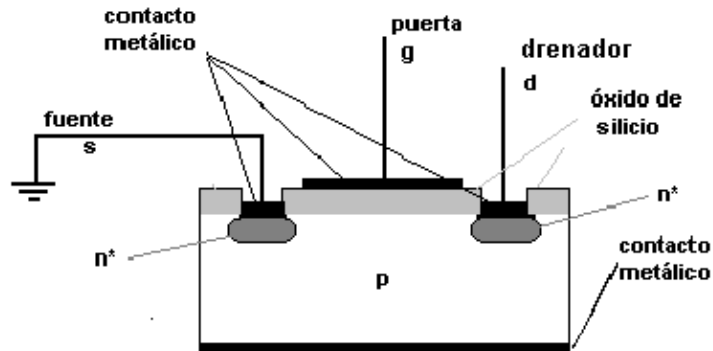
Fig.14.2.b

En los unipolares, por el contrario, los portadores de corriente son, o huecos, o electrones, pero no ambos conjuntamente. En este grupo debemos distinguir entre los transistores de efecto campo de unión (JFET), que pueden ser de canal n (portadores electrones) o canal p (portadores huecos) y los de estructura metal óxido semiconductor (MOSFET o MOS), que pueden, a su vez, ser de enriquecimiento, o de agotamiento y también de canal n o canal p (NMOS o PMOS). La estructura general de JFET y MOSFET se muestran en las figuras 14.3 a y b. Nótese el cambio de nomenclatura de los terminales y los símbolos provenientes de las palabras inglesas.



JFET de canal p

Fig.14.3.a



MOSFET de enriquecimiento de canal n

Fig.14.3.b

En la tabla siguiente (fig.14.4) se resumen los distintos tipos de transistores mencionados y se reproducen los símbolos utilizados. En el caso de los FET no hay unanimidad en la bibliografía por lo que es conveniente prestar atención a los que utiliza cada autor. Los que mostramos aquí coinciden con los empleados generalmente en los textos sajones y en el simulador de circuitos Electronics Workbench.

Una característica central de los FET es que por el circuito de puerta (de alguna manera equivalente a la base de los BJT) no circula corriente, aunque sí hay aplicada una tensión que regula la intensidad entre fuente y sumidero. De lo dicho se desprende que, en la simbología empleada, la flecha *no tiene* un significado similar a la de los símbolos de los transistores bipolares.









BIPOLARES o DE UNIÓN	BJT		PNP	
			NPN	
UNIPOLARES o DE EFECTO CAMPO	JFET		Canal n	
			Canal p	
	MOSFET	De enriquecimiento	Canal n	
			Canal p	
		De agotamiento	Canal n	
			Canal p	

Fig.14.4

TRANSISTORES BIPOLARES (BJT)

Utilizaremos un recorte de la zona activa del transistor (fig 14.5), para estudiar sus propiedades y comportamiento.

Adoptaremos algunas convenciones para lo que sigue:

1) $V_b - V_c = V_{bc} = -V_{cb}$;

$V_c - V_e = V_{ce} = -V_{ec}$; etc.

2) Todas las corrientes que entran al componente son positivas. Entonces, podemos escribir:

$V_{bc} + V_{ce} + V_{eb} = 0$

e

$I_b + I_c + I_e = 0$

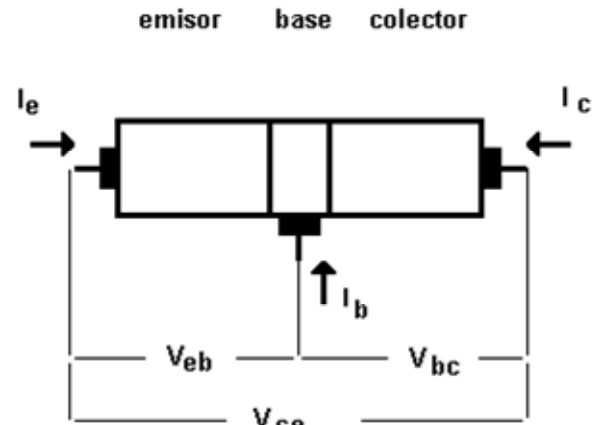


Fig.14.5

de acuerdo con las leyes de Kirchhoff.

CONFIGURACIÓN

La conexión de un transistor siempre involucra dos circuitos (o sub-circuitos), donde uno de los electrodos pertenece a ambos. Tendremos entonces tres configuraciones, o formas de conexión, posibles: configuración en base común (BC), emisor común (EC) o colector común (CC). En la fig.14.6 se muestran las tres configuraciones posibles para un transistor *npn* y las notaciones habitualmente utilizadas para cada elemento del circuito.

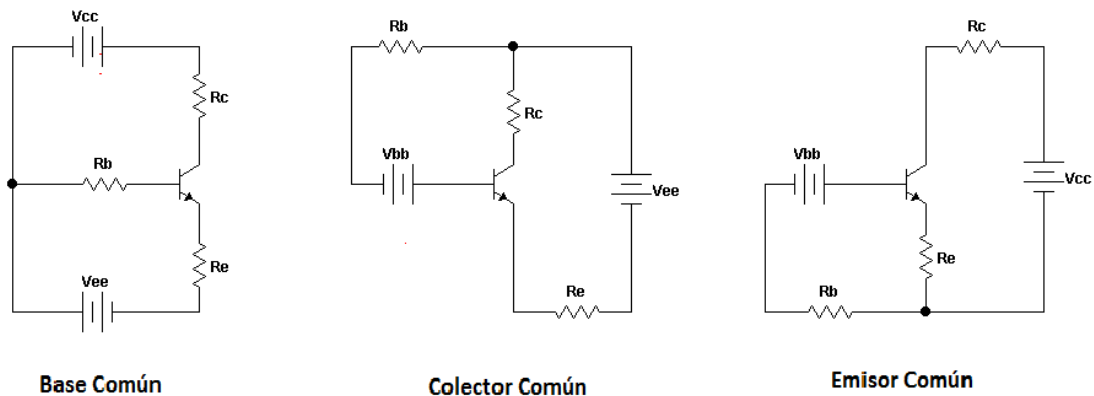


Fig.14.6

REGIÓN DE TRABAJO

Además del tipo de transistor y la configuración en que se encuentra, es importante poder identificar en un circuito el estado o región de trabajo en que se encuentra.

Ya que tenemos dos uniones ***n-p*** y cada una se puede encontrar en dos estados, el total de posibilidades es de cuatro, según se muestra a continuación:

Región de trabajo	Polarización emisor/base	Polarización base/colector
ACTIVA o NORMAL	Directa	Inversa
SATURACIÓN	Directa	Directa
CORTE	Inversa	Inversa
INVERSA	Inversa	Directa

Fig.14.7

La región *activa o normal* es típica del uso analógico del transistor, ya que debe permanecer en este estado para amplificar fielmente una señal. Las dos siguientes, *saturación* y *corte*, son los estados opuestos que constituyen un *bit*, para su uso digital. Como veremos, para pasar de uno a otro de estos estados opuestos, el transistor atraviesa la región activa, lo que insume cierto tiempo, variable de la mayor importancia en las puertas lógicas. La última región carece de interés para nosotros.

Para un transistor ***pnp*** puede representarse:

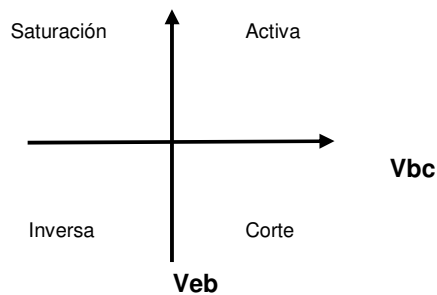


Fig.14.8

¿Cómo sería este diagrama para un ***nnp***?

CONFIGURACIÓN BASE COMUN EN REGIÓN ACTIVA.

Esta combinación es un buen punto de partida para comenzar a comprender el funcionamiento y propiedades de los transistores. Comencemos por considerar el circuito de la fig.14.9. Como se ve, hemos conectado sólo dos de los terminales; emisor y base. En esta situación lo que tenemos es simplemente un diodo polarizado en directa, ya que el potencial alto está conectado del lado *p* y la otra unión permanece desconectada. La única diferencia con los diodos que hemos analizado hasta ahora es que la unión *n-p* involucrada es muy asimétrica, ya que el emisor está muy fuertemente dopado en comparación con la base, tiene un comportamiento que se asemeja al de un conductor metálico y la corriente es transportada mayoritariamente por los huecos. .

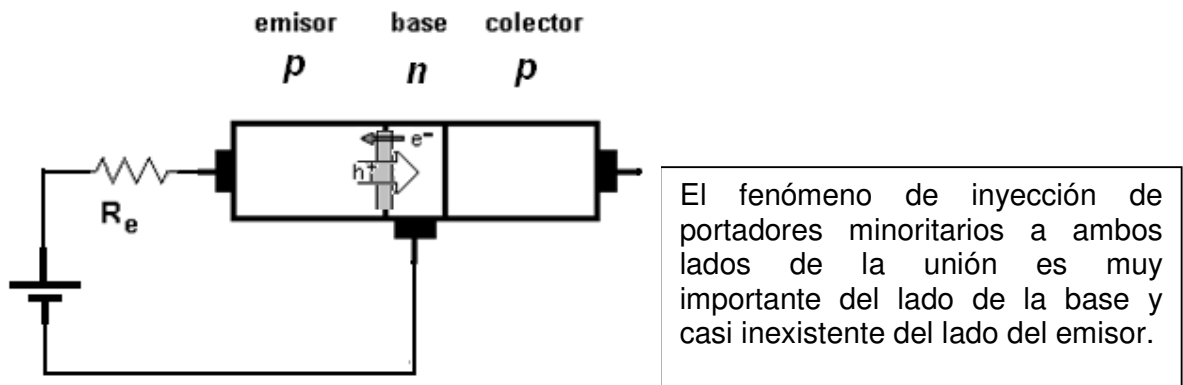


Fig.14.9

Recordemos que los huecos inyectados al lado *p* de la unión darán origen a la corriente que saldrá por el terminal de la base, sólo después de recombinarse con los electrones mayoritarios. Pero éstos son muy escasos frente a los portadores positivos inyectados, por lo que podemos imaginar que la concentración de huecos en la base aumentará considerablemente.

Si ahora completamos la conexión en la forma en que se muestra:

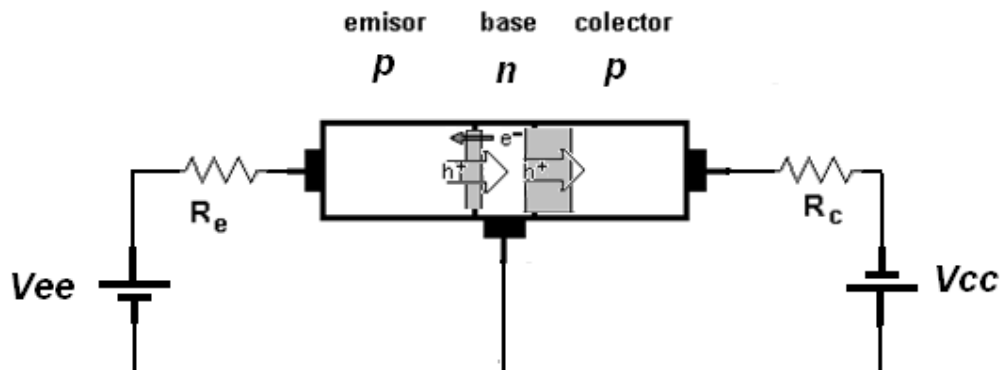


Fig.14.10

es fácil comprender que la unión base-colector, **aunque está polarizada en inversa**, permite el paso de los huecos que no alcanzan a recombinarse antes de llegar al límite entre ambos semiconductores. Esto es así ya que se encuentran con un “tobogán” de potencial como le ocurre siempre a los portadores minoritarios en la polarización inversa de la juntura.

Las características del diseño de construcción del transistor (pequeño espesor de la base, bajo nivel de dopado) hacen que la proporción de huecos que atraviesan la base sin recombinarse sea *del orden del 99%*. Ya en el colector, como portadores libres *mayoritarios*, son extraídos hacia el circuito exterior por el contacto a potencial elevado. El 1% restante se recombina en la base con los electrones y sale hacia el circuito exterior por el terminal correspondiente. La descripción dada para un transistor **pnp** es igualmente válida, con los cambios correspondientes, para un **nnp** como el que se muestra a continuación.

El gráfico de bandas de energía (fig 14.11, parte inferior) nos da una visión complementaria del proceso. Recordemos aquí nuestra convención gráfica (en la que los electrones “ruedan” cuesta

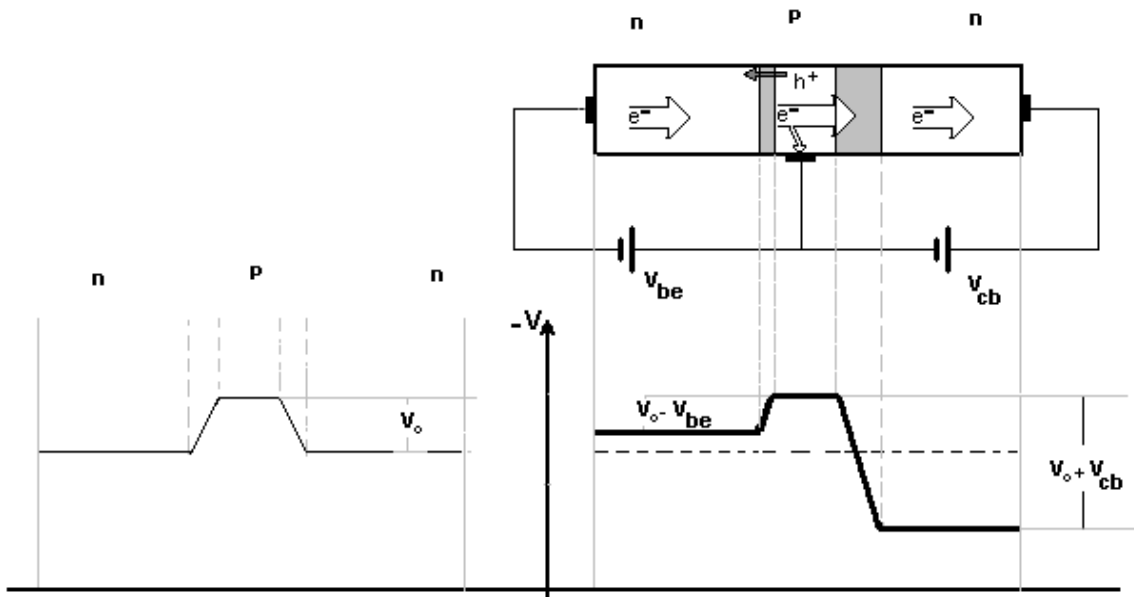


Fig.14.11.a

Fig.14.11.b

abajo de la curva de potencial) que implica tomar el potencial eléctrico cambiado de signo. Entonces lo que se representa en ordenadas es $-V$ y su perfil coincide con el del límite inferior de la energía de la banda de conducción y con el superior de la banda de valencia.

En la fig 14.11.a se muestra el estado antes de conectar el transistor al circuito. El salto de potencial V_0 corresponde al potencial de contacto de la unión **p - n**. Podemos imaginar los electrones de la banda de conducción, impedidos de salvar el desnivel entre **n** y **p** y a los huecos "atrapados" en la campana de la región **p**.

A la derecha (fig.14.11.b) se muestra como la polarización del transistor modifica esta situación, disminuyendo la barrera de potencial en V_{be} del lado del emisor y aumentándola en V_{cb} del lado del colector. Se comprende que la disminución de la barrera de potencial entre emisor y base permitirá que mayor cantidad de electrones y huecos atraviesen la unión correspondiente y que los electrones que difunden en la base serán impulsados por el potencial del colector, una vez que alcancen esa unión.

La parte del proceso que determina la corriente total (o sea el factor limitante, por ser la más lenta) que sale por el colector es la difusión a través de la base y ésta, a su vez, depende de la cantidad de portadores que atraviesan la unión de emisor, o sea de V_{be} y R_c . Este hecho sorprendente es la esencia de lo que se conoce como “efecto transistor” y la razón de las extraordinarias propiedades del dispositivo.

(*) (Explicación, optativa, del párrafo anterior) Vamos a analizar con más detalle qué pasa en cada región del transistor. Comenzando desde la izquierda, en la zona del emisor, el campo eléctrico aplicado sobre una zona muy conductora determina que la caída de potencial sea casi nula, similarmente a lo que ocurre en un buen conductor metálico (recuérdese que dijimos que este SC muy dopado tiene características similares a un metal) y que la zona sea eléctricamente neutra. Aquí vale plenamente la ley de Ohm, es decir hay proporcionalidad directa entre la tensión aplicada y la intensidad que circula.

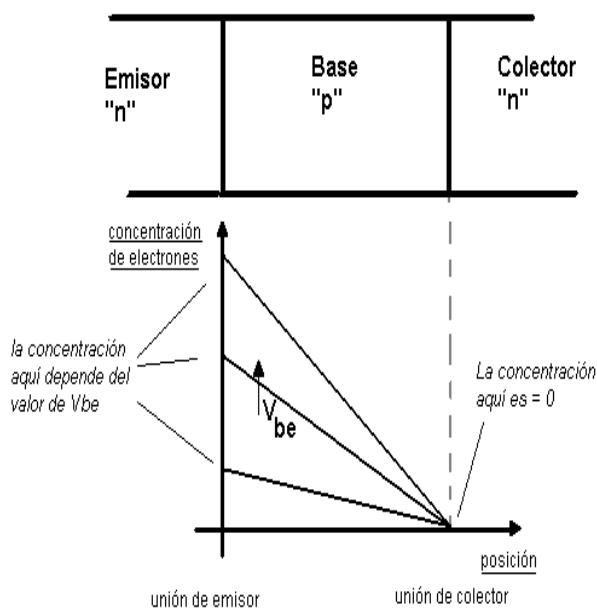


Fig.14.12

El panorama cambia en la unión de emisor. Como se vio en la fig. 14.11, los portadores de carga¹ encuentran una barrera de potencial que sólo podrán salvar los portadores con energía suficiente. Está claro que la barrera de potencial disminuye con la tensión de polarización aplicada y con ello aumenta la fracción de portadores con energía suficiente para atravesar la unión.

En la zona de base, del lado del emisor están llegando los electrones libres, portadores minoritarios para ese SC, que son inyectados aumentando considerablemente su concentración. En el otro extremo, unión de colector, la concentración cae prácticamente a 0, pues encuentran un gradiente de potencial que los impulsa hacia el otro lado de la unión. Entonces lo que determina la

movilidad de esos portadores es el fenómeno de difusión (Ley de Fick)² siendo la fuerza impulsora², el gradiente de concentración entre ambas uniones. Esta situación se representa en la fig.14.7.

Dentro de la unión de colector, el campo eléctrico mantiene la corriente, pero aquí no podemos decir que se cumple la ley de Ohm, pues no hay proporcionalidad entre tensión y corriente. El factor limitante es la concentración de portadores, todos los que llegan son transportados hacia el colector.

¹ En este caso electrones, pero puede hacerse el mismo análisis para una unión $p^{**} - n$ en la que los portadores mayoritarios serán huecos.

² La difusión es un fenómeno que determina que las partículas agitadas térmicamente se desplacen de las zonas de alta concentración hacia las de baja. Es el mismo fenómeno que determina que los portadores libres atraviesen la unión $p - n$ generando el potencial de contacto.

De los procesos que acabamos de describir se concluye que:

*Para un transistor en la **región activa**, la cantidad de portadores que alcanzan el colector y con ello, la intensidad de corriente de ese terminal I_c , está determinada por el proceso de difusión a través de la base, a su vez influenciado por V_{eb} y no por la diferencia de potencial V_{bc} .*

Esto puede expresarse matemáticamente, por la relación:

$$I_c = \alpha * I_e$$

donde α representa la fracción de portadores mayoritarios del emisor que atraviesan la base por difusión, sin recombinarse. Aunque esta expresión es sólo aproximada, pues se desprecian factores que modifican el valor de α , es de gran utilidad para interpretar y predecir el comportamiento de los transistores en la región activa. α es un parámetro típico de cada transistor, informado por su fabricante.

Debemos recordar aquí que por **región activa**, queremos significar un régimen de trabajo del transistor caracterizado por la polarización en directa de la juntura emisor-base y polarización inversa entre base y colector. En las próximas páginas veremos con más detalle qué significa esto.

Utilizaremos ahora estas ideas para resolver cuantitativamente un circuito BC. Sea el circuito de la fig 14.13:

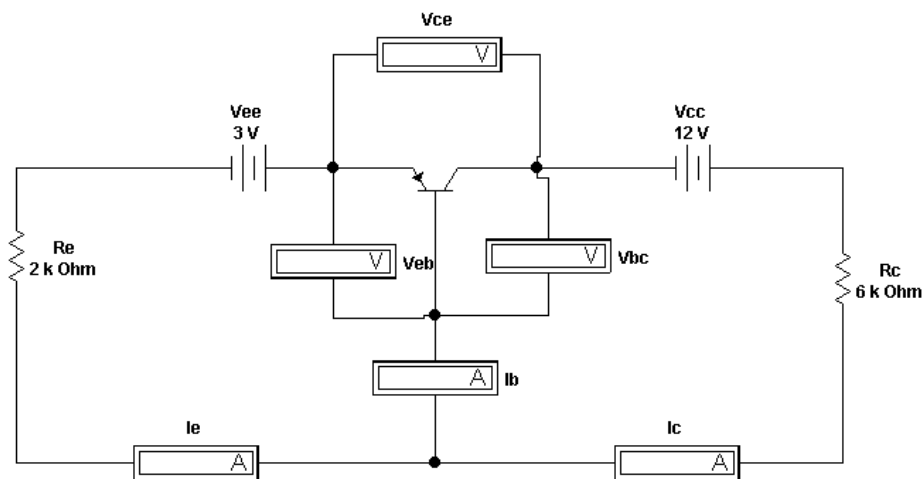


Fig.14.13

ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO II

Nos proponemos predecir cuál será la lectura de los instrumentos en un circuito físico real. Aunque parezca un poco más complicado que otros circuitos que sabemos resolver, una mirada en detalle nos permitirá descubrir que podemos calcular inmediatamente el valor de **I_e**. Efectivamente la corriente que atraviesa **R_e** es la misma que pasa por la unión emisor-base, que podemos calcular como venimos haciendo en los circuitos con diodos. Suponemos que el diodo está polarizado en directa y aplicamos Kirchhoff:

$$V_{ee} - V_{eb} - I_e * R_e = 0 \implies I_e = \frac{V_{ee} - V_{eb}}{R_e} = \frac{3V - 0,7V}{2k\Omega} = 1,15mA$$

Con lo cual tenemos resuelta la malla de entrada (fig 14.14).

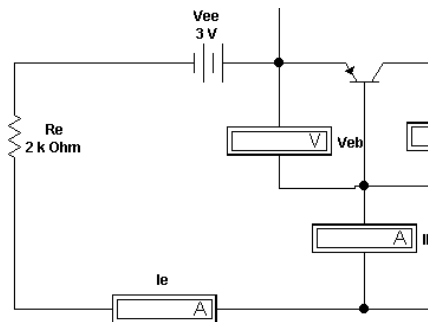


Fig.14.14

Ahora para calcular **I_c** usamos la relación:

$$I_c = \alpha * I_e$$

α es un dato que nos da el fabricante. En este caso, como nos proponemos comparar nuestros resultados con los del simulador de circuitos, tomamos el valor que, por defecto, considera ese *soft* y que es $\alpha = 0,99$.

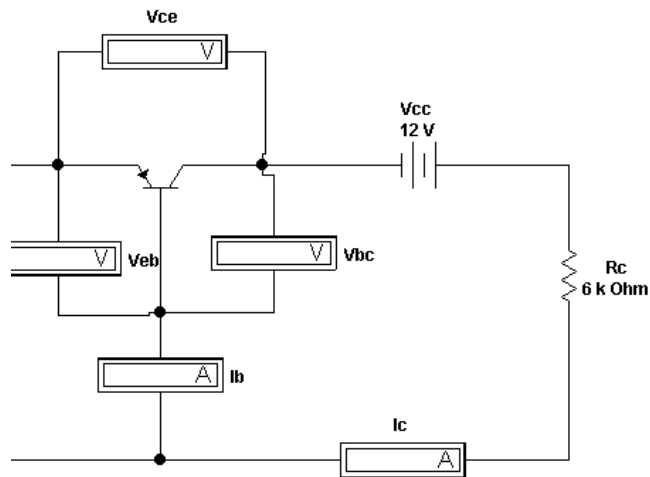
O sea **I_c** = 1,14mA ~ **I_e**. (Ambos valores serán siempre muy parecidos, en ocasiones los podemos considerar iguales, pero no en este caso, ya que **I_b** lo calcularemos, usando la I Ley de Kirchhoff, como la diferencia entre ambos).

O sea **I_b** = 0,01mA.

Todavía nos faltan las tensiones, pero noten que hemos resuelto todas las corrientes del transistor, sin usar para nada los valores de **V_{cc}** ni de **R_c**.

Consideremos ahora el circuito de salida que incluye el terminal de base y el de colector (fig.14.15).

Aplicando la II Ley de Kirchhoff:



$$V_{cc} - I_c * R_c - V_{bc} = 0$$

$$V_{bc} = 12V - 6,84V = 5,16V$$

V_{bc} según nuestro cálculo es un número positivo, es decir $V_b > V_c$. Como el transistor es **pn**p, si el potencial de la base es mayor que el de colector, la **unión correspondiente debe estar polarizada en inversa**. Pero esta es justamente la suposición que hicimos al usar el valor de α , es decir que el transistor estaba en la región activa, (que la otra unión estaba en directa ya lo habíamos supuesto al calcular I_e).

Fig.14.15

Como el resultado que obtuvimos es consistente con las suposiciones, éstas deben ser correctas. **El transistor se encuentra en la región activa.**

Por último, podemos calcular V_{ce} , con la II Ley, ya sea con la malla exterior del circuito o con una malla que incluya a los tres voltímetros.

Cualquiera de los dos caminos nos dará: $V_{ce} = 5,86 V$.

Comparemos nuestros resultados con lo que dice la simulación (fig 14.16):

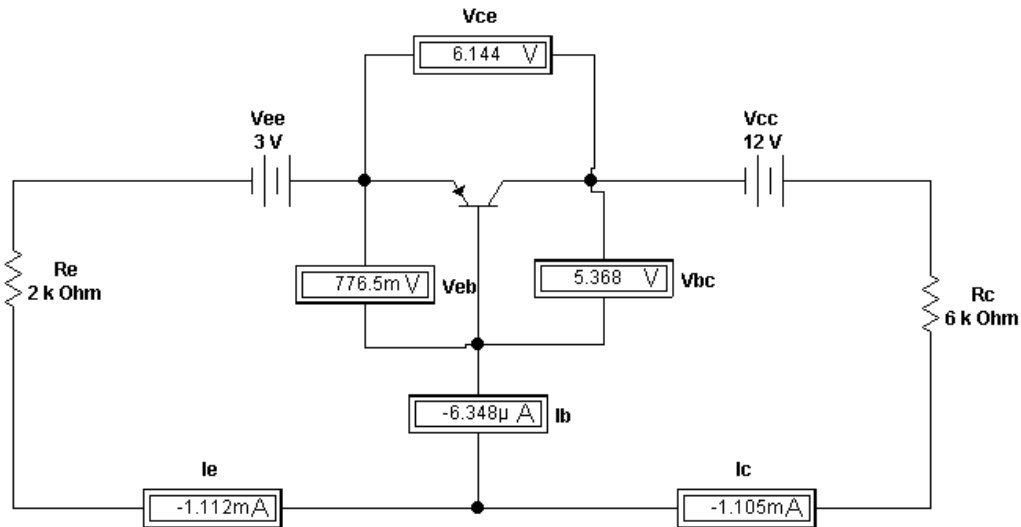


Fig.14.16

Y la concordancia es buena, aunque no perfecta, ya que nuestra aproximación de considerar la tensión sobre cualquier unión polarizada en directo como 0,7V, es eso, sólo una aproximación, mientras que el *software* utiliza una curva característica más cercana a la realidad..

(*) Veamos una aplicación basada en esta propiedad del transistor en esta configuración.

En el circuito que se muestra en la fig. 14.17, igualmente configurado en base común, hemos agregado una señal de corriente alterna superpuesta a la tensión continua del circuito del emisor y de amplitud pequeña, comparada con ésta. Analicemos qué sucede con la tensión sobre la resistencia del colector R_c .

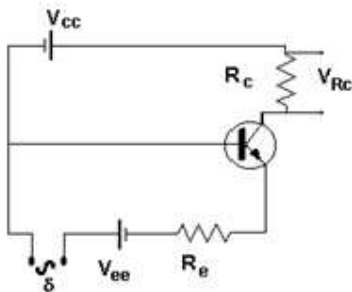


Fig 14.17

Puesto que

$$I_c = \frac{V_{Rc}}{R_c} = \alpha \cdot I_e = \alpha \frac{V_{ee} - V_{be}}{R_e} \quad \Rightarrow$$

$$V_{Rc} = \frac{\alpha \cdot R_c \cdot (V_{ee} - V_{be})}{R_e}$$

En un instante posterior V_{ee} se habrá incrementado, pongamos en un valor δ y la nueva tensión sobre R_c será:

$$V_{Rc} = \frac{\alpha \cdot R_c \cdot (V_{ee} + \delta - V_{be})}{R_e}$$

Y la **variación** de la tensión sobre R_c

$$V'_{Rc} - V_{Rc} = \Delta V = \alpha \frac{R_c}{R_e} \cdot \delta$$

Como α tiene un valor muy próximo a 1, podemos escribir

$$\Delta V \cong \frac{R_c}{R_e} \cdot \delta$$

O sea que eligiendo un valor de la resistencia del circuito de colector más elevado que el de la resistencia de emisor (o de entrada) podemos obtener una amplificación de la tensión. La señal a la salida, tomada sobre la resistencia, copiará la forma de la de entrada pero amplificándola.

Una característica habitualmente deseable en un circuito amplificador de tensión es que la impedancia (resistencia) de entrada sea elevada, condición que no cumple el circuito visto, por lo que no es muy utilizado. Sin embargo, presenta la ventaja de que la corriente de salida es prácticamente independiente de la resistencia de carga.

Una condición que debe cumplirse para que las cosas ocurran tal como se han descripto, es que la polarización de las uniones del transistor se mantengan en su estado original, esto es, en directa la de emisor e inversa la de colector, lo que sucede si la señal alterna es lo suficientemente pequeña. En caso contrario, el transistor pasa a operar fuera de la región activa y sus características cambian, como veremos a continuación.

CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

Lo más común en aplicaciones digitales de los transistores es la configuración en emisor común como se muestra en la fig.14.18 .

El circuito de entrada es básicamente igual al que ya vimos, pero el de salida ahora incluye, además de batería y resistencia, las dos uniones **p - n** presentes en el dispositivo. Está claro, observando las conexiones de base y emisor, que esa unión está polarizada en directo, ya que el emisor se encuentra conectado directamente al borne negativo de V_{bb} , mientras que la base lo hace con el positivo, a través de R_b . Podemos escribir:

$$V_{be} = V_{bb} - I_b \cdot R_b$$

y

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c$$

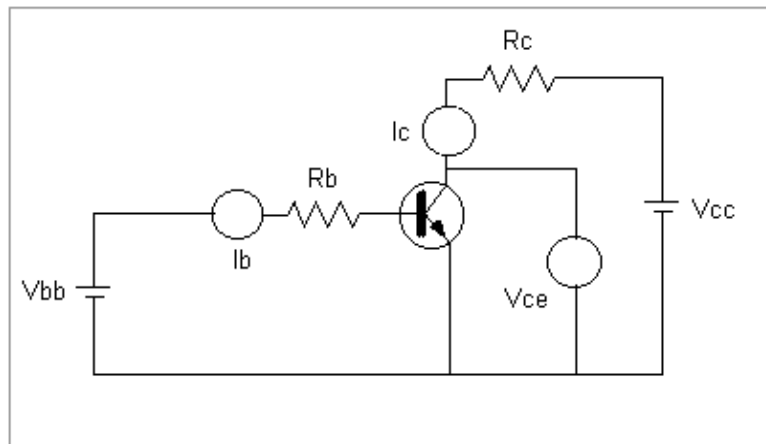


Fig.14.18

En esta configuración, las corrientes de entrada y salida están relacionadas por la expresión:

$$I_c = \beta * I_b$$

donde β es el llamado factor de ganancia de corriente, y que a través de la Ley de Kirchhoff, puede vincularse con α

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

β es el parámetro que indica el multímetro, cuando se prueba el transistor conectándolo en la posición **hfe**.

Veamos cómo está polarizada la unión colector / base. Debe cumplirse:

$$V_{bc} + V_{ce} + V_{eb} = 0$$

En nuestro caso $V_{eb} < 0$ (la base está a un potencial mayor que el emisor) siendo el valor aproximadamente -0,7 V si es un transistor de silicio. En el caso en que la unión de colector se encuentre también polarizada en directa, $V_{bc} > 0$ con aproximadamente el mismo valor absoluto y, entonces, $V_{ce} \sim 0$. La presencia de una baja tensión entre los terminales de colector y emisor está indicando que el transistor está conduciendo, ya que toda la tensión de la fuente, V_{cc} , está cayendo en la resistencia R_c , lo que, a su vez implica, que la intensidad de corriente I_c es la máxima posible, y justifica el nombre (**saturación**) que recibe esta condición.

En otras palabras, la condición de saturación se alcanzará cuando I_b (o sea V_{bb}) sea suficientemente elevada y aquí ya no existe la proporcionalidad entre I_c e I_b , característica de la región activa. En la "jerga" digital se dice *estado encendido (on)* o *alto (high)*.

Por el otro extremo, cuando V_{bb} no polariza en directa la unión de emisor (valor muy bajo o de polaridad opuesta), el transistor entra en la **región de corte**. La resistencia y la tensión entre los

terminales emisor-colector son elevadas, y no hay conducción. En circuitos digitales esta situación se conoce como *estado apagado (off)* o *bajo (low)*.

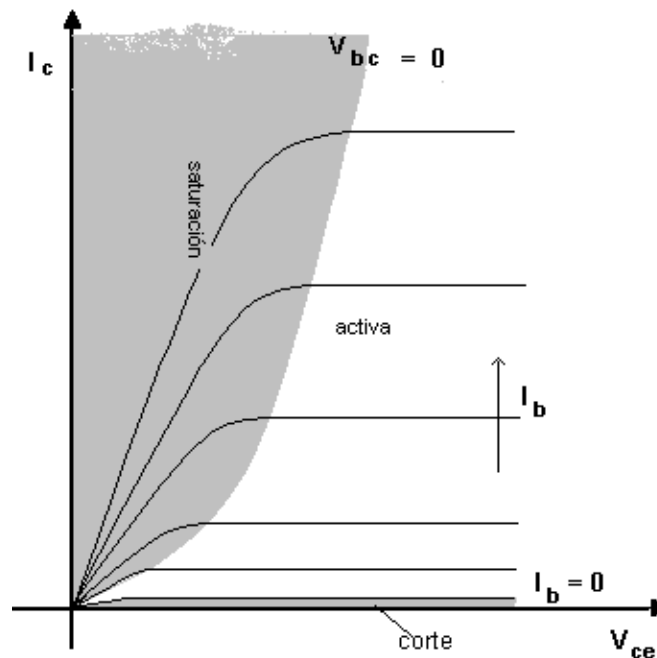


Fig.14.19

Tomando a la corriente de base como parámetro, se pueden determinar las curvas características de salida, esto es la variación de la corriente de colector en función de los valores de V_{ce} , para conexión en emisor común, que tienen un aspecto como el que se ilustra en la figura 14.19.

En la región activa, I_c es casi independiente de V_{ce} , lo que puede interpretarse a partir de considerar a esta tensión como:

$$V_{ce} = V_{cb} + V_{be}$$

y dado que V_{be} permanece constante para cada valor de I_b , ya vimos que en la región activa la corriente de colector no depende de la diferencia de potencial establecida entre base y colector. Aunque no se aprecie en el gráfico anterior, (por la ausencia de escalas) hay que tener en cuenta que I_b es mucho menor que I_c , como se explicaba más arriba, lo que justifica el uso de esta configuración, en circuitos analógicos como un amplificador de corriente. Al mismo tiempo amplifica la tensión, lo que da lugar a una amplificación de potencia.

Como se ha señalado, en los circuitos digitales los transistores se polarizan de forma que trabajen conmutando entre la región de corte y la de saturación. La conmutación se logra a través de cambiar I_b , o sea V_{be} , y pequeños cambios en este parámetro, desencadenan, entonces, importantes variaciones en el estado de funcionamiento del transistor. Aquí interesa conocer el comportamiento del transistor ante pulsos de tensión aplicados a los terminales que controlan la polarización de la unión de emisor. Entramos aquí las consideraciones que hicimos respecto del "tiempo de conmutación", dependiente de la inyección de portadores minoritarios, como vimos

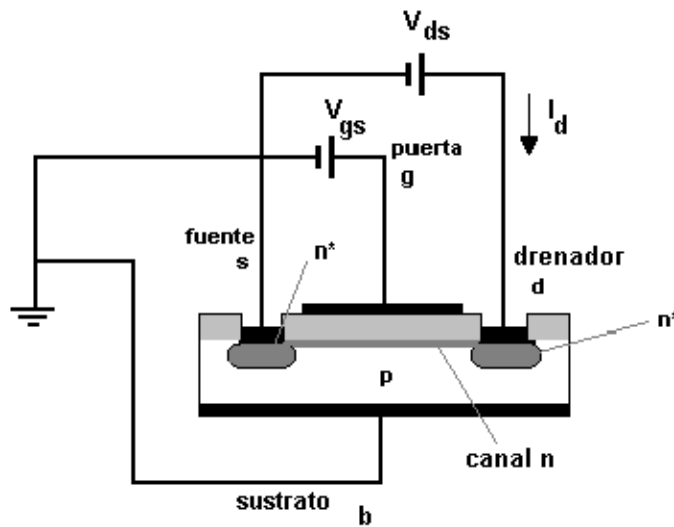
al estudiar la unión $p-n$. Por supuesto, lo que interesa es que este tiempo sea lo menor posible, lo que se consigue introduciendo, durante el proceso de fabricación del transistor, lo que se conoce como "centros de recombinación" en la región de base.

TRANSISTORES UNIPOLARES O DE EFECTO CAMPO (FET)

Hay aquí un cambio de nomenclatura respecto de los transistores bipolares. Los contactos se llaman ahora: **fuelle**, **puerta** y **drenador**, pero se comprende la analogía con lo anterior. Podemos describir su principio de funcionamiento considerando que la resistencia de un conductor es función de su sección y de la concentración de portadores disponibles. En los JFET el área de la sección conductora varía con el voltaje aplicado y en los MOSFET, (o MOS) ambos parámetros son sensibles a la señal de entrada, que se aplica en el terminal llamado puerta.

Los transistores MOS ocupan hoy un importantísimo lugar en los circuitos digitales, por lo que centraremos nuestra atención en ellos. Presentan importantes ventajas, en comparación con los dispositivos bipolares: por un lado permiten mayores densidades de bits en los chips de circuito integrado, son más fáciles de fabricar y además, los transistores MOS son dispositivos de alta impedancia, lo que lleva a una disipación de potencia más baja. Su principal desventaja es su velocidad de operación relativamente lenta.

Consideremos un transistor MOS de canal n como el representado en la fig.14.20. El contacto

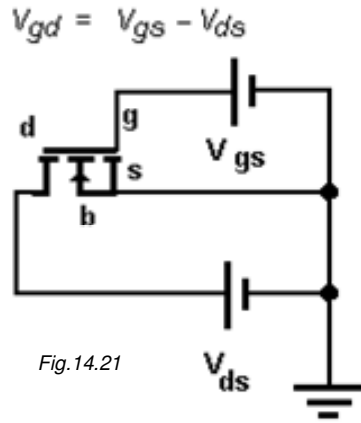


Si $V_{gs} > V_T$ y $V_{ds} > 0$, aparece I_d

Fig.14.20

del sustrato, que origina un cuarto terminal, está normalmente conectado a la fuente, o a un potencial fijo. La aplicación de un voltaje positivo a la puerta no puede provocar la aparición de una corriente pues la capa de óxido es un excelente aislante, pero el campo eléctrico establecido, sí ocasiona una redistribución de los portadores presentes en el semiconductor (p). Cuando la tensión entre puerta y sustrato supera un valor umbral V_T , se observa una inversión en el carácter del semiconductor ubicado justo debajo de la puerta. La migración de los portadores provoca que la concentración de los portadores minoritarios (electrones) supere a la de los mayoritarios

(huecos) formándose así un canal conductor **n** que une las islas, fuertemente dopadas, **n*** de fuente y drenador. Este canal está limitado por su parte superior por la superficie del óxido de silicio, constituyente de la estructura de la puerta, mientras que en las otras direcciones está rodeado por la zona de agotamiento, creada debido a la polarización inversa establecida en la unión $p-n$ entre canal y sustrato. Como se dijo antes, la conductividad de este canal aumenta con el voltaje aplicado.



Si en estas condiciones, se aplica una tensión positiva entre el drenador y la fuente, circula una corriente, tal como se muestra en la figura. Este tipo de transistor es el llamado "de enriquecimiento"; en el tipo "de agotamiento", el canal ya existe sin necesidad de aplicar tensión a la puerta. Lo que hace ésta es eliminarlo. Obsérvese que el circuito representado en la figura 14.20 y que se reproduce en fig.14.21, pero empleando la simbología adoptada, puede ser descrito, haciendo una analogía con los transistores BJT, como configuración en "fuente común". Estudiaremos puntualmente esta disposición, en MOS de enriquecimiento, pues es la más común en circuitos digitales.

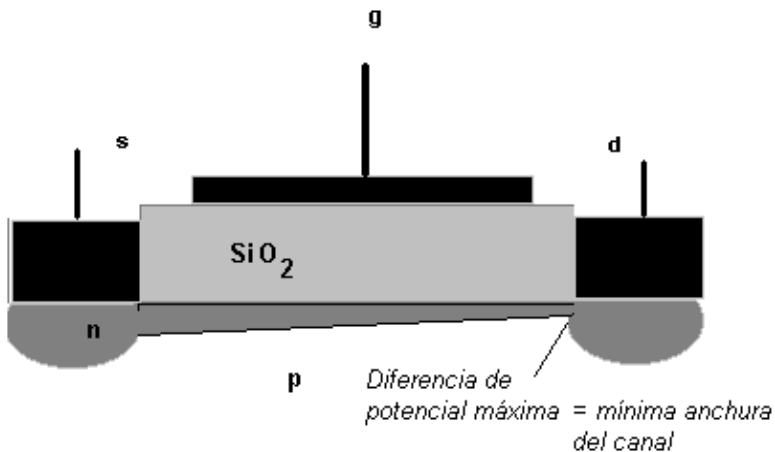
REGIONES DE TRABAJO

En forma similar a lo que ocurre en los BJT, podemos distinguir entre distintos regímenes de funcionamiento.

- 1) *Corte*. Si la tensión de puerta no alcanza al valor V_T , no hay conducción entre fuente y sumidero. Situación análoga a la estudiada con los bipolares.
- 2) *Óhmica o lineal*. Si V_{ds} es pequeña:

$$V_{gd} = V_{gs} - V_{ds} \sim V_{gs}$$

es decir la caída de tensión entre la puerta y el drenador (V_{gd}) es aproximadamente igual a la caída de tensión entre la puerta y la fuente (V_{gs}), o dicho de otra forma, el campo eléctrico cerca del drenador es aproximadamente igual al campo cerca de la fuente. Tenemos por tanto un número parecido de electrones atraídos en los extremos de drenador y fuente, y el canal es



aproximadamente igual en ambos lados, es uniforme. En estas condiciones la relación entre V_{ds} e I_d es lineal como en un conductor óhmico.

3) *Saturación*. Si manteniendo V_{gs} constante, aumentamos progresivamente V_{ds} , la tensión entre puerta y drenador disminuye y aumenta la diferencia de potencial entre la isla n^+ de drenador y el sustrato, conectado a masa. Esto significa que la región de agotamiento en la unión n^+-p

en las cercanías del drenador aumenta su espesor. Pero lo mismo sucede entre el canal n y el sustrato, en tanta mayor medida cuanto más cerca se esté del drenador (pues al haber

Fig.14.22

circulación de corriente hay una caída de potencial a lo largo del canal). O sea que el canal

disminuye progresivamente su ancho a medida que nos acercamos al drenador. En la figura 14.22 se intenta mostrar esta situación. Para cierto valor de V_{ds} , el canal reduce su ancho a 0 justo donde alcanza a la isla n^+ . Este punto se conoce como de estrangulamiento. Un posterior aumento de V_{ds} ya no provocará un aumento de I_d . Se dice que el transistor está saturado y que $V_{ds} > V_{ds,sat}$.

Analícese cuidadosamente las diferencias en los nombres de las regiones de trabajo entre los BJT y los FET. Corte es la misma cosa para ambos. Óhmica en los FET es equivalente a saturación en BJT y saturación en FET se corresponde con activa de los bipolares.

El gráfico I_d vs. V_{ds} , de la fig.14.23, con la tensión de puerta V_{gs} como parámetro, ilustra lo anterior.

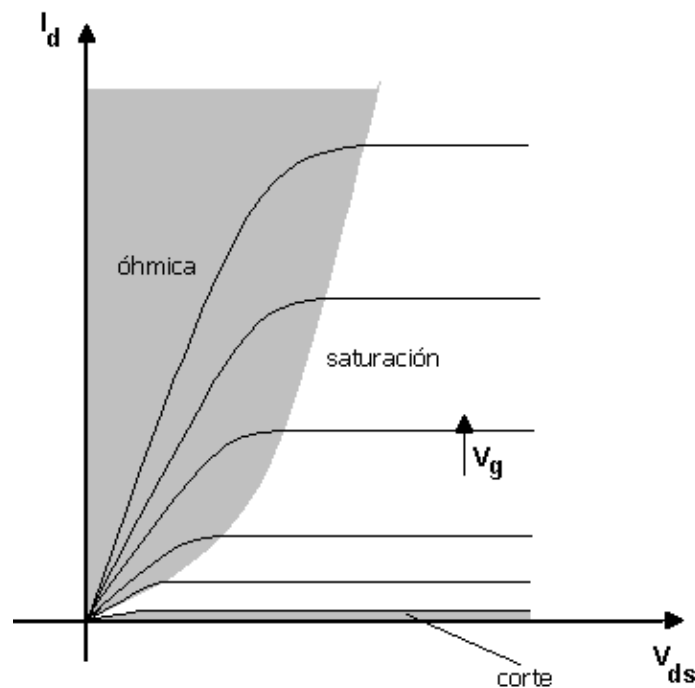


Fig.14.23

PUERTAS LÓGICAS

Ya que los diodos actúan como puertas de paso de tensiones, sin la posibilidad de generar nuevos valores de tensión, no es posible realizar con ellos la operación de negación. Con los transistores, en cambio, esto se implementa perfectamente.

TECNOLOGÍA BIPOLAR

La puerta **not** más antigua es la conformada con un BJT configurado en emisor común, ya que una tensión aplicada en la base puede hacer pasar al transistor de corte a saturación, llevando a 0 la tensión entre emisor y colector, tal como se muestra a continuación.

De la ecuación:

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c$$

que habíamos establecido, podemos escribir, reordenando :

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_c} - \frac{V_{ce}}{R_c}$$

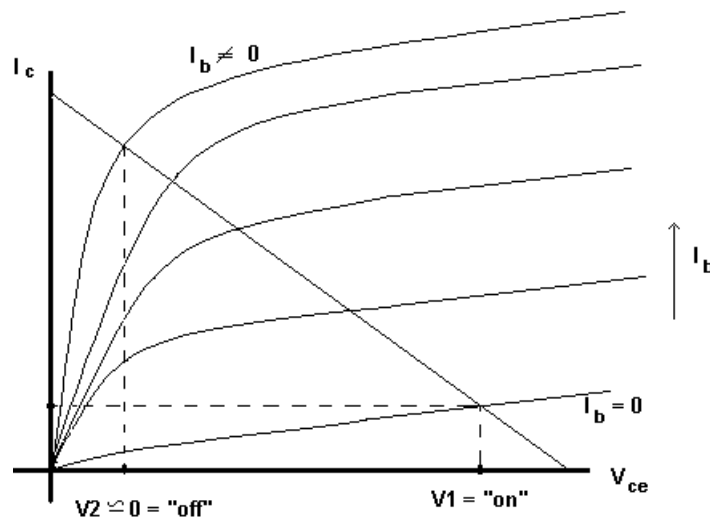


Fig.14.24.a

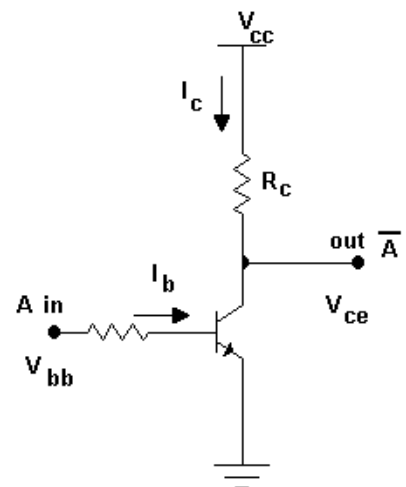


Fig.14.24.b

que no es otra cosa que la ecuación de la recta que aparece atravesando el primer cuadrante del gráfico en la fig.14.24.a, y que corresponde al circuito de la fig. 14.24.b. Conocida como la **recta de carga** del transistor, (análoga a la que utilizamos con los diodos) determina, para unos dados valores de V_{cc} y R_c , -característicos de cada circuito-, los valores I_c por los que pasa la operación del transistor al variar V_{ce} . Por otro lado, por cada punto del plano V_{ce} ; I_c , pasa una curva característica correspondiente a un valor de I_b . Entonces, en un circuito dado, para un

determinado valor de I_b , el valor de V_{ce} (y de I_c), está determinado por la intersección de la línea de carga con la curva característica correspondiente. Como I_b , por su parte, está determinada por V_{bb} y R_b , se comprende que utilizando V_{bb} como señal de entrada, puede conseguirse cambiar los valores de V_{ce} (señal de salida) entre V_1 "on" y V_2 "off".

A la ausencia de entrada, $V_{bb} = 0$ (y entonces $I_b = 0$), le corresponde salida "on", mientras que a un valor positivo de V_{bb} , le corresponde salida "off". Tenemos así implementada la puerta NOT.

(*)La velocidad de conmutación depende, como hemos visto al estudiar las propiedades de la juntura, de la concentración de portadores minoritarios inyectados, en este caso a la base. En la situación de corte dicha concentración es prácticamente nula, correspondiendo a la ausencia de corrientes de colector y base; al pasar a modo activo se crea una concentración de portadores minoritarios, cuya distribución a lo largo de la base varía linealmente, desde un valor máximo en su unión con el emisor (que es quién inyecta dichos portadores) hasta anularse prácticamente en la de colector. (ver figura 14.12).

A través de los valores de R_b y R_c se determinan las condiciones de operación del circuito, condiciones que son una solución de compromiso entre la velocidad de conmutación y la potencia disipada. Valores altos de R_b impiden que el transistor entre en un estado de saturación profunda, con lo que se gana en velocidad. Cuanto menor es R_c , por otro lado, menor es la constante de tiempo asociada a la capacidad de la juntura y la conmutación es más rápida aunque con mayor consumo.

Una solución alternativa es la incorporación de diodos Schotky en paralelo con la unión base-colector. Este diodo conduce a 0,25V, además de conmutar muy rápidamente. De esta manera, el transistor no entra en saturación profunda, ganándose en velocidad, aunque a costa del consumo y perjudicando la inmunidad al ruido. Hay variantes circuitales que optimizan el rendimiento de estas puertas rápidas.

Hay otra disposición con transistores bipolares que proporciona buena velocidad de respuesta. Se la conoce como de acoplamiento de emisor o ECL (por Emisor Coupled Logic), que se ilustra en

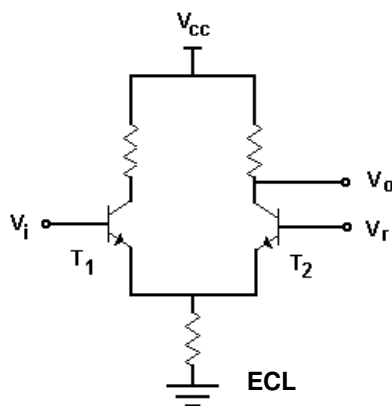


Fig.14.25

la fig. 14.25 y su gran velocidad proviene de que los transistores no entran en saturación. Igual que en el caso anterior, esto viene unido con un gran consumo. Como ventaja adicional permite la conmutación a altas frecuencias.

Si $V_i = 0$, (o en realidad menor que V_r), T_1 está en corte, T_2 conduce y V_o tiene un valor bajo. Por el contrario una señal mayor que V_r , ocasiona el corte de T_2 y V_o se hace igual a V_{cc} .

La disipación de potencia en una puerta lógica, será, como en cualquier circuito de corriente continua, el producto de la tensión de alimentación por la intensidad de corriente. Esta última varía entre un estado alto y uno bajo, a los que

podemos considerar igualmente frecuentes, por lo que se considera a I_c como el promedio entre ambos valores. La disipación de potencia media se define como:

$$P_d = V_{cc} \times I_c$$

TECNOLOGÍA UNIPOLAR

La tecnología bipolar (DTL, TTL, ECL) ha sido reemplazada en buena medida por la MOS. Para la configuración de puertas lógicas interesan los FET en que la tensión de puerta es del mismo signo que la del drenador (referidas ambas a la fuente): o sea los NMOS de enriquecimiento. Se muestran a continuación (fig.14.26) circuitos básicos de puertas implementados con esta tecnología.

Una ventaja de estas puertas es la muy alta impedancia de entrada, con lo que la intensidad de entrada es prácticamente nula, por lo que disminuye mucho su consumo en régimen estático. Sin embargo, es función creciente de la frecuencia. El bajo consumo facilita la integración en densidades elevadas, (valor típico actual, cerca de 5000 puertas en un mm^2) sin problemas de disipación de calor. En el objetivo de reducir tamaños, la tecnología MOS permite también reemplazar las resistencias por los propios FET, con un considerable ahorro de superficie. Además se requieren menos pasos en el proceso de fabricación.

Una desventaja es que la capacidad puerta-canal limita su velocidad de trabajo y otra es que la

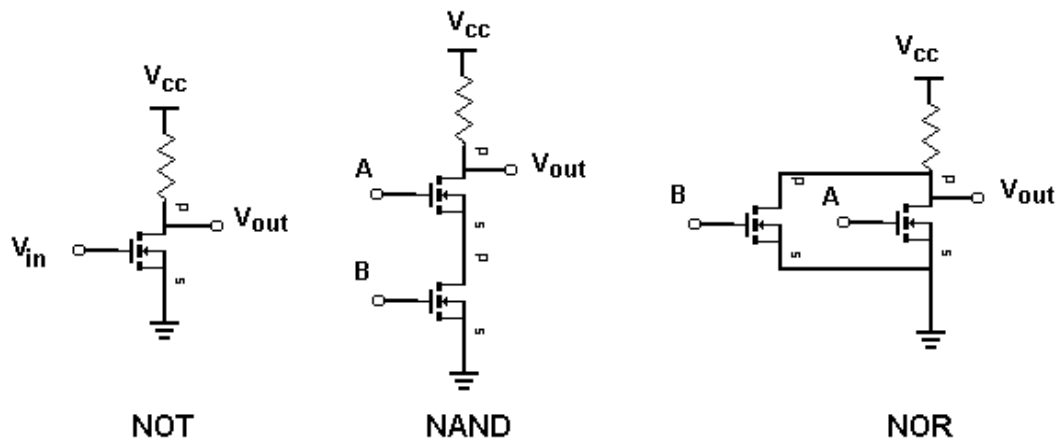
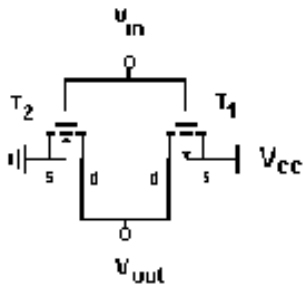


Fig.14.26

capa aislante de la puerta resulta muy vulnerable a descargas estáticas, lo que complica su manipulación.

Los FET han aportado aún otra tecnología a los CI, la MOS Complementaria o CMOS. Aquí la combinación de dos MOS, uno de canal n y el otro p, permite configurar un inversor de características muy atractivas. Se muestra una celda básica en la fig 14.27



Si V_{in} es alta ($= V_{cc}$), T_1 no conduce y sí lo hace T_2 (con la condición de que V_{in} supere la tensión umbral), con lo cual la tensión a la salida es la de masa. Pero si $V_{in} = 0$, hay una tensión negativa entre la puerta y el sustrato de T_1 , (PMOS) y entonces es T_1 el que conduce y se apaga T_2 . Entonces $V_{out} = V_{cc}$.

Fig.14.27

Obsérvese que en cualquiera de los dos estados no hay consumo de corriente, pues los MOS están en serie y cuando uno conduce el otro no lo hace. O sea que su consumo estático es nulo. En cambio, durante la conmutación se produce un consumo no despreciable, debido a la capacidad asociada al conjunto puerta-canal. Consecuentemente el consumo de las puertas basadas en esta tecnología, aumenta fuertemente con la frecuencia del reloj.

RESUMEN

La invención del transistor, al permitir el reemplazo de las válvulas termoiónicas por dispositivos más eficientes, seguros, pequeños y baratos tuvo enormes consecuencias tecnológicas y económicas. La miniaturización es uno de los componentes claves de la industria de los semiconductores, pues equipos electrónicos más pequeños posibilitan el desarrollo de equipos más eficientes.

Los transistores bipolares (BJT) consisten básicamente en dos uniones **p-n** muy próximas, construidas sobre el mismo cristal y que dan origen a tres zonas distintas que reciben los nombres de *emisor*, *base* y *colector*. Según cuál de los terminales resulta compartido entre el circuito de entrada y el de salida, se habla de configuración en *emisor común*, *base común* o *colector común*. La polarización de las uniones determina la *región de trabajo* del transistor. La *región activa* es de uso común en amplificación, mientras que las de *corte* y *saturación* son típicas de usos digitales. Las propiedades de amplificación se basan fundamentalmente en el *efecto transistor*, según el cual, la intensidad de corriente en el colector está definida, en gran medida, por la intensidad de corriente en la base. Para los usos digitales, se hace pasar el estado del transistor, configurado en emisor común, de corte a saturación, a través de señales de tensión que entran por la base.

Hay transistores unipolares (FET) de distintos tipos y los más importantes para circuitos integrados son los nMOSFET de enriquecimiento. Consisten básicamente en dos islas de semiconductor **n** implantadas en un sustrato **p**, separadas por una pequeña distancia. Sobre ésta y sin contacto eléctrico se encuentra una zona metálica o de polisilicio conductor. Los terminales

se llaman aquí *fuelle*, *puerta* y *drenador* y su principio de funcionamiento se basa en el control que se puede ejercer sobre la corriente que circula entre *fuelle* y *drenador*, a través de la tensión aplicada a la *puerta*. Cuando esta tensión supera un valor umbral V_T , el MOS pasa del estado de *corte* al de *conductividad óhmica* y posteriormente al de *saturación*. Estos nombres de las regiones de trabajo no tienen exactamente el mismo significado que en los BJT. Ya que la puerta está aislada eléctricamente, no circula corriente a través de ella y esto trae aparejado un consumo significativamente menor. La importancia de estos transistores radica principalmente en la posibilidad de conseguir elevadas densidades de integración y en la mayor sencillez de las operaciones de fabricación. Presentan como desventaja principal una menor velocidad de operación.

Los transistores aportan a las puertas lógicas la función negación, y con ello la posibilidad de implementar cualquier función lógica.

La configuración emisor común es la base de los distintos circuitos con tecnología bipolar en los que generalmente se busca limitar, o aún impedir, la saturación para conseguir menores tiempos de transición. La entrada es la base del transistor y la salida se toma en el colector.

Similarmente, en la tecnología unipolar, se utiliza la configuración en fuente común, con la puerta como entrada y el drenador como salida. Otra variante muy importante con FETs es la tecnología MOS complementaria (CMOS), en la cual un NMOS y un PMOS están conectados compartiendo el drenador y la puerta. En ninguno de los dos estados digitales, esta puerta está conduciendo, aunque sí lo hace durante la transición.