

# CAPÍTULO 2

---

## TRANSISTORES MOSFET

### INTRODUCCIÓN

En este capítulo estudiaremos los transistores. Se dará a conocer de manera breve como surgió el transistor el funcionamiento básico de este. Sin embargo el capítulo estará más enfocado al Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor (MOSFET) ya que para este trabajo se propone una estructura pseudo-MOSFET que funciona bajo los mismos principios y que permite conocer la viabilidad de fabricar un transistor funcional con el material estudiado.

### 2.1. Historia del Transistor

En 1930 los científicos de los laboratorios Bell estaban intentando usar ondas de ultra alta frecuencia para comunicaciones telefónicas y necesitaban un método de detección más confiable que el tubo de vacío que probó ser ineficaz en el proceso de recibir vibraciones rápidas además de ser muy voluminosos y consumir una gran cantidad de energía. Recurrieron a un detector basado en un cristal, esto los llevó al silicio, en el que descubrieron que tenía una zona favoreciendo la corriente negativa ("N") y otra que favorecía la corriente positiva ("P"). John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley especularon que agregando un tercer contacto al detector podrían controlar la cantidad de corriente

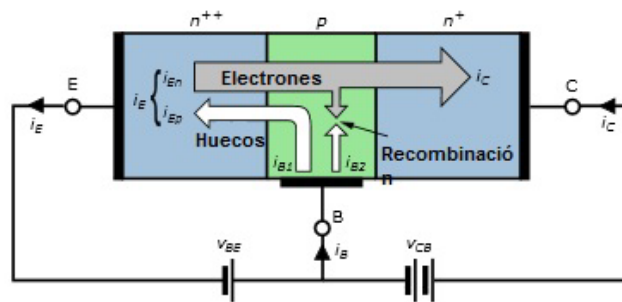
que atravesaba al silicio. El dispositivo teóricamente sería capaz de amplificar tan bien como el tubo de vacío pero sin consumir tanta corriente y en una fracción del espacio.

Sin embargo las amplificaciones que lograban no eran tan buenas y cambiaron el cristal de silicio por uno de germanio. Sin embargo aún no lograban obtener lo que necesitaban y de manera accidental se descubrió que si los contactos penetraban ligeramente al germanio se lograban buenas amplificaciones a cualquier frecuencia. Entonces Brattain colocó un hilo de oro en un triángulo de plástico y lo cortó en una de las esquinas, cuando la punta del triángulo era colocada sobre el germanio la señal entraba por un contacto, y salía incrementada por el otro y en diciembre de 1947 se creó el primer transistor de punto de contacto [27].

## **2.2. Funcionamiento del Transistor**

Para comprender el funcionamiento de un transistor se necesita entender cómo funciona un diodo de unión p-n. En este dispositivo dos materiales, uno tipo “p” y el otro tipo “n” se unen en una misma base. En el momento en que son unidos los electrones y los huecos en la región de la unión se combinan, resultando en una falta de portadores en la región de la unión. Esta región (región de agotamiento) se comporta como una barrera para la corriente pero ahí la base de su funcionamiento. Cuando un potencial positivo se aplica en el material tipo p y un potencial negativo en el material tipo n se produce una polarización directa. Cuando esto sucede el potencial presiona a los electrones en el material n y a los huecos en el material p para que se recombinen con los iones cercanos a la unión reduciendo al región de agotamiento. Como la región de agotamiento se reduce los electrones en el material n son fuertemente atraídos por el potencial en el material p. Conforme va aumentando el potencial la región se adelgaza más y llega a un punto en el que los electrones pueden pasar libremente y la corriente aumenta de manera exponencial.

Un Transistor Bipolar de Unión (BJT) está construido ya sea por dos materiales tipo n y uno tipo p o dos materiales tipo p y uno tipo n, de manera que se compone de 2 diodos p-n. En un funcionamiento típico, la unión base-emisor esta polarizada directamente, lo que significa que el material tipo p tiene un potencia más positivo que el tipo n, y la unión base-colector esta inversamente polarizada. En un transistor NPN, cuando una polarización positiva es aplicada en la unión base-emisor, el equilibrio se rompe entre los portadores generados térmicamente y el campo eléctrico repelente de la región n del emisor. Esto permite que los electrones excitados térmicamente se inyecten desde el emisor a la base. Estos electrones se difunden en la base de la región de alta concentración a la región de baja concentración cerca del colector. Los electrones en la base son llamados portadores minoritarios ya que la base es tipo p, lo que hace que los huecos sean los portadores mayoritarios en la base. Esta inyección de electrones provoca una recombinación en la región de agotamiento entonces los electrones en la región base-colector son empujados hacia el colector por el campo eléctrico de la base completando la operación del transistor. En la siguiente figura se puede observar lo explicado [28].



**Figura 2.1:** Esquema del funcionamiento de un transistor

Sin embargo el transistor BJT no es el único tipo de transistor, también existen los Transistores de Efecto de Campo (FET) que a diferencia de los BJT son dispositivos también de 3 terminales pero que está controlado por voltaje. Según su estructura pueden ser Transistores de Efecto de Campo de Unión (JFET) o Transistores de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor (MOSFET). La estructura propuesta para un transistor en este trabajo es la de un

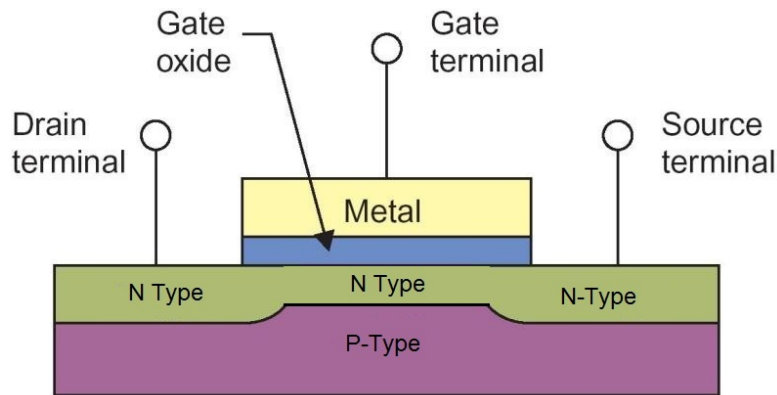
pseudo-MOSFET que trabaja bajo los mismos principios y por lo tanto solo se verán los MOSFET.

### **2.3. Transistor de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor**

El transistor de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET= Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) es un dispositivo de tres terminales que es capaz de controlar, a través de una de sus terminales, la corriente que circula entre 2 de sus terminales. Se emplea para una amplia variedad de aplicaciones que van desde usarlo como un simple dispositivo de apagado y encendido, hasta el control de cada pixel en una pantalla o el funcionamiento completo de un procesador en una computadora. El término efecto de campo en el nombre del dispositivo viene de un fenómeno muy conocido que consiste en la habilidad de un imán de atraer limaduras de metal sin la necesidad de un contacto físico directo. El campo magnético de un imán actúa sobre las limaduras y las atrae sobre el imán a través de un esfuerzo por parte de las líneas de flujo magnético para mantenerlas a tan corta distancia como sea posible. Para el MOSFET se establece un campo eléctrico por medio de las cargas presentes que controlarán la trayectoria de conducción del circuito de salida, sin necesidad de un contacto directo entre la cantidad que controla y la que es controlada.

Los dispositivos MOSFET, al igual que los transistores BJT, se presentan en 2 variantes. En un BJT se tienen transistores npn y pnp pero debido a que el FET es un dispositivo unipolar, sus variantes son transistores MOSFET de canal "n" o canal "p". La construcción básica de un MOSFET se puede ver en la figura 2.2. Se observa que la mayor parte de la estructura la ocupa el material del que esté hecho substrato (ya sea "n" o "p"). En los extremos se encuentran 2 terminales fabricadas con material del tipo contrario al substrato que son las terminales de fuente (Source S) y la terminal de drenaje (Drain D), el material de estas terminales define el tipo de canal. Entre estas 2 terminales se encuentra,

sobre una capa de óxido, la terminal de la compuerta (Gate G) la cual controla el ancho del canal del transistor.



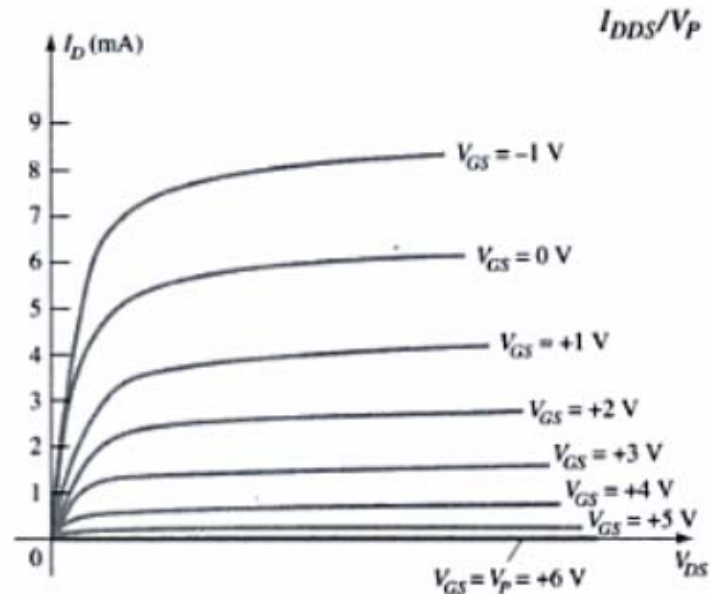
**Figura 2.2:** Transistor MOSFET de canal N

El MOSFET además de poder ser tipo n o tipo p, también puede ser incremental o decremental en cualquiera de los dos tipos y define el modo básico de operación del MOSFET. [28]

#### 2.4. Funcionamiento del Transistor MOSFET

El principio básico de funcionamiento aplica para ambos transistores (n o p) y es el siguiente. Supongamos que en el transistor de la figura 2.2 se conecta una fuente  $V_{DD}$  a la terminal S y la terminal de tierra de  $V_{DD}$  se conecta tanto a D como a G. El voltaje entre D y S ( $V_{DS}$ ) provocará que electrones libres en el canal entre las terminales D y S formen una corriente eléctrica. De esta manera a la corriente resultante de un voltaje  $V_{GS}=0$  (está a tierra) será llamada  $I_{DSS}$ . Ahora imaginemos que en el contacto G se introduce un voltaje  $V_{GS}=-1$ . Este voltaje negativo provocará que los electrones del canal n sean repelidos hacia el sustrato de tipo p donde se recombinarán, esto provocará que existan menos electrones libres para establecer una corriente, entonces se puede decir que el canal se ha estrechado. Si seguimos haciendo el voltaje más negativo la corriente seguirá

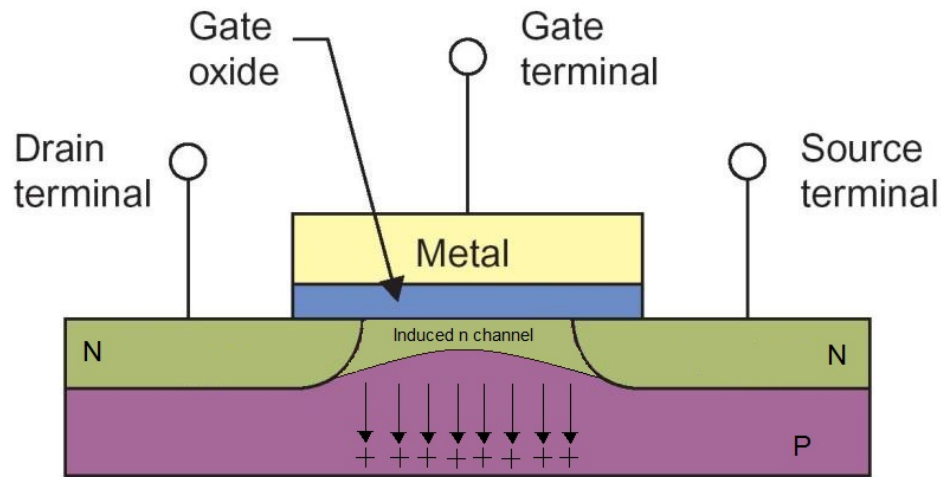
disminuyendo hasta que sea muy cercana a cero como para utilizarse satisfactoriamente. Para un transistor tipo p se cumple lo anterior con la diferencia de que habría que aplicar un voltaje positivo en  $V_{GS}$  para lograr el mismo efecto como se ve en la siguiente figura. [28]



**Figura 2.3:** Gráfica de corriente  $I_D$  contra  $V_{DS}$  para un MOSFET de canal P decremental. [28]

El principio explicado anteriormente solo aplica para MOSFETS de tipo decremental. En el caso de los MOSFETS de tipo incremental no existe un canal físico entre las terminales de fuente y drenaje. Si el voltaje de  $V_{GS}$  se fija a cero como en los tipo decremental sucede todo lo contrario, ya que al no haber un canal físico se obtienen 0 amperes de corriente como resultado. De nuevo usando el ejemplo de un MOSFET de canal n, si se aplica un voltaje positivo en la compuerta (es decir  $V_{GS}=+1, +2, +3, \dots$ ) el voltaje repelerá a los huecos del substrato y atrayendo a los electrones del mismo cerca de la superficie del aislante (capa de óxido). El aislante evitará que los electrones sean absorbidos por la compuerta y de esta manera, mientras el voltaje de compuerta siga siendo más

alto se inducirá una región tipo n, creando un canal que pueda soportar una corriente entre las terminales de drenaje y fuente. [28]



**Figura 2.4:** MOSFET de canal N de tipo incremental.

En la figura 2.4 se puede observar las cargas positivas desplazadas hacia el sustrato estimuladas por el voltaje positivo en la compuerta de compuerta, mientras que las cargas negativas se mantienen cerca de la superficie de la capa de óxido donde forma el canal n inducido.