

UNIDAD 3

EL DIODO SEMICONDUCTOR Y MODELOS

OBJETIVO

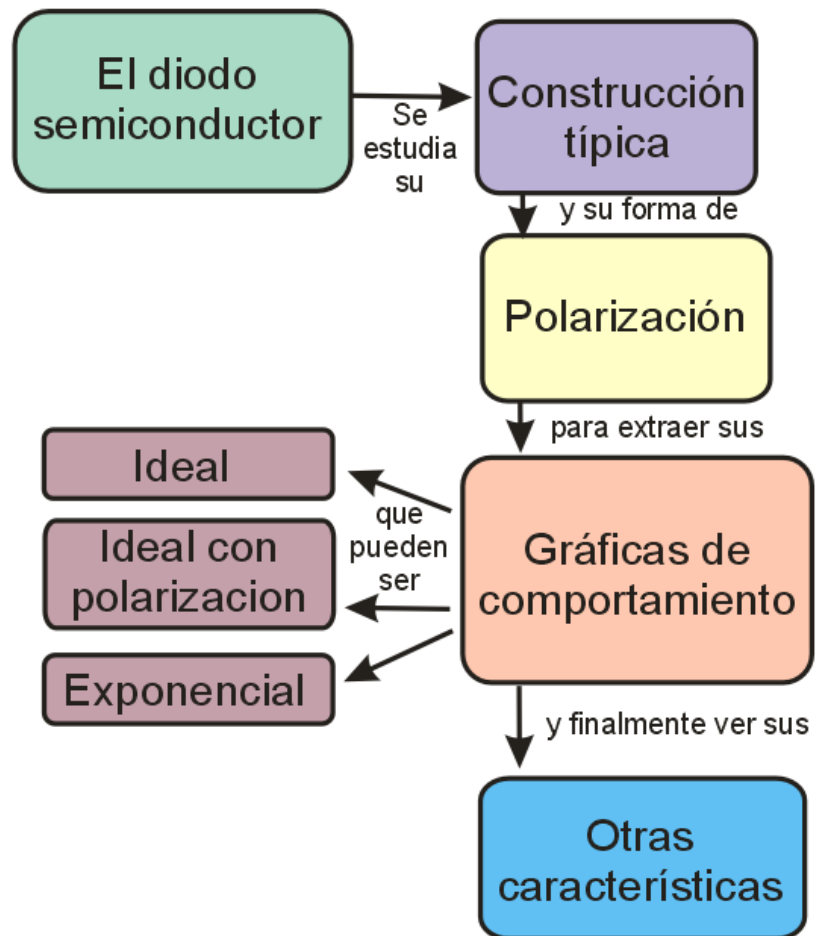
El estudiante conocerá la estructura básica de un diodo semiconductor para distinguir su principio de operación, comportamiento ideal y real, los modelos que se han establecido para su estudio y las gráficas que representan su funcionamiento.

TEMARIO

3.1 DIODO SEMICONDUCTOR

3.2 MODELOS: IDEAL, EXPONENCIAL, DE SEÑAL GRANDE Y DE SEÑAL PEQUEÑA

MAPA CONCEPTUAL

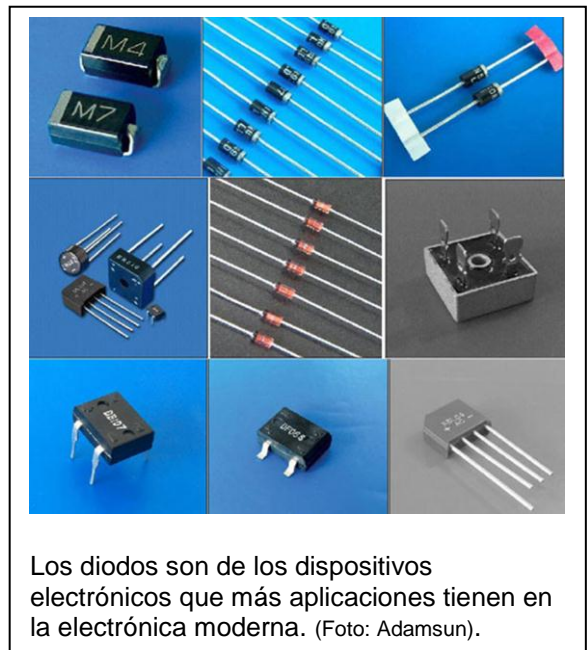


INTRODUCCIÓN

Ahora que se tienen las bases sobre el principio de funcionamiento de los materiales semiconductores, y específicamente de lo que ocurre cuando se une un cristal tipo P con uno tipo N, se puede iniciar el estudio de los dispositivos electrónicos básicos más conocidos, y que han resultado ser una de las estructuras más flexibles y funcionales descubiertas por el ser humano: el diodo semiconductor.

Aunque en un principio la principal aplicación que se buscaba en un diodo era su capacidad de sólo conducir electricidad si se polarizaba en la dirección correcta (modo rectificador), en la actualidad existe una gran variedad de diodos que se utilizan en múltiples aplicaciones dentro de la industria electrónica. Esto significa que conocer a profundidad el principio de operación de los diodos resulta fundamental para la comprensión de diversos circuitos electrónicos complejos.

Ese es precisamente el objetivo de esta unidad: mostrar a detalle el principio de operación de un diodo semiconductor, para comenzar a explorar el mundo de los dispositivos electrónicos, su comportamiento y su aplicación.



3.1 DIODO SEMICONDUCTOR

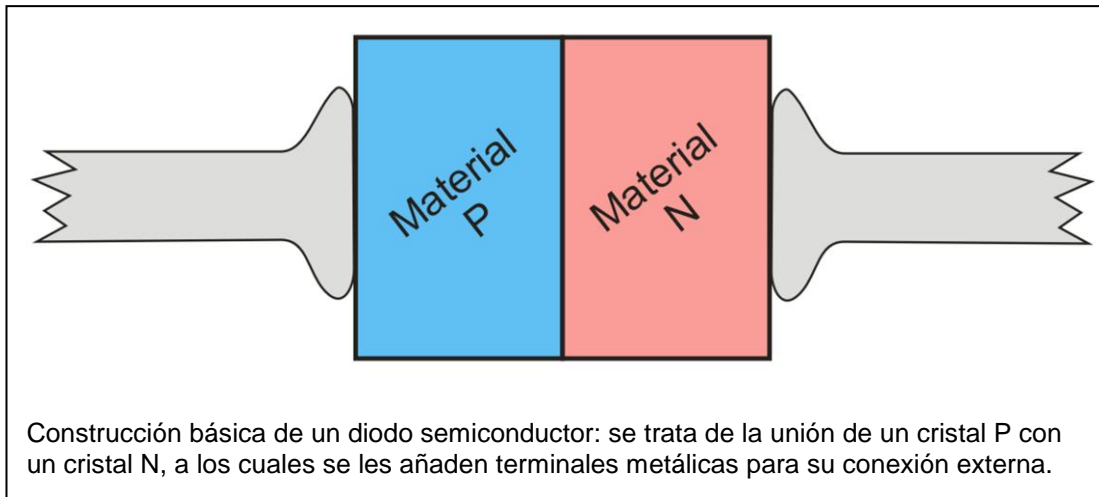
Como se mencionó en unidades anteriores, una de las aplicaciones más necesarias en los primeros tiempos de la electrónica, era la obtención de un dispositivo que fuera capaz de conducir la corriente eléctrica cuando se le aplicara un voltaje en cierto sentido, pero que la bloqueara si la polarización cambiaba. Este comportamiento era indispensable para la correcta recepción y demodulación de las señales de radio transmitidas en amplitud modulada, así que toda la industria de la radio dependía de que se desarrollara un dispositivo que tuviera ese comportamiento, y que al mismo tiempo fuera lo más económico y confiable posible.

En un principio se utilizaban los diodos de vacío, que eran grandes, voluminosos y poco eficientes; más tarde se desarrollaron los diodos de galena, más pequeños pero que tenían en ocasiones un comportamiento algo errático; sin embargo, con el desarrollo de los materiales semiconductores, se logró por fin construir un dispositivo que sólo condujera cuando se le aplicaba voltaje en su polaridad correcta, y que al mismo



tiempo era muy económico y de operación confiable: el diodo semiconductor.

Un diodo semiconductor es una unión de un material extrínseco tipo P con otro material extrínseco tipo N. El peculiar comportamiento de esta unión se estudió en la unidad anterior, así que ahora sólo se dará un repaso rápido.



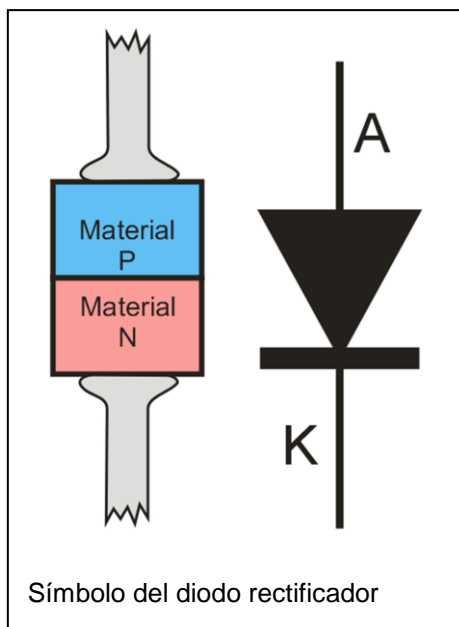
En la figura anexa se presenta un resumen del comportamiento de una unión P-N: si el dispositivo está en modo de reposo, los electrones del material N cercanos a la unión se desplazan para tratar de cubrir los huecos en el material P; esto provoca la aparición de un campo eléctrico formado por los iones de los átomos que han perdido o ganado un electrón, y este campo impide la migración de más electrones desde N hacia P, formando lo que se conoce como “zona de transición”, la cual al no poseer portadores libres, se comporta como un aislante.

Resumen del comportamiento de una unión P-N en reposo y con voltaje externo aplicado en ambas polaridades.			
		Unión de cristales semiconductores P-N en condición de reposo.	
	Voltaje (+)	Voltaje (-)	Unión P-N con voltaje externo aplicado: polaridad (+) hacia P y polaridad (-) hacia N.
	Voltaje (-)	Voltaje (+)	Unión P-N con voltaje externo aplicado: polaridad (-) hacia P y polaridad (+) hacia N.

Enseguida se observa qué sucede cuando se aplica un voltaje externo al dispositivo con la polaridad positiva (+) hacia el cristal P y la negativa (-) hacia el cristal N. En este caso, el campo positivo en P “empuja” a los huecos hacia N, y una vez ahí, son atraídos hacia el campo negativo aplicado en tal cristal; lo mismo sucede con los electrones de N: son repelidos por el campo aplicado al cristal, y una vez que alcanzan el material P, son atraídos por la polaridad aplicada a esa capa. Esto significa que con este sentido de polarización, sí existe conducción de electricidad dentro del dispositivo, y por tal razón, se dice que el diodo está conectado en “directa”.

Finalmente se observa qué sucede cuando se invierte la polaridad: en este caso, los electrones de N se ven atraídos por la polaridad positiva aplicada, mientras que los huecos de P se atraen con la polaridad negativa externa. Esto despoja de portadores la región central del dispositivo (el punto de unión), creando una capa aislante bastante amplia, e impidiendo el flujo de corriente en su interior. En este caso, se dice que el dispositivo está polarizado en “inversa”.

Este es el principio básico de operación de un diodo rectificador: cuando se polariza de tal modo que a su extremo P llegue un voltaje positivo



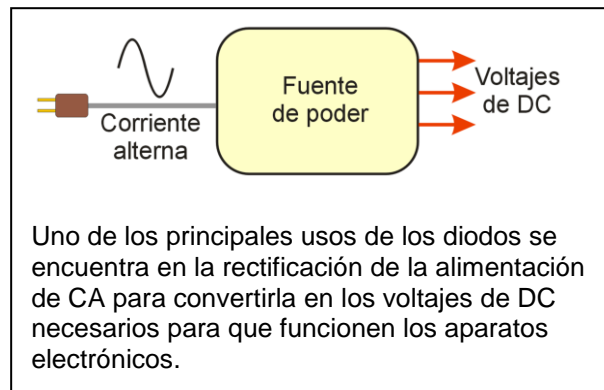
y a su extremo N llegue un voltaje negativo, el dispositivo entrará en modo de conducción, permitiendo el flujo de energía eléctrica; por el contrario, si la polaridad se invierte, el dispositivo se comporta como un aislante, impidiendo el paso de la corriente. Debido a que en las válvulas de vacío que hacían esta misma función se había bautizado a las terminales de este dispositivo como “cátodo” y “ánodo”, estos nombres también se aplicaron al diodo semiconductor, denominando como

“ánodo” (A) al extremo que corresponde al cristal P, y “cátodo” (K) al extremo del cristal N.

Para representar fácilmente a este dispositivo en los diagramas electrónicos, se le asignó un símbolo muy simple, que se muestra en la

figura anexa: se puede observar que parece una punta de flecha que indica el flujo normal de corriente si el dispositivo está polarizado en directa, con una línea en el vértice de la punta. En este caso, la base del triángulo corresponde al ánodo, mientras que la línea en el vértice corresponde al cátodo del dispositivo.

¿Cuál es la principal aplicación de un diodo semiconductor? Como ya se ha mencionado, se usan principalmente para rectificar una señal, esto es, dejarla pasar sólo cuando la polaridad sea la adecuada, y bloquearla










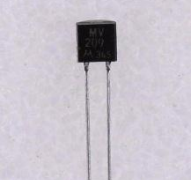








si se invierte. Esto resulta fundamental, por ejemplo, para alimentar los aparatos electrónicos en los hogares, ya que como es bien sabido, la energía eléctrica llega en forma de corriente alterna o CA, pero los dispositivos electrónicos requieren de corriente directa o CD para funcionar; esto significa que una de las primeras etapas que se encuentra en prácticamente todos los aparatos electrónicos, es un bloque de conversión de CA a CD, y en él los diodos tienen un papel muy importante, tomando por un extremo la corriente de polaridad alterna y expidiendo a su salida una corriente con polaridad directa. Por eso, a este tipo de diodos se les denomina “diodo rectificador”.

Sin embargo, y como ya se ha indicado, la estructura del diodo ha resultado extremadamente flexible, al grado que se han encontrado un gran número de variantes con distintos comportamientos y diversas aplicaciones. En la tabla de la siguiente página se muestran algunos de los diodos más empleados en la industria electrónica moderna.

En la actualidad, prácticamente es imposible encontrar algún aparato electrónico que no utilice diodos de alguna u otra forma. Se usan para la rectificación de señales de CA, como luces indicadoras para señalar que el equipo está encendido y funcionando, para estabilizar los voltajes que se aplican a circuitos integrados, como capacitores variables en procesos de sintonía, en fin, sus aplicaciones son muy variadas, y debido al desarrollo de











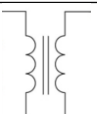

dispositivos de potencia, se fabrican diodos capaces de manejar desde unos cuantos miliamperes (para circuitos de muy baja señal), hasta decenas o cientos de amperes, para procesos industriales o de distribución de energía eléctrica. Sin duda, el diodo es uno de los dispositivos semiconductores más usados en la actualidad.



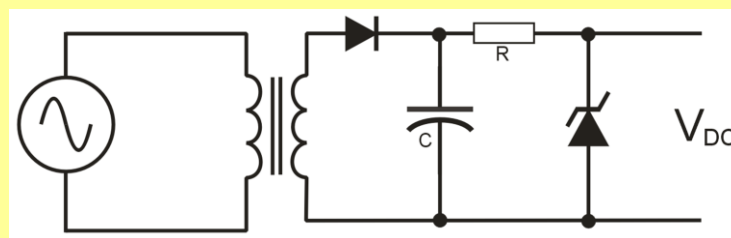
Tipos de diodos más comunes en aplicaciones electrónicas			
Diodo	Símbolo	Aspecto típico	Características
Rectificador			Es el diodo más simple, y sirve para rectificar una señal con polaridad alterna a su entrada, logrando una salida con una sola polaridad.
Zener			Funciona como regulador de voltaje, aprovechando el fenómeno de avalancha cuando se polariza en inversa.
LED			Emisor de luz, se usa como indicador o visualizador, aunque cada vez tiene más aplicaciones en telecomunicaciones o para recuperar información almacenada por métodos ópticos.
Varactor			Diodo con capacitancia variable dependiendo de su polarización, muy utilizado en procesos de sintonía y recepción de señales de radio.
Fotodiodo			Receptor de luz que conduce o no dependiendo de la iluminación recibida; muy usado en sistemas de control o en telecomunicaciones.
Túnel			Dispositivo que posee en su curva característica una zona de "resistencia negativa", lo que lo hace ideal para ciertas aplicaciones de radiofrecuencia.
PIN			Diodo conmutador, se usa para activar o desactivar bloques dentro de circuitos electrónicos; muy usado en procesos de sintonía de señales de radio.
Shottky			Diodo de muy alta velocidad de recuperación, empleado para aplicaciones donde es necesario rectificar señales de muy alta frecuencia.

El concepto de simbología electrónica

Prácticamente desde que comenzaron a construirse los primeros circuitos electrónicos, fue conveniente contar con un lenguaje gráfico propio, que pudiera representar, de forma rápida y fácil de interpretar, los distintos dispositivos que forman un circuito. Por tanto, se desarrolló una simbología electrónica, que representa con un símbolo característico a cada uno de los componentes usuales en esta rama de la tecnología. En la siguiente tabla se muestran algunos de estos símbolos:

Componente	Símbolo	Componente	Símbolo
Conductor		Resistencia	
Batería		Condensador	
Referencia de tierra		Condensador electrolítico	
Alimentación CA		Diodo común	
Bobina		Diodo zener	
Transformador		LED	

Con ellos se pueden representar diversos circuitos electrónicos; por ejemplo, una fuente simple que toma el voltaje de CA de la línea de alimentación y lo convierte en voltaje de CD podría quedar así:



Este es un conocimiento básico para cualquier estudiante de electrónica,

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 3A

- ¿Qué tipo de diodos se usaron en los primeros años de la industria radiofónica?
- ¿Cómo se construye un diodo semiconductor típico?
- ¿Cómo se denominan las terminales de este dispositivo?
- ¿Qué polaridad debe tener el voltaje externo para que un diodo entre en conducción?
- Dibuja el símbolo del diodo:
- ¿Cuál es uno de los usos más frecuentes de los diodos?
- Menciona por lo menos tres tipos de diodos que conozcas:

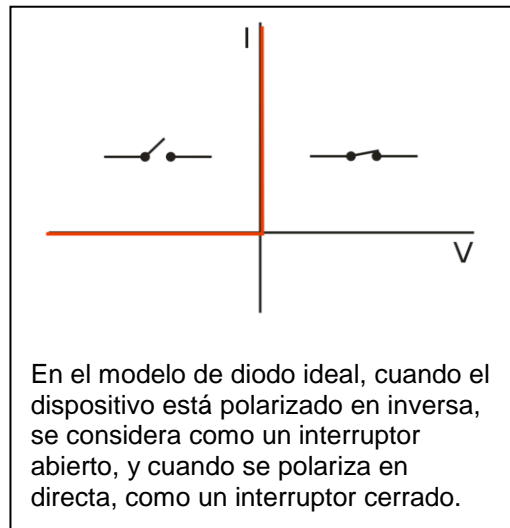
3.2 MODELOS: IDEAL, EXPONENCIAL, DE SEÑAL GRANDE Y DE SEÑAL PEQUEÑA

Cuando se diseña un circuito electrónico, se debe considerar el comportamiento de un dispositivo, para saber cómo influye en la operación total del conjunto. Existen distintas formas de visualizar la forma como se comporta un diodo rectificador, cada una con ventajas y desventajas en comparación a las demás. A continuación se describirán algunas de ellas.

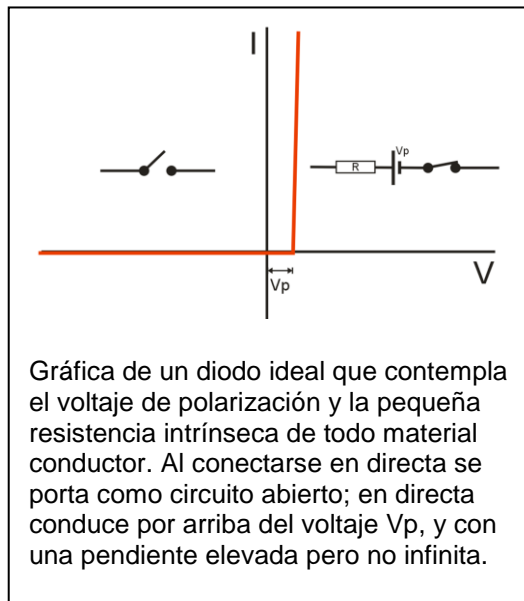
La más simple de todas, sin duda es considerar al diodo como un dispositivo ideal, que bloquea por completo la circulación de corriente cuando se polariza en inversa, pero la deja pasar de forma total cuando se polariza en forma directa. En la figura anexa se presenta una gráfica de este modelo ideal.

Si bien hay ocasiones en las que sí se puede considerar al diodo

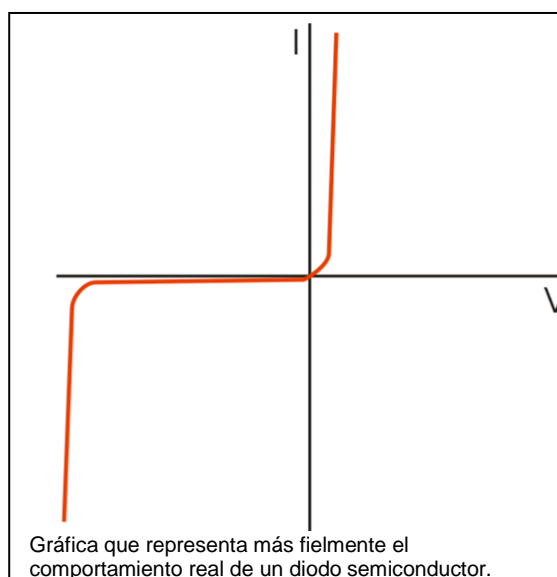
como un dispositivo ideal, en la realidad este componente se porta de manera ligeramente distinta, y existen algunos aspectos operativos que hay que tomar en cuenta, sobre todo si se trabaja con señales muy grandes o con señales muy pequeñas. Esto es especialmente crítico cuando se habla de señales que caen en el rango de polarización de un diodo, esto es, de



menos de 0.3V en el caso de los dispositivos de germanio, o de menos de 0.7V en el caso de los de silicio.



Ante este problema, se diseñó un segundo modelo de diodo ideal, donde se considera el voltaje de polarización del dispositivo. En la imagen anexa se muestra esta gráfica; es obvio que el diodo no conduce en absoluto ni en su porción de polarización negativa, ni antes de alcanzar su voltaje de polarización, pero cuando se alcanza este voltaje, el dispositivo comienza a conducir con una pendiente muy pronunciada (de hecho, la línea es casi vertical). Este modelo describe de forma más precisa el comportamiento de un diodo, pero no es un reflejo fiel de la realidad.



La curva real que muestra el comportamiento de este dispositivo se observa en la gráfica ubicada a un costado. Es notorio que en su porción negativa, el diodo prácticamente no conduce nada de electricidad, sólo una especie de “corriente residual” transportada por los portadores minoritarios dentro del material

semiconductor; sin embargo, si la polarización negativa crece demasiado, el dispositivo puede entrar en un modo de conducción forzado denominado “avalancha”, donde se pierde su capacidad aislante, y sí existe flujo de electricidad. En diodos rectificadores, se busca que este voltaje de avalancha sea lo más elevado posible, muy por encima de los voltajes que maneje normalmente un circuito, pero para ciertas aplicaciones, y manipulando cuidadosamente el porcentaje de dopado de los cristales del diodo, se puede regular el valor de esta tensión de ruptura, para que siempre ocurra a un voltaje predeterminado. Este es precisamente el principio de operación de los diodos zener, que como ya se mencionó, se han convertido en una de las referencias de voltaje más empleadas en la industria electrónica.



Al pasar a la porción positiva de la curva, se observa que, cuando se conecta en directa un diodo, antes de alcanzar su voltaje de polarización sí existe un pequeño flujo de corriente, pero para fines prácticos puede considerarse también despreciable. Cuando el voltaje comienza a alcanzar el valor de polarización, esta corriente comienza a subir de forma cada vez más pronunciada, y cuando por fin se alcanza el voltaje de conducción, la corriente puede aumentar muy rápidamente sin que esto implique un crecimiento significativo en el voltaje aplicado.

Este comportamiento de inmediato hace recordar la gráfica de una

$$I = I_S \left(e^{\frac{V - IR}{nV_T}} - 1 \right)$$

I = Corriente que circula por el diodo.
 I_S = Corriente inversa de saturación.
 V = Voltaje aplicado.
 R = Resistencia intrínseca del diodo.
 V_T = Potencial térmico.
 n = Factor de idealidad.

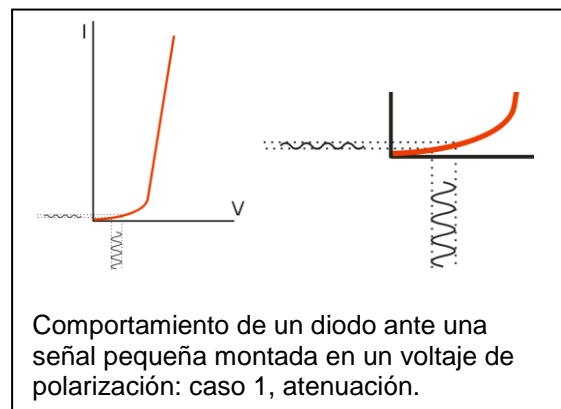
ecuación exponencial, y por eso se ha desarrollado un modelo que aprovecha esta similitud para representar de la forma más fiel posible el comportamiento de un diodo real. La ecuación que se usa para representar esta gráfica

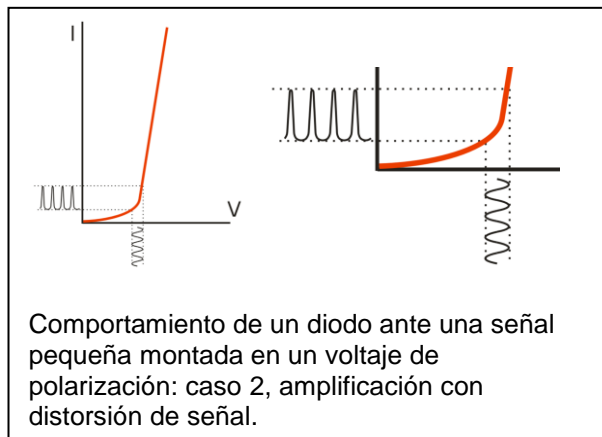
es la que se muestra a un lado, con su correspondiente descripción, indicando lo que significa cada uno de los términos de ésta. Cuando se usa esta fórmula para hacer la gráfica de un diodo, se obtiene una curva muy parecida a la de un dispositivo real, así que este modelo exponencial es el que se considera que mejor representa las características particulares de un diodo real.

Si se diseñan circuitos de muy alta precisión, será necesario que se use esta fórmula para hacer los cálculos correspondientes, pero para aplicaciones de tipo normal, el modelo ideal que sí contempla el voltaje de polarización del diodo suele ser suficiente. Precisamente por esta razón, cuando a un diodo se le aplica una señal de gran tamaño, se puede usar como modelo el que se mostró anteriormente: la gráfica ideal a la que se le ha añadido el voltaje de polarización y la resistencia intrínseca del dispositivo. En términos generales, a este modelo se le denomina “de señal grande”, y si bien no representa el comportamiento real del dispositivo, sí es lo suficientemente parecido como para que las diferencias entre los cálculos realizados y la realidad sean despreciables.

Sin embargo, aquí aparece un problema muy importante: ¿qué sucede cuando se aplica a un diodo un cierto voltaje de polarización, y éste trae “montada” una señal de valor muy pequeño? Esto puede representar algunos problemas, dependiendo del valor del voltaje de polarización y del valor de la señal asociada.

En la figura anexa se muestra el primer caso: un voltaje de polarización muy bajo, de modo que la señal montada en él cae dentro de la parte de baja conducción de la curva (conviene descartar por el momento la parte negativa de la curva). Es obvio que en este caso, las variaciones de voltaje a la entrada provocarán una variación muy pequeña en la corriente que circula en el diodo, obteniéndose para fines prácticos una atenuación de la señal.

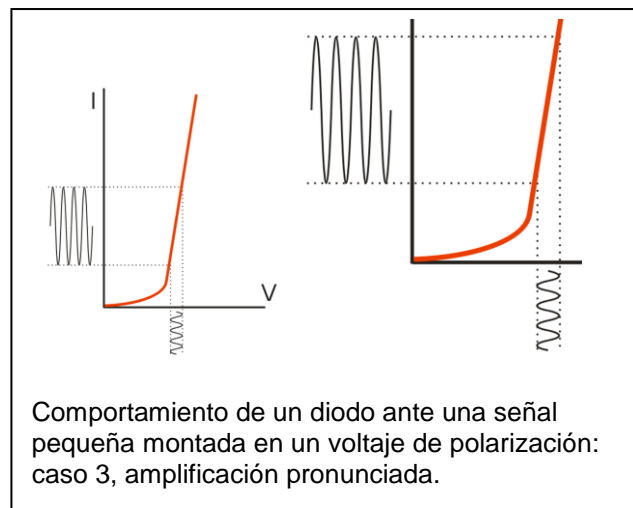




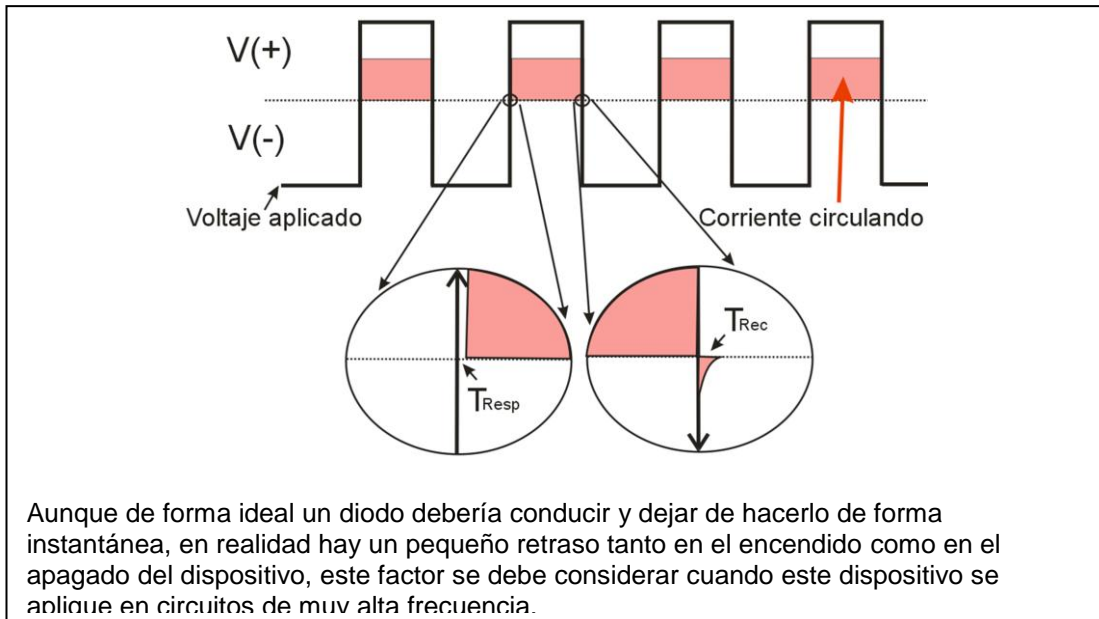
Si se aumenta el voltaje de polarización, de modo que ahora la señal anexa caiga en la región donde el diodo comienza a conducir, se tiene que ahora una pequeña variación del voltaje a la entrada se refleja como un cambio más pronunciado en la

corriente circulando, pero debido a que la señal cae en una porción no lineal de la curva, la corriente reflejada estará bastante distorsionada, como se observa en la figura anexa.

Finalmente, si el voltaje de polarización crece un poco más, ahora la señal cae en la parte lineal de la curva donde el diodo ya está en conducción, lo que significa que un cambio de voltaje muy pequeño en los extremos del diodo se refleja como cambios muy pronunciados en la corriente interna del dispositivo, lográndose una amplificación considerable.



Esto refuerza algo que ya se había mencionado: si se utilizan diodos en un circuito que maneje señales de muy baja amplitud, es necesario tomar las precauciones necesarias al momento de efectuar los cálculos correspondientes, ya que de no hacerlo, en lugar de amplificar una señal, se podría atenuar o distorsionar. Es por ello que cuando hay señales de baja amplitud involucradas, lo mejor es utilizar el modelo exponencial del diodo, ya que es el que mejor refleja el comportamiento real de este dispositivo; y es por esto que, de manera general, se considera que el modelo ideal con polarización es el que se debe utilizar cuando se hagan cálculos con señales grandes, pero cuando se involucren señales pequeñas, es mejor utilizar el modelo exponencial.



Antes de concluir el tema de los diodos, conviene mencionar otro aspecto importante de su operación: cuando a un dispositivo de estos se le aplica una señal de voltaje alterno a su entrada, en el momento en que esta señal pasa de polaridad directa a polaridad inversa, el diodo tarda un instante en reaccionar, por lo que estrictamente hablando, el diodo permanece en modo de conducción por un breve instante después de que la polaridad ya se ha invertido. A este pequeño lapso se le conoce como “tiempo de recuperación”, y la mayoría de las veces es tan breve que puede ser despreciado; sin embargo, cuando se aplica un diodo en condiciones de muy alta frecuencia, este factor comienza a influir en el comportamiento general del circuito, y hay que tomarlo en cuenta.

De igual forma, cuando un diodo entra en conducción, existe un pequeño retraso entre el momento en que aparece el voltaje directo, y el momento en que el dispositivo comienza a conducir. A este lapso se le denomina “tiempo de respuesta”, y al igual que en el caso anterior, la mayoría de las veces se puede despreciar y considerar que el diodo responde de forma instantánea; sólo cuando el componente se aplique a señales de muy alta frecuencia, este factor comienza a ser importante, y hay que considerarlo en los cálculos respectivos.

Ahora que se conoce en detalle la operación del más sencillo de los dispositivos semiconductores, ha llegado la hora de pasar a componentes

más complejos, por lo que en la siguiente unidad se estudiarán los transistores.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 3B

- a) ¿Cómo es el modelo ideal de un diodo?
- b) ¿Cómo es el modelo ideal con voltaje de polarización?
- c) ¿Por qué se dice que el modelo exponencial es el más fiel de todos?
- d) ¿Qué fenómeno aprovechan los diodos zener para funcionar como referencia de voltaje?
- e) ¿Cuál de los anteriores modelos se usa en caso de señales grandes?
- f) ¿Qué sucede cuando a un diodo se le aplica una señal de valor pequeño?
- g) ¿Cuándo hay que tomar en cuenta los tiempos de recuperación y respuesta de los diodos?

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cómo se construye un diodo semiconductor?
2. ¿Por qué se les dio el nombre de “ánodo” y “cátodo” a sus terminales?
3. ¿Cómo debe estar polarizado un diodo para conducir? ¿Qué sucede si se invierte la polaridad?
4. ¿Para qué sirve un diodo varactor? ¿Y un fotodiodo?
5. Dibuja las curvas de modelo ideal, ideal con polarización y exponencial de un diodo:
6. ¿Cuál de ellas se utiliza cuando se aplica el diodo con señales grandes?
7. Escribe la fórmula del modelo exponencial de un diodo:
8. ¿Qué ocurre si se aplica una señal muy pequeña a un diodo en la zona donde apenas está entrando en conducción?
9. ¿Se puede usar un diodo como amplificador de señal?
10. ¿Cómo se le denomina al tiempo que tarda un diodo en comenzar a conducir? ¿y para apagarse?

RESPUESTAS

1. Con la unión de un cristal semiconductor tipo P con un cristal semiconductor tipo N.
2. Porque así se llamaban las terminales de los diodos de vacío.
3. Con el voltaje positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. Si se invierte la polaridad, el diodo no conduce.
4. El varactor funciona como capacitancia variable dependiendo de su polarización, y el fotodiodo como detector de presencia de luz.
5. Evaluar los dibujos presentados.
6. La gráfica del diodo ideal con polarización.

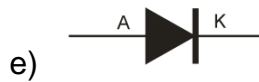
7.
$$I = I_s \left(e^{\frac{V-IR}{nV_T}} - 1 \right)$$

8. Se produce una amplificación, pero se distorsiona la salida.
9. Sí, aplicando la señal de entrada en la zona de conducción de su curva característica.
10. Tiempo de respuesta y tiempo de recuperación.

RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

Actividad de aprendizaje 3A:

- a) Los diodos al vacío y los diodos de galena.
- b) Con la unión de un cristal semiconductor tipo P con otro tipo N.
- c) Ánodo y cátodo.
- d) El voltaje positivo debe ir al ánodo, y el negativo al cátodo.



- f) Como rectificador de señal, convirtiendo una entrada de CA en salida de CD.
- g) Rectificador, zener, LED, varactor, fotodiodo, PIN, Schottky y túnel.

Actividad de aprendizaje 3B:

- a) El diodo se porta como un interruptor abierto cuando se polariza en inversa, y como un interruptor cerrado al polarizarse en directa.
- b) El diodo se comporta como un interruptor abierto al polarizarse en inversa y también en directa antes de alcanzar su voltaje de polarización; al alcanzar este voltaje, comienza a conducir, con una pendiente muy pronunciada (casi vertical).
- c) Porque la curva de comportamiento real de un diodo se porta de forma muy similar a una gráfica exponencial, al menos en su zona de conducción.
- d) El fenómeno de avalancha que aparece cuando se polariza en inversa.
- e) El modelo ideal con voltaje de polarización.
- f) Puede atenuar, distorsionar o amplificar la señal, dependiendo de en qué punto de la curva de conducción caiga.

UNIDAD 4

EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO (FET)

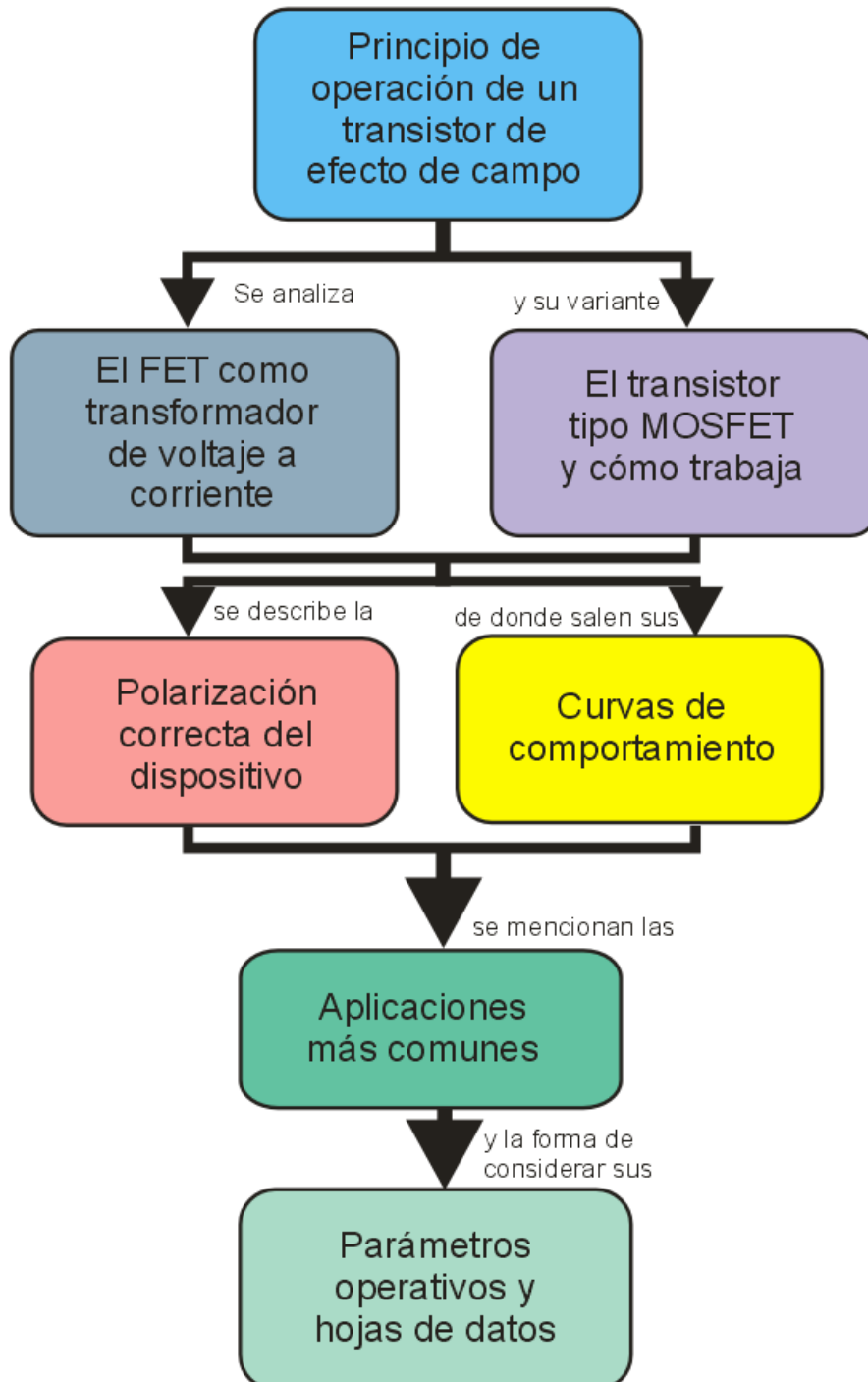
OBJETIVO

Mostrar al estudiante el principio básico de operación de un transistor de efecto de campo, sus aplicaciones más comunes, su forma de uso como interruptor o amplificador, las variantes más usuales de esta tecnología, y qué se puede lograr con ella.

TEMARIO

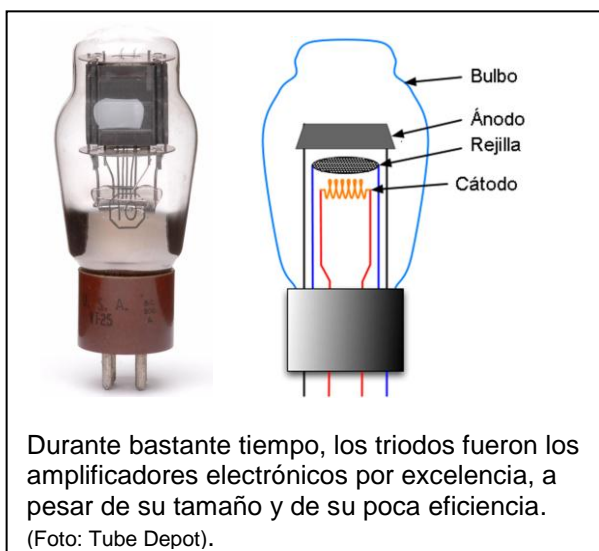
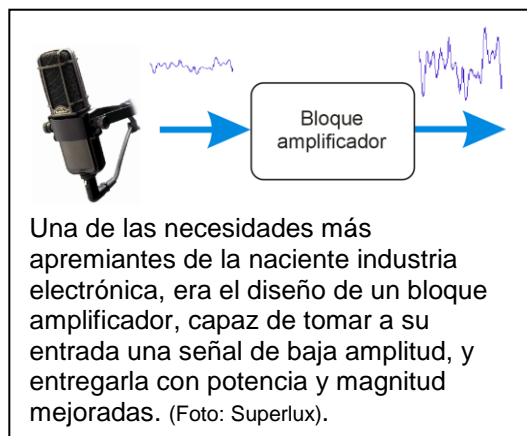
- 4.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN FET
- 4.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN
- 4.3 EL MOSFET COMO ELEMENTO DE CONMUTACIÓN
- 4.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO
- 4.5 ESPECIFICACIONES DE FABRICANTE

MAPA CONCEPTUAL



INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos que enfrentó la industria electrónica prácticamente desde sus inicios, fue la necesidad de amplificar señales de muy baja amplitud, para que éstas tuvieran un nivel adecuado para su posterior proceso. Por ejemplo, si se tiene un micrófono que capta los sonidos, la señal que sale de él por lo general tiene una amplitud de unos cuantos milivoltios, lo cual evidentemente no es adecuado para aplicarlo a una bocina o a un aparato de proceso de audio. Cuando se recibe una estación de radio por medio de una antena, la magnitud de señal recibida también es minúscula, y es necesario amplificarla para poder finalmente captar el audio transmitido. Y como éstas, hay muchas más aplicaciones para un dispositivo capaz de amplificar una señal de entrada.

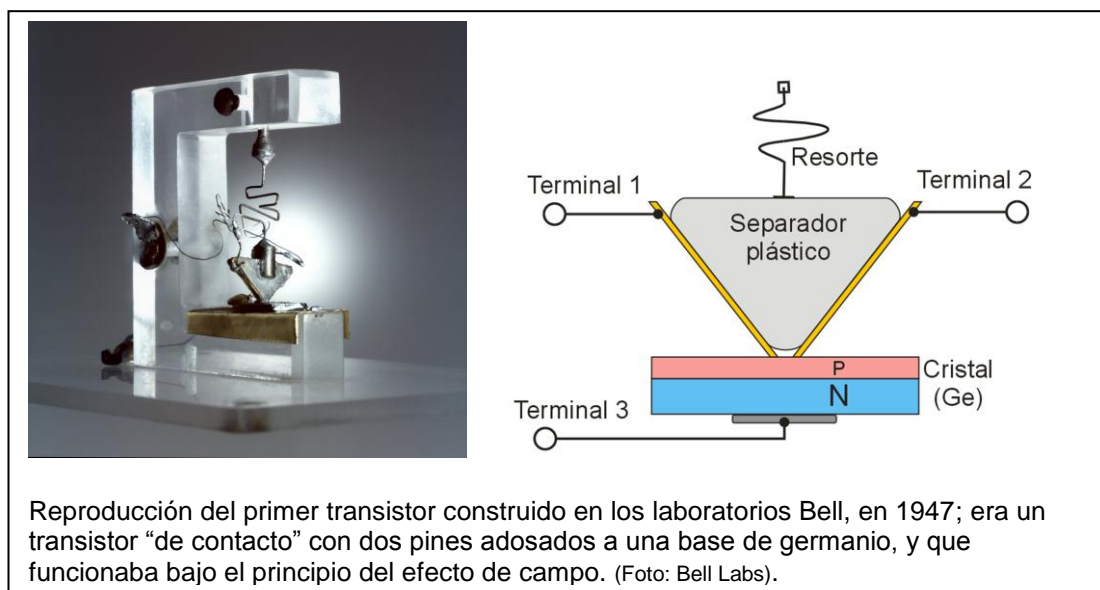


En un principio, para realizar esta labor se utilizaban las válvulas de vacío o bulbos, específicamente uno denominado “triodo”. Estos dispositivos cumplían adecuadamente con su labor, pero tenían varios inconvenientes, como ser demasiado voluminosos y frágiles, además de gastar demasiada energía por la necesidad de contar con un filamento incandescente. Por

eso, cuando se descubrió que un diodo semiconductor podía reemplazar a un diodo al vacío, de inmediato se buscaron formas de conseguir, mediante

cristales semiconductores, un efecto de amplificación similar al que se obtenía con estas válvulas.

Las primeras noticias relacionadas con “amplificadores de cristal”, surgieron a mediados de la década de 1920, cuando J. E. Lilienfield patentó una idea básica de cómo funcionaría un dispositivo de éstos, aunque nunca pudo construir uno. Tuvieron que pasar más de 20 años para que de la teoría se pasara a la práctica: en 1947, un equipo de investigadores de los laboratorios Bell, formado por Brattain, Bardeen y Shockley, desarrollaron el primer “triodo de cristal” de la historia, el cual precisamente funcionaba bajo el principio de “efecto de campo” que caracteriza a los transistores tipo FET (siglas de *Field Effect Transistor* o transistor de efecto de campo). En el diagrama anexo se muestra la construcción de este primer transistor, y una descripción de su estructura interna. Por tal descubrimiento, este equipo de investigadores ganó el premio Nobel de física en 1956.



A partir de ese momento, los transistores rápidamente reemplazaron a las grandes y poco eficientes válvulas de vacío, revolucionando la tecnología electrónica, y dando paso a la miniaturización tan característica de esta industria. Durante todo este tiempo, y hasta la actualidad, los transistores tipo FET han contribuido notablemente con el desarrollo de la electrónica en todos sus campos; de hecho, estos dispositivos son la base para prácticamente todos los circuitos integrados de proceso digital que se conocen actualmente. Definitivamente, los transistores tipo FET son la

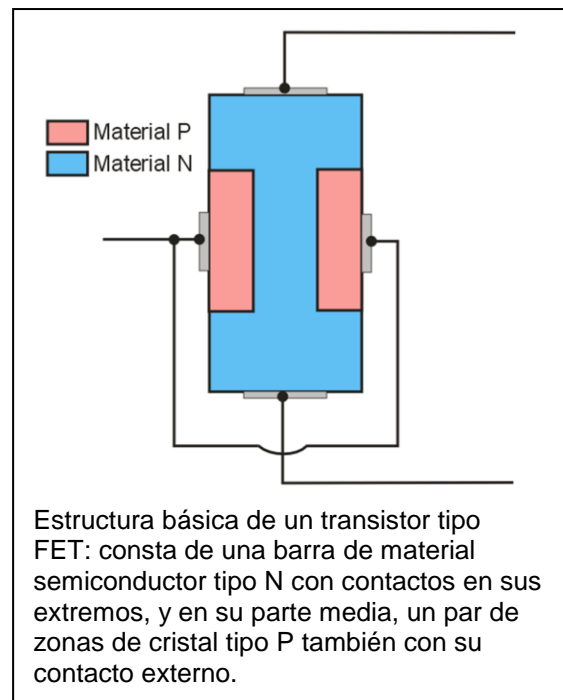
pedra angular de la tecnología moderna, y al parecer lo seguirán siendo por muchos años más.

4.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN FET

¿Cuál es el origen del término “transistor”? Cuando el departamento legal de la compañía Bell comenzó los trámites para patentar el descubrimiento hecho por Barden, Brattain y Shockley, los abogados decidieron buscar un nombre característico, que fuera fácil de recordar y que al mismo tiempo describiera de alguna forma la función del dispositivo. Debido a que el componente *transformaba* un voltaje en una *resistencia variable* (*transform-resistor*), decidieron darle el nombre de *transistor* al nuevo dispositivo creado.

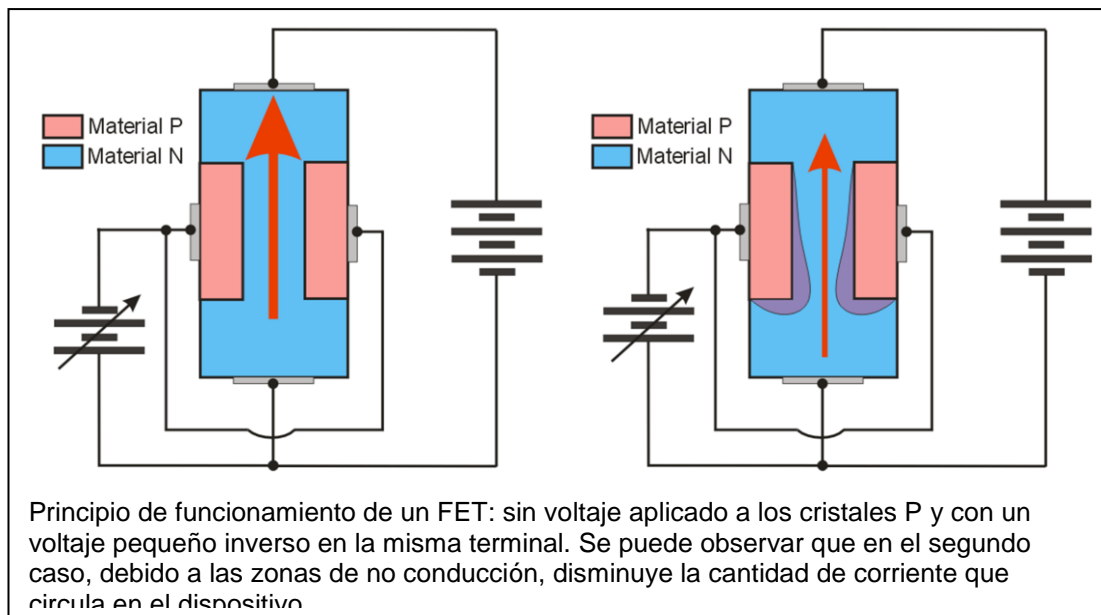
¿Cómo se transforma un voltaje variable en una resistencia variable? Para averiguarlo, se debe explorar la construcción tan particular que tienen estos componentes. En la figura anexa se muestra un diagrama simplificado de la estructura típica de un transistor tipo FET; se puede observar que se trata de una barra de material semiconductor tipo N, con terminales de conexión en sus extremos superior e inferior; y en la parte media de la barra se encuentran un par de cristales tipo P, los cuales están unidos eléctricamente entre sí, y forman una nueva terminal. Entonces, un transistor de efecto de campo típico es un dispositivo de tres terminales, dos por donde circula la corriente, y uno que servirá para controlar el flujo de esa corriente.

¿Cómo se lleva a cabo ese control? En la figura anexa se presenta el FET conectado a dos fuentes externas, una entre sus terminales superior e inferior, y una fuente variable negativa conectada a la terminal del centro (la de control). Para efectos didácticos, se supondrá que en un inicio la fuente variable tiene un valor de cero voltios, y poco a poco empieza a subir su tensión inversa de salida; mientras que por el otro lado, la fuente entre la terminal



superior y la inferior del dispositivo permanece constante.

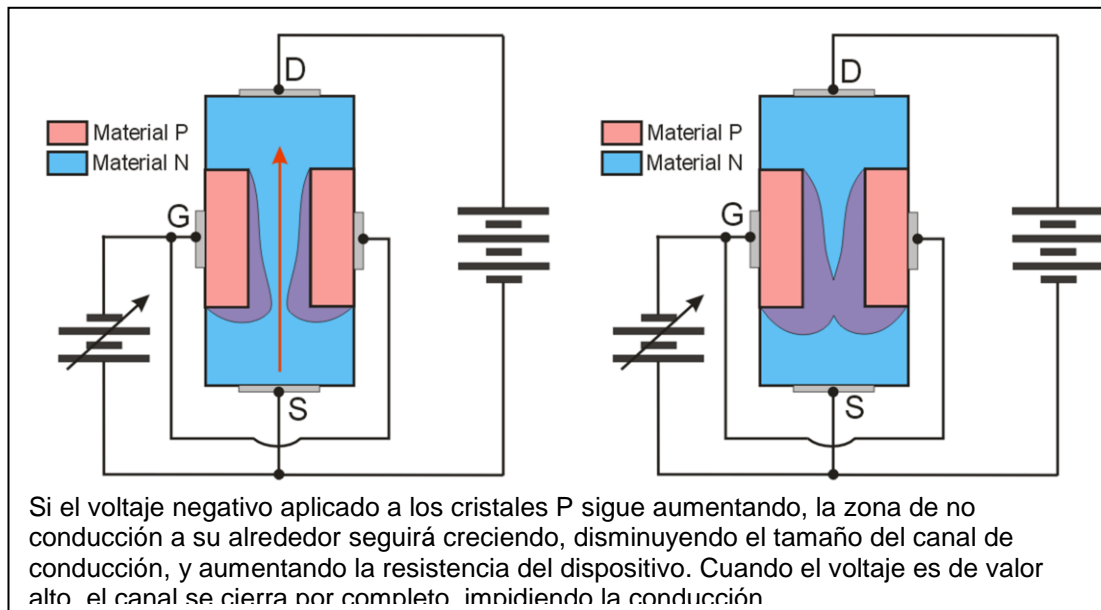
Cuando el voltaje en la terminal de control es cero, la corriente puede fluir en el canal central del dispositivo, ya que los portadores del mismo (electrones), son repelidos por la tensión negativa de la fuente (terminal inferior), mientras que son atraídos por la tensión positiva (terminal superior); esto significa que en condición de reposo, este FET se comporta prácticamente como un conductor, y por tanto se dice que está en modo de saturación.



Si el voltaje aplicado a la terminal de control comienza a subir, aparece un fenómeno que ya se explicó en la unidad correspondiente al comportamiento de los semiconductores: cuando se aplica un voltaje inverso a una unión P-N, los portadores de ambos cristales son atraídos hacia los extremos del dispositivo, creando una zona de no conducción (aislante) en la unión. Esto es lo que comienza a suceder en el FET, creándose una región de no conducción alrededor de los cristales P, y eso reduce el tamaño del canal conductor central, incrementando la resistencia del dispositivo y disminuyendo la cantidad de corriente que puede circular por él.

Si continúa el aumento de voltaje inverso en la terminal de control, la zona de no conducción seguirá creciendo, hasta llegar a un voltaje en el cual estas zonas han crecido tanto que “cierran” por completo el canal de conducción, impidiendo la circulación de corriente dentro del dispositivo.

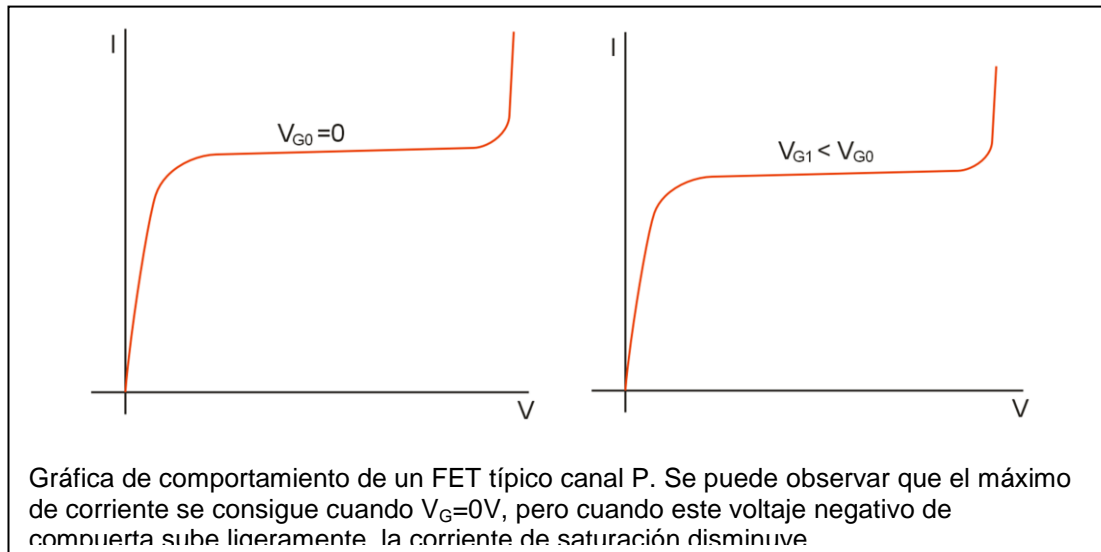
Esto significa que, para fines prácticos, el dispositivo se está portando como una resistencia variable, cuyo valor depende del voltaje aplicado en la terminal de control.



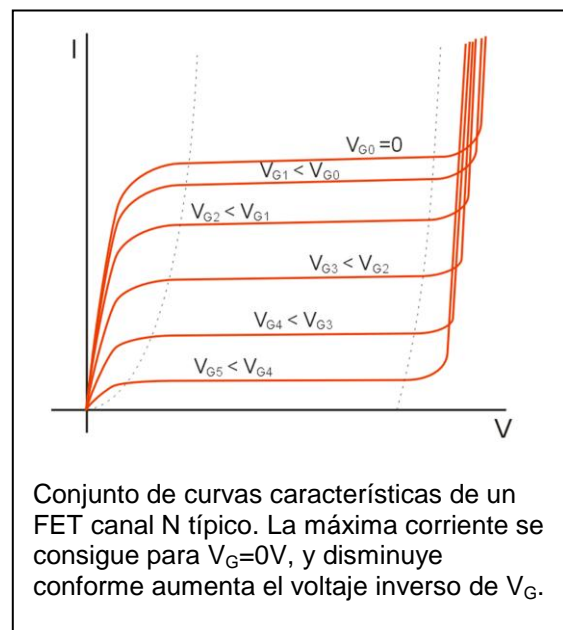
Este es el comportamiento particular que hace especial a un FET: su capacidad de regular la cantidad de corriente que puede circular a través del dispositivo dependiendo del voltaje aplicado a una terminal de control. Para identificar sus terminales, se decidió que el extremo del cristal conductor por donde entran los portadores de electricidad se denominaría “Fuente” (*Source*), el extremo por donde salen sería el “Drenaje” o “Drenador” (*Drain*) y la terminal de control sería una “Compuerta” (*Gate*). Entonces, se puede decir que un FET es un dispositivo en el cual la corriente que circula entre D-S varía dependiendo del voltaje en G.

Este comportamiento se puede graficar en una serie de curvas que representen la cantidad de corriente que fluye a través del dispositivo dependiendo del voltaje aplicado a los extremos del cristal N, para distintos valores de voltaje en P. En la figura anexa se presenta la gráfica en el caso de que no se aplique ningún voltaje a la compuerta; se puede observar que la corriente en el dispositivo crece rápidamente desde cero hasta llegar a un valor de saturación, y cuando se alcanza este punto, se puede seguir aumentando el voltaje entre D y S sin que ello afecte demasiado la cantidad de corriente en el cristal; sin embargo, cuando se llega a un voltaje de

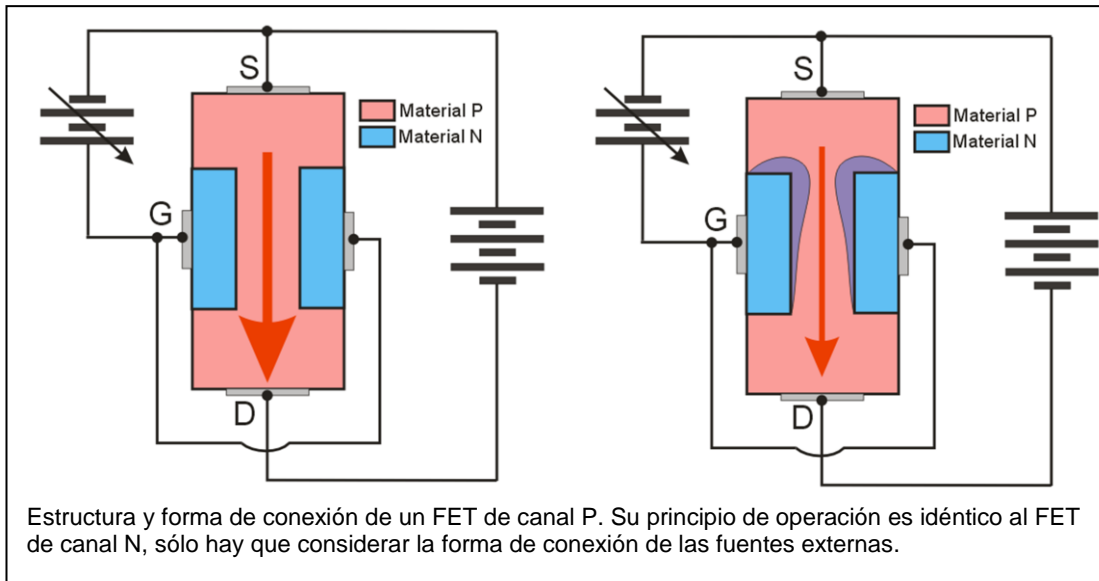
ruptura, el dispositivo entra en conducción, lo que normalmente trae consigo su destrucción.



Si ahora se aplica un voltaje inverso pequeño en la compuerta, la curva resultante será casi igual a la anterior, pero en este caso, la corriente de saturación será menor que en la gráfica anterior, además de que el voltaje de ruptura también será un poco menor. Si se aumenta gradualmente el voltaje negativo de compuerta, este comportamiento se repite poco a poco, hasta que al alcanzar el voltaje donde se cierra completamente el canal de conducción, se tendrá un valor cero de corriente. En la gráfica anexa se muestran una serie de curvas características de un FET canal N típico.



Todo lo que se ha explicado también puede aplicarse para un dispositivo que tenga un canal hecho con cristal tipo P y con las compuertas con cristal tipo N; la única consideración es que se deben cambiar ligeramente los voltajes aplicados, y como ahora los portadores mayoritarios son los huecos y no los electrones, en este tipo de FET se considera que la corriente circula desde el extremo positivo de la fuente hacia el negativo.



En la figura anexa se muestra una representación de cómo es la estructura interna de un FET canal P, su conexión y la forma como se va cerrando el canal de conducción cuando comienza a aumentar el voltaje aplicado a la compuerta. Es obvio que el comportamiento de este FET es muy similar al de un canal N, sólo considerando los cambios en la polaridad de los voltajes aplicados.

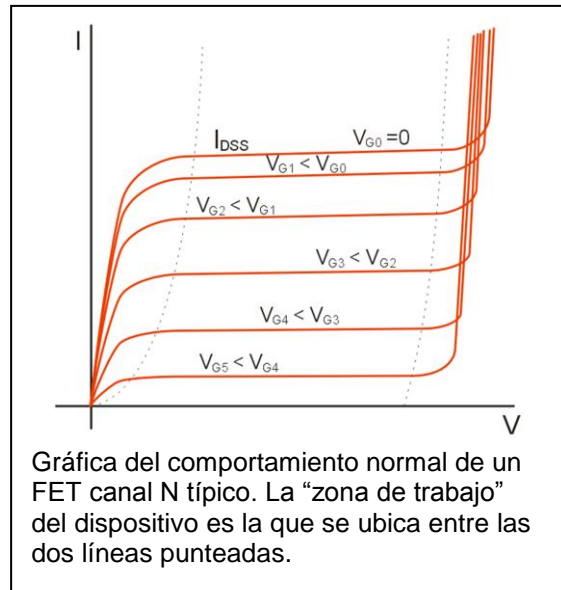
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4A

- ¿Qué significa el término “transistor”?
- ¿Cuál es la estructura básica de un FET típico?
- ¿Por qué se necesita una fuente inversa para hacer funcionar al FET?
- ¿Cómo se denominan las tres terminales de un FET?
- ¿Para qué voltaje de compuerta se tiene el máximo de corriente entre D y S?
- ¿Qué sucede cuando el voltaje inverso de compuerta se incrementa?

4.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN

Con la explicación anterior, se puede decir que un transistor de efecto de campo funciona como un dispositivo que deja pasar cierta cantidad de corriente entre sus terminales D-S, y esa cantidad está regulada por el voltaje que se aplique en su terminal G. Conviene recordar la gráfica donde se muestran las curvas características de un FET canal N, para precisar un par de detalles interesantes:

Se puede observar que en la gráfica se han incluido un par de líneas punteadas, una en el extremo izquierdo y otra al extremo derecho de las curvas. Estas líneas marcan el inicio y el final de la zona de corriente constante para cada valor de V_G , y la región entre ambas líneas punteadas representa precisamente la zona de trabajo de un FET. Se considera que la curva con la máxima corriente que maneja el dispositivo es la correspondiente a un voltaje de compuerta igual a cero voltios, y se le denomina “corriente de saturación entre drenaje y fuente”, y se le asignan las siglas I_{DSS} .



De la misma manera, al voltaje necesario para que el dispositivo deje de conducir se le ha dado el nombre de “voltaje de estrangulamiento”, y se

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

I_{DS} = Corriente dentro del FET
 I_{DSS} = Corriente de saturación
 V_{GS} = Voltaje de compuerta
 V_P = Voltaje de estrangulamiento

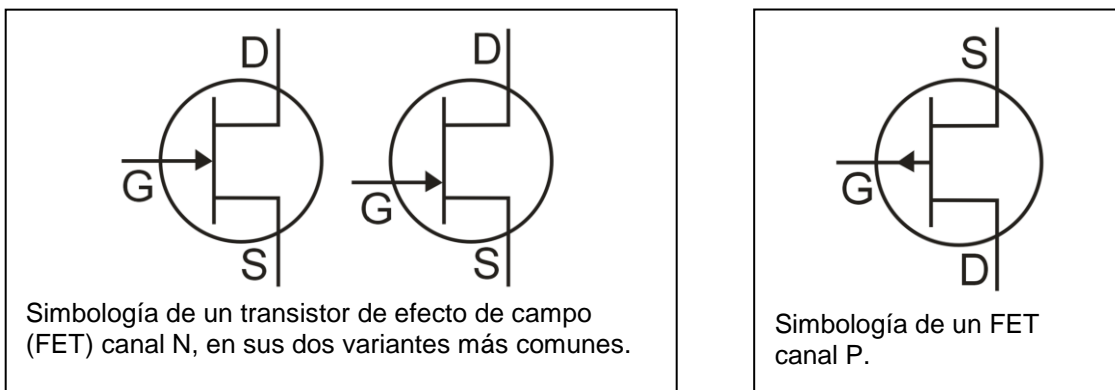
identifica con las siglas V_P . Con estos datos, si se desea saber qué corriente estará circulando a través del dispositivo para un cierto voltaje en su compuerta, el modelo matemático que representa el comportamiento de un FET se muestra en

el recuadro anexo. Se observa que la corriente que circula dentro del dispositivo (I_{DS}) será igual a la corriente de saturación I_{DSS} multiplicada por un factor que se calcula por medio del voltaje aplicado en la compuerta y el voltaje de estrangulamiento del FET. Es importante señalar que esta fórmula sólo se cumple en la zona lineal de la gráfica, esto es, la región entre las dos líneas punteadas marcadas en la figura anterior; además de que no se considera válido un valor de V_{GS} mayor al de V_P .

De lo anterior se desprende que, mientras se obligue al dispositivo a operar en su “zona de trabajo”, su comportamiento es muy predecible, y se puede aprovechar para múltiples aplicaciones dentro de la electrónica. Pero ¿cómo se garantiza que un FET sólo funcione dentro de su zona de trabajo?

Aquí se involucra la correcta polarización del dispositivo, lo cual se describirá enseguida.

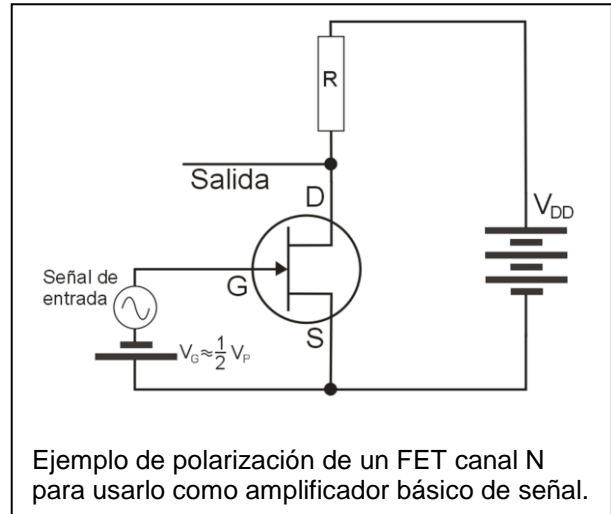
Para aprovechar las propiedades tan especiales de un FET dentro de un circuito electrónico, es necesario obligarlo a trabajar en ciertas condiciones que fuercen al componente a funcionar como un amplificador, que transforme pequeñas variaciones en el voltaje de entrada en grandes variaciones en su corriente de salida. Para hacer esto, es necesario polarizar al FET de modo adecuado, a continuación se detallará precisamente ello.



Pero antes de comenzar con el tema de la polarización, se debe mencionar un punto importante: recordando que para representar de forma gráfica un circuito electrónico se utiliza una simbología especial, resulta obvio que los FET también poseen un símbolo que los identifica fácil y rápidamente. En la figura anexa se muestra esta simbología para un transistor de efecto de campo canal N. Si bien el símbolo más común es el mostrado en el extremo izquierdo, algunos autores y empresas utilizan el que se muestra a la derecha, y se hace esto para identificar a primera vista cuál de las terminales es el drenador y cuál la fuente. Por supuesto que los FET canal P también poseen su símbolo específico, el cual se muestra en la figura anexa. Se puede observar que la diferencia entre ambos es la dirección de la punta de flecha en su compuerta, y precisamente lo que indica es el sentido de la unión P-N resultante. Conviene recordar este detalle, ya que se usa constantemente en la simbología de diversos componentes electrónicos.

Regresando al tema de la polaridad de un transistor, si se desea utilizar este dispositivo como un amplificador, es necesario forzarlo a trabajar en un punto intermedio de su curva característica; esto es, si se trata de un

transistor canal N, conectarlo de tal forma que su voltaje de compuerta caiga aproximadamente en la parte media de su zona de trabajo, de modo que el canal de conducción dentro del FET esté parcialmente cerrado y la corriente que circule por él sea de aproximadamente la mitad de su corriente de saturación. Esta situación se ilustra en la figura anexa, donde se ha colocado un FET como amplificador: se puede observar que el FET posee una fuente de poder conectada entre D y S, pero con una resistencia en su terminal D; por otra parte, en la compuerta se aplica un voltaje negativo de alrededor de $1/2 V_P$, esto es, la mitad del voltaje de estrangulamiento del dispositivo; finalmente, la señal que se desea amplificar se conecta de tal modo que se suma a ese voltaje de polarización en la compuerta.



D y S, pero con una resistencia en su terminal D; por otra parte, en la compuerta se aplica un voltaje negativo de alrededor de $1/2 V_P$, esto es, la mitad del voltaje de estrangulamiento del dispositivo; finalmente, la señal que se desea amplificar se conecta de tal modo que se suma a ese voltaje de polarización en la compuerta.

La manera en la que trabaja este circuito es la siguiente: cuando la señal de entrada es igual a cero, al estar polarizada la compuerta del FET con un voltaje de aproximadamente la mitad de su valor de estrangulamiento, la corriente D-S dentro del dispositivo será de aproximadamente la mitad de su corriente de saturación; esto significa que en la terminal D (de donde se está tomando la salida de señal) se tendrá el valor de la batería V_{DD} menos la caída de voltaje que la corriente circulando provoque en la resistencia R. Si ahora la señal de entrada toma un valor positivo pequeño, este valor se resta al del voltaje de polarización de G, haciendo que el FET conduzca un poco más, provocando más caída en la resistencia, y presentando en D un voltaje más bajo. Por el contrario, si la señal de entrada toma un valor negativo, este se suma al voltaje de polarización de G, reduce aún más el canal de conducción interno y hace disminuir la corriente circulando, por lo que la caída de voltaje en R es menor, y el voltaje en D aumenta.

Resulta obvio de la explicación anterior, que calculando cuidadosamente los valores de V_G , V_{DD} y R, se puede conseguir un circuito

que tome una señal muy pequeña de entrada en G y la expida amplificada e invertida en su terminal D. Precisamente, el cálculo de los valores anteriores es el aspecto más importante para conseguir una buena polarización de un transistor.

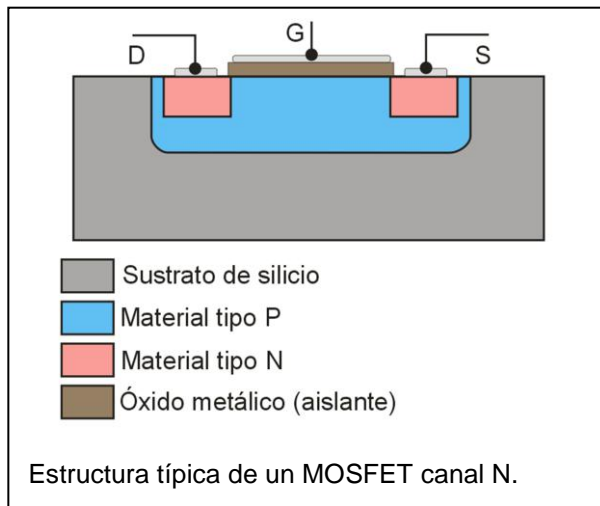
ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE 4B

- a) ¿Dónde se encuentra la zona de trabajo de un FET?
- b) ¿Cómo se identifica a la corriente de saturación?
- c) ¿Cómo se denomina al voltaje aplicado a compuerta cuando el FET deja de conducir?
- d) Escribe la fórmula para el modelo matemático de un FET típico:
- e) ¿Qué se entiende por “polarización” de un FET?
- f) ¿Cuál es la manera más directa de polarizar un FET canal N?
- g) ¿De dónde sale la señal amplificada?

4.3 EL MOSFET COMO ELEMENTO DE CONMUTACIÓN

Si bien el FET común funciona adecuadamente como amplificador de señal, presenta un defecto importante para su aplicación en diversos circuitos electrónicos, como la necesidad de un voltaje de polarización de compuerta negativo, lo que lo hace poco recomendable para circuitos que sólo tengan una fuente de poder sencilla. Este es el caso de los circuitos digitales, donde los dispositivos funcionan sólo entre dos niveles: “bajo” y “alto”, o lo que es lo mismo, un voltaje cercano a cero voltios para “bajo” y un voltaje cercano a V_{DD} para “alto”. En este caso, sería mucho mejor si existiera alguna forma de utilizar un FET de modo que necesitara voltajes con una polaridad única, y el desarrollo de tal dispositivo se convirtió en un reto para los investigadores de las empresas electrónicas. El resultado de estas investigaciones es el transistor tipo MOSFET, siglas en inglés de “transistor de efecto de campo semiconductor con óxido metálico”, el cual tiene una estructura muy particular y un principio de funcionamiento ligeramente distinto al del FET común.

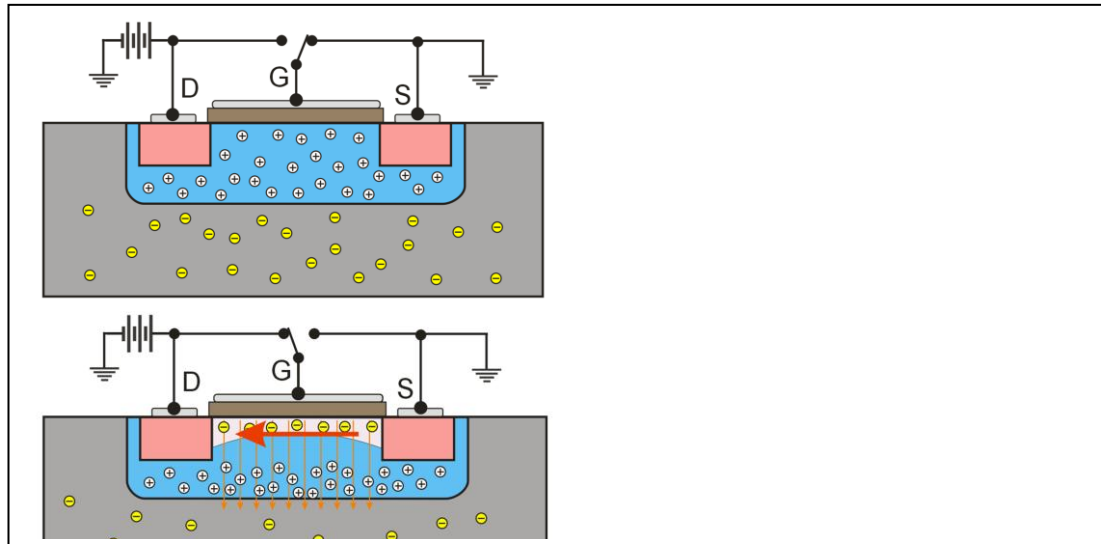
En la figura anexa se muestra una representación de cómo está construido un MOSFET canal N típico; se puede observar que se trata de



una capa de material P y dentro de ella se han incrustado un par de regiones tipo N, a las cuales están adosadas las terminales D y S respectivamente; sin embargo, entre ambas zonas N se ha depositado una delgada laminilla de material aislante formada normalmente por algún óxido metálico, y sobre esa laminilla se

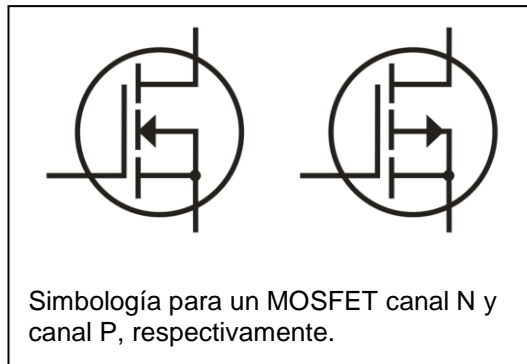
coloca una placa de conexión que hará las veces de compuerta.

¿Cómo funciona este dispositivo? Si se aplica un voltaje positivo entre D y S, y se hace que el voltaje de la compuerta sea igual a cero, la estructura está en condiciones de reposo, se tiene una región P separando las regiones N polarizadas, y debido a las características de la unión P-N, no circula corriente a través de estas terminales; en tal caso, el dispositivo está en corte, y no hay circulación de portadores.



Cuando comienza a aplicarse un voltaje positivo a la terminal G, aparece un fenómeno curioso: los huecos del material P son repelidos por este campo eléctrico, y los pocos electrones libres que se encuentran en el sustrato metálico del dispositivo, comienzan a ser atraídos por ese campo. Con esto, se empieza a formar un canal entre ambas regiones N, donde debido a la presencia de los electrones atraídos, puede circular corriente

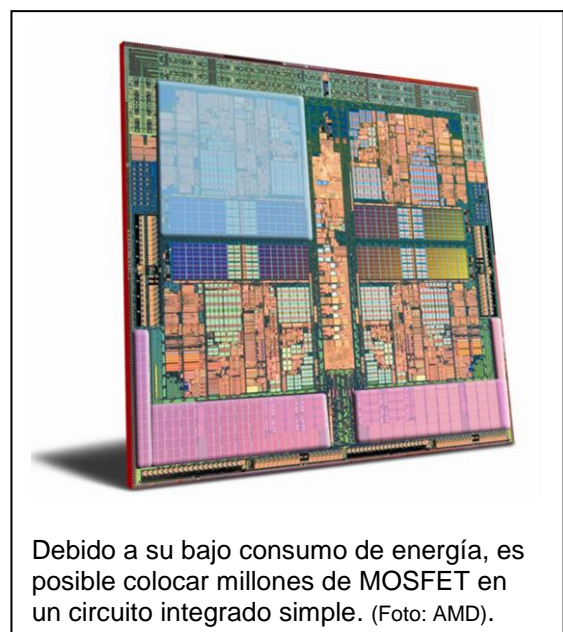
entre D y S. Si el voltaje aplicado a la compuerta es del valor suficiente, el canal N se forma por completo, permitiendo la circulación de electrones, y colocando al dispositivo en modo de saturación. Esta situación también ocurre en el caso de los transistores MOSFET canal P, lo único que hay que tener en consideración es la polaridad de la fuente externa aplicada.



Este es el principio de operación de los transistores tipo MOSFET, que son los más utilizados para la construcción de circuitos de proceso digital de señal. En la figura anexa se muestra su simbología, tanto para transistores canal N como para canal P.

Si bien estos dispositivos pueden funcionar también como amplificadores si se polarizan de manera adecuada, en realidad su comportamiento en la zona de trabajo no es muy regular, así que las aplicaciones analógicas de estos dispositivos son en realidad muy escasas. Es en la electrónica digital, en la que estos componentes sólo tienen que trabajar en sus modos de corte o saturación, donde brillan con luz propia, ya que sus características operativas los hacen ideales para este tipo de aplicaciones.

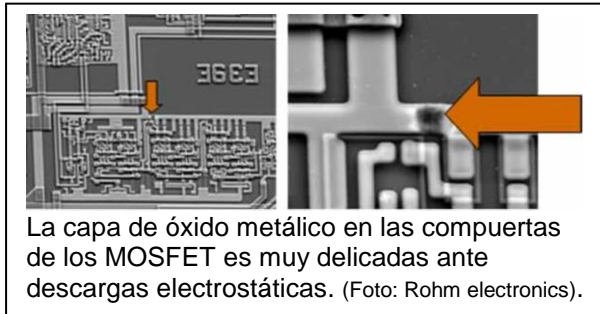
Por ejemplo, la existencia de la capa aislante entre la compuerta y el dispositivo en sí, hace que estos elementos se disparen con la presencia de voltaje, y que prácticamente no requieran de flujo de corriente para funcionar (al menos en la compuerta). Esto hace que la fuente de disparo pueda ser un voltaje con muy poca potencia de salida, y aun así, el MOSFET lo captará y reaccionará de modo



adecuado. Esto también es importante cuando se comienzan a combinar

varios miles de transistores en un circuito integrado individual, ya que al no necesitar circulación de corriente para el disparo del componente, se reduce el consumo energético, logrando chips más rápidos y eficientes.

Sin embargo, no todas son ventajas para los MOSFET; también poseen algunos inconvenientes que se deben tomar en cuenta cuando se



La capa de óxido metálico en las compuertas de los MOSFET es muy delicadas ante descargas electrostáticas. (Foto: Rohm electronics).

trabaja con ellos. El más importante es que la laminilla aislante de la compuerta es muy delicada, y fácilmente puede dañarse por descargas electrostáticas, lo que significa

que al manipular estos componentes, hay que tomar algunas precauciones adicionales. Otro punto que se debe considerar es que entre la compuerta y el cuerpo del transistor, se forma una pequeña capacitancia parásita, lo que significa que, cuando hay algún cambio de voltaje en la compuerta, ésta no reacciona de manera instantánea, sino que hay un tiempo de retraso mientras el capacitor de entrada se carga o se descarga. Esto puede aprovecharse para ciertas aplicaciones, como son los circuitos de memoria (los módulos de RAM dinámica utilizan precisamente la capacitancia de estos transistores para guardar la información binaria en sus chips); pero tiene como inconveniente que los transistores MOSFET son más lentos en reaccionar que otras tecnologías. Este factor se ha podido minimizar a lo largo de los años, consiguiendo en la actualidad dispositivos de proceso de señal que trabajan por encima de los mil megahertz de frecuencia (como los microprocesadores en computadoras personales); sin embargo, es un factor que hay que contemplar en diseños que trabajarán a muy alta velocidad.

Una ventaja adicional de los MOSFET es que su estructura básica puede escalarse hacia abajo y hacia arriba; esto significa que no sólo se pueden miniaturizar los



Los MOSFET de potencia se han convertido en los principales componentes de las fuentes conmutadas, las más utilizadas en la actualidad. (Foto: Fairchild).

transistores, sino que también pueden hacerse más grandes, y por tanto, capaces de manejar grandes voltajes y corrientes. En la actualidad, los MOSFET se usan ampliamente en aplicaciones de conversión de energía, como fuentes de poder, y no es raro encontrar transistores que trabajen habitualmente a decenas o cientos de voltios, y que permitan la circulación de decenas o cientos de amperios, algo muy difícil de lograr con otro tipo de transistores.

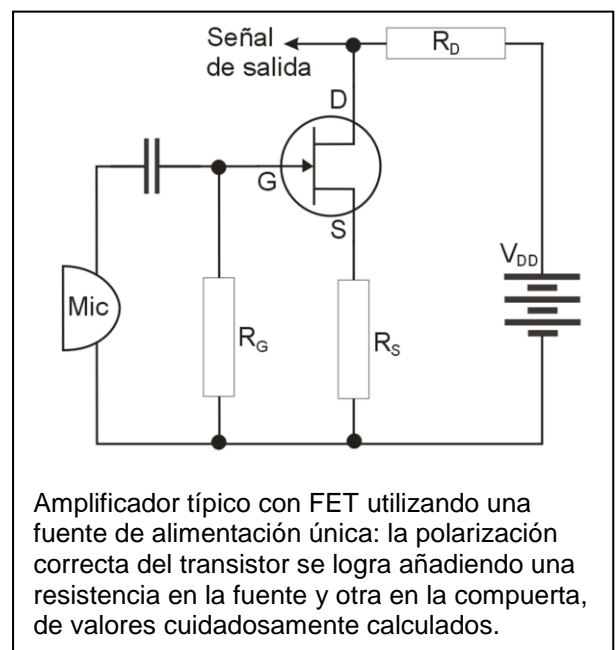
ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4C

- ¿Cuál es el principal inconveniente del FET común?
- ¿Qué significan las siglas MOSFET?
- ¿Cómo se forma el canal de conducción dentro de un MOSFET?
- ¿Cuál es la principal aplicación de los MOSFET?
- ¿Por qué se debe tener cuidado al manipular estos dispositivos?
- ¿Qué tipo de transistores se usan en las fuentes conmutadas?

4.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO

Aunque ya se mencionó una configuración amplificadora básica con anterioridad en esta unidad, también ya se había señalado que este modo de polarización tiene un inconveniente muy serio: la necesidad de una fuente inversa que polarice la compuerta del transistor. Tener que utilizar más de una fuente de poder resulta algo problemático para los diseñadores de circuitos electrónicos, así que se buscaron formas para poder conseguir una amplificación sin necesidad de utilizar la fuente negativa en la compuerta.

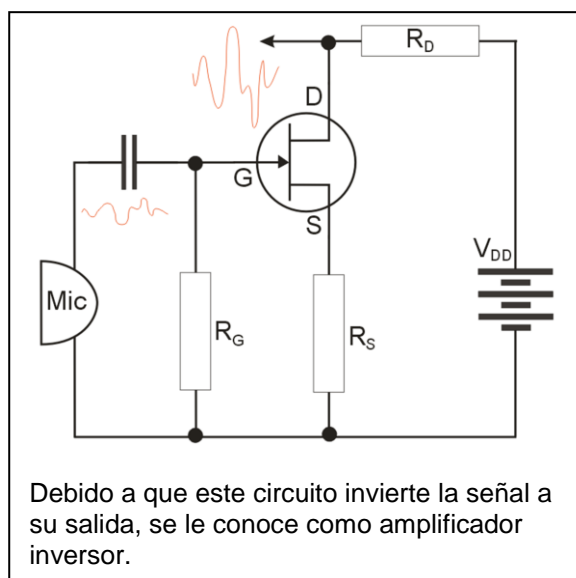
La solución a la que se llegó resulta muy ingeniosa: en la figura anexa se muestra el diagrama de un amplificador con FET canal N típico; se aprecia que la única diferencia en



comparación al que se mostró anteriormente, es la adición de una resistencia en la terminal de fuente (R_S), y una más entre el voltaje negativo de la fuente y la compuerta (R_G), además de la que va desde el positivo de la fuente hacia el drenador (R_D). También en este caso se ha colocado como fuente de señal un micrófono, pero podría ser cualquier otro transductor que convierta algún fenómeno físico en una señal eléctrica.

Para conocer cómo estos simples elementos pueden polarizar de manera adecuada a un FET, hay que considerar lo siguiente: cuando se colocan las resistencias R_S y R_G , debido a que prácticamente no hay caída de voltaje en la resistencia R_G , se puede indicar que el mismo voltaje negativo de la fuente se tiene como voltaje de compuerta, y como se recordará, en esa condición es cuando el FET entra en modo de saturación, lo que significa que por medio de sus terminales trata de circular una corriente muy alta; sin embargo, esta corriente está limitada por el valor de la fuente de alimentación y de las resistencias R_D y R_S .

Ahora bien, cuando circula una corriente a través de una resistencia, aparece entre sus terminales un voltaje $V=RI$, o lo que es lo mismo, el valor de la resistencia multiplicado por la corriente circulando. Esto significa que, poniendo atención a la terminal S, la tensión en los extremos de R_S provoca que esa terminal esté a un voltaje mayor que el del extremo negativo de la fuente; pero como por R_G no está circulando prácticamente nada de corriente, entonces en G se sigue teniendo un voltaje casi idéntico al del extremo negativo de la fuente, y por tanto, en G hay una tensión negativa en



comparación al voltaje de S. Este voltaje negativo limita la corriente que puede circular por el transistor, cerrando el canal interno, hasta llegar a una situación de equilibrio, en la cual por las resistencias de drenaje y fuente está circulando la corriente necesaria para mantener a la terminal G a la

tensión negativa suficiente como para que la corriente fluya.

Una vez que se alcanza esta situación de equilibrio, se dice que el transistor está en su estado de reposo, y si en ese instante el micrófono comienza a inyectar una señal a la compuerta a través del capacitor, entonces la corriente en el interior del FET comenzará a variar siguiendo a la señal de entrada, lo que se refleja en la caída de voltaje en R_D , de donde finalmente se toma la señal de salida, la cual será idéntica a la de entrada, pero de mayor nivel e invertida en polaridad.

Entonces, para construir un amplificador simple por medio de un FET, lo único que se necesita es un transistor de efecto de campo, unas cuantas resistencias, una fuente de voltaje única y una fuente externa de señal. Calculando cuidadosamente los valores de R_D , R_S y R_G se puede lograr que el FET amplifique tanto como sea necesario la señal de entrada (dentro de sus parámetros operativos), con la ventaja adicional de que, como el FET tiene una impedancia muy alta en su compuerta, prácticamente no le exigirá energía al transductor conectado, logrando una amplificación lo más fiel posible.

El cálculo de las resistencias de polarización es un factor muy importante al diseñar un amplificador con FET, y esto está estrechamente relacionado con las características operativas del dispositivo, las cuales se pueden consultar en las hojas de datos correspondientes. Este tema se tratará enseguida.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4D

- a) ¿Cómo se polariza un FET usando una fuente única?
- b) ¿Cuánta corriente circula a través de la resistencia de compuerta?
- c) ¿Por dónde sale la señal amplificada?
- d) ¿Cuáles elementos hay que calcular para obtener un buen amplificador con FET?

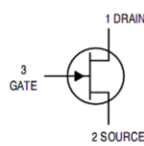
4.5 ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE


Cuando se diseña un circuito electrónico, es necesario conocer los detalles operativos de los componentes que se utilizarán en el proyecto, sin

embargo, tratar de determinar los parámetros funcionales de un dispositivo individual requiere de muchas pruebas y de equipo altamente especializado, el cual por lo general no está al alcance del público en general.

ON Semiconductor™

JFET Switching
N-Channel — Depletion






2N5555

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	25	Vdc
Drain-Gate Voltage	V_{DG}	25	Vdc
Gate-Source Voltage	V_{GS}	25	Vdc
Forward Gate Current	I_{GF}	10	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	350 2.8	mW mW/°C
Junction Temperature Range	T_J	-65 to +150	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	°C



CASE 29-11, STYLE 5
TO-92 (TO-226AA)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Gate-Source Breakdown Voltage ($I_G = 10 \mu\text{Adc}$, $V_{DS} = 0$)	$V_{(BR)GSS}$	25	—	Vdc
Gate Reverse Current ($V_{GS} = 15 \text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GSS}	—	1.0	nAdc
Drain Cutoff Current ($V_{DS} = 12 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = -10 \text{ V}$) ($V_{DS} = 12 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = -10 \text{ V}$, $T_A = 100^\circ\text{C}$)	$I_{D(off)}$	—	10 2.0	nAdc μAdc
ON CHARACTERISTICS				
Zero-Gate-Voltage Drain Current ⁽¹⁾ ($V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = 0$)	I_{DSS}	15	—	mAdc
Gate-Source Forward Voltage ($I_D = 1.0 \text{ mAdc}$, $V_{DS} = 0$)	$V_{GS(f)}$	—	1.0	Vdc
Drain-Source On-Voltage ($I_D = 7.0 \text{ mAdc}$, $V_{GS} = 0$)	$V_{DS(on)}$	—	1.5	Vdc
Static Drain-Source On Resistance ($I_D = 0.1 \text{ mAdc}$, $V_{GS} = 0$)	$r_{DS(on)}$	—	150	Ohms

1. Pulse Test: Pulse Width < 300 μs , Duty Cycle < 3.0%.

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Small-Signal Drain-Source "ON" Resistance ($V_{GS} = 0$, $I_D = 0$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	$r_{ds(on)}$	—	150	Ohms
Input Capacitance ($V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{iss}	—	5.0	pF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{DS} = 0$, $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{rss}	—	1.2	pF

SWITCHING CHARACTERISTICS

Turn-On Delay Time	($V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$, $I_{D(on)} = 7.0 \text{ mAdc}$, $V_{GS(on)} = 0$, $V_{GS(off)} = -10 \text{ Vdc}$) (See Figure 1)	$t_{d(on)}$	—	5.0	ns
Rise Time		t_r	—	5.0	ns
Turn-Off Delay Time	($V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$, $I_{D(on)} = 7.0 \text{ mAdc}$, $V_{GS(on)} = 0$, $V_{GS(off)} = -10 \text{ Vdc}$) (See Figure 1)	$t_{d(off)}$	—	15	ns
Fall Time		t_f	—	10	ns

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001
November, 2001 – Rev. 3

1

Publication Order Number:
2N5555/D

Aspecto típico de la primera página de las hojas de datos de un transistor de efecto de campo canal N, en este caso, el 2N5555. Aquí se pueden consultar los principales parámetros operativos del componente en cuestión. (Cortesía: ON Semiconductor).

Para suplir ese aspecto, los fabricantes de dispositivos electrónicos ponen al alcance de los diseñadores una serie de “hojas de datos” de sus componentes, en las cuales están consignados precisamente todos los datos que se podrían llegar a necesitar al construir un circuito usando alguno de estos dispositivos. En estas hojas de datos (*datasheets*) se pueden

93

consultar los principales parámetros operativos de un dispositivo, y así determinar si es el correcto para la aplicación requerida, o si mejor se busca otro más adecuado para la función deseada.

En la figura superior se muestra una hoja de datos típica de un transistor FET canal N de pequeña señal, en este caso, el 2N555 fabricado por ON Semiconductor, y de esta hoja se pueden deducir los principales datos que se necesitan para el diseño de cualquier circuito:

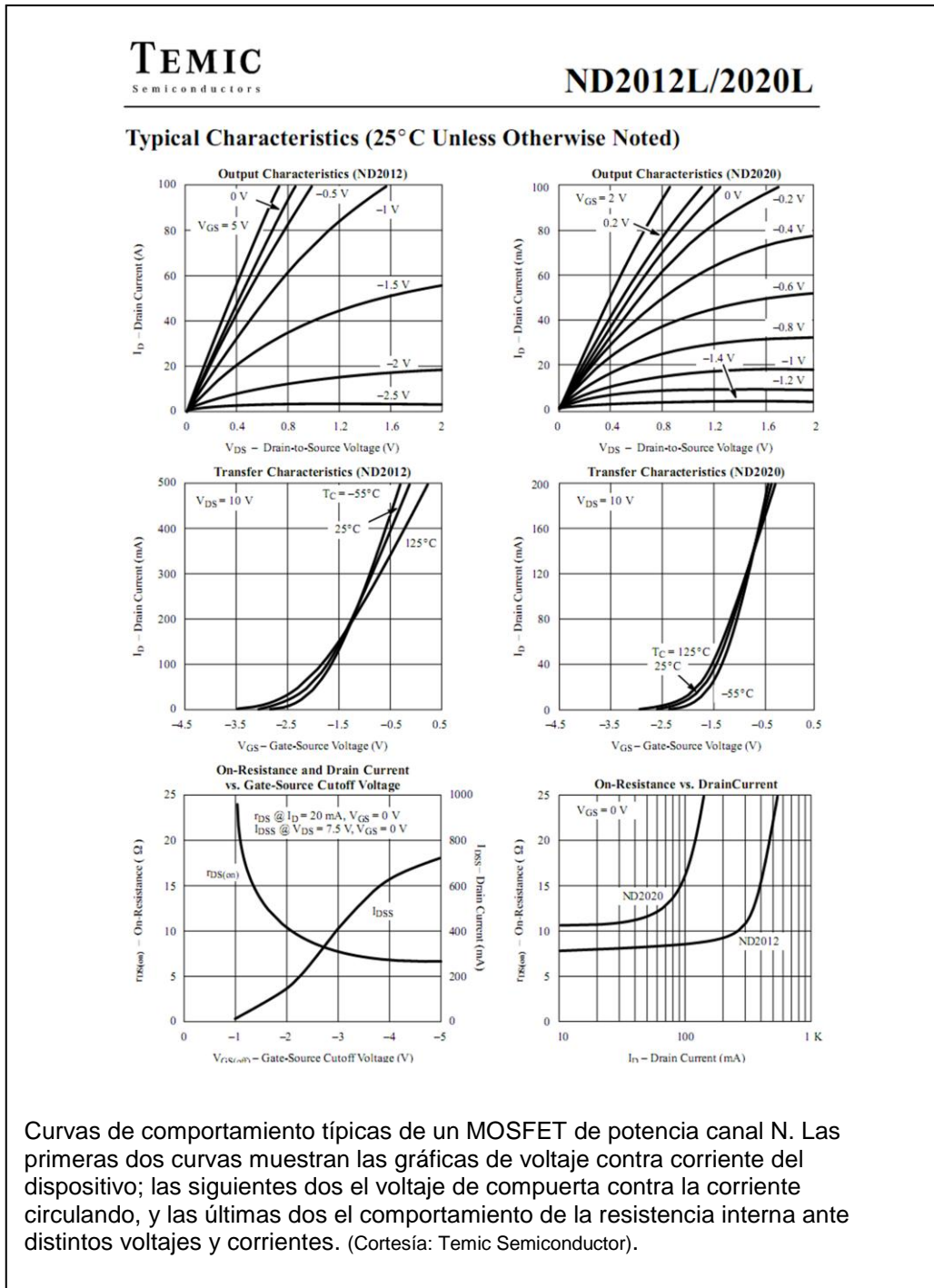
- Qué tipo de transistor es: FET, MOSFET, bipolar, UJT, etcétera.
- En el caso de los FET, si es de canal N o de canal P.
- Cuál es el voltaje máximo que se puede aplicar al FET (V_{DS}).
- Corriente de saturación del FET (I_{DSS}).
- Potencia máxima que puede disipar el FET (P_D).
- Tipo de encapsulado y disposición de terminales.
- Resistencia entre D y S en modo encendido ($r_{DS(on)}$).
- Tiempos de encendido y apagado ($t_{d(on)}$ y $t_{d(off)}$).

Y muchos otros datos más, que para aplicaciones especializadas o de alta frecuencia, resultan fundamentales para saber si el dispositivo cumplirá con las expectativas.

Estas hojas de datos se pueden consultar o descargar desde Internet, sólo se debe escribir en cualquier buscador: “(matrícula del dispositivo) datasheet”, y de inmediato se mostrarán diversas opciones para conseguir esa información. Por ejemplo, si se estuvieran buscando datos sobre un dispositivo 2SK3707, simplemente hay que poner en el buscador “2SK3707 datasheet” (sin comillas) y en unos segundos se podrá consultar o descargar la información detallada sobre ese componente.

En las hojas de datos también se incluyen una serie de gráficos que muestran el comportamiento del dispositivo ante diversas condiciones de polarización o de frecuencia. Estas curvas de comportamiento permiten al diseñador calcular de manera precisa la forma como reaccionará el dispositivo ante distintas condiciones de operación, y saber si el dispositivo cumplirá sus funciones tal cual o necesitará de elementos auxiliares (como podría ser un disipador de calor externo, redes de filtrado, protecciones

contra sobrevoltaje o corriente, etcétera). En caso de que se deba diseñar algún circuito de muy alta frecuencia o que maneje voltajes o corrientes muy elevados, es conveniente considerar estas curvas de comportamiento; así se pueden evitar sorpresas desagradables.



Otro uso común de las hojas de datos es la búsqueda de dispositivos alternativos en caso de que se necesite reemplazar algún componente en un circuito, pero la pieza original ya no se produzca o sea muy difícil de

conseguir. En estos casos, hay que descargar las hojas de datos del dispositivo original, consultar sus características fundamentales y, con ellas, entrar a los catálogos de componentes de los diversos fabricantes, hasta localizar alguno que sí pueda conseguirse y que funcione sin problemas como sustituto del original. Esta situación es muy común, sobre todo cuando se da servicio a equipo electrónico con más de cinco años de haber sido fabricado, algo muy frecuente en la industria.

Por todo lo anterior, es muy conveniente tener a la mano las hojas de datos de los dispositivos más usuales, ya sean diodos, transistores de efecto de campo, o cualquier otro tipo de componente electrónico con el que se tenga que lidiar con cierta frecuencia. También es bueno tener toda esta información descargada en alguna computadora, ya que se puede presentar el caso de tener que consultar algún dato y no tener acceso a Internet en ese momento.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4E

- a) ¿Quién proporciona al diseñador electrónico toda la información sobre sus dispositivos?
- b) ¿Cómo se le llama a esta información?
- c) Menciona cuatro parámetros típicos que se pueden consultar sobre los FET:
- d) ¿Para qué sirven las curvas de comportamiento?
- e) ¿En dónde se puede conseguir esta información?
- f) ¿Qué otro uso común tiene esta información?

AUTOEVALUACIÓN

1. ¿De qué tipo era el primer transistor construido por Brattain, Bardeen y Shockley?
2. ¿Por qué le llamaron transistor?
3. ¿Cuál es la estructura básica de un transistor de efecto de campo?
4. ¿Cómo se controla el flujo de corriente dentro del dispositivo?
5. ¿Por qué se necesita un voltaje inverso en la compuerta?
6. ¿Cómo se le denomina al cálculo de los voltajes y resistencias necesarias para que un FET funcione como amplificador?
7. ¿Por qué es posible reunir miles o millones de MOSFET en un chip sencillo?
8. ¿Cómo se le llama a la configuración básica de un FET como amplificador y por qué?
9. ¿Por qué es importante contar con las hojas de datos de los fabricantes?

RESPUESTAS

1. Era un transistor de efecto de campo de contacto, construido a base de germanio.
2. Porque transformaba un voltaje en una resistencia variable; transform-resistor.
3. Una barra de material semiconductor de un tipo, con un par de zonas de cristal del tipo opuesto formando un canal de conducción entre ellas.
4. Al aplicar un voltaje inverso a la unión P-N entre compuerta y fuente del FET, se forman zonas de no conducción, que van limitando la corriente que circula dentro del dispositivo.
5. Para crear las zonas de no conducción al polarizar en inversa la unión P-N.
6. Polarización del transistor.
7. Porque tienen muy bajo consumo de energía.
8. Amplificador inversor, porque la señal de entrada sale con mayor amplitud, pero invertida.
9. Para conocer los parámetros operativos del dispositivo en cuestión, y saber de antemano si es el adecuado para la aplicación que se desee.

RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

Actividad de aprendizaje 4A:

- a) Transformador de resistencia; transform-resistor.
- b) Una barra de cristal semiconductor tipo N con dos regiones tipo P en su parte media, formando un canal de conducción.
- c) Porque se aprovecha el fenómeno de creación de una zona de no conducción en una unión P-N conectada en inversa.
- d) Fuente (Source), Drenador (Drain) y Compuerta (Gate).
- e) Para un voltaje de compuerta igual a cero voltios.
- f) Comienza a circular cada vez menos corriente entre D y S, hasta que el flujo se detiene por completo.

Actividad de aprendizaje 4B:

- a) En la zona de comportamiento lineal de las curvas I-V, cuando el dispositivo ya entró en conducción pero antes de la zona de avalancha.
- b) Es la máxima corriente que puede circular entre D y S en un FET.
- c) Voltaje de estrangulamiento.
- d) (fórmula)
- e) Conectarlo de tal forma que pueda ser aprovechado como amplificador de señal.
- f) Conectando en su compuerta un voltaje inverso de aproximadamente $\frac{1}{2}$ del valor del voltaje de estrangulamiento.
- g) Del punto de unión entre el drenador del transistor y su resistencia asociada.

Actividad de aprendizaje 4C:

- a) La necesidad de utilizar dos fuentes de poder de polaridades inversas para que trabaje adecuadamente.
- b) Transistor de efecto de campo semiconductor con óxido metálico.
- c) Por expulsión de los portadores del cristal del canal, y atracción de portadores minoritarios del estrato de silicio.

- d) En circuitos digitales como elementos de conmutación.
- e) Porque el aislante en su compuerta es muy susceptible a daños por descargas electrostáticas.
- f) Los transistores MOSFET de potencia.

Actividad de aprendizaje 4D:

- a) Agregando un par de resistencias, una en la terminal de fuente y la otra en la terminal de compuerta.
- b) Prácticamente nada, ya que el FET sólo necesita voltaje y no corriente.
- c) De la terminal drenador del FET.
- d) El valor de las resistencias R_D , R_S y R_G .

Actividad de aprendizaje 4E:

- a) Los fabricantes de los dispositivos electrónicos.
- b) Hojas de datos o datasheets.
- c) Qué tipo de transistor es, si es canal N o P, voltaje de operación, corriente de saturación, potencia máxima disipada, encapsulado y disposición de terminales, tiempo de respuesta, etc.
- d) Para conocer las características de operación del dispositivo ante altas frecuencias, voltajes o corrientes.
- e) Los fabricantes las ponen a disposición del público por medio de Internet.
- f) Para localizar componentes sustitutos en caso de que se necesite reemplazar algún dispositivo dañado y no se consiga fácilmente.

UNIDAD 5

EL TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNTURA (TBJ)

OBJETIVO

El estudiante comprenderá el principio de funcionamiento y los detalles operativos de los transistores bipolares de juntura, que son los más utilizados en electrónica analógica, y son pieza fundamental para el manejo de señales eléctricas; conocerá su construcción, la teoría detrás de su comportamiento, sus curvas de operación, sus aplicaciones más comunes, así como sus ventajas y desventajas, para tener un conocimiento adecuado de esta tecnología y de su influencia en la electrónica moderna.

TEMARIO

5.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

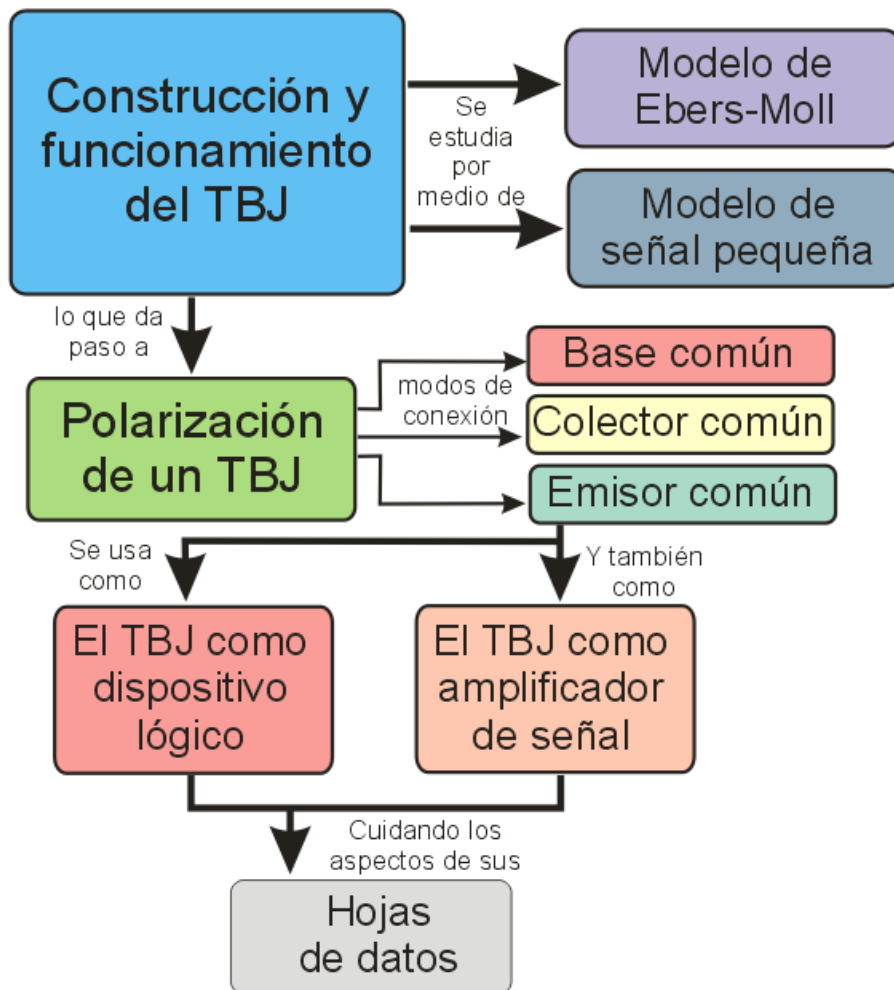
5.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN

5.3 EL TBJ COMO INVERSOR Y COMPUERTAS LÓGICAS

5.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO

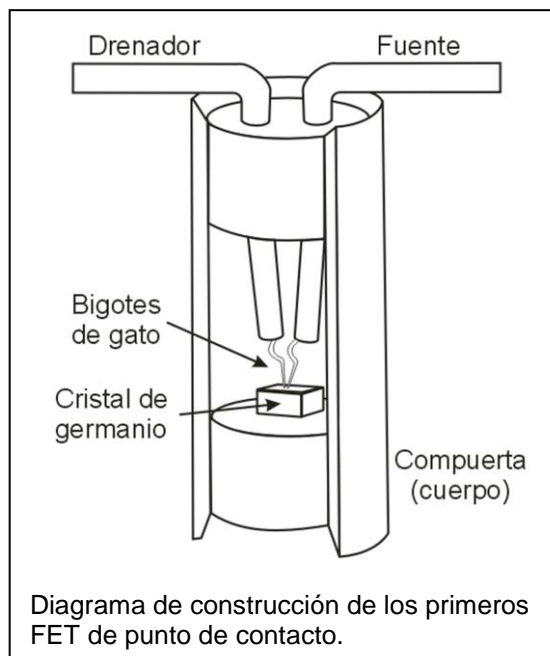
5.5 ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

MAPA CONCEPTUAL

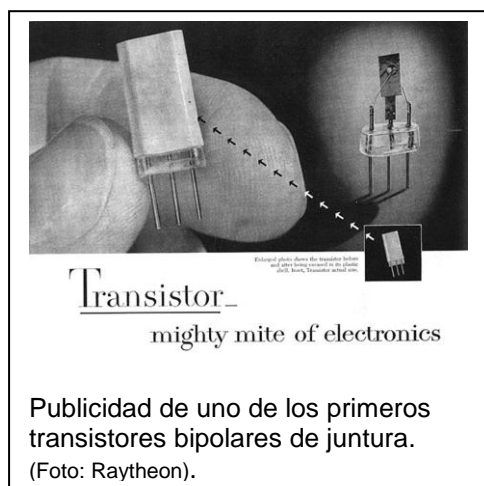


INTRODUCCIÓN

Prácticamente desde que aparecieron los primeros transistores de efecto de campo de punto de contacto, muchos investigadores detectaron algunos inconvenientes que podrían afectar el desempeño regular de éstos; por ejemplo, cuando salieron los primeros transistores comerciales, estaban contruidos de forma muy similar al primer transistor descubierto en los laboratorios Bell; esto es, un bloque de germanio P-N con dos contactos metálicos adosados por medio de un resorte. Claro que cuando los FET se comenzaron a producir de forma masiva, se tuvieron que buscar



alternativas para lograr este contacto, optando por utilizar unos alambres con forma de "bigote de gato" (en la figura anexa se muestra un diagrama de cómo estaban contruidos estos primeros transistores); sin embargo, este método de construcción tenía el inconveniente de que, si el dispositivo sufría un golpe fuerte, los contactos podían moverse de lugar, afectando seriamente las condiciones operativas del dispositivo o arruinándolo completamente.



El mismo William Shockley, uno de los investigadores que desarrollaron el primer transistor, fue de los principales críticos de esta situación, e intentó desarrollar un modelo alternativo que permitiera la construcción masiva de dispositivos electrónicos que no tuvieran estos inconvenientes. Como resultado de sus investigaciones, en 1951

presentó el transistor bipolar de juntura o TBJ, un dispositivo que podía construirse de forma sólida y sin puntos que pudieran salirse de lugar, y que además resultaba fácil de fabricar para los procesos industriales de la época. El TBJ tenía la ventaja de que su funcionamiento no estaba supeditado a la posición de unos puntos de contacto “flotantes”, sino que trabajaba con base en cristales semiconductores sólidamente unidos entre sí. Esto le dio a los TBJ una confiabilidad y un desempeño uniforme, algo fundamental en el desarrollo de nuevos circuitos electrónicos.

Casi de inmediato, los TBJ desplazaron a los FET como los principales componentes en estos primeros pasos de la industria electrónica moderna, y hasta la fecha siguen siendo de los más usados, sobre todo en aplicaciones donde se manipulan señales de forma analógica.

¿Cómo funciona un TBJ y qué lo hace diferente a los transistores de efecto de campo? Esto se describirá en la presente unidad.