

Tiristores Especiales

Indice:

1.- Transistor de Inducción Estática(SIT)

2.- Transistor Bipolar de Compuerta

Ailada(IGBT)

3.- Transistores de Efecto de Campo de unión

Metal Oxido Semiconductor (MOSFET's)

4.- Esquema y Teoría de Operación del

Puente-H con MOSFETs

Transistor de Inducción Estática (SIT)

El Dispositivo mas importante bajo desarrollo es el transistor de inducción estática (SIT) mostrado esquemáticamente en la figura 1. El SIT es un dispositivo portador mayoritario (unipolar) en el que el flujo de electrones de la fuente a el drenaje es controlado por un potencial de barrera en el semiconductor de dos dimensiones con forma de silla de montar entre las compuertas metálicas. Si el dopado y las dimensiones laterales son escogidas adecuadamente, la altura del potencial de barrera sera modulado por la compuerta y el drenaje. Debido a que la corriente se incrementa exponencialmente conforme la barrera es disminuido, las características de la salida del SIT son usualmente no saturadas o de manera de triodo, por ejemplo pareciendose a un triodo de tubo al vacio. El SIT es importante como un dispositivo de microondas a bajas frecuencias en GHz porque este entrega potencia extremadamente alta por unidad de area.

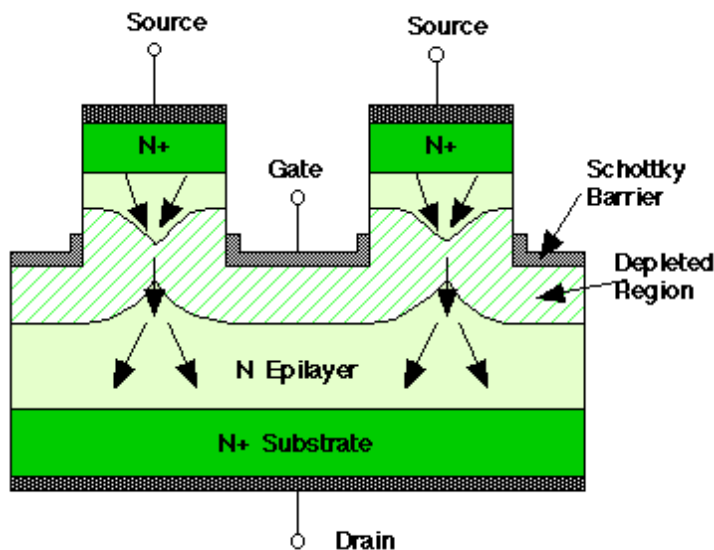


Figura 1. Sección transversal de un transistor de unión estática (SIT). Los electrones

fluyen de la fuente a el drenaje a través de un punto ensillado de potencial

electrostatico entre los electrodos de compuerta.

La fabricación del SIT requiere un grabado anisotrópico de pared recta de zanjas de $2 - 3 \mu\text{m}$ de profundidad usando una grabado reactivo de ion (RIE, por sus siglas en ingles) seguida por una deposición de Metalización de Shottky en la zanja del fondo sin cubrir la zanja lateral. Las dimensiones laterales entre las zanjas de compuerta oscilan en el orden de $0.5 - 1.5 \mu\text{m}$. Los contactos de baja resistencia ohmica son establecidos a las regiones de la fuente en el techo de las uniones. La figura 2 (debajo) muestra una foto SEM de un SIT completo teniendo una ancho de unión de $1 \mu\text{m}$ y una longitud total de union de 1 cm (100 dedos). Para mas claridad, esta foto ha sido tomada antes de la deposición de las conexiones del puente de aire de la fuente. Características experimentales estaticas VI son mas pequeñas en el SIT mostrado en la figura 3.

El maximo voltaje de drenaje es de 250 volts, la corriente de encendido en la rodilla es casi

80 mA/mm y la ganacia de bloqueo es aproximadamente 10. Estos valores son comparables a la mejor literatura reportada para un SIT.

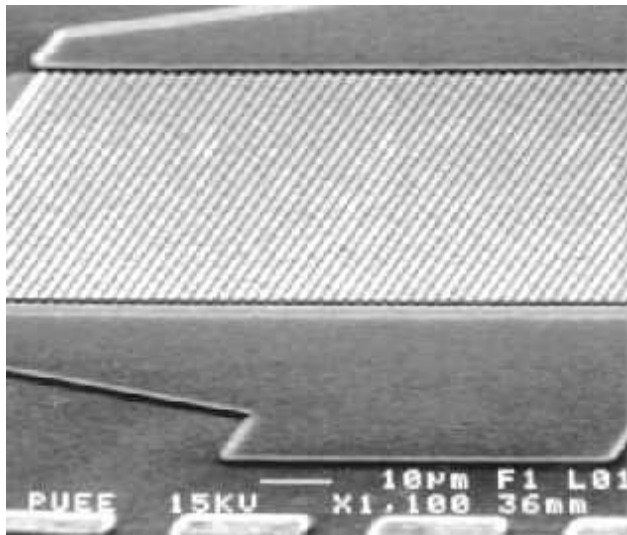


Figura 2. Foto SEM de una gran area experimental de un dispositivo SIT fabricado en el laboratorio. Los dedos de union son $1 \mu\text{m}$ de ancho y $100 \mu\text{m}$ de largo.

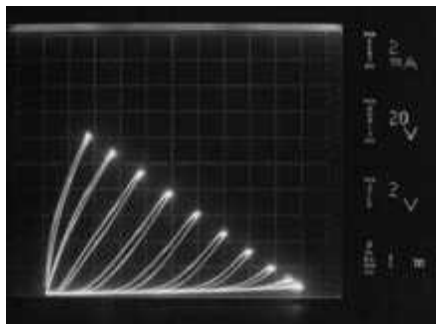


Figura 3. Características VI medidas de un SIT experimental. El voltaje de compuerta cambia desde cero (arriba de la curva) a 18 V (debajo de la curva) en cambios de 2 V . La escala Horizontal es de 20 V / div . El maximo voltaje de drenaje mostrado en la foto es de 200 V .

Para alcanzar operación a altas frecuencias, es necesario escalar agresivamente la escala de la unión anchar

las zanjias, incrementar el dopado de la región del canal y minimizar capacitancias parásitas. La figura 4 muestra otra fotografía SEM de la banda C del SIT recientemente fabricado en el laboratorio. El ancho de unión y los anchos de las zanjias son $0.5\mu\text{m}$ cada uno. Los contactos de la fuente son formados por una interconexión de puente de aire para minimizar capacitancias parásitas. Este dispositivo exhibió una frecuencia de 7 GHz , el valor mas alto hasta ahora reportado para un SIT.

Una grafica de corrientes a señal baja contra frecuencia es mostrada en la figura 5

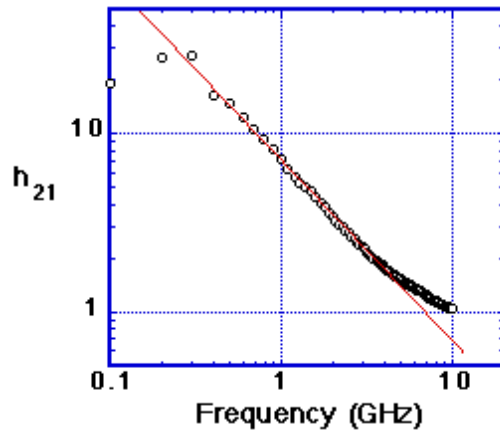


Figura 5

Transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT)

La figura 1 muestra la estructura de un IGBT canal-N típico. Toda la discusión aquí será referida al tipo de canal-n pero el IGBT canal-P se puede considerar de la misma manera.

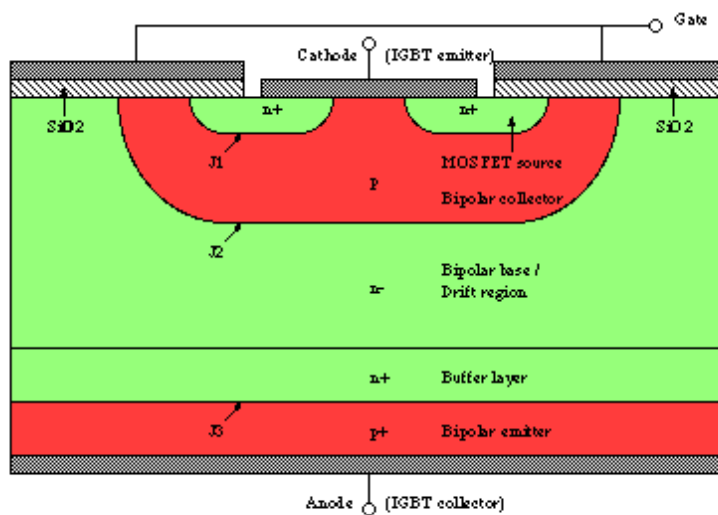


Fig.1: A typical IGBT structure

La estructura es muy similar a la de un MOSFET difundido verticalmente que ofrece una difusión doble de una región del tipo-p y de una del tipo-p. Una capa de inversión se puede formar bajo la compuerta aplicando el voltaje correcto al contacto de la compuerta como con un MOSFET. La diferencia principal es el uso de una capa del substrato de p+ para el drenaje. El efecto es cambiar esto en un elemento bipolar pues esta región del tipo-p inyecta los agujeros en la región de la deriva del tipo-n.

Operación

Operación de Bloqueo

El estado enc/apag del dispositivo es controlado, como en un MOSFET, por el voltaje V_G de la compuerta. Si el voltaje aplicado al contacto de la compuerta, con respecto al emisor, es menor que el voltaje V_{th} del umbral entonces ninguna capa de inversión del MOSFET se crea y el dispositivo es apagado. Cuando éste es el caso, cualquier voltaje directo aplicado bajará a través de la unión J2 polarizada inversamente. La única corriente a fluir será una corriente pequeña de la salida.

El voltaje de ruptura directo es por lo tanto determinado por el voltaje de ruptura de esta unión. Esto es un factor importante, determinado para los dispositivos de potencia de donde los voltajes y las corrientes grandes se están tratando. El voltaje de ruptura de la unión unilateral es dependiente en el dopado de la cara bajo-dopada de la unión, por ejemplo la cara n^- . Esto es porque el dopado más bajo da lugar a una región de agotamiento más amplia y así a un campo eléctrico máximo más bajo en la región de agotamiento. Es por esta razón que la región n^- de la deriva es mucho más ligeramente dopada que la región del cuerpo del tipo-p. El dispositivo que se está modelando se diseña para tener un voltaje de ruptura de 600V.

La capa del almacenador intermediario de n^+ está a menudo presente para prevenir la región de agotamiento de la unión J2 de la derecha que extiende al colector bipolar de p. La inclusión de esta capa sin embargo reduce drásticamente la capacidad de bloqueo inversa del dispositivo pues ésta es dependiente de el voltaje de ruptura de la unión J3, la cual es polarizada inversamente bajo condiciones de voltaje inverso. La ventaja de esta capa del almacenador intermediario es que permite que el espesor de la región de la deriva sea reducido, reduciendo pérdidas del estado encendido.

Operación Del Estado Encendido.

El encendido del dispositivo es alcanzado aumentando el voltaje V_G de la compuerta de modo que sea mayor que el voltaje V_{th} del umbral. Esto da lugar a una capa de inversión que forma bajo compuerta que proporciona a un canal que conecta la fuente a la región de la deriva del dispositivo. Los electrones entonces se inyectan de la fuente en la región de la deriva mientras que al mismo tiempo la unión J3, la cual se polariza hacia directamente, inyecta los agujeros en la región dopada n^- de la deriva (Fig.2).

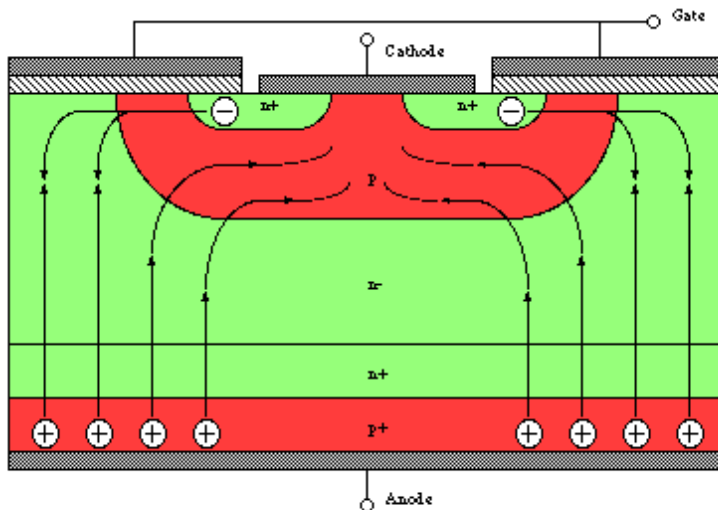


Fig 2: Hole and electron flow in the IGBT during on-state

Esta inyección causa la modulación de la conductividad de la región de la deriva donde las densidades del electrón y del agujero son de algunos órdenes de magnitud más arriba que el dopado n^- original. Es esta

modulación de la conductividad que da al IGBT su voltaje bajo de estado encendido debido a la resistencia reducida de la región de la deriva. Algunos de los agujeros inyectados se recombinarán en la región de la deriva, mientras que otros cruzarán la región vía deriva y difusión y alcanzarán la unión con la región del tipo-p donde serán recogidas. La operación del IGBT puede entonces ser considerada como un transistor PNP de base ancha cuya corriente es alimentada por el MOSFET a través del canal. Un circuito equivalente simple está por lo tanto según lo mostrado en la fig.3(a).

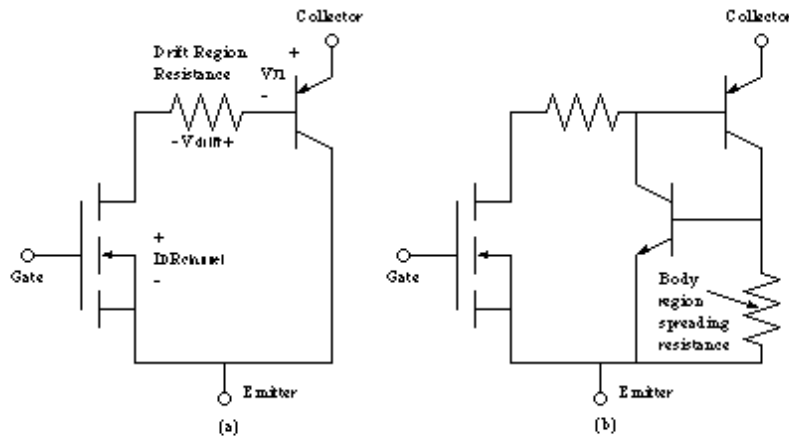


Fig 3: (a) Simple equivalent circuit for the IGBT; (b) more complete equivalent circuit showing the transistors which make up the parasitic thyristor

La fig.3(b) muestra un circuito equivalente más completo el cuál incluye el transistor parásito NPN formado por la fuente del MOSFET de tipo-n+, la región del cuerpo del tipo-p y la región n- de la deriva. También se muestra la resistencia lateral de la región de tipo-p. Si la corriente que atraviesa esta resistencia es lo suficientemente alta producirá una caída de voltaje que polarice directamente la unión con la región n+ que encenderá el transistor parásito que forma parte del tiristor parásito. Una vez que suceda esto hay una alta inyección de electrones de la región n+ en la región de p y se pierde todo el control de la compuerta. Esto es conocido como latch up y generalmente conduce a la destrucción del dispositivo.

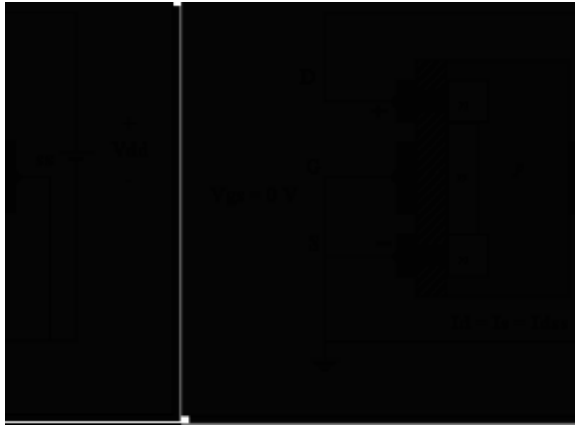
Transistores de Efecto de Campo de unión Metal Oxido Semiconductor

(MOSFET's)

El MOSFET es un dispositivo de 4 terminales y la corriente que circula internamente es controlada por un campo eléctrico. Los terminales son Fuente (Source), Compuerta (Gate), Drenaje (Drain) y el Sustrato (Substrate) cuando está polarizada la compuerta ($V=0$), se cierran las uniones p-n ubicadas entre el drenaje y la fuente y por esto no hay flujo de corriente entre la fuente y el drenado. Cuando se le aplica a la compuerta un voltaje positivo con respecto a la fuente (la entrada y el sustrato son comunes), las cargas negativas en el canal son inducidas y comienza a circular corriente por el canal. De ahí en adelante la corriente es controlada por el campo eléctrico, este tipo de dispositivo es llamado transistor de efecto de campo de unión o JFET. El MOSFET ha reemplazado a los BJT en muchas aplicaciones electrónicas porque sus estructuras son más sencillas y su costo es menor. Entre estos también se encuentran los MOSFET de canal n (nMOS), MOSFET de canal p (PMOS), MOSFET complementarios (CMOS), memorias de compuertas lógicas y dispositivos de carga acoplada (CCDs).

El transistor de efecto de campo de Metal-Aislante-Semiconductor (MISFET) El cual es formado por un metal como es el Aluminio (Al) y un semiconductor como puede ser el Silicio (Si), Germanio (Ge) o el Arseniuro de Galio (GaAs) colocados entre un aislante como puede ser SiO_2 , Si_3N_4 o Al_2O_3 . Si la estructura formada es Al- SiO_2 -Si también es llamada MOSFET aunque coincide con el MISFET. El MOSFET es muy usado en la fabricación de circuitos para microondas de alta escala de integración.

Los MOSFET pueden ser tanto de canal n como de canal p. El MOSFET canal n consiste en un sustrato semiconductor tipo p levemente dopado, en la cuál dos secciones tipo n⁺ altamente dopados difunden como se muestra en la figura.



Esas secciones tipo n⁺ que actúan como fuente (Source) y drenador (Drain) se encuentran separadas cerca de 0.5 mm (0.5–6 mm). Una delgada capa de aislante de Dióxido de Silicio (SiO₂) es colocada sobre la superficie de la estructura. El contacto metálico en el aislante es llamado compuerta (Gate). El polisilicón altamente dopado o una combinación de Silicio y polisilicón también pueden ser usados como el electrodo de compuerta.

El funcionamiento de este dispositivo consiste en que cuando no se aplica ningún voltaje a la compuerta (Gate) de un MOSFET de canal tipo n, las conexiones entre el electrodo de la fuente (Source) y el electrodo del drenador (Drain) quedan interrumpidos, es decir, no circula corriente. Cuando se aplica un voltaje positivo (con respecto a la fuente) a la compuerta, las cargas positivas son depositadas en el metal de la compuerta, como consecuencia las cargas negativas es inducida en el semiconductor tipo p a la región del aislante semiconductor.

Hay cuatro modos básicos d operación para los MOSFET's de canal n y de canal p y son los siguientes:

- Modo de enriquecimiento del canal (Normalmente OFF). Cuando el voltaje de compuerta es cero, la conductancia del canal es muy baja y este no conduce, es decir, se necesita un voltaje positivo para que el canal entre en conducción.
- Modo de vaciamiento del canal n (Normalmente ON). Si existe equilibrio en el canal, un voltaje negativo debe ser aplicado a la compuerta para extraer los portadores del canal.
- Modo de enriquecimiento del canal p (Normalmente OFF). Un voltaje negativo debe ser aplicado a la compuerta para inducir a que el canal conduzca.
- Modo de vaciamiento del canal p (Normalmente ON). Un voltaje positivo debe ser aplicado a la compuerta para extraer los portadores del canal y aislarlo.

Type	Electrical symbol	Output characteristic	Transfer characteristic
n-channel enhancement (normally off)			
n-channel depletion (normally on)			
p-channel enhancement (normally off)			
p-channel depletion (normally on)			

El MOSFET es frecuentemente usado como amplificador de potencia ya que ofrecen dos ventajas sobre los MESFET's y los JFET's y ellas son:

- En la región activa de un MOSFET en modo de enriquecimiento, la capacitancia de entrada y la trasconductancia es casi independiente del voltaje de la compuerta y la capacitancia de salida es independiente del voltaje del drenador. Este puede proveer una potencia de amplificación muy lineal.
- El rango de voltaje activo de la compuerta puede ser mayor porque los MOSFET's de canal n en modo de vaciamiento pueden operar desde la región de modo de vaciamiento ($-V_g$) a la región de modo de enriquecimiento ($+V_g$).

Capacitancia en el MOSFET

Dos capacitancias son importantes en un conmutador de encendido–apagado con MOSFET. Éstas son C_{gs} entre Gate y la fuente y C_{gd} entre Gate y drenaje. Cada valor de capacitancia es una función no lineal del voltaje. El valor para C_{gs} tiene solamente una variación

pequeña, pero en C_{gd} , cuando δD_G haya pasado a través de cero, es muy significativa. Cualquier desprecio de estas variaciones crea un error substancial en la carga que es requerida en Gate que es necesaria para estabilizar una condición dada de operación.

Encendido

En la mayoría de los circuitos con MOSFET, el objetivo es encenderlo tan rápido como sea posible para minimizar las pérdidas por conmutación. Para lograrlo, el circuito manejador del gatillo debe ser capaz de alimentar la suficiente corriente para incrementar rápidamente el voltaje de gatillo al valor requerido.

Apagado

Para apagar el MOSFET, el voltaje gate–fuente debe reducirse en acción inversa como fue hecho para

encenderlo. La secuencia particular de la corriente y el voltaje depende de los arreglos del circuito externo.

Área segura de operación

El área segura de operación de el MOSFET está limitada por tres variables que forman los límites de una operación aceptable. Estos límites son:

1. Corriente máxima pulsante de drenaje
2. Voltaje máximo drenaje–fuente
3. Temperatura máxima de unión.

Pérdidas del MOSFET

Las pérdidas de potencia del MOSFET son un factor tomado en cuenta para la selección de un dispositivo de conmutación. La elección no es sencilla, pues no puede decirse que el MOSFET tenga menores o mayores pérdidas que un BJT en un valor específico de corriente. Las pérdidas por conmutación en el encendido y apagado juegan un papel más importante en la selección. La frecuencia de conmutación es también muy importante.

Esquema y Teoría de Operación del Puente–H con MOSFETs

Este puente–H usa MOSFETs por una razón primordial – mejorar la eficiencia del puente. Cuando se usaban transistores BJT(transistores convencionales), éstos presentaban al activarse un voltaje de saturación de aproximadamente 1V entre Emisor–Colector. La fuente de alimentación era de 10V y estaba consumiendo 2V a través de los dos transistores necesarios para controlar la dirección del motor. Se probaron darlington etc... nada funcionó. Los transistores se calentaban demasiado – y no había sitio para ventilación.

Se escogieron los MOSFETs porque tienen un resistor llamado RDS(on) que actúa al poner el transistor en funcionamiento. El RDS (on) es la resistencia entre Fuente y Drenador que presenta el transistor al activarse. Es bastante fácil comprar MOSFETs que tengan RDS(on) de valores muy bajos de menos de 0.1 ohm. Esto significaría que con 4 amps, el voltaje bajaría a 0.4V por MOSFET, una mejora sustancial. Los MOSFETs que se seleccionó tenían RDS(on) de valores inferiores a 0.04 ohms, lo que mejoró sustancialmente la eficiencia.

Realmente, cuando un MOSFET tiene un RDS(on) de valor bajo, presenta normalmente un valor de corriente elevado (típicamente del orden de 10–20 amps). Necesitábamos 4 amps de corriente continua y el MOSFET que escogí ofrece 25 amps. Naturalmente, cuanto más bajo es el valor del RDS(on), más caro es el MOSFET. BTW, ambos tipos de MOSFET están disponibles en encapsulado TO220.

Los MOSFET funcionan aplicando un voltaje a la Puerta. A éste tipo de funcionamiento se le llama transconductancia. Cuando se aplica un voltaje positivo mayor que el voltaje umbral de Puerta, el MOSFET se activa (Q4 y Q6 – canal–N solamente). Los de canal–P funcionan en modo inverso.

Es importante saber que además de ser extremadamente sensibles a la corriente estática, es importante tener en cuenta que si se deja la Puerta en circuito abierto (sin conectar) los transistores MOSFET se pueden autodestruir. La puerta es un dispositivo de alta impedancia (mas de 10megohms) y el ruido puede activar el MOSFET. Las resistencias R3, R4, R6, y R8 se han añadido a propósito para evitar la autodestrucción del MOSFET. Es muy importante montar primero estas resistencias antes de instalar el MOSFET. Después demontar estas resistencias, notarás que los MOSFET son dispositivos bastante estables. Además de forzar un determinado voltaje de Puerta para desactivar los MOSFETs, las resistencias añaden protección contra la corriente estática.

Los diodos D1, D2, D3, y D4 devuelven EMF desde el motor a la fuente de alimentación. Algunos MOSFET

(de hecho lamayoría) se fabrican con estos diodos ya incorporados, con lo que puede ser que su instalación no sea necesaria.

Q1 y Q2 son transistores NPN que controlan el funcionamiento del motor.

Modo parado

Cuando $A=0$ y $B=0$, el motor está parado. R3 y R4 conectan las Puertas de Q3 y Q5 a un voltaje positivo respectivamente desactivando los MOSFETs.

Modo inverso

Cuando $A=0$ y $B=1$ (+5V), el motor opera en modo inverso. Q1 se desactiva y Q3 se desactiva a consecuencia de R3. Q2 se activa a causa del voltaje en B. El colector de Q2 conecta la Puerta de Q5 con tierra. Esto activa Q5 (El canal-P necesita mayor voltaje -ve que la fuente para activarse). El lado -ve del motor aumentará a +12V. R5 aumentará la Puerta de Q4 a +11V o lo que es equivalente, activará Q4. La conexión el Drenador de Q4 con tierra fuerza la conexión del lado +ve del motor con tierra. R7 también está conectado al lado +ve del motor, lo que conecta la Puerta de Q6 con tierra asegurando su desactivación. El camino seguido por la corriente del motor va de +12V a tierra pasando por Q5, el contacto -ve, el contacto +ve, y Q4.

Modo Normal

Cuando $A=1$ y $B=0$, el motor opera en modo normal. Q2 se desactiva y Q5 se activa debido a R4. Q1 se activa debido al voltaje en A y el Colector de Q1 va a tierra. Esto activa Q3 que eleva el voltaje del lado +ve del motor a +12V. R7 eleva el voltaje de la Puerta de Q6, activándolo. La presencia de R5 asegura la desactivación de Q4, cuando Q6 se desactiva. El camino seguido por la corriente del motor va de +12V a tierra pasando por Q3, el contacto +ve, el contacto -ve, y Q6.

Modo NO PERMITIDO (o sólo permitido una vez)

Si $A=1$ y $B=1$, entonces todos los MOSFETs se activan, provocando un desgaste de la de la fuente de alimentación . No serecomienda. El LED tricolor permite probar el circuito sin conectar el motor. El color del LED será verde para una dirección y rojo para laotra. Prueba muy útil.

Los motores provocan mucho ruido eléctrico a causa del movimiento de las astas mientras está en marcha, y enormes deltas eléctricas al parar, ponerse en marcha, y especialmente al cambiar de dirección. C1 y C2 intentan suprimir los deltas de ruido. Las deltas negativas se neutralizan al conectar D1 y D4 a tierra y a la fuente de alimentación, respectivamente. Z1 intenta cortar las deltas positivas.

Si es posible, intente mantener la fuente de alimentación del motor separada de la fuente de alimentación del resto del circuito, o bien utilice técnicas extremas de filtrado usando bobinas, diodos, y condensadores para filtrar el ruido del motor.

A continuacion se muestra el diagrama esquematico del circuito:

Figura 1.- Motor controlado por Mosfet con configuración Puente H

