



Radioaficionados

Unión de Radioaficionados Españoles - Julio 2002

Los semiconductores (II)

Dayton 2002

Resultados del
EA RTTY Contest



LOS SEMICONDUCTORES (II).

EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO, FET.

1.- INTRODUCCIÓN.

Todos los equipos electrónicos están formados por una serie de componentes, que podemos dividir en dos grandes grupos, componentes pasivos y componentes activos. Entre los componentes pasivos se encuentran las resistencias, condensadores, bobinas y todos sus derivados. Los componentes activos son las válvulas y los transistores. Los circuitos integrados están formados por transistores y resistencias.

La principal diferencia entre las válvulas y los transistores es que los segundos están fabricados a partir de materiales semiconductores, es decir, materiales tales como el silicio, al que se le añaden impurezas de forma controlada para obtener unas características de conducción perfectamente definidas.

Dentro de los transistores, podemos establecer dos grupos, transistores bipolares y transistores de efecto de campo, llamados de forma abreviada *FET* (Field Effect Transistor). En ambos dispositivos existe un elemento de control, que determina la intensidad de la corriente de salida. En los transistores bipolares, esta corriente de salida está controlada por la corriente que fluye por el elemento de control, llamado Base. En los transistores de efecto de campo, la corriente de salida está controlada por la tensión aplicada al elemento de control, llamado Gate (Puerta ó Compuerta). En este sentido, el *FET* es parecido a la válvula electrónica, en la cual, la tensión aplicada al elemento de control, llamado Rejilla, determina la intensidad de la corriente de salida o corriente de Placa.

Antes de continuar diremos que normalmente se utiliza la denominación *FET*, procedente del inglés, aunque en algunas publicaciones pueda aparecer la sigla *TEC* (Transistor de Efecto de Campo). Las siglas *JFET* (Junction Field Effect Transistor) y *MOSFET* (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) designan otros tipos de *FET*.

Los transistores de efecto de campo fueron propuestos por vez primera por Shockley en el año 1952, pero esto sucedió más de diez años antes de que el proceso de fabricación se perfeccionara como para permitir la construcción de dispositivos confiables. Los *FET* son quizá el tipo de transistor más fácil de comprender y se utilizan profusamente en aplicaciones tanto analógicas como digitales. Se caracterizan por tener resistencias de entrada muy altas, bajos requerimientos de energía y pequeñas dimensiones físicas. Estas características se combinan para hacerlos ideales en la construcción de circuitos de muy alta densidad, como los que se usan en los circuitos de muy alta escala de integración (*VLSI*, Very Large Scale Integration).

El *FET* tiene ciertas ventajas frente al transistor bipolar, como son alta impedancia de entrada, alta insensibilidad a los cambios de temperatura, alto factor de amplificación y bajo nivel de ruido. Estas y otras características hacen

que el FET sea cada día más utilizado tanto en aplicaciones de baja frecuencia como en alta frecuencia.

2.- TIPOS DE FET.

El FET dispone normalmente de tres electrodos, aunque algunos tipos pueden tener cuatro ó más. En la siguiente tabla se muestra la correspondencia entre los electrodos de la válvula, el transistor bipolar y el FET.

	ENTRADA	COMÚN	SALIDA
VÁLVULA	Rejilla	Cátodo	Placa
TRANSISTOR	Base	Emisor	Colector
FET	Gate Compuerta Puerta	Source Fuente Surtidor	Drain Drenador

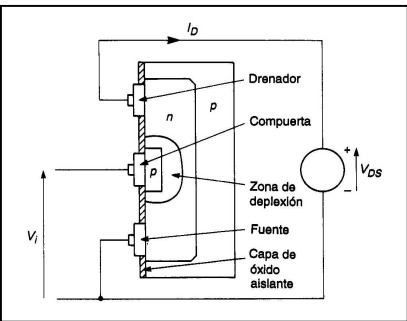
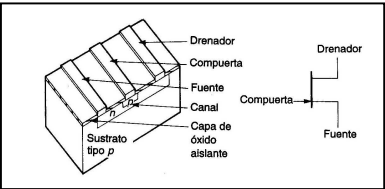
Para el FET se especifica la denominación en inglés y otras denominaciones en español normalmente utilizadas.

Hay dos tipos principales de transistores de efecto de campo, específicamente el FET de Compuerta de unión y el FET de Compuerta aislada.

2.1.- FET DE COMPUERTA DE UNIÓN, JFET.

En el FET de Compuerta de unión, también llamado *JFET* (*Junction Field Effect Transistor*), este electrodo forma una unión NP con el Sustrato, tal como se puede ver en la figura número uno. Sobre un Sustrato de silicio tipo P se establece un canal de silicio tipo P, en cuyos extremos se disponen los electrodos correspondientes a la Fuente y al Drenador.

Dentro del canal existe una región de material tipo P que forma la Compuerta del dispositivo. Sobre esta región se establece el electrodo correspondiente a la Compuerta, que forma una unión PN con el canal.

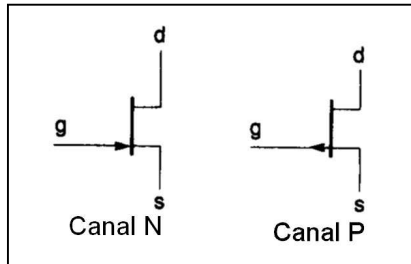


El funcionamiento del JFET depende de que la unión que se forma entre la Compuerta y el canal esté polarizada en sentido inverso. Esto forma una **zona de depleción** alrededor de la Compuerta, como lo muestra la figura número dos.

Si el Drenador se hace positivo con respecto a la Fuente mediante la aplicación de un voltaje V_{DS} , fluiría corriente de la Fuente al Drenador a través del canal tipo N (se indica el sentido “real” de la corriente, es decir, el de los electrones). Si ahora se aplica una tensión negativa a la Compuerta con respecto a la Fuente, esto polariza en sentido inverso a la unión Compuerta-canal y evita que fluya cualquier corriente de Compuerta. El voltaje negativo sobre la Compuerta repele los electrones en la región de la Compuerta e incrementa así el tamaño de la **zona de**

deplexión. Esto reduce el área transversal efectiva del canal y, por lo tanto, reduce su conductividad.

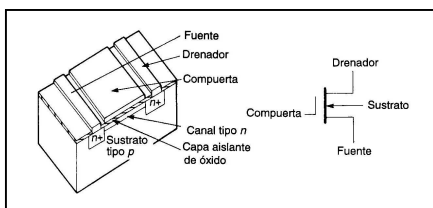
Conforme la Compuerta se hace más negativa, la anchura efectiva del canal disminuye hasta que la corriente del Drenador se anula por completo. Este modo de funcionamiento es análogo al comportamiento de la rejilla en una válvula electrónica. Si se polariza negativamente la Compuerta en una zona intermedia entre cero voltios y la tensión para la cual la corriente del Drenador se anula, pequeñas variaciones en la tensión de la Compuerta producirán grandes variaciones de la corriente del Drenador, produciéndose así la amplificación.



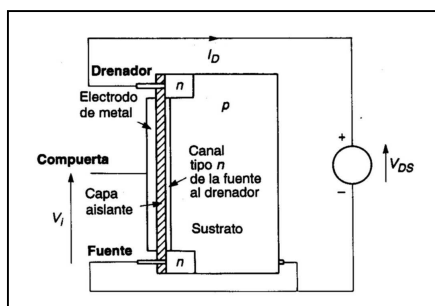
En las figuras anteriores se ha representado un JFET de canal N, que es el más utilizado. Si se invierte el tipo de material para los distintos elementos, tendremos un JFET de canal P. En la figura número tres tenemos los símbolos correspondientes.

2.2.- FET DE COMPUERTA AISLADA, MOSFET.

El término MOSFET se refiere al método de construcción de este dispositivo y a su modo de funcionamiento. Se trata de las siglas en inglés de transistor de efecto de campo de metal, óxido y semiconductor (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). La primera parte de su nombre indica que su construcción es un emparedado de capas de un metal, un óxido (en general óxido de silicio) y un semiconductor. La segunda parte indica que el dispositivo funciona mediante un campo eléctrico más que mediante una corriente eléctrica. A un MOSFET también se le puede llamar MOST (*Metal Oxide Semiconductor Transistor*, transistor de metal, óxido y semiconductor) o bien IGFET (*Insulated Gate Field Effect Transistor*, transistor de efecto de campo de Compuerta aislada).



La construcción de un MOSFET característico así como su símbolo aparecen en la figura número cuatro. Se forman dos regiones tipo N, Drenador y Fuente, en una barra de silicio tipo P, Sustrato. Estas dos regiones están unidas por un canal delgado de material tipo N en la superficie de la barra. El canal está cubierto por un electrodo conductor (la Compuerta) que se encuentra aislado de él por una capa de óxido. Es común que el electrodo de la Compuerta esté formado por una capa de metal, pero de



manera alternativa puede ser una capa de silicio policristalino. Es usual que el Sustrato se conecte de manera interna o externa a la Fuente.

Consideremos en principio la situación en la que se aplica un voltaje positivo V_{DS} entre el Drenador y la fuente, como se muestra en la

figura número cinco. Las regiones de Drenador-canal-Fuente son todas de material tipo N y forman una unión PN con el Sustrato tipo P. El extremo de la Fuente de esta unión se encuentra al mismo potencial que el Sustrato, y por lo tanto, no fluye corriente alguna entre la Fuente y este último. El Drenador y el canal, que son positivos con respecto a la Fuente, son también positivos con respecto al Sustrato; por lo tanto, la unión entre ellos y el Sustrato está polarizada a la inversa y de nuevo no fluye corriente alguna entre estas regiones y el Sustrato.

La presencia del canal delgado tipo N proporciona un camino de conducción entre el Drenador y la Fuente, y el voltaje aplicado entre ellos ocasionará un flujo de corriente. El valor de esta corriente dependerá del espesor del canal y del voltaje aplicado. Si la Compuerta se hace positiva con respecto a la Fuente (y por lo tanto con respecto al Sustrato), la carga positiva en la Compuerta repele huecos en el Sustrato cerca de la Compuerta y aumenta así la profundidad efectiva del canal tipo n. Esto tiene el efecto de incrementar la corriente de Drenador a la Fuente. Este proceso se llama acumulación del canal.

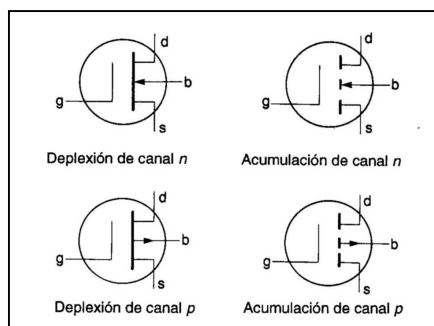
Por el contrario, si la Compuerta se hace negativa con respecto a la Fuente, los electrones son repelidos de la región de la Compuerta y se reduce el espesor efectivo del canal, disminuyendo la corriente del Drenador a la Fuente. Esto se conoce como depleción del canal. De esta manera, la tensión aplicada a la Compuerta controla la corriente del Drenador.

2.2.1.- TIPOS DE MOSFET.

En el MOSFET descrito, el voltaje sobre la Compuerta se puede usar para producir la depleción o la acumulación del canal, por lo tanto, se le llama MOSFET de depleción/acumulación. Otros dispositivos se construyen de modo que no exista canal alguno entre el Drenador y la Fuente en ausencia de un voltaje de Compuerta. En estos dispositivos se debe aplicar un voltaje a la Compuerta para producir un canal de conducción. Un dispositivo de esta naturaleza sólo se puede usar en modo de acumulación y, por lo tanto, recibe el nombre de MOSFET de acumulación.

Los dispositivos que hemos descrito hasta ahora tienen un canal tipo N en un Sustrato tipo P y, por lo tanto, reciben el nombre de MOSFET de canal N. También se pueden construir dispositivos mediante la formación de un canal tipo P en un Sustrato tipo N. Resulta lógico suponer que a estos dispositivos se les llama MOSFET de canal P. El funcionamiento de los dispositivos de canal P es similar al de los dispositivos de canal N, con la excepción de que la

polarización de todos los voltajes y las corrientes es la opuesta.

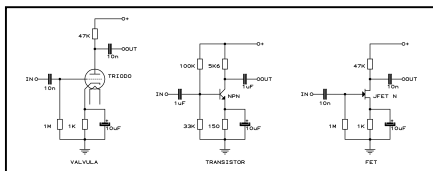


La figura número seis muestra los símbolos de los cuatro tipos básicos de MOSFET. Nótese que el Sustrato está marcado como "b" (bulk) a fin de distinguirlo de la "s" de Fuente (source). En ocasiones el Sustrato se

une internamente a la Fuente para producir un dispositivo con tres terminales en lugar de cuatro. La línea que conecta el Drenador y la Fuente representa el canal. Aparece como una línea continua en un MOSFET de depleción para representar un canal que está presente aun cuando no se aplique voltaje de Compuerta alguno, y con una línea punteada en un MOSFET de acumulación para indicar que el canal no está establecido con voltaje de Compuerta de cero.

En algunas ocasiones, sobre todo en MOSFET de potencia, se encuentra un diodo interno conectado entre la Fuente y el Drenador. La función de este diodo es proteger al transistor frente a sobretensiones inversas, como las que se pueden producir en circuitos de conmutación con cargas inductivas.

Otro tipo de MOSFET muy utilizado es el de doble puerta. En este caso, la puerta número dos hace parecidas funciones que la rejilla pantalla en un tetrodo, consiguiéndose factores de amplificación mayores.



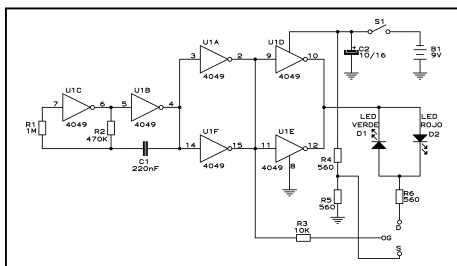
Resumiendo, podemos hacer una comparación entre las válvulas, los transistores bipolares y los transistores de efecto de campo. En la figura número siete podemos ver tres montajes elementales con válvula, transistor y JFET. Los valores de los

componentes son los típicos para estos tres montajes. Se puede observar que los valores de los componentes del amplificador con válvula son similares a los valores del amplificador con FET. La diferencia fundamental entre estos dos montajes es que la tensión de alimentación para la válvula es muy superior a la tensión de alimentación para el FET.

3.- COMPROBADOR DE FET.

3.1.- DESCRIPCIÓN.

Hemos visto que hay diversos tipos de transistores de efecto de campo, de unión, de acumulación, de depleción, etc. Esto hace que la construcción de un comprobador para todos los tipos de FET sea un poco complicado, sobre todo si se pretende un instrumento de medida sencillo de construir y utilizar. Con pocos componentes podemos realizar un comprobador que nos podrá indicar, dentro de ciertos límites, el estado del FET bajo prueba.



El esquema del comprobador se puede ver en la figura número ocho. Se utiliza un circuito integrado CMOS del tipo 4049 que contiene en su interior seis inversores. Dos de estos inversores, U1C y U1B, forman un oscilador de muy baja frecuencia y entregan una onda cuadrada a los inversores U1A y U1F que están

conectados en paralelo. Las resistencias R1, R2 y el condensador C1 forman la red de realimentación para generar la oscilación. La onda de salida es una

onda cuadrada de una frecuencia de pocos hertzios y una excursión de tensión entre cero voltios y nueve voltios.

La salida de los inversores U1A y U1F se aplica a los dos restantes U1D y U1E también conectados en paralelo. El Drenador del transistor bajo prueba se conecta a la salida de estos inversores a través de la resistencia R6 de 560 ohmios y dos diodos LED de color verde y rojo, conectados en oposición.

El terminal correspondiente al Surtidor queda conectado al punto de unión de las resistencias R4 y R5 de 560 ohmios, por lo que en este terminal tendremos una tensión fija de 4,5 voltios.

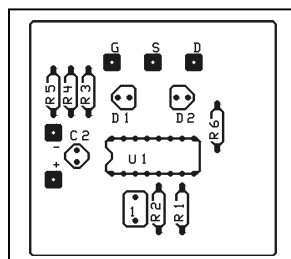
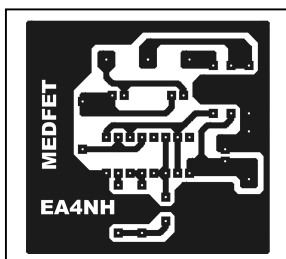
El terminal correspondiente a la Puerta se conecta, a través de la resistencia R3 de 10K, a la salida de U1A y U1F, por lo que, en este terminal tendremos una señal en oposición de fase con la del Drenador.

Si cortocircuitamos los dos terminales “D” y “S”, lucirán alternativamente los dos diodos LED, ya que el terminal “D” será alternativamente positivo y negativo respecto al terminal “S”. Si conectamos un diodo entre los terminales “D” y “S” lucirá uno de los dos diodos, dependiendo de la polaridad de la conexión.

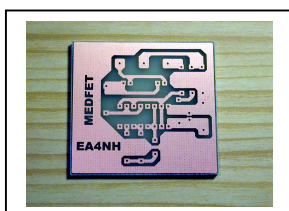
Si conectamos el Drenador y el Surtidor de un FET de unión, como puede ser el BF245, dejando sin conectar la Puerta, los dos diodos lucirán alternativamente, ya que el canal queda establecido al no haber potencial de puerta. Si ahora conectamos la puerta, cuando ésta reciba un potencial negativo respecto al Surtidor, el canal quedará bloqueado, por lo que solamente quedará parpadeando uno de los diodos, dependiendo de si el FET es NPN o PNP.

El circuito se alimenta con una tensión de nueve voltios procedente de una pila o una batería recargable. El condensador electrolítico C2 de 10 microfaradios desacopla la línea de alimentación.

3.2.- CONSTRUCCIÓN.



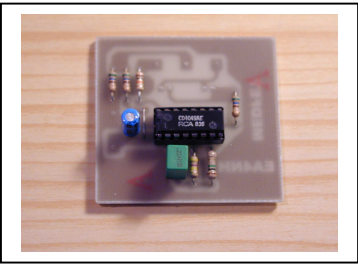
Para la construcción del comprobador utilizaremos el circuito impreso mostrado en la figura número nueve. En la figura número diez tenemos la disposición de los componentes sobre la placa de circuito impreso. La figura número once muestra la



placa de circuito impreso utilizada en el prototipo. Después de montar el prototipo se realizaron algunas modificaciones en la placa de circuito impreso. Estas modificaciones están recogidas en la plantilla de circuito impreso de la figura número nueve.

Los componentes necesarios para el montaje del comprobador, son los siguientes:

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
R1	1M
R2	470K
R3	10K
R4	560
R5	560
R6	560
C1	220nF
C2	10uF/16 V
U1	4049
D1	LED VERDE
D2	LED ROJO
S1	INTERRUPTOR
B1	BATERÍA DE 9 VOLTIOS
TRES	BANANAS
TRES	HEMBRILLAS
UN	ZÓCALO DE 16 PATILLAS
UNA	CAJA RETEX RB-551
UN	CONECTOR DE BATERÍA



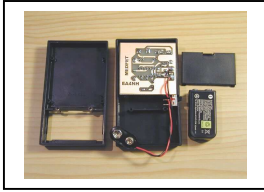
Una vez en posesión de todos los componentes procederemos a su montaje sobre la placa de circuito impreso. En la figura número doce podemos ver la placa de circuito impreso con los componentes montados y preparada para su colocación en la caja. Esta caja es el modelo RB-551 de RETEX que tiene un compartimiento para albergar la pila de nueve voltios.

Prepararemos la caja dando los taladros correspondientes a los diodos LED y a las tres hembrillas para la conexión del FET a probar. Colocaremos los diodos LED y las tres hembrillas en sus taladros correspondientes. Soldaremos unos trozos de hilo desnudo en las hembrillas. Estos hilos y los terminales de los diodos LED servirán para sujetar la placa de circuito impreso. En un lateral de la caja colocaremos el interruptor de encendido.



Haremos el taladro necesario, dependiendo del tipo de interruptor utilizado. En el prototipo se utilizó un interruptor deslizante que se fijó a la caja con un poco de pegamento instantáneo. En la figura número trece podemos ver la caja de plástico con el interruptor, los diodos LED y las hembrillas en sus lugares correspondientes, preparada para el montaje de la placa de circuito

impreso.

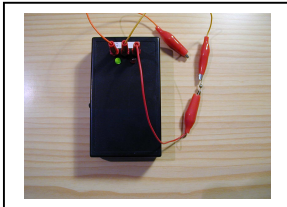
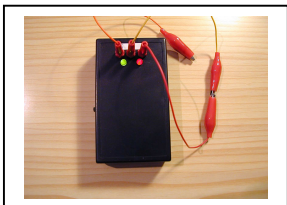


Colocaremos la placa introduciendo los hilos de las tres hembrillas y de los diodos LED en los taladros correspondientes. Soldaremos estos hilos y completaremos el cableado del

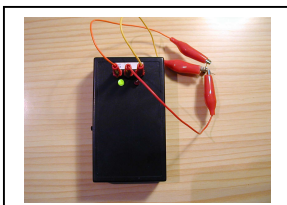
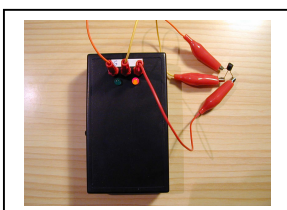
interruptor y del conector de la batería. En la figura número catorce se puede ver la placa colocada en su lugar y el cableado del interruptor y el conector de la batería. En la figura número quince vemos la batería en su alojamiento y en la figura número dieciséis tenemos la caja cerrada. Por último, la figura número diecisiete muestra la parte frontal del

comprobador.

3.3.- OPERACIÓN.



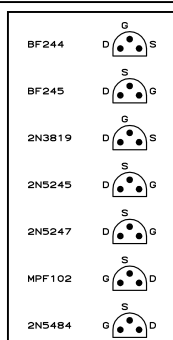
Una vez completado el montaje del comprobador procederemos a su puesta en funcionamiento. Accionaremos el interruptor de encendido y uniremos los terminales "D" y "S". Los dos diodos LED se iluminarán alternativamente indicando un correcto funcionamiento del conjunto. En la figura número dieciocho vemos estos dos diodos luciendo al tiempo debido a la velocidad de obturación. A continuación conectaremos a estos terminales "D" y "S" un diodo y comprobaremos que se ilumina solamente uno de los diodos, el verde o el rojo, dependiendo de la polaridad de conexión del diodo, tal como se puede ver en la figura número diecinueve.



Conectaremos un FET en sus terminales correspondientes y observaremos que se ilumina uno de los diodos, dependiendo de la polaridad del FET. Según el tipo de FET obtendremos iluminación o no con el terminal de la Puerta desconectado. En determinados FET de potencia puede existir un diodo interno conectado entre el Drenador y el Surtidor, con lo que es posible que se iluminen alternativamente los dos diodos LED. La experiencia nos dará las pautas para la comprobación de distintos tipos de FET.

En la figura número veintidós se indica el patillaje de

algunos tipos de FET de pequeña potencia.



4- RESUMEN.

En el presente artículo se han descrito, de forma somera, las características y principio de funcionamiento de los transistores de efecto de campo. Estos dispositivos se utilizan profusamente en electrónica debido a sus excelentes características eléctricas, mecánicas y térmicas. Así mismo se ha descrito la construcción y funcionamiento de un comprobador elemental para estos transistores, que permite determinar rápidamente su estado de funcionamiento en la mayoría de los casos.

Es indudable que en un artículo como el presente no se pueden tratar todos los aspectos referentes a este tipo de semiconductor. El lector interesado en ampliar sus conocimientos sobre los FET, puede dirigirse a libros especializados donde encontrará mayor información al respecto.

El montaje descrito en el presente artículo no ha sido probado en grandes series y, por tanto, no se tiene certeza de que su funcionamiento sea 100% correcto. Solamente se describe la construcción y el funcionamiento del prototipo.

El autor no se hace responsable de posibles derechos de copia. La información para la realización de este montaje procede de diversas publicaciones, libros, revistas, etc., así como de los propios conocimientos del autor.

El autor no se hace responsable de posibles daños y/o perjuicios causados por la construcción y/o uso de este dispositivo, daños personales o muerte, daños a la propiedad, daños al medio ambiente, lucro cesante, pérdida total o parcial de datos informáticos o cualquier tipo de daño que se pudiera derivar del montaje y/o uso de este dispositivo.

No se aconseja el uso de este dispositivo en aplicaciones críticas, como son control de maquinaria peligrosa, control de navegación o tráfico, maquinaria de mantenimiento de vida o sistemas cuyo mal funcionamiento pueda provocar causas o efectos anteriormente mencionados. Este dispositivo no es tolerante a fallos.

El autor declina cualquier responsabilidad, ni se hace responsable de no mencionar a los dueños de las posibles patentes que aquí se pudieran reflejar.

El dispositivo descrito en el presente artículo es un montaje experimental, cuyo propósito es el estudio de los diferentes aspectos de la Electrónica, por tanto, no está destinado a su utilización industrial ni para su explotación comercial en cualquiera de sus facetas.

El autor no efectúa ninguna actividad comercial relacionada con este u otros montajes publicados en esta u otras revistas o publicaciones de cualquier tipo.

El presente artículo y todos los publicados hasta el momento en la revista "RADIOAFICIONADOS", están recopilados en un DVD a disposición de quien

lo solicite. Se incluyen todos los textos, así como las fotografías, dibujos, gráficos, plantillas de circuitos impresos, etc.

Aunque se ha intentado proporcionar todos los detalles necesarios para la realización del comprobador, es posible que algún aspecto no haya quedado suficientemente desarrollado. Como es natural, con mucho gusto el autor dará cumplida información sobre cualquier detalle no especificado, o cualquier punto en particular que no haya quedado completamente explicado. Buena suerte a todos.

Luis Sánchez Pérez. EA4-NH
Apartado 421, 45080-TOLEDO
Tlf. 606-383-140
Web: www.ea4nh.com
E-mail: ea4nh@ure.es

FIGURA NÚMERO UNO.
Construcción de un JFET.

FIGURA NÚMERO DOS.
Zona de deplexión de un JFET.

FIGURA NÚMERO TRES.
Símbolos de los JFET.

FIGURA NÚMERO CUATRO.
Construcción de un MOSFET.

FIGURA NÚMERO CINCO.
Conducción de corriente de un MOSFET.

FIGURA NÚMERO SEIS.
Símbolos de los MOSFET.

FIGURA NÚMERO SIETE.
Válvula, Transistor y FET.

FIGURA NÚMERO OCHO.
Esquema general del comprobador de FET.

FIGURA NÚMERO NUEVE.
Circuito impreso del comprobador de FET.

FIGURA NÚMERO DIEZ.
Disposición de los componentes.

FIGURA NÚMERO ONCE.
Placa de circuito impreso.

FIGURA NÚMERO DOCE.
Placa de circuito impreso montada.

FIGURA NÚMERO TRECE.
Caja preparada para el montaje.

FIGURA NÚMERO CATORCE.
Placa colocada en la caja.

FIGURA NÚMERO QUINCE.
Batería en su alojamiento.

FIGURA NÚMERO DIECISÉIS.
Vista trasera de la caja.

FIGURA NÚMERO DIECISIETE.

Vista frontal.

FIGURA NÚMERO DIECIOCHO.
Terminales “D” y “S” unidos.

FIGURA NÚMERO DIECINUEVE.
Prueba de diodos.

FIGURA NÚMERO VEINTE.
Prueba de FET PNP.

FIGURA NÚMERO VEINTIUNO.
Prueba de FET NPN.

FIGURA NÚMERO VEINTIDÓS.
Patillaje de algunos FET.