

# El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) (julio 2021)

Alejandro Garnung Menéndez

## I. INTRODUCCIÓN

EN este documento se pretende recoger una gran cantidad de información relevante, de carácter divulgativo, didáctico e investigativo, sobre un dispositivo sumamente importante para la electrónica moderna desde hace ya más de cincuenta años. Este dispositivo, que ocupa un lugar principal como título del informe, es el MOSFET (transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor). Se abordarán diversos aspectos tales como su historia y precedentes (el camino científico y tecnológico llevado a cabo a lo largo de los años hasta llegar al componente propiamente dicho), su estructura y funcionamiento (desde una visión más bien general, cualitativa y práctica pero aun así tratando de profundizar someramente en sus características y cualidades propias, que distinguen su comportamiento físico del de otros dispositivos), su situación dentro de una clasificación global de diversos tipos de transistores, aplicaciones comunes y otros distintos aspectos, de carácter general y específico, que resultarán de valiosa utilidad para que el lector logre conseguir una visión global, clara y concisa sobre este maravilloso dispositivo electrónico.

## II. ¿MOSFET?

El MOSFET es un transistor (es decir, es capaz de modificar una señal de salida como respuesta a una variable de control de entrada) que puede ser utilizado con varios posibles fines: amplificación, conmutación o rectificación de señales eléctricas (refiriéndose al fenómeno físico del flujo de cargas a través de campos electromagnéticos) y electrónicas (refiriéndose a las señales derivadas del estudio y control del flujo de los electrones) o crear cambios periódicos (o cuasi-periódicos) en un conductor (funcionar como un oscilador). La segunda parte de su nombre (transistor de efecto de campo o FET) nos indica que hace uso de campos eléctricos para controlar y manejar el comportamiento y la forma de un potencial “canal” formado por un solo tipo de portadores de carga (es un transistor unipolar). Se diferencia, por tanto, de otros tipos de transistores (como los BJT o transistores de unión bipolar, que se basan en el control mediante corriente) en que estos requieren de un voltaje o una diferencia de potencial en una determinada zona (entre su “puerta” y su “fuente”) para controlar la corriente que circula por otra zona concreta (entre el “drenador” y la “fuente”). De la primera parte de su nombre (metal-óxido-semiconductor) se pueden extraer de forma directa varias conclusiones, como los elementos de los que están formadas cada una de las partes de que se compone: una capa de *metal* con características conductoras (terminal G, *gate* o “puerta”), un “substrato” o “sustrato” formado por un semiconductor (s-c) “puro” o “dopado” de tipo *p* (o aceptor, ya que permite la

formación íntegra de huecos, por tanto de vacantes para aceptar otros electrones) o de tipo *n* (o donante, ya que permite la aparición íntegra de electrones sin huecos asociados, por tanto pueden “entregar” electrones) y una capa de óxido de características dieléctricas que aísla el metal y lo separa del terminal B (*body*) del substrato. Más aún, debido a estas características del óxido, se forma una estructura equivalente a condensador plano (condensador MOS), en la que una de las placas conductoras o electrodos se corresponde al *metal* y la otra al substrato semiconductor. El funcionamiento del MOSFET se basa en este condensador, mediante el cual es posible formar y controlar la concentración de portadores de carga para crear el canal conductor que permite el flujo de corriente eléctrica a través del dispositivo (concretamente a través del drenador y la fuente, como ya se mencionó antes).

Por otra parte, estos terminales “drenador” (D) y “fuente” (S) que incluye el MOSFET, se encuentran conectados a dos regiones (cada uno a una distinta) altamente dopadas y del mismo tipo (*p* o *n*), que a su vez ha de ser contrario al tipo del substrato (típicamente se usan MOSFET de canal *n*; es decir, con substrato de tipo *p*).

Realmente, el término “metal” atribuido a la designación de los MOSFET no es del todo correcto, ya que a partir de mediados de la década de los 70, el aluminio (o incluso el molibdeno o el silicio amorfo, que se usaban como material de la puerta) se “fue sustituyendo” por el silicio policristalino (que es un semimetal o metaloide), ya que con este se alcanzaban muchos más beneficios estructurales (reducción de las capacidades parásitas, mayor aislamiento gracias al recubrimiento de óxido térmico de alta calidad que tiene la compuerta de silicio, ...) y en la fabricación de los transistores con puertas autoalineadas (técnica mediante la cual la puerta se superpone ligeramente sobre los bordes de las regiones del drenador y la fuente); antes había que depositar el aluminio en las últimas etapas del proceso de fabricación del dispositivo a causa de que este se funde aproximadamente a los 660 °C y las etapas de dopaje se llevaban a cabo a unos 1000 °C, pero el silicio (que se funde a 1414 °C aproximadamente) permitía crear la capa de la puerta en cualquier etapa del proceso. Por otra parte, el “óxido” que se usa como aislante entre el substrato y la puerta también se ha reemplazado por otros materiales que pueden cumplir su función (nitruro de silicio, polímeros en el caso de circuitos basados en semiconductores orgánicos, etc.).

En relación con este último aspecto, resulta interesante introducir dos términos vinculados al MOSFET: IGFET (transistor de efecto de campo de puerta aislada), que es un término más general que el que se trata en este texto (ya que no limita los transistores únicamente a metales u óxidos) y MISFET (transistor de efecto de campo metal-aislante-semiconductor), que es menos general que el anterior pero más que el MOSFET, ya que no limita los transistores (que

pertenezcan a su denominación) a un aislante de solo óxido (generalmente dióxido de silicio).

### III. HISTORIA

La invención del transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (incluso más genéricamente hablando, del transistor) es un claro ejemplo de cómo pueden existir varios científicos, tecnólogos o investigadores estudiando independientemente un cierto tema de desarrollo (hasta en localizaciones o tiempos remotos) y de que, pudiendo llegar a un mismo resultado, no se supriman entre sí los avances, resaltando una prioridad de referencia de descubrimiento, sino que se “teja” conjuntamente un camino correcto que engrose el acervo del conocimiento (parafraseando a Francis Bacon [1561-1626]).

Se puede mirar hacia atrás en la historia y recordar una serie de descubrimientos de los que, en cierto modo, cada uno es consecuencia indirecta del anterior: desde el indudable conocimiento de los antiguos griegos y probablemente todo el mundo antiguo de los fenómenos de la electricidad y el magnetismo (véase la etimología de “electrón”, del griego clásico *ἤλεκτρον*, que significa “ámbar”) hasta la sistematización de su estudio, con las aportaciones de Sir William Gilbert (quien describía cualitativamente en *De Magnete* [1600] propiedades de los imanes), Otto von Guericke y sus investigaciones sobre las interacciones eléctricas y la primera máquina electrostática triboeléctrica (1660) (introducción de los conceptos de aislante y agente externo para producir electricidad), el comportamiento eléctrico de los cuerpos y las cargas (“resinosas” y “vítreas”, que más tarde serían negativas y positivas) gracias a Du Fay (a principios del siglo XVIII), el *electroscopio de panes de oro* y la *botella de Leyden* (construidos por Francis Hauksbee en 1705 y por científicos de la Universidad de Leyden en 1745, respectivamente) (siendo considerado este último invento como la primera topología de condensador eléctrico), los importantes estudios de Benjamin Franklin en el entorno del año 1753 (en los que se infiere el concepto de circulación de la corriente eléctrica en el sentido convencional; es decir, desde un electrodo positivo [ánodo] a uno negativo [cátodo]), los descubrimientos acerca de las leyes de las fuerzas eléctricas y magnéticas por parte de Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) y Henry Cavendish (1731-1810), los experimentos de Luigi Galvani (1737-1798) y Alessandro Volta (1745-1827) (precursores de las baterías eléctricas), el descubrimiento y estudio por parte de Hans Christian Ørsted (1777-1851) del electromagnetismo (así lo denominó él) y posteriormente de André-Marie Ampère (1775-1836) y Michael Faraday (1791-1867) o las valiosas contribuciones investigatorias de George Simon Ohm (1789-1854) sobre las corrientes eléctricas (relación entre la intensidad de una corriente circulante, la diferencia de potencial aplicada a través de un conductor y la resistencia del material por el que circula).

Ya desde finales del siglo XIX, se sabía (gracias a hallazgos de científicos como Carl Ferdinand Braun en 1874) que poniendo en contacto alambres de ciertos metales y cristales semiconductores como la galena (que contiene Sulfuro de plomo II, que es lo que realmente causa el efecto buscado), se creaba un dispositivo capaz de dejar pasar la corriente en una sola dirección (diodo). Se vio útil utilizar este dispositivo para la rectificación de señales de alterna y sirvió, bastantes años

más tarde, para la invención del receptor (o detector) de radio con transistores (que trabaja a frecuencias incompatibles con estos primeros diodos) a mediados del siglo XX.

Uno de los primeros trabajos en relación con la amplificación usando semiconductores vino de la mano del ingeniero Oleg Losev (que trabajaba en un laboratorio de radio de Nizhegorod en Rusia). En torno al año 1922, descubrió un modo especial de funcionamiento de un diodo de punta de contacto de zincita (forma mineral del óxido de zinc o ZnO), en el que se lograba mantener una amplificación de señales de hasta 5 MHz de frecuencia. Estos diodos se diferencian de los diodos semiconductores típicos de silicio en que se fabrican empleando dos cristales de diferente polaridad y puestos en contacto formando una unión p-n (su uso ha llegado a quedar sustituido casi por completo por el de los dispositivos de silicio).

Entrado el siglo XX, surgió la necesidad de nuevas tecnologías para mejorar la industria de la telecomunicación (para comunicarse de costa este a costa oeste en EEUU, con casi 4000 km de ortodrómica), por lo que una subsidiaria (que posteriormente sería American Telephone & Telegraph) de la compañía fundada en 1880 por Graham Bell, Bell Telephone Company, compró la patente (de 1906) del triodo (válvula electrónica de tubo de vacío que logra amplificar una señal eléctrica) a su inventor, Lee de Forest.

Aparecieron años más tarde nuevos dispositivos que podían sustituir beneficiosamente al triodo (generalmente para aplicaciones de baja y media potencia). Así, en 1925, el físico austrohúngaro Julius Edgar Lilienfeld solicitó la primera patente (en la que describía “un método y un aparato para controlar corrientes eléctricas”) del transistor (como sustituto de estado sólido del triodo), que él definió como un dispositivo amplificador de tres electrodos que usa sulfuro de cobre como material s-c (con aluminio y óxido de aluminio representando la “M” y la “O” de su configuración MOS, respectivamente). Este invento es comparable al posterior transistor FET, ya que Lilienfeld no fue totalmente capaz de llevar a cabo en la práctica su patente, a causa de que sin la tecnología del Silicio (que aparecería unos 40 años adelante) no se lograba la calidad de fabricación necesaria para el correcto funcionamiento de estos dispositivos.

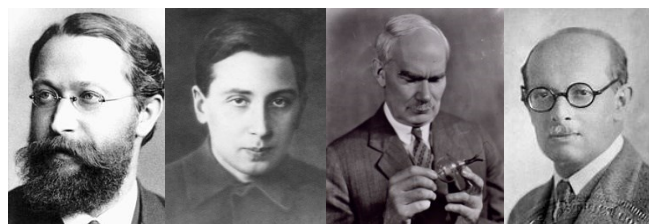


Fig. 1. De izquierda a derecha: Carl Ferdinand Braun (1850-1918), Oleg Losev (1903-1942), Lee de Forest (1873-1961) y Julius Edgar Lilienfeld (1882-1963).

En 1934, el ingeniero eléctrico alemán Oskar Heil (junto a su esposa) llegó a patentar un dispositivo similar al FET, con el que lograba controlar la conductividad de un material s-c mediante variaciones de un campo eléctrico. Solo cuatro años más tarde, en 1938, los físicos (también alemanes) Rudolf Hilsch y Robert Pohl experimentaron con cristales de bromuro de potasio y tres electrodos, consiguiendo amplificar señales de bajas frecuencias (sobre 1 Hz), pero sus descubrimientos no llegaron a la práctica comercial.

Las investigaciones en los Laboratorios Bell acerca de la

rectificación usando óxido de cobre (de mano, en parte, de Walter Houser Brattain, figura importante que se volverá a mencionar) y los trabajos de Nevill Francis Mott y Walter Hermann Schottky (finales de la década de 1930), mostraron una visión más correcta de este fenómeno, debido al establecimiento de una barrera de potencial asimétrica en la intercara del metal y el óxido. Llevaron al físico William Bradford Shockley a pensar (como afirma en su cuaderno de laboratorio en 1939) que realmente era posible realizar amplificadores usando semiconductores en lugar de tubos de vacío. Durante los subsiguientes años, él y Brattain trataron de desarrollar un dispositivo de tres electrodos (usando uno de ellos para modular esta barrera de potencial antes mencionada), pero los resultados aún no fueron fructíferos.

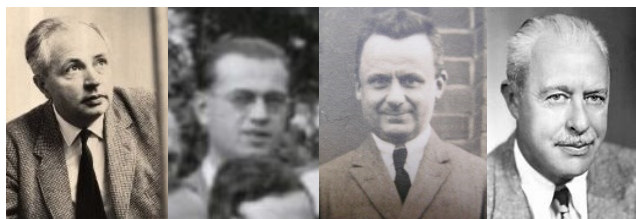


Fig. 2. De izquierda a derecha: Oskar Heil (1908-1994), Rudolf Hilsch (1903-1972), Robert Pohl (1884-1976) y Walter Houser Brattain (1902-1987).

Tras la II Guerra Mundial, en abril de 1945, el Grupo de Física del Estado Sólido liderado por Shockley propuso un dispositivo (que ahora se denomina FET) que hacía uso de un campo eléctrico externo para variar la cantidad de portadores de carga a través de una fina capa de s-c (silicio o germanio), es decir, variar la intensidad de corriente (aplicando un cierto voltaje a un circuito cerrado que pasase por medio del s-c, se conseguiría una amplificación inducida en otro circuito, que también pasase a través del s-c); aun así, la teoría no “predijo” bien la práctica y la idea no se llevó a cabo correctamente.

Meses más tarde, con ayuda de John Bardeen, llegaron a la conclusión de que el problema podía deberse a que los electrones atraídos a la superficie por el campo eléctrico quedaban atrapados en los llamados “estados de superficie” (estados electrónicos que se encuentran en la superficie de los materiales) y por tanto no podían actuar como portadores de carga; o como Shockley dijo: “los estados de superficie bloquean el campo eléctrico en la superficie y blindan el interior del semiconductor frente a la influencia de la lámina de control cargada positivamente”.



Fig. 3. De izquierda a derecha: Nevill Francis Mott (1905-1996), Walter Hermann Schottky (1886-1976), John Bardeen (1908-1991) y William Bradford Shockley (1910-1989).

Junto con el apoyo de una serie de científicos como Gerald Pearson, Robert Gibney y el propio Bardeen, Brattain propuso que podía solucionar el problema del bloqueo de campo eléctrico sumergiendo un s-c de Silicio en una solución electrolítica. Tras varios intentos frustrados y un

estudio exhaustivo de diferentes tipos de materiales y tecnologías, Bardeen y Brattain (principal y conjuntamente) consiguieron elaborar, por primera vez, un transistor de punta de contacto (fabricado con un cristal de germanio y dos alambres de oro), dispositivo que patentaron en 1948. Este dispositivo tenía un tamaño de más de 1 cm de altura y como Shockley apreció, su fabricación en grandes cantidades sería complicada y poco fiable.

Tras algún tiempo de investigación propia y mientras escribía su mayor obra, *Electrones y Huecos en Semiconductores con aplicación a transistores electrónicos*, Shockley presentó a mediados de 1948 una patente de otro dispositivo similar, el transistor de unión bipolar (BJT). Otra importante patente, la primera de un transistor de efecto de campo, la presentó en 1951. Dos científicos de los Laboratorios Bell, George Clement Dacey e Ian Ross, tuvieron éxito al llevar a la práctica funcionalmente (por primera vez) este último invento.

Cabe destacar que el término “transistor” no fue acuñado por ninguno de estos científicos, sino por el ingeniero y autor John Robinson Pierce, partiendo de la denominación de otros dispositivos semiconductores ya inventados (como el termistor o el varistor), además de considerando que, si bien el tubo de vacío tenía “transconductancia”, este “nuevo” dispositivo debería tener “transresistencia”.

Alternativamente, durante los años 1945 y 1948, Herbert Franz Mataré y Heinrich Johann Welker (que trabajaban en una subsidiaria francesa de la compañía Westinghouse) desarrollaron (similar y paralelamente a Bardeen y Brattain) lo que fue el primer transistor funcional en Europa. Este dispositivo fue denominado (después del transistor) “transistron” y fue usado, mayormente, para la telefonía en Francia, pero su impacto fue bastante secundario en comparación con el de los Laboratorios Bell.

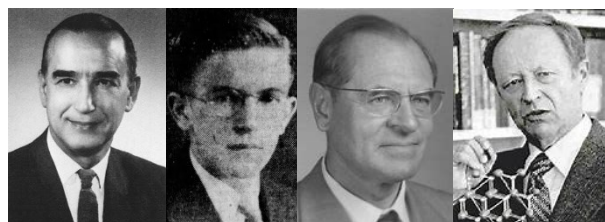


Fig. 4. De izquierda a derecha: Gerald Pearson (1905-1987), Robert Bernard Gibney (1911-1991), Herbert Franz Mataré (1912-2011) y Heinrich Johann Welker (1912-1981).

La siguiente década (1950-1960), gracias (en parte) al trabajo de Shockley y todo Laboratorios Bell, fue sumamente productiva en cuanto al desarrollo de nuevas tecnologías sobre transistores; a decir, del transistor Darlington, transistores de alta frecuencia, receptores de radio (véase la radio TR-55 de Akio Morita y Masaru Ibuka, fundadores de Sony), el transistor de superficie de barrera o el de silicio, procedimientos para producir dispositivos semiconductores, etc. En 1959, el primer MOSFET fue inventado (también en los Laboratorios Bell) por el coreano-estadounidense Dawon Kahng y el egipcio Mohammed “Martin” Atalla, como consecuencia de un intento no frustrado de lidiar con los problemas de los estados superficiales (mediante la pasivación, oxidación térmica y uso de estructuras MOS, entre otros métodos). El dispositivo fue patentado al año siguiente y, aunque fuese más compacto y fácil de producir en masa, no le hizo (entonces) gran competencia al BJT.



Fig. 5. De izquierda a derecha: George Clement Dacey (1921-2010), Ian Munro Ross (1927-2013), Dawon Kahng (1931-1992) y Martin (John) M. Atalla (1924-2009).

El trabajo de estas dos personas (que también demostraron la fabricación de MOSFET de canal n y p) no pasó en su momento desapercibido para todo el mundo, ciertos empresarios o científicos supieron o pudieron ver el potencial de este invento y el acierto se ve en los fructuosos resultados que les correspondieron. A principios de los 60, las compañías *Fairchild Semiconductor*, *RCA Laboratories*, *General Microelectronics* e *IBM* iniciaron planes de investigación en la tecnología MOS. En 1962, Steven R. Hofstein y Frederic P. Heiman (en los laboratorios de RCA) incorporaron por primera vez el MOSFET en un circuito integrado (habiendo sido estos creados en 1959 por Jack Clair Kilby). La familia lógica MOS-complementaria (CMOS) usada para la fabricación de dispositivos semiconductores fue introducida en 1963 por Chih-Tang Sah y Frank Wanlass (de Fairchild Semiconductor), tomando como base los PMOS y los NMOS. Con esta tecnología se pueden conformar interruptores de estado alto-bajo que permiten una baja disipación de potencia para circuitos digitales (en caso de que no estén conmutando).

Más tarde, en 1968, Albert H. Medwin desarrolló CMOS integrados en circuitos. La comercialización pública del componente de mano de General Microelectronics incentivó una rápida expansión en el mercado, dirigiendo a él su atención compañías de ámbito espacial (satélites o aeronaves, ...), televisión, amplificación y radio.

El MOSFET se ha convertido, con el paso de los años y por antonomasia, en el dispositivo básico de la electrónica moderna, habiendo sido manufacturado millones y millones de veces e implementado en una enormemente amplia gama de aplicaciones y sectores de la electrónica, como la de potencia, la digital, analógica, o computacional.

#### IV. ASPECTOS GENERALES DE LOS MOSFET

Para dar comienzo, se pueden comentar las diferencias entre estos transistores y otros tipos con los que “competía” en sus inicios (como los JFET o los BJT), citando varias cualidades de los MOSFET: el control de flujo de corriente se realiza mediante un campo eléctrico (al contrario del control por corriente en los BJT; en los JFET se ha de aplicar una tensión “de polarización” inversa al terminal de la puerta con el canal drenador-fuente), el JFET tiene mayor transconductancia que el MOSFET (y a su vez la de ambos es inferior a la del BJT), los MOSFET presentan una alta impedancia de entrada (en comparación con los otros dos) que provoca mayores pérdidas de potencia en estado de conmutación (por otra parte los MOSFET presentan menores corrientes de fuga; se ha de tener en cuenta que estos trabajan a mayores frecuencias que los otros [ $10 \div 80$  kHz frente a  $100 \div 500$  kHz]), el MOSFET tiene mayores niveles de ruido (debido en parte a la rápida conmutación) que los demás transistores y, por eso, se suele

usar en aplicaciones de conmutación y amplificación de señales, control de motores y sistemas embebidos, a diferencia de los usos que se les da a los JFET, BJT, ..., como pueden ser conmutaciones electrónicas o amplificadores búfer.

Existen dos diferenciaciones básicas de los transistores MOSFET, que son los de “enriquecimiento” o “acumulación” (incrementales) y los de “empobrecimiento” o “depleción” (decrementales); ambos tipos pueden ser de canal n o p, indistintamente. De estos dos tipos, por una serie de razones tecnológicas y funcionales, los que más han “triunfado” han sido los de enriquecimiento (es “más útil” aplicar una tensión para que el transistor entre en conducción cuando queramos [enriquecimiento] que aplicarla para suprimir el canal conductor en “modo reposo” [empobrecimiento]). Estos se basan (como ya se ha comentado anteriormente) en la creación de un canal por el que pueda circular la corriente, mediante la acumulación de electrones (que están presentes en el material tipo p o n junto con los “huecos de electrones”), desencadenada por la aplicación de una tensión entre la puerta y el sustrato, de manera que haya mayor potencial en la puerta para que el flujo de carga electrónica (entre drenador y la fuente) se dé en la dirección correcta. El término “enriquecimiento” se debe a que la conductividad eléctrica en este “canal” aumenta durante el proceso descrito (en la zona denominada como “zona de inversión”).

Si bien en los transistores (MOSFET) de tipo n los electrones son atraídos hacia la superficie (bajo la capa de óxido y repeliendo los huecos hacia el sustrato), en los de tipo p el fenómeno ocurre de forma contraria; el campo eléctrico (perpendicular a la superficie sustrato-óxido) ha de ser opuesto al del tipo n y, por lo tanto, los huecos son atraídos hacia la superficie y los electrones repelidos hacia el sustrato (más aún, la corriente por el canal de estos dos tipos de transistores son de sentido opuesto).

Como también se ha mencionado anteriormente, puede existir la posibilidad de fabricar un transistor de esta topología ya sea con s-c de tipo n o p, bajo la condición de que el sustrato que forme el conjunto sea del tipo contrario al primero (p o n). Por adición, la variante que más ha “triunfado” ha sido el transistor de canal n, por presentar menores pérdidas y mayor velocidad de conmutación, debido a la mayor movilidad de los electrones con respecto a los huecos.

#### V. ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO

Partiendo de la tecnología de semiconductores más normalizada y general en la industria electrónica y microelectrónica (la del silicio), se puede “reducir el campo de visión” y analizar cómo están organizados los átomos que conforman (en parte) un transistor.

Los átomos de silicio presentan un total de 4 electrones en su orbital (incompleto) externo (o capa de valencia), al igual que los demás elementos del grupo de elementos al que pertenece (carbonoideos). Al presentar propiedades intermedias entre los metales (como el estaño o plomo, pertenecientes a dicho grupo) y los no metales (como el carbono), se le denomina metaloide o semimetal (al igual que el germanio, que está en un periodo superior) y es, como se ha mencionado reiteradamente, un semiconductor (un conductor ideal presentaría un solo electrón de valencia y un aislante ocho). Su configuración electrónica le permite agruparse con otros 4 átomos vecinos formando una estructura cristalina (tetraédrica) mediante enlaces covalentes (cada par comparte, en este caso, dos electrones de sus bandas o capas de



valencia). A temperatura ambiente (aprox. 300 K) o superior, empiezan a aparecer proporcionalmente algunos electrones libres que consiguen “escapar” del enlace covalente y “moverse” por la red cristalina hacia polos potencialmente positivos (sentido de la corriente real, no convencional). Entonces su lugar lo “reemplaza” un hueco de igual carga, pero signo contrario (positivo).

A este fenómeno descrito le acompaña una técnica denominada “dopado” o “dopaje”, mediante la cual se introduce una impureza (sea un átomo de algún elemento distinto al silicio) que desencadena un cambio en el comportamiento de la red cristalina. Se pueden introducir dos tipos de impurezas: un elemento (en forma de átomo “donador”) con 5 electrones de valencia (como el arsénico, antimonio o fósforo), de los cuales uno de ellos se vuelve libre (para que se cumpla la “regla del octeto”) o un elemento (en forma de átomo “aceptor”) con 3 electrones de valencia (aluminio, boro, galio, ...), que introduce un hueco en el orbital externo. El número de electrones que quedan libres (con la primera impureza) se denomina “n” y el número de huecos que aparecen con el segundo tipo de impureza se denomina “p” (ambos medidos por unidad de volumen). Es notorio el porqué de que haya triunfado más el uso de los transistores de tipo n; estos son mejores conductores que los otros.

Lo verdaderamente interesante sucede cuando se dopa un s-c con impurezas de tipo p y, separadamente, con otras de tipo n (formando una unión “p-n”); aquellos electrones de la región n que se vuelven libres se dirigen a la región p, en la que se recombinan (caen energéticamente de la banda de conducción a la banda de valencia) con los huecos más próximos que se formaron debido a la impureza trivalente. Los pares de iones resultantes (iones positivos en la región n y negativos en la región p) forman una “barrera de potencial” en la unión que rechaza a los huecos y electrones más alejados existentes en las regiones p y n, respectivamente. La zona que se crea cuando aumentan los dipolos (pares de iones) alrededor de la unión se denomina “zona de depleción”; en ella no hay portadores de carga, ni minoritarios (como serían los electrones en la región p), ni mayoritarios (como serían los huecos en la región n).

Llegado a un punto de equilibrio, la barrera que se opone al flujo electrónico de la zona n a la p (diferencia de potencial eléctrico) deja de aumentar (a los 0.7 V en el caso del Si y a los 0.3 V en el caso del Ge) y hasta ese punto, la fuerza de desplazamiento detiene el movimiento de los portadores. Los portadores de carga han de superar este potencial para que haya conducción de corriente.

Se ha visto pues, cómo puede existir cierta tensión umbral sobre la cual, bajo efectos intrínsecos de los semiconductores, puede desencadenarse un canal de conducción formado por portadores de carga negativa (electrones libres). Si se toma una configuración habitual del transistor MOSFET (dos pequeñas regiones n a los lados y una mayor región p intermedia), surge un fenómeno muy parecido al explicado.

De manera similar a un interruptor eléctrico, este transistor tiene dos contactos conductores (uno en una región n denominado “drenador” y otro en la restante, denominando “fuente”) y un tercer contacto denominado “puerta”, aislado del sustrato (o región p) y resto del s-c mediante una capa de óxido (estos conceptos se han explicado anteriormente).

Ya que la disposición de los cristales es tal como se ha descrito, la interacción entre los electrones libres de las regiones tipo n y los huecos de la región tipo p formará una zona de depleción o de agotamiento en sus intercaras. Atendiendo al fenómeno anteriormente descrito, se llega a un

punto en el que los electrones libres se “agotan” y la barrera de potencial formada (desde la zona p electronegativa) comienza a repeler cualquier portador de carga negativa que trate de atravesar la banda de agotamiento (similar a un interruptor en estado de apagado; no hay flujo de corriente eléctrica de un contacto a otro). De la misma forma que con la simple unión p-n, si se aplica un voltaje positivo suficiente a la puerta, los electrones se verán atraídos y superarán la repulsión de la capa de agotamiento para formar a su través un canal conductor (capa de inversión) (interruptor en estado de encendido). Cuanto mayor sea la tensión de la puerta, mayor será el campo eléctrico que se forma perpendicularmente a la superficie de la región del s-c tipo p (que atrae a los electrones y repele a los huecos) y por tanto mayor el flujo de carga por el canal n. Ahora bien, teniendo en cuenta que se está analizando un MOSFET de tipo n de enriquecimiento, la corriente por este canal se originaría al aplicar una tensión positiva en el terminal drenador respecto al terminal fuente (al contrario que pasaría en un transistor de canal p).

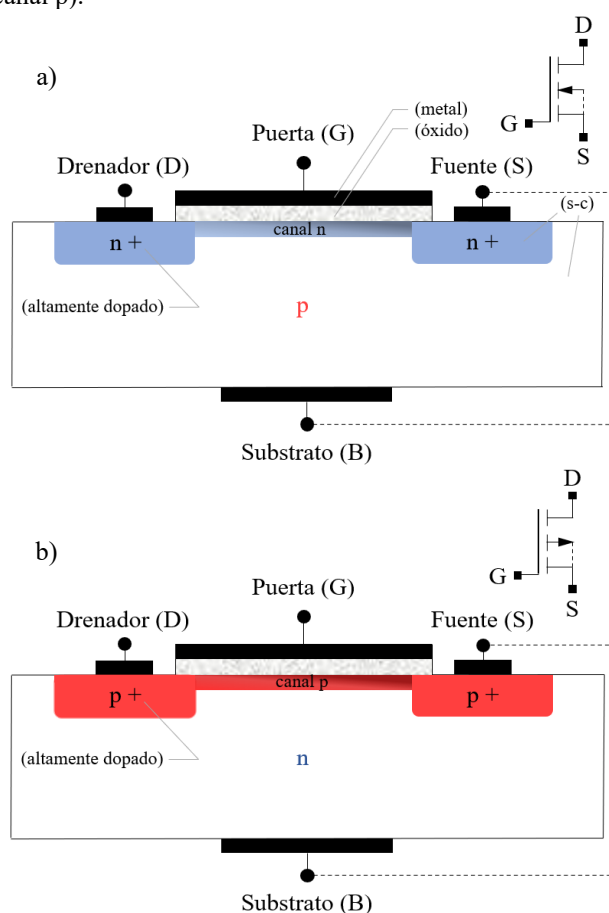


Fig. 6. a) MOSFET (de enriquecimiento) de canal tipo n. b) MOSFET (de enriquecimiento) de canal tipo p. Dibujado en discontinuo, los terminales B y S conectados (configuración más típica). Si fuesen de empobrecimiento, en sus respectivos símbolos se unirían (en una) las tres líneas discontinuas contiguas a la puerta.

De forma general, se denomina “tensión umbral” ( $V_{GS(th)}$ ) a la mínima tensión aplicada en la puerta con la cual la densidad (volumétrica) de electrones en la zona de inversión es igual a la densidad (volumétrica) de huecos en el sustrato (región p en este caso). Mediante el terminal del sustrato (que en parte controla el ancho del canal del transistor) se puede hacer variar esta tensión umbral, aunque normalmente va unido al terminal de la fuente y, a su vez, a una masa de referencia (para evitar efectos de conducción parásitos a causa de la estructura “pnp” del transistor), resultando así un MOSFET de tres terminales.

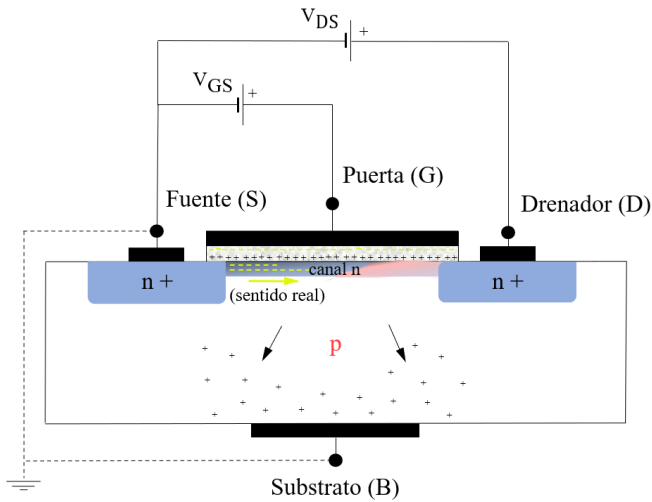


Fig. 7. MOSFET en funcionamiento. Se observa el estrangulamiento (ver párrafo siguiente) en la región cercana a la fuente, así como el sentido de los portadores de carga (en este caso electrones), contrario al sentido convencional de corriente. Las cargas positivas se “dirigen” al fondo del sustrato (desplazados por el potencial positivo del terminal G), mientras que las negativas a la capa de óxido aislante, formando el canal conductor.

El funcionamiento de este transistor se puede dividir en 3 modos de operación distintos, dependiendo del valor de las tensiones puerta-fuente y drenador-fuente, entre otros factores. Si se comporta como un circuito abierto significa que está en la “zona de corte”, por lo que  $V_{GS} < V_{GS(th)}$  y no existe circulación de corriente ya que no se ha podido llegar a formar un canal conductor o zona de inversión (únicamente podría aparecer una corriente “subumbral” asimilable a una función exponencial de  $V_{GS}$ , debida a efectos térmicos y energéticos). Cuando  $V_{GS}$  alcanza y supera a  $V_{GS(th)}$  (o  $V_t$ ), se entra en la zona “ohmica” o “lineal”, se puede formar la mencionada zona de inversión y por tanto da comienzo el flujo de corriente, que es función de estas dos tensiones, entre otros factores (relación no lineal). La tercera zona aparece cuando  $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$  (y obviamente  $V_{GS}$  es positivo); por debajo del valor de saturación, el transistor trabaja en zona lineal. Como el voltaje en el drenador es (paulatinamente) mayor que en la fuente, los electrones tienden a ser más atraídos por el primero y, por tanto, se desencadena un “estrangulamiento” del canal en las proximidades del drenador; aunque desaparezca el antiguo canal, la conducción continúa activa gracias al fuerte campo eléctrico entre D y S. En resumen, llegado a este punto, el valor de la corriente entrante al drenador ( $I_D$ ) se hace constante e invariante ante incrementos de  $V_{DS}$ .

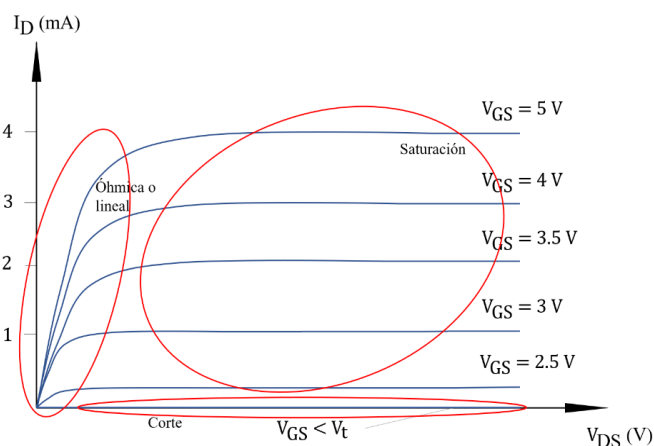


Fig. 8. Zonas de funcionamiento del transistor y “curvas de Drenador” (ejemplificadoras) de un transistor n-MOS de enriquecimiento.

## VI. APLICACIONES

Uno de los principales precursores del uso masivo del transistor en todo tipo de aplicaciones y ámbitos fue Carver Andress Mead (fundador de la empresa desarrolladora de sensores de imagen Foveon, así como inventor del MESFET). Introdujo el concepto *VLSI* (Integración a muy gran escala), mediante el que abrió las puertas a una electrónica de un tamaño sorprendentemente reducido (microelectrónica) y a una potenciación de las cualidades de “escalabilidad” y miniaturización de los transistores, especialmente del MOSFET.

La alta densidad de integración de estos transistores (mayor número de ellos en menos espacio, generalmente conservando la potencia) facilitó la tecnología de las comunicaciones digitales (teléfonos móviles inteligentes, dispositivos de almacenamiento y audiovisuales, ...), la industria informática, los videojuegos y circuitos integrados analógicos y digitales, en general.

Una ventaja de estos transistores para la conmutación es que logran bloquear la puerta de corrientes continuas indeseadas, lo que reduce el consumo de energía y le otorga una alta impedancia de entrada. Estas cualidades hacen que el MOSFET se prefiera indiscutiblemente para aplicaciones digitales antes que otros tipos de transistores como el BJT o el JFET (aunque estos últimos tienen sus ventajas para ciertos circuitos analógicos). Pero, por ejemplo, en su zona de trabajo lineal, los MOSFET pueden funcionar como resistencias de precisión (cargas electrónicas), con la ventaja de que presentan menores fugas térmicas que otros transistores.

Su uso como dispositivos de almacenamiento (memorias) se hizo notar con nuevas tecnologías como la SRAM (memoria estática de acceso aleatorio, introducida por John Schmidt en 1964), DRAM (memoria dinámica de acceso aleatorio) (ambas mejores sustitutas de las anteriores memorias de núcleo magnético de los computadores), EPROM (memoria de solo lectura programable y borrrable), EEPROM (ROM programable borrrable eléctricamente) o incluso memorias flash (que se basan en diseños con MOSFET de puerta flotante).

Otras aplicaciones interesantes son los sensores MOS (instrumentación y medición de parámetros, detección de cambios físicos y químicos, ...), destacando el transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET) en la biomedicina o el dispositivo de carga acoplada (CCD) y el sensor de píxeles activos (sensor CMOS), ampliamente utilizados en adquisición de imágenes digitales.

También es sumamente importante y básico en ramas como la electrónica de potencia, llegando a ser el dispositivo de potencia más utilizado jamás. Al no requerir de un flujo continuo de corriente (al contrario del BJT) para mantenerse en estado alto, permiten velocidades de conmutación muy elevadas, entre otras virtudes. Su integración a este campo de la electrónica ha causado mejoras notables en diversos dispositivos como fuentes de alimentación (conmutadas, regulables...) o amplificadores de potencia de RF (radiofrecuencia) y en los sistemas de telecomunicaciones, permitiendo la invención del LDMOS (s-c de óxido metal de difusión lateral).

Por último, es suficiente con mencionar su gran y vital uso en sistemas de automoción (vehículos eléctricos, ...), industriales, de automatización o en el control número por computadora (CNC).

## VII. CONCLUSIÓN

Todos (aventuradamente hablando) los circuitos integrados usan algún MOSFET. Es por esto por lo que al hablar acerca del concepto “recuento de transistores” (número de transistores dentro de un dispositivo electrónico) se pueda estar refiriendo indirectamente a la cantidad de MOSFET que estos contienen. Más aún, este recuento ha evolucionado a lo largo de los años de una manera un tanto proporcional y “vaticinable”. En este sentido, Gordon Earle Moore (integrante de Fairchild Semiconductor y cofundador de Intel) propuso empíricamente en 1965 una ley que sugería que el número de transistores en un CI se duplicaría (aproximadamente) cada dos años.

El desarrollo y avance de la fotolitografía y del proceso planar permitió la rápida expansión de la fabricación de circuitos integrados (superiores frente a los circuitos discretos para altos volúmenes de producción); esta permitía imprimir los chips con todos sus componentes en un espacio mucho más reducido y más eficientemente que lo que permitía la construcción de transistores individuales.

Por esta tecnología comentada y otras razones, la Ley de Moore (en congruencia con la “Escala de Dennard”, que propone que el consumo energético de los transistores disminuye en proporción a su área) se ha cumplido por más de 50 años. En 1971 se trabajaba con tamaños típicos de 10  $\mu\text{m}$ , mientras que las dimensiones (que fueron disminuyendo paulatinamente) se estiman en solo 2 nm para el año 2023 (en realidad estos tamaños o escalas indican de cierta forma la distancia entre el drenador y la fuente, que puede servir, de manera vagamente rigurosa, para extrapolar las densidades de integración en los circuitos, cada vez mayores).

Si bien con una escala de integración de 14 nm aproximadamente, unos 90 átomos de silicio ocupan la longitud del canal del transistor, en el año 2025 se ha previsto reducir esta cifra a 4 átomos. A estas escalas ya no se podrían evitar efectos cuánticos de los electrones (lo que sí era posible años antes con “la suficiente” barrera de potencial); es decir, los portadores de carga serían capaces de atravesar el canal sin necesidad de un potencial mínimo en la puerta, dando lugar a eventos imprevisibles y extraños. De esta forma los métodos de control clásicos dejarían de ser manejables y quedarían obsoletos ante potenciales ampliaciones que mantuviesen activa la idea de reducción de la escala de integración; la investigación se expandiría en otras direcciones y ocasionaría una transición global del estudio y funcionamiento de nuevos tipos de transistores.

## VIII. REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

- Riordan, M., Hoddeson, L., Herring, C., *The Invention of the Transistor*, en: Bederson, B., *More Things in Heaven and Earth*, 1999, Springer, NY, ISBN 978-1-4612-1512-7.
- Ashley, Kenneth L., *Analog Electronics with LabVIEW*, 2002, Prentice Hall, ISBN 978-0130470652.
- M. M. Lorda, M. M. Hidalgo, *Diccionario de Electrónica, Informática y Energía Nuclear*, 1999, Ediciones Díaz de Santos, ISBN 9788479784119.
- George Gamow, *Biografía de la Física*, 3a ed., 2014, Alianza Editorial, ISBN 978-84-206-8970-8.
- David A. Laws, *Who Invented the Transistor?*, *Computer History Museum*, 2013.
- Ignacio Mártel, “Microelectrónica, La Historia de la Mayor Revolución Silenciosa del Siglo XX”, 2018, Ediciones Complutense, ISBN 978-84-669-3602-6.
- Alpha & Omega Semiconductor, *Power MOSFET Basics*.
- Bakshi, U.A., Godse, A.P., *Analog and digital electronics «8.2 The depletion mode MOSFET»*, 2007, ISBN 978-81-8431-284-3.

Julius Edgar Lilienfeld, *Electric Current Control Mechanism*, Patent CA 272437, 1927.

N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, applications and design*, 3a ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003, ISBN: 0-471-22693-9.

Gordon E. Moore, *The Role of Fairchild in Silicon Technology in the Early Days of Silicon Valley*, IEEE Vol. 86, n° 1, January 1998.

Dawon Kahng, John Atalla, *Electric Field Controlled Semiconductor Device*, Patent US n° 3102230, 1960.

1965: “Moore's Law” Predicts the Future of Integrated Circuits, *Computer History Museum*.

N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, applications and design*, 3a ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003, ISBN 0-471-22693-9.

J. A. Gualda, S. Martínez, P. M. Martínez, *Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia*, 2a ed., Ed. Marcombo, S.A., 1999, ISBN 84-267-0843-9.

M.H. H. Rashid, *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, 3a ed., Editorial Pearson-Prentice Hall, 2004, ISBN 970-26-0532-6.

Lee De Forest, *Wireless telegraphy*, Patent US n° 841386A, 1906.

William Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors with application to transistor electronics*, Bell Telephone Labs. Inc., 1950.

William Shockley, *Circuit element utilizing semiconductive material*, Patent US n° 2569347A, 1948.

Hambley, Allan R., *Electrónica*, Prentice-Hall, 2000, ISBN 84-205-2999-0.

Moore, Gordon., *Cramming More Components onto Integrated Circuits*, *Electronics Magazine*, Vol. 38, n° 8, 1965.