

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la  
Propiedad Intelectual  
Oficina internacional



(43) Fecha de publicación internacional  
04 de junio de 2020 (04.06.2020)

WIPO | PCT

(10) Número de publicación internacional  
**WO 2020/109641 A1**

(51) Clasificación internacional de patentes:

H01L 29/16 (2006.01) H01L 21/205 (2006.01)

H01L 29/94 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:

PCT/ES2019/070812

(22) Fecha de presentación internacional:

28 de noviembre de 2019 (28.11.2019)

(25) Idioma de presentación:

español

(26) Idioma de publicación:

español

(30) Datos relativos a la prioridad:

P201831162 29 de noviembre de 2018 (29.11.2018) ES

(71) Solicitantes: **UNIVERSIDAD DE CÁDIZ** [ES/ES]; C/ Ancha, 16, 11001 Cádiz (ES). **CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS** [ES/ES]; C/ Serrano, 117, 28006 Madrid (ES).

(72) Inventores: **LLORET VIEIRA, Fernando**; Universidad de Cádiz, C/Ancha, 16, 11001 Cádiz (ES). **ARAUJO GAY, Daniel**; Universidad de Cádiz, C/Ancha, 16, 11001 Cádiz (ES). **GODIGNON, Philippe**; Centro Nacional de Microelectrónica (CNM), Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB CSIC), C/del Til·lers. Campus Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallès (Bellaterra) Barcelona (ES). **EON, David**; CNRS/UGA, UPR2940, 25 rue des Martyrs BP 166, 38042 Grenoble cedex 9 (FR). **PERNOT, Julien**; CNRS/UGA, UPR2940, 25 rue des Martyrs BP 166, 38042 Grenoble cedex 9 (FR). **BUSTARRET, Etienne**; CNRS/UGA, UPR2940, 25 rue des Martyrs BP 166, 38042 Grenoble cedex 9 (FR).

(74) Mandatario: **PONS ARIÑO, Angel**; Glorieta Rubén Darío 4, 28010 Madrid (ES).

(81) Estados designados (*a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible*): AE, AG,

AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (*a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

— con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))

(54) Title: FIELD-EFFECT TRANSISTOR (MOSFET) AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) Título: TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO (MOSFET) Y PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL MISMO

(57) Abstract: The invention relates to a field-effect transistor (MOSFET) and a method for manufacturing same. The invention comprises a high-power diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET), as well as the method for manufacturing same by lateral/selective growth. The combination of growth on the substrate of the first layers with a standard vertical shape and the use of selective lateral growth on the etched-mesa structure grants the MOSFET device a novel three-dimensional structure. This avoids the edge effects of the metal contacts and the high internal electrical fields, improves the crystalline quality of the diamond and reduces the times, costs and size of the device, also making it more versatile for implementation on more complex architectures.

(57) Resumen: Transistor de efecto campo (MOSFET) y procedimiento de fabricación del mismo. La invención comprende un transistor metal-óxido-semiconductor de efecto campo (MOSFET) de diamante para alta potencia, así como el procedimiento de fabricación mediante crecimiento lateral/selectivo. La combinación del crecimiento sobre el sustrato de las primeras capas de forma vertical estándar con el uso de un crecimiento lateral selectivo sobre la estructura mesa grabada confiere al dispositivo MOSFET de una estructura tridimensional novedosa. Esta evita los efectos de borde de los contactos metálicos y los altos campos eléctricos internos, mejora la calidad cristalina del diamante y reduce los tiempos, costes y tamaño del dispositivo dotándole a su vez de una mayor versatilidad para su implementación sobre arquitecturas más compleja.



WO 2020/109641 A1

## TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO (MOSFET) Y PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL MISMO

### DESCRIPCIÓN

#### 5 SECTOR DE LA TÉCNICA

La invención se encuadra dentro del sector industrial de electrónica de potencia y microelectrónica.

#### 10 ESTADO DE LA TÉCNICA

Los dispositivos de potencia de silicio semiconductor han guiado el desarrollo de la electrónica de potencia permitiendo su continua mejora con un gran número de implicaciones en la industria, especialmente en la transmisión y distribución de energía eléctrica a gran escala (T&D). Recientemente se han realizado grandes esfuerzos en el desarrollo de dispositivos de SiC dotando a este de su nicho de aplicación. Sin embargo, los requerimientos de la nueva electrónica de potencia superan los límites físicos de ambos, SiC y silicio. Por tanto, la nueva generación de dispositivos de potencia debe estar desarrollada en un nuevo material semiconductor. En este sentido, el diamante sintético expande claramente los límites de la tecnología en Silicio y SiC gracias a sus espectaculares propiedades eléctricas y térmicas. Su resistencia a la ruptura dieléctrica es tres veces superior a la del SiC y más de treinta veces mejor que la del Si. Además, la movilidad de portadores en el diamante es muy alta tanto para electrones como para huecos y su conductividad térmica no tiene parangón.

25

En el contexto actual, los conmutadores de potencia de Si semiconductor usados en el 90% del mercado de las aplicaciones de potencia son dispositivos de control de puerta MOS (VDMOS, IGBT). Además, son aún muy usadas las estructuras basadas en tiristor para aplicaciones de alta frecuencia y voltaje debido principalmente a la falta de dispositivos MOS-controlados equivalentes. Esto es algo que el SiC, con voltajes de ruptura inferiores a 10kV, y el diamante o el Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, con voltajes de ruptura superiores a 10kV, podrían resolver.

La mayor ventaja de los conmutadores MOS-controlados, es la baja energía de impulso requerida para conmutar el circuito y la simplificación en el circuito que esto

35

lleva asociada. Además, los dispositivos controlados por puertas MOS no tienen flujo de corriente cuando la puerta no está polarizada (*normally-off*), evitando así cortocircuitos en la carga eléctrica en caso de fallo de suministro.

- 5 El diamante es, teóricamente, el semiconductor ideal para la fabricación de semiconductores unipolares de potencia. Sin embargo, el material de partida es costoso y el tamaño de las obleas es realmente pequeño (2,25 cm<sup>2</sup> como máximo). Además, la densidad de defectos en los sustratos es aún elevada y muy variable de una muestra a otra, incluso proviniendo de la misma partida de un único suministrador.
- 10 La calidad superficial también varía mucho de unos sustratos a otros y es habitual que requieran pulidos extra. A estos inconvenientes inherentes al material de partida hay que sumarle los problemas debido al procesado tecnológico, más en concreto los referentes al dopado local y la pasivación de intercaras.
- 15 La disponibilidad comercial de diamante monocristalino con calidad electrónica se hizo realidad con el desarrollo del crecimiento de diamante por deposición química de vapor (CVD) en la década de los noventa. Así, hoy día existen sustratos de diamante de hasta una pulgada disponibles y de hasta dos pulgadas lo estarán pronto. Recientemente, Shin-Etsu y TIT publicaron un alto rendimiento en un diodo Schottky
- 20 de diamante fabricado sobre un sustrato de diamante basado en Silicio y en marzo de 2016, el grupo de Namiki (grupo industrial japonés) anunció en el MRS Spring Meeting la comercialización del primer sustrato de diamante de largo diámetro crecido por heteroepitaxia. Esto prueba que es posible tener obleas de gran área con calidad electrónica. El precio de estos sustratos en compras de gran volumen no debería
- 25 variar del de otros materiales de largo ancho de banda prohibida (WBG), tales como SiC. Sin embargo, los dispositivos electrónicos de diamante están aún en fase de investigación y no han dado lugar a productos comerciales. La razón principal de esto es el muy pobre rendimiento que ofrecen causado por una intercara diamante/contacto metálico muy defectuosa. Este problema fue solventado recientemente por el Institut
- 30 Néel usando un tratamiento superficial sobre el diamante antes de la fabricación del contacto Schottky, permitiendo así la realización de rectificadores con baja resistencia activa (ON) y muy alto voltaje de bloqueo [Patente CNRS: PCT/US N°14/786130, FR N°13/53647]. La combinación de este nuevo logro junto con los recientes progresos en el procesado de obleas abre la puerta a la fabricación de dispositivos que se
- 35 benefician de las excepcionales propiedades del diamante.

Como consecuencia de su muy compacta estructura cristalina, el diamante es un material muy duro y sensible a la generación de defectos durante la incorporación a su red cristalina de impurezas para su dopado. Este hecho enfatiza la importancia de controlar la propagación de defectos en las capas activas. Recientemente se ha probado como las condiciones de crecimiento, más en concreto la ratio molar de metano sobre hidrógeno, en deposición química de vapor activado por plasma de microondas (MPCVD) define la orientación preferencial de crecimiento [F. Lloret et al., Phys. Status Solidi A 210, 2570 (2016)]. De esta forma es posible realizar un crecimiento de diamante homoepitaxial selectivo sobre sustratos grabados. Dicho crecimiento lateral selectivo juega un papel principal permitiendo la fabricación in-situ (en la misma cámara de crecimiento) de arquitecturas 3D, minimizando el proceso de fotolitografía y controlando la generación de dislocaciones al permitir crecer sobre planos óptimos a este respecto [M.P. Alegre et al., Appl. Phys. Lett. 105, 1731303 (2014)].

Estas propiedades ofrecen la posibilidad de dispositivos electrónicos con rendimiento muy superiores en términos de alta frecuencia, eficiencia energética, propiedades de densidad de potencia, pérdidas, refrigeración y robustez en ambientes contaminados [D. Chamund et al., proceedings of the 7th WSEAS Inst.Conf. Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communications, Cambridge, UK, ISBN 973-960-6766-40-4, ISSN 1790-5117, February 2008].

En la actualidad, algunos autores se han hecho eco de los avances que este tipo de dispositivos suponen. Es el caso de la patente EP2884525A1, que hace referencia a la creación de un dispositivo FET sobre sustrato de diamante, o la WO2010001705A1, que recoge la formación de una unión p-n de diamante. En ambos casos se hace uso de crecimiento de diamante lateral por CVD para el diseño de las estructuras 3D. Dicho crecimiento lateral consiste en un crecimiento selectivo llevado a cabo en direcciones diferentes a la de orientación del sustrato. Sin embargo, está demostrado que la curvatura de las líneas de campo para diseños horizontales y pseudo-verticales, como los referenciados, inducen altos campos eléctricos en su interior principalmente en los bordes y los alrededores del contacto de puerta [Tesis de Aurelien Marechal, Université Grenoble-Alpes, 2015]. No obstante, un diseño que incluya una primera capa altamente dopada en la parte inferior que actúe como drenador permite un

comportamiento completamente vertical sin curvatura de las líneas de campo y, por tanto, sin generación de campos eléctricos anómalamente altos.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

5

La presente invención se corresponde con una estructura MOSFET completamente nueva, basada en la combinación de procesado estándar con el recrecimiento selectivo de epicapas (capas crecidas epitaxialmente). Diseñada enteramente en diamante monocristalino, dicha estructura resuelve los diferentes problemas tecnológicos existentes hasta ahora en la fabricación de dispositivos comerciales de diamante. Entre ellos: el crecimiento selectivo de capas dopadas tipo n y tipo p, el diseño de terminaciones y la pasivación para capacidad de alto voltaje. Esto se consigue mejorando el procesado y la fabricación tecnológica. De una parte, la arquitectura se ha diseñado de forma que las etapas de procesado en sala limpia se minimicen. La estructura comprende una serie de capas y no contiene ángulos agudos para las líneas de campo, logrando evitar así la generación de áreas con campos eléctricos intensos en el interior del dispositivo. Además, el crecimiento lateral no solo evita la generación de nuevos defectos, sino que desvía los que pudieran haber de forma que evita cortocircuitar puerta y drenador actuando así como filtro de dislocaciones. Dicha estructura permite igualmente un largo campo arbitrario y, como se ha adelantado, reduce sustancialmente el número de procesos de fotolitografía. Además, la combinación de caras orientadas en diferentes direcciones permite la optimización del dopado y de las ratios de crecimiento, mejorando la eficiencia del dispositivo y reduciendo los tiempos de fabricación.

25

Por otra parte, el uso de técnicas de CVD para el crecimiento permite una alta calidad cristalina con tiempos de deposición relativamente bajos. El dispositivo se ha diseñado para minimizar los pasos en sala limpia logrando la estructura tridimensional con únicamente dos etapas de grabado. Una etapa inicial en la cual se generan unas caras laterales sobre las que crecer, y una segunda etapa para la fabricación de contactos óhmicos. El diseño del dispositivo permite que ninguno de estos grabados sea crítico en el funcionamiento del dispositivo.

35

Sobre un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido, se crece por CVD una primera capa que es de diamante

altamente dopado con boro,  $p^+$ , de espesor superior a 50 nm. Sobre esta primera capa, se deposita entre 5 y 20  $\mu\text{m}$  de diamante con muy bajo dopado por boro,  $p^-$ ; de tal manera que se define una segunda capa

- 5 Tras este primer paso, se procede al grabado de la segunda capa una vez depositada,  $p^-$ , mediante técnicas de grabado iónico; para generar estructuras tipo *mesa* de profundidad comprendida entre los 200 nm y las 15  $\mu\text{m}$ , dependiendo del espesor de esta segunda capa.
- 10 Sobre estas estructuras se crece selectivamente una tercera capa, que es de diamante dopado preferiblemente con fósforo (dopado tipo n) de forma que cubra la altura grabada (siendo por tanto su espesor dependiente de la profundidad de grabado escogida). Gracias a la estructura tridimensional del sustrato y el crecimiento preferencial del diamante tipo n sobre las caras laterales, es decir, sobre orientaciones
- 15  $\langle 111 \rangle$  y próximas, se logra el crecimiento selectivo sin necesidad del uso de máscaras u otras técnicas. Sobre esta tercera capa, de diamante dopado tipo n, se deposita una cuarta capa que será más fina que dicha tercera capa y de diamante semiconductor dopado  $p^+$ . Como se adelantó en el estado de la técnica, mediante el uso de una relación adecuada metano/hidrógeno, se consigue un crecimiento selectivo por
- 20 MPCVD, logrando de esta forma que la cuarta capa, de diamante semiconductor dopado  $p^+$  solo se deposite en las caras laterales dopadas tipo n.

- Previo a la fabricación de los contactos, se realiza un segundo y último grabado en los extremos de la estructura de forma que alcancen la primera capa  $p^+$  depositada. La
- 25 profundidad de este grabado dependerá de los espesores escogidos previamente, pero en cualquier caso supondrá varias micras. Este hecho sin embargo no supone un inconveniente para el dispositivo pues, aunque el grabado no fuera ideal, la distancia de este respecto de las capas activas del MOSFET hace que no tenga influencia en el correcto funcionamiento del dispositivo. Finalmente, sobre esta estructura final se
- 30 fabrican los contactos.

Mediante este diseño se evitan los siguientes problemas subyacentes en los actuales dispositivos de potencia basados en diamante:

- Efectos de borde de los contactos metálicos:

- Altos campos eléctricos internos: La geometría del diseño reduce la curvatura de las líneas de campo favoreciendo una distribución homogénea del campo eléctrico.
- Problemas asociados al grabado cerca de zonas activas del dispositivo: El grabado para el drenador se realiza a gran distancia del resto de contactos de forma que los habituales defectos asociados a estos largos periodos de grabado no tienen efecto en el comportamiento del dispositivo.
- Dislocaciones y "*killer defects*": Los defectos reticulares generados durante el crecimiento de las diferentes capas son contrarrestados gracias al crecimiento lateral. Además, este diseño proporciona:
- Mejoras de la calidad cristalina: El diseño del dispositivo en diamante monocristalino asegura la ausencia de defectos debido a desajustes reticulares propios de estructuras heteroepitaxiales. Además, el crecimiento lateral/selectivo disminuye la densidad de defectos cristalinos.
- Reducción de los tiempos y costes de fabricación. El crecimiento lateral y selectivo permite reducir las etapas de grabado y los costes en tiempo y económicos asociados a ellas.
- Reducción del tamaño del dispositivo: el diseño tridimensional permite una mayor miniaturización del sistema.
- Mayor versatilidad en el diseño: El uso de un crecimiento selectivo abre el diseño a su implementación sobre arquitecturas más complejas.

## DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE LOS DIBUJOS

**Figura 1:** Crecimiento sobre un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido, de una capa de diamante dopado p<sup>+</sup> y de una capa de diamante no dopado, p<sup>-</sup>.

**Figura 2:** Grabado parcial de la última capa fabricando así estructuras tridimensionales tipo mesa.

**Figura 3:** Crecimiento selectivo de capa de diamante dopado tipo n y de capa de diamante dopado p<sup>+</sup>.

**Figura 4:** Grabado en los extremos de la estructura que alcancen la primera capa de diamante dopado p<sup>+</sup>.

Figura 5: Fabricación de los contactos drenador, D, puerta, G, y fuente, S.

### MODO DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

5 Sobre un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido, se crece por MPCVD una primera capa, de diamante dopado  $p^+$  ( $10^{17} < [B] < 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ ). A este crecimiento le sigue la deposición de diamante no dopado,  $p^-$  ( $10^{12} < [B] < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) generando una segunda capa de diamante, que es de diamante aislante. Se realiza sobre la segunda capa un proceso de grabado a  
10 través del cual se fabrican estructuras tridimensionales, preferiblemente tipo mesa (una estructura mesa en electrónica significa que el dispositivo se levanta por encima del sustrato). Sobre estas estructuras tridimensionales se crece selectivamente una tercera capa que es de diamante dopado  $n$  y sobre ésta, una cuarta capa, de diamante dopado  $p^+$ . La arquitectura se finaliza con un grabado en los extremos de la estructura  
15 que alcancen la primera capa  $p^+$ . Sobre esta estructura se fabrican los contactos Ohmicos y Schottky.

A continuación, se presenta detalladamente un ejemplo de fabricación del dispositivo:  
Por MPCVD se deposita sobre un sustrato de diamante monocristalino de calidad  
20 electrónica y orientación (100) una capa de 500 nm de diamante dopado con boro. Para ello se utilizan las siguientes condiciones de crecimiento: metano como gas precursor con una ratio molar de 0.5%  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ , diborano para el dopado con una proporción de boro sobre carbono de 14000 ppm, una presión controlada a 33Torr durante el crecimiento, una potencia en el plasma de 300W y una temperatura sobre el  
25 sustrato de 900°C. Sobre esta capa se depositan 12  $\mu\text{m}$  de diamante no dopado intencionadamente,  $p^-$ , utilizando para ello las siguientes condiciones de crecimiento: metano como gas precursor con una ratio molar de 0.75%  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ , oxígeno para minimizar el dopado residual con una proporción de 0.3%  $\text{O}_2/\text{H}_2$ , una presión controlada a 33Torr durante el crecimiento, una potencia en el plasma de 300W y una  
30 temperatura sobre el sustrato de 900°C. Estos dos crecimientos dan lugar a una estructura como la representada en la figura 1.

Se realiza sobre la muestra un proceso de fotolitografía *lift-off* por el cual se dibujan mascarar de aluminio con geometría rectangular. Por grabado ICP se fabrican las  
35 estructuras rectangulares tipo *mesa* con una profundidad de 700 nm (figura 2).

Sobre estas estructuras se crece selectivamente una capa de diamante dopado n de aproximadamente 800 nm de espesor y una última capa de diamante dopado p<sup>+</sup> de 200 nm (figura 3). Ambas capas se depositan mediante MPCVD y usando metano como precursor del diamante, las condiciones de crecimiento de la primera serán las siguientes: Fosfina para el dopado n con una proporción de 50% PH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>, el metano por su parte será en una proporción de 0.05 % sobre hidrógeno. Presión, temperatura y potencia se mantendrán a 33Torr, 900°C y 300 W respectivamente. Para la segunda capa se usarán las mismas condiciones de presión, temperatura y potencia pero la proporción de gases será de 0.1% de metano sobre hidrógeno y 20000 ppm de boro sobre carbono. Estas condiciones de bajo metano aseguran un crecimiento selectivo lateral en ambas capas.

La arquitectura se finaliza con un grabado por ICP en los extremos de la estructura que alcancen la primera capa p<sup>+</sup> (figura 4). Este grabado requiere grandes profundidades (15 µm) pero, al mantenerse distante de las capas activas, no supone un paso crítico para el correcto funcionamiento del dispositivo.

Sobre esta estructura se fabrican los contactos Óhmicos y Schottky (figura 5). Los contactos óhmicos constan de una primera deposición de titanio de 30nm de espesor debido a la buena adhesión de la capa de carburo de titanio que se forma en la intercara con el diamante. Sobre esta se depositan 50 nm de platino para evitar la difusión a través del contacto de los 40 nm de oro que se depositan como última capa. Este oro garantiza una buena estabilidad térmica (>600°C) y baja resistividad en el contacto.

Para la fabricación de la estructura MOS, se realiza primero un tratamiento superficial de pasivación, consistente en la exposición de la superficie en vacío saturado de oxígeno a una luz ultravioleta (técnica VUV). Tras esto se deposita por deposición atómica de capas (ALD) 40 nm de Aluminio a 380°C de temperatura para lograr la formación de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sobre dicha capa se depositan 50 nm de platino y 40 nm de oro, que tiene la misma función que las descritas en el apartado correspondiente a los contactos óhmicos.

La muestra se recuece 30 minutos a 500°C para la creación de la capa de carburo de titanio y la alumina de los MOS.

## APLICACIÓN INDUSTRIAL

Las posibilidades que ofrece la nueva geometría de diseño presentada en esta invención hace que este diseño y método de fabricación sea de un elevado interés en  
5 todo sector industrial que haga uso de la electrónica de potencia, muy especialmente en el sector energético por el interés que el diamante despierta para los convertidores de corriente y otros dispositivos que requieren trabajar a altos voltajes.

El uso de dispositivos diseñados y fabricados como aquí se expone supondría grandes  
10 ahorros energéticos y una gran miniaturización de las dimensiones.

## REIVINDICACIONES

- 1.- Transistor de efecto campo (MOSFET), caracterizado por que comprende:
- a) un sustrato (100) orientado de diamante pulido
  - 5 b) una primera capa de diamante, donde el diamante es semiconductor dopado tipo p+.
  - c) una segunda capa de diamante, ubicada sobre la primera capa, donde el diamante es aislante tipo p-, y que comprende en su superficie una serie de estructuras tridimensionales,
  - 10 d) una tercera capa, de diamante, ubicada sobre la segunda capa, donde el diamante es semiconductor dopado tipo n crecido sobre las laderas segunda capa,
  - e) una cuarta capa, de diamante, ubicada sobre la tercera capa donde el diamante es semiconductor dopado tipo p+ crecido lateralmente sobre la cara lateral de la tercera capa, y
  - 15 f) grabados en los extremos de todas las capas hasta que se llegue a la primera capa, con una profundidad hasta la primera capa de diamante semiconductor tipo p+.
- 2.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según reivindicación 1, caracterizado por que el diamante del sustrato y de las capas es diamante monocristalino.
- 20
- 3.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según reivindicaciones 1 o 2, caracterizado por que la segunda capa de diamante, comprende un grabado en su superficie de forma que exhibe estructuras tridimensionales con caras laterales.
- 25
- 4.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la primera capa comprende una concentración de boro comprendida en el rango  $10^{17} < [B] < 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ .
- 5.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según una cualquiera de las
- 30 reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la segunda capa, de diamante comprende una concentración de boro comprendida en el rango  $10^{12} < [B] < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- 6.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los contactos comprenden:

- contactos de drenador están ubicados sobre la primera capa diamante tipo  $p^+$ ,
- contactos de fuente están fabricados sobre la última capa diamante tipo  $p^+$ , y
- contactos de puerta ubicados sobre la capa de diamante tipo  $n$ .

5

7.- Transistor de efecto campo (MOSFET), según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sustrato (100) tiene rugosidad una superficial  $\leq 1$  nm.

10 8.- Procedimiento de fabricación del transistor de efecto campo (MOSFET) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que comprende las siguientes etapas llevadas a cabo sobre un sustrato (100) pulido:

- a) realizar un crecimiento de la primera capa de diamante,
- b) realizar un crecimiento de la segunda capa de diamante,
- 15 c) realizar un grabado de la segunda capa de diamante para generar las estructuras tridimensionales,
- d) realizar un crecimiento lateral de la tercera capa de diamante sobre las laderas de las estructuras tridimensionales,
- e) realizar un crecimiento lateral la cuarta capa de diamante sobre la tercera capa de
- 20 diamante, y
- f) realizar un grabado sobre la cuarta capa en aquellas regiones fuera de las estructuras tridimensionales donde el grabado tiene una profundidad tal que llega a la primera capa crecida.

25 9.- Procedimiento, según reivindicación 8, caracterizado por que el crecimiento de la tercera capa se realiza lateralmente.

10.- Procedimiento, según reivindicación 8 o 9 caracterizado por que crecimiento de la cuarta capa se realiza lateralmente.

30

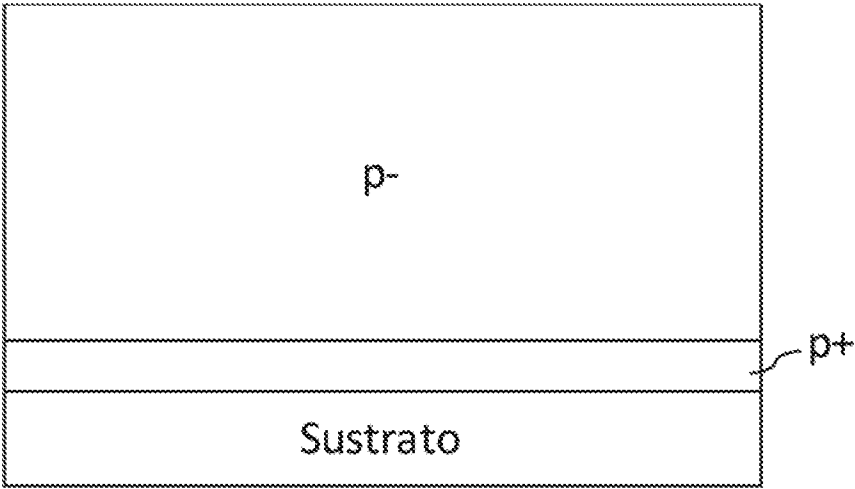


Fig. 1

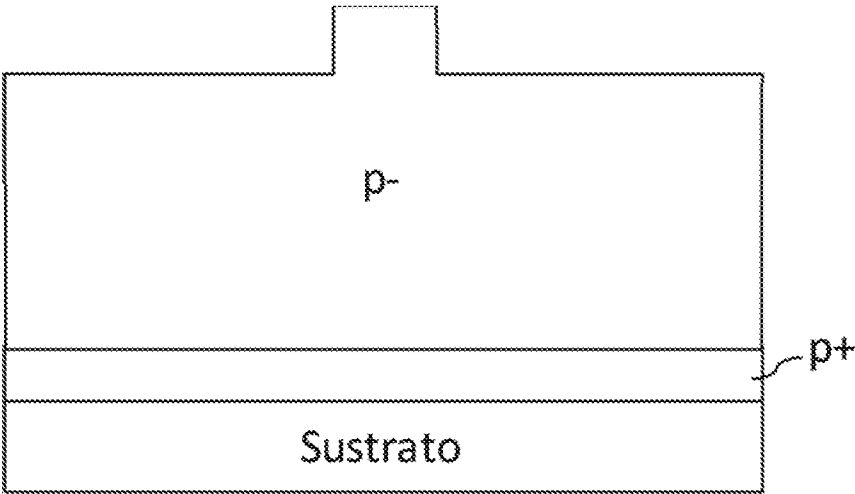


Fig. 2

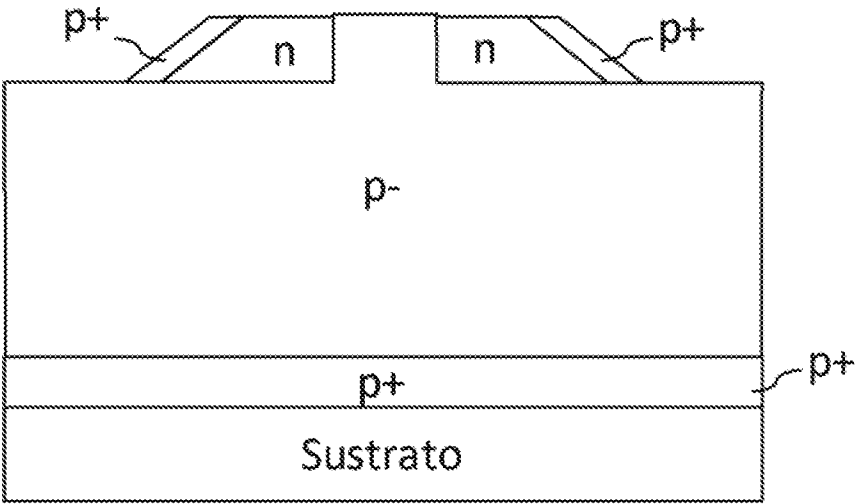


Fig. 3

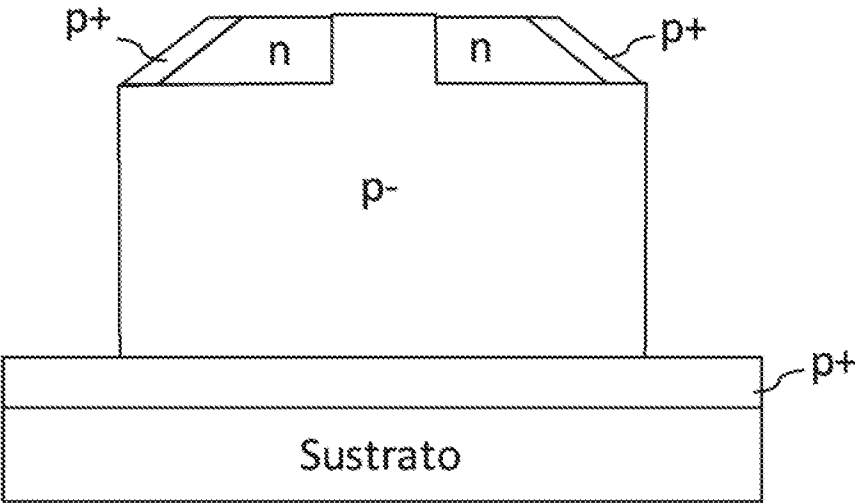


Fig. 4

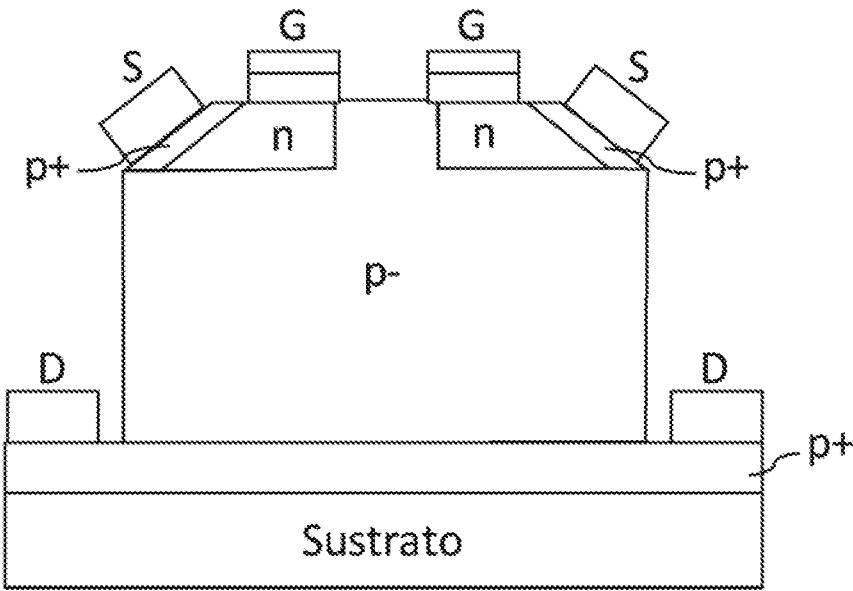


Fig. 5

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2019/070812

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

**See extra sheet**

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, WPI, EMBASE, INSPEC, XPI3E, XPIEE, COMPENDEX, BIOSIS

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                    | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | LLORET VIEIRA, F., Crecimiento lateral MPCVD de diamante homoepitaxial para dispositivos electrónicos de potencia, PhD Document, 15/06/2017, Retrieved from Internet<br><a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707012">URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707012</a> . PP. 167-176. | 1-10                  |
| A         | LLORET, F., et al., Stratigraphy of a diamond epitaxial three-dimensional overgrowth using doping superlattices. Applied Physics Letters, 02/05/2016, PP 181901 (5 pp.). Abstract.                                                                                                                    | 1-10                  |
| A         | NOBUTAKA, O., et al., Vertical-type two-dimensional hole gas diamond metal oxide semiconductor field-effect transistors, Scientific Reports, 13/07/2018, Vol. 8, pp 10660, ISSN 2045-2322(print) ISSN 2045-2322(electronic), <DOI: doi:10.1038/s41598-018-28837-5>. Fig. 1.                           | 1-10                  |
| A         | EP 2884525 A1 (NAT INST OF ADVANCED IND SCIEN) 17/06/2015. Figs.                                                                                                                                                                                                                                      | 1-10                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention                                         |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.                                                               |                                                                                                                                                                                                                                             |
| "E" earlier document but published on or after the international filing date                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                             |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone                                                                |
| "O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.                                                                                           | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed                                                                  | "&" document member of the same patent family                                                                                                                                                                                               |

Date of the actual completion of the international search  
24/01/2020

Date of mailing of the international search report  
(28/01/2020)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer  
M. García Poza

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS  
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)  
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 91 3495568

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2019/070812

## CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

*H01L29/16* (2006.01)

*H01L29/94* (2006.01)

*H01L21/205* (2006.01)

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2019/070812

Information on patent family members

| Patent document cited<br>in the search report | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date |
|-----------------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| EP2884525 A1                                  | 17.06.2015          | TW201413945 A              | 01.04.2014          |
|                                               |                     | TWI552340B B               | 01.10.2016          |
|                                               |                     | US2015228727 A1            | 13.08.2015          |
|                                               |                     | US9478619 B2               | 25.10.2016          |
|                                               |                     | KR20150044914 A            | 27.04.2015          |
|                                               |                     | KR101735712B B1            | 16.05.2017          |
|                                               |                     | CN104541364 A              | 22.04.2015          |
|                                               |                     | CN104541364B B             | 26.01.2018          |
|                                               |                     | WO2014027600 A1            | 20.02.2014          |
|                                               |                     | JP2014038953 A             | 27.02.2014          |
|                                               |                     | JP5967572B B2              | 10.08.2016          |
| -----                                         | -----               | -----                      | -----               |

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2019/070812

## A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

**Ver Hoja Adicional**

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

## B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H01L

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES, WPI, EMBASE, INSPEC, XPI3E, XPIEE, COMPENDEX, BIOSIS

## C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

| Categoría* | Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes                                                                                                                                                                                                                                      | Relevante para las reivindicaciones nº |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| A          | LLORET VIEIRA, F., Crecimiento lateral MPCVD de diamante homoepitaxial para dispositivos electrónicos de potencia, Tesis doctoral, 15/06/2017<br>Recuperado de Internet<br>URL: <a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707012">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707012</a> . Páginas. 167-176. | 1-10                                   |
| A          | LLORET, F., et al., Stratigraphy of a diamond epitaxial three-dimensional overgrowth using doping superlattices. Applied Physics Letters, 02/05/2016, páginas 181901 (5 pp.). Resumen.                                                                                                                        | 1-10                                   |
| A          | NOBUTAKA, O., et al., Vertical-type two-dimensional hole gas diamond metal oxide semiconductor field-effect transistors, Scientific Reports, 13/07/2018, Vol. 8, páginas 10660, ISSN 2045-2322(print) ISSN 2045-2322(electronic), <DOI: doi:10.1038/s41598-018-28837-5>. Figura 1.                            | 1-10                                   |
| A          | EP 2884525 A1 (NAT INST OF ADVANCED IND SCIEN) 17/06/2015. Figuras.                                                                                                                                                                                                                                           | 1-10                                   |

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos ☒ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

|                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Categorías especiales de documentos citados:                                                                                                                                               | "T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.     |
| "A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.                                                                                      | "X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.                                                                                    |
| "E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.                                                                   | "Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia. |
| "L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada). | "&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.                                                                                                                                                                                                                 |
| "O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| "P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.  
24/01/2020

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.  
**28 de enero de 2020 (28/01/2020)**

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional  
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS  
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)  
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado  
M. García Poza  
Nº de teléfono 91 3495568

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional n°

PCT/ES2019/070812

## CLASIFICACIONES DE INVENCION

**H01L29/16** (2006.01)

**H01L29/94** (2006.01)

**H01L21/205** (2006.01)

# INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2019/070812

| Documento de patente citado<br>en el informe de búsqueda | Fecha de<br>Publicación | Miembro(s) de la<br>familia de patentes | Fecha de<br>Publicación |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| EP2884525 A1                                             | 17.06.2015              | TW201413945 A                           | 01.04.2014              |
|                                                          |                         | TWI552340B B                            | 01.10.2016              |
|                                                          |                         | US2015228727 A1                         | 13.08.2015              |
|                                                          |                         | US9478619 B2                            | 25.10.2016              |
|                                                          |                         | KR20150044914 A                         | 27.04.2015              |
|                                                          |                         | KR101735712B B1                         | 16.05.2017              |
|                                                          |                         | CN104541364 A                           | 22.04.2015              |
|                                                          |                         | CN104541364B B                          | 26.01.2018              |
|                                                          |                         | WO2014027600 A1                         | 20.02.2014              |
|                                                          |                         | JP2014038953 A                          | 27.02.2014              |
|                                                          |                         | JP5967572B B2                           | 10.08.2016              |
| -----                                                    | -----                   | -----                                   | -----                   |