

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 929 674**

21 Número de solicitud: 202130489

51 Int. Cl.:

H01L 29/16 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

31.05.2021

43 Fecha de publicación de la solicitud:

30.11.2022

Fecha de concesión:

30.03.2023

45 Fecha de publicación de la concesión:

10.04.2023

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ (100.0%)
Avda. Carlos III, número 9
11003 Cádiz (Cádiz) ES**

72 Inventor/es:

**LLORET VIEIRA, Fernando Manuel;
ARAUJO GAY, Daniel y
VILLAR CASTRO, María Del Pilar**

54 Título: **TRANSISTOR METAL-AISLANTE-SEMICONDUCTOR DE EFECTO CAMPO (MISFET) DE DIAMANTE PARA ALTA POTENCIA CON CANAL OPTO-ACTIVADO Y PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL MISMO**

57 Resumen:

Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia con canal opto-activado y procedimiento de fabricación del mismo.

La invención comprende el diseño de la fabricación de un MISFET de diamante con puerta opto-activada para alta potencia mediante emisor de luz LED-IR y crecimiento lateral/selectivo.

El uso de una puerta opto-activada le confieren un funcionamiento novedoso que, junto al uso de crecimiento vertical estándar sobre el sustrato y lateral selectivo para los contactos de fuente y drenado, confiere al dispositivo MISFET de una estructura tridimensional.

Este dispositivo evita las fugas de puerta debidas al óxido, 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 complejas.

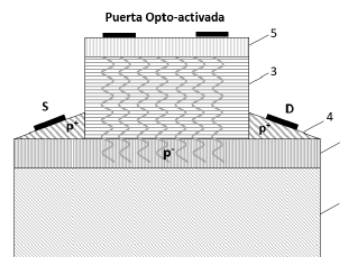


FIG. 6

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 929 674 B2

DESCRIPCIÓN

TRANSISTOR METAL-AISLANTE-SEMICONDUCTOR DE EFECTO CAMPO (MISFET) DE DIAMANTE PARA ALTA POTENCIA CON CANAL OPTO-ACTIVADO Y PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL MISMO

5

SECTOR DE LA TÉCNICA

Sector industrial: Electrónica de potencia y Microelectrónica.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El desarrollo de la electrónica de potencia ha sido guiado por los dispositivos de potencia de silicio semiconductor, favoreciendo 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). En la actualidad, se han realizado grandes avances en el desarrollo de dispositivos de SiC dotando a éste de su nicho de aplicación. Sin embargo, los límites físicos de ambos, SiC y silicio se ven superados por los requerimientos de la nueva electrónica de potencia. 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 equivalente, siendo 5 veces superior a la del cobre.

15

20

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 Ga₂O₃, con voltajes de ruptura superiores a 10kV, podrían resolver.

30

35

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 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.

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 ($2,25 \text{ cm}^2$ como máximo). Además, la densidad de defectos en los sustratos es aun elevada y muy variable de una muestra a otra, incluso proviniendo de la misma partida de un único suministrador. La calidad superficial también varía mucho de unos sustratos a otros y es habitual que requieran pulidos extra.

El diamante intrínseco es un material aislante, que requiere ser dopado para adquirir comportamiento semiconductor. Los dos elementos principales para el dopado del diamante son el boro (dopado tipo p) y el fósforo (dopado tipo n). La incorporación de ambos dopantes no es sencilla y, aunque para el caso del boro la técnica está más avanzada, son pocos los laboratorios que logran crecer con buena calidad cristalina diamante altamente dopado de ambos tipos. La alta incorporación de dopantes genera una gran densidad de dislocaciones [D. Araujo et al. Appl. Phys. Lett. 118, 052108 (2021)], mientras que para el caso del fósforo es muy difícil si quiera lograr una alta concentración. La principal necesidad de altas concentraciones dopantes es la alta energía de activación de ambos elementos (0,39 eV para el boro y 0,57 eV para el fósforo), lo cual provoca que a temperatura ambiente sean muy pocos los átomos ionizados y, por lo tanto, la conductividad es muy baja. Esto supone una importante limitación para la consecución de dispositivos con alta corriente. Por tanto, en la actualidad un dispositivo de diamante puede trabajar a altas tensiones, pero se ve limitado en corriente, que es indispensable para obtener una alta potencia.

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.

35

El principal desafío para la tecnología MOS es obtener un rendimiento y una intercara fiable entre el semiconductor y el dieléctrico. El silicio tiene un óxido natural (SiO_2), que presenta una calidad relativamente buena, lo que confiere al silicio el éxito actual en todas las aplicaciones electrónicas, incluida la electrónica de potencia. El SiC también
5 presenta un óxido natural (SiO_2 como el Si) pero la calidad de la interfase es peor que en el Si debido a, entre otros problemas, la presencia de átomos de carbono. Otros materiales semiconductores como germanio, III-V (GaAs) y GaN tienen óxidos nativos muy pobre. Pero para el diamante es peor aún, no tiene óxido nativo.

10 Es por ello que en la comunidad científica se trabaja con óxidos como el ZrO_2 , Al_2O_3 o el SiO_2 . Los primeros parecen ofrecer los mejores resultados en términos de bajas fugas y permiten controlar mejor el espesor de puerta de óxido requerido como resultado de su alta constante dieléctrica. Sin embargo, todos ellos con un ancho de banda ligeramente superior al del diamante muestran fugas en puerta como resultado
15 de los estados de interfaz con el diamante y su microestructura relativamente pobre. De hecho, mientras que en la tecnología de Si los óxidos amorfos que se necesitan hacen que su ancho de banda sea más bajo, esto no afecta el comportamiento de la puerta de Si. Para el diamante, su ancho de banda no debe disminuir demasiado ya que deben suponer una barrera para los portadores y, además, ésta no debe
20 “cristalizar” cuando el MOSFET trabaja a altas temperaturas. Este escenario es muy difícil de resolver por lo que el diamante necesita un enfoque completamente diferente para ser competitivo en este campo. Además, el nivel muy profundo de dopantes en diamante (0,36 eV y 0,57 eV para boro y fósforo respectivamente) dificulta la activación de los portadores. Es justo lo contrario de lo que sucede con el SiC: el dispositivo
25 funciona mejor a alta temperatura que a temperatura ambiente. Esto da como resultado una densidad de corriente de drenador y una movilidad de efecto de campo muy baja a temperatura ambiente (en el rango de 2 mA/mm y 8,0 cm^2/Vs , respectivamente).

30 **EXPLICACIÓN DE LA INVENCION**

La presente invención se corresponde con una estructura MISFET de activación completamente nueva, basada en la combinación de procesado estándar con el recrecimiento selectivo de epicapas, e incluye la novedad de usar un canal de puerta
35 activado ópticamente. El uso de un LEDs IR (diodo emisor de luz infrarroja) permite la

misma activación del dopante a cualquier temperatura y permite alcanzar corrientes muy elevadas. Para el caso del diamante, y debido a la alta energía de ionización de dopantes tanto p (Boro) como n (Fósforo), muy pocos dopantes generan portadores de cargas (electrones o huecos según el dopado) y el material es muy resistivo a temperatura ambiente. Por ello, un dispositivo sólo podría trabajar correctamente si se alcanzan temperaturas superiores a 200°C. Esto hace que el comportamiento del dispositivo sea muy dependiente de la temperatura, funcional mal a temperatura ambiente (cuando el Si funciona bien) y mejora con altas temperaturas (cuando el Si deja de funcionar). Para permitir un funcionamiento “uniforme” con la temperatura y que el dispositivo funcione tanto a temperatura ambiente como a temperaturas de 250°C-300°C, se propone como invención una activación óptica de dopantes que permita conseguir así una densidad constante de portadores con la temperatura. Para que esto sea posible, se propone incorporar una puerta del MISFET de diamante no-dopado y transparente a la radiación IR necesaria para la activación de dopante en el canal dopado con boro. Este dispositivo de capa no-dopada e “iluminación” IR (LED con una longitud de onda en el rango de 1,3-1,5µm), que modula su intensidad, forman la puerta del MISFET. Mediante este nuevo dispositivo pueden alcanzarse corrientes superiores a 10 A por MISFET con dopados de boro de únicamente 10^{17} cm^{-3} . El LED IR atraviesa sin ninguna absorción el diamante no dopado aislante para activar los dopantes del canal y alcanzar corrientes elevadas. El alto espesor del diamante no dopado permite aplicaciones de alto voltaje.

Como activador de puerta – emisor LED – se necesita una energía de luz mayor que la de la activación del boro (0,36 eV) pero no demasiado para que la capa de diamante no dopado sea transparente incluso si tuviera defectos cristalinos (<1 eV). Esto hace que cualquier LED en el rango del infrarrojo (IR) resulte conveniente y se propongan LED emisores de IR entre 1111nm y 2000nm de longitud de onda.

La estructura, diseñada completamente en diamante, soluciona el problema del dopado en el diamante a través de un método alternativo que maximiza los rangos bajos de dopados. La ausencia de ángulos agudos evita la generación de áreas con campos eléctricos intensos en el interior del dispositivo y el crecimiento lateral reduce las etapas de litografía. Al no ser necesarias zonas activas de alto dopado y gracias a fabricar los contactos óhmicos mediante crecimiento lateral, se evitan las principales fuentes de generación de defectos. Dicha estructura permite igualmente un largo

campo arbitrario y, como se ha adelantado, reduce sustancialmente el número de procesos de fotolitografía. Esta nueva estructura mejora la eficiencia del dispositivo y reduce los tiempos de fabricación.

5 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 una etapa de grabado. La calidad de este grabado además no es crítica para el funcionamiento del dispositivo.

10

Sobre un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido, se crece por CVD una primera capa de diamante de bajo dopado con boro, p-, ($[B] \leq 10^{17} \text{cm}^{-3}$). Sobre esta, se deposita una segunda capa de diamante no dopado, mayor o igual a $5 \mu\text{m}$.

15

Tras este primer paso, se procede al grabado de la última capa depositada, la no dopada. Mediante técnicas de grabado iónico se fabrican estructuras paralelepípedas tipo mesa de la misma profundidad que el ancho de la capa no dopada. Es decir, se graba la bicapa hasta alcanzar la capa de diamante de bajo dopado.

20

Sobre estas estructuras se crece selectivamente, de manera lateral, una capa de diamante altamente dopado con boro, p+, ($10^{17} \text{cm}^{-3} < [B] < 10^{23} \text{cm}^{-3}$), de entre 300 nm y una micra..

25

Sobre la capa de diamante no dopado se coloca un emisor de luz infrarroja.

Finalmente, sobre la estructura se fabrican los contactos Óhmicos, que se recuecen para garantiza la formación de una capa de carburo en la frontera diamante/contacto.

30

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 todo sector de industrial que haga uso de la electrónica de potencia, muy especialmente en el sector energético por el interés que el diamante despierta para la conversores de corriente y otros dispositivos que requieren trabajar a altos voltajes y

35

con altas corrientes sin necesidad de enfriar el dispositivo más que lo previsto en un

packaging clásico y en un chip muy reducida.

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

5

Mediante este diseño se solventa principalmente la limitación de conductividad del diamante y permitirá así alcanzar altas potencias (10kV, 10A) y además se evitan los siguientes problemas subyacentes en los actuales dispositivos de potencia basados en diamante:

10 - Pérdidas de puerta: Asociadas al aislante de puerta y muy comunes en el diamante debido a que no tiene un óxido nativo. Se soluciona usando diamante sin dopar como puerta del transistor.

- Calidad de la capa altamente dopada, activación de los dopantes. Se soluciona usando capas con bajo dopado y asegurando la activación de todos ellos mediante un emisor de IR (opto-activación)

15

- Efectos de borde de los contactos metálicos: Se evitan usando geometrías suaves sin ángulos agudos.

- Altos campos eléctricos internos: La geometría del diseño reduce la curvatura de las líneas de campo favoreciendo una distribución homogénea del campo eléctrico.

20

- Problemas asociados al grabado cerca de zonas activas del dispositivo: El grabado para fuente y drenador no influye en el funcionamiento del dispositivo al estar situados sobre diamante bajo dopado. La posible generación de defectos no conlleva cortocircuitos en el dispositivo.

25

- Dislocaciones y "killer defects": Los defectos reticulares generados durante el crecimiento de las diferentes capas son contrarrestados gracias al crecimiento lateral. Además, al igual que se menciona en el punto anterior, la posible generación de defectos no conlleva cortocircuitos en el dispositivo.

30

- Defectos debido al crecimiento de diamante altamente dopado: Al solo existir otras capas de diamante sobre la altamente dopada, la posible generación de defectos en estas no tiene consecuencias eléctricas.

Además, este diseño proporciona:

- Activación de portadores de carga: Al opto-activar el canal de puerta, se activan todos los dopantes, mejorando la conductividad del diamante y permitiendo altas corrientes.

35

- Mejoras de la calidad cristalina: El crecimiento lateral/selectivo y, sobre todo, la ausencia de regiones activas de alto dopado, 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.

- 5 - 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.
- Mayor versatilidad en el funcionamiento: al ser opto-activado, aumentan las posibles
10 aplicaciones del dispositivo final.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Figura 1: Esquematiza el crecimiento sobre un sustrato (100)-orientado de diamante
15 (1) de calidad electrónica y convenientemente pulido, de una capa (2) de diamante de bajo dopado, p-, y una capa (3) más gruesa de diamante no dopado.

Figura 2: Esquematiza el grabado de la última capa (3) por ICP utilizando aluminio para
la máscara. Se fabrican así estructuras mesa.
20

Figura 3: Representa el crecimiento selectivo de alrededor de la capa (4) de diamante
altamente dopada p+.

Figura 4: Representa la deposición del material emisor LED IR (5) sobre el canal
25 (fabricación de la puerta optoactivada).

Figura 5: Incorpora la fabricación de los contactos óhmicos (drenador y fuente) y del
LED-IR.

30 Figura 6: Esquema de funcionamiento del MISFET objeto de la invención.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

35 A continuación, se describe un modo de realización preferente del objeto de la invención desarrollada.

5 Sobre un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido, se crece por MPCVD una primera capa de diamante de bajo dopado con boro p-, ($[B] < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) de espesor superior a 50 nm. Las condiciones de crecimiento dependerán del reactor con el que se esté trabajando, pero deben ser los estándares para el crecimiento sobre esta orientación. A este crecimiento le sigue la deposición de 5 μm de diamante no dopado. El criterio en la selección de los parámetros de crecimiento de esta capa es el mismo.

10 Se realiza sobre la muestra un proceso de fotolitografía lift-off por el cual se dibujan mascaradas de aluminio con geometría rectangular. Por grabado ICP se fabrican las estructuras mesa con una profundidad de 5 μm .

15 Sobre estas estructuras se crece selectivamente una capa de diamante altamente dopado p+, ($10^{17} \text{ cm}^{-3} < [B] < 10^{23} \text{ cm}^{-3}$) de aproximadamente 500 nm de espesor. Como se ha referenciado previamente, el crecimiento selectivo lateral se logra mediante el uso de bajas concentraciones de metano en el reactor MPCVD.

20 Sobre la capa de diamante no dopado se presentan dos opciones alternativas: (i) La integración de un LED comercial mediante pegado y sustentación física por "packaging"; (ii) depositar un material emisor de luz LED IR, como puede ser InGaAsN. La única restricción real es que su energía de radiación sea superior a 0,36 eV pero la capa de diamante no dopado se mantenga transparente para ésta.

25 Sobre esta estructura se fabrican los contactos Óhmicos de la fuente y el drenador. 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.
30 Este oro garantiza una buena estabilidad térmica ($>600^\circ\text{C}$) y baja resistividad en el contacto. La muestra se recuece 30 minutos a 500°C para la creación de la capa de carburo de titanio.

REIVINDICACIONES

- 5
1. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, caracterizado por que incorpora un canal de puerta que se activa ópticamente.
- 10
2. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicación 1, caracterizado por que incorpora una puerta de diamante de bajo dopado, cubierta de una no dopada y transparente a la radiación infrarroja, que se activa ópticamente.
- 15
3. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicación 2, caracterizado por que la activación del dopante se realiza mediante un emisor de luz infrarroja.
- 20
4. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicación 3, caracterizado por que el emisor de luz infrarroja posee una energía de radiación superior a 0,36 eV.
- 25
5. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende:
- 25
- a) un sustrato (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido.
- b) una primera capa de diamante de bajo dopado con boro, p-, ($[B] \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).
- c) una segunda capa de diamante no dopado.
- d) una tercera capa de diamante altamente dopado con boro, p+, ($10^{17} \text{ cm}^{-3} < [B] < 10^{23} \text{ cm}^{-3}$) crecida lateralmente.
- 30
- e) Un emisor de luz infrarroja sobre la capa de diamante no dopado.

6. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicación 5, donde el emisor de luz consiste en un led comercial integrado sobre la capa de diamante no dopado mediante pegado y sustentación física por “packaging”.
- 5
7. Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicación 5, donde el emisor de luz consiste en una capa de material emisor de luz infrarroja.
- 10
8. Procedimiento de fabricación del Transistor metal-aislante-semiconductor de efecto campo (MISFET) de diamante para alta potencia, según reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende las siguientes etapas llevadas a cabo sobre (100)-orientado de diamante de calidad electrónica y convenientemente pulido:
- 15
- a) realizar un crecimiento por CVD de una capa de diamante de bajo dopado con boro, p-, ($[B] \leq 10^{17} \text{cm}^{-3}$) de espesor superior a 50 nm.
- b) realizar el crecimiento de una capa de diamante no dopado mayor o igual a 5 μm .
- c) realizar el grabado de la última capa depositada, para generar estructuras paralelepípedas tipo mesa de la misma profundidad que el ancho de la capa no dopada.
- 20
- d) realizar sobre estas estructuras el crecimiento selectivo lateral de una capa de diamante altamente dopado con boro, p+, ($10^{17} \text{cm}^{-3} < [B] < 10^{23} \text{cm}^{-3}$) de entre 300 nm de espesor y una micra.
- 25
- e) depositar el emisor de luz infrarroja sobre la capa de diamante no dopado.
- f) fabricar los contactos óhmicos sobre la estructura, que se recuecen para garantizar la formación de una capa de carburo en la frontera diamante/contacto.
- 30

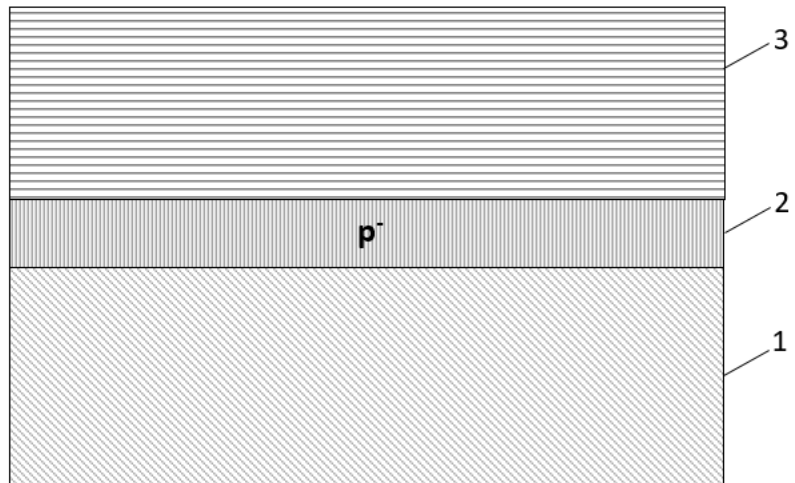


FIG. 1

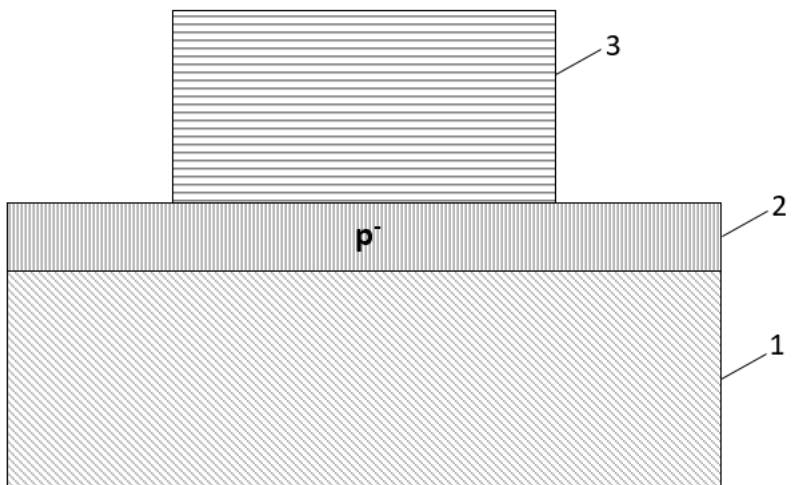


FIG. 2

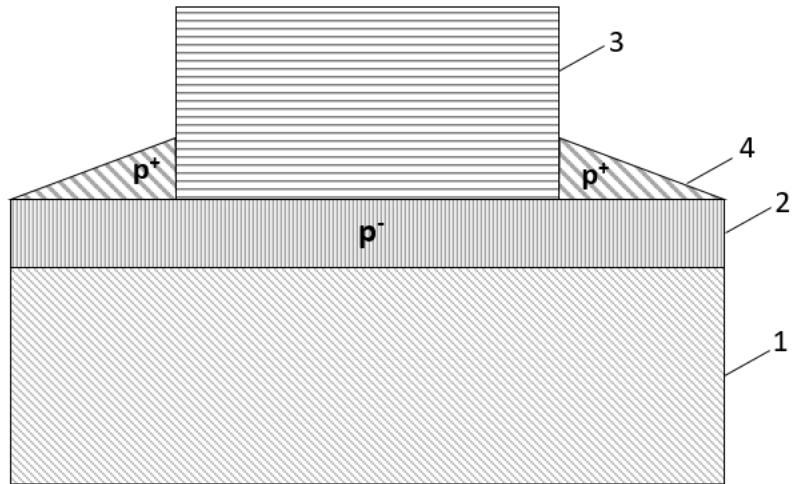


FIG. 3

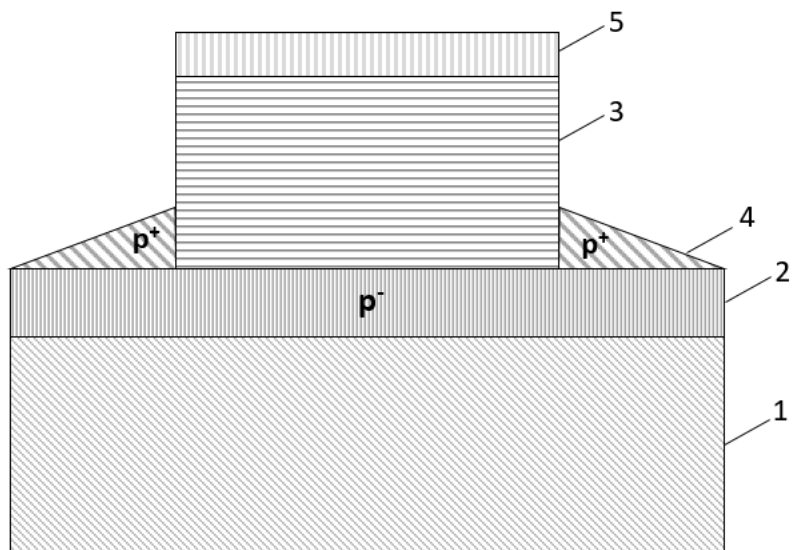


FIG. 4

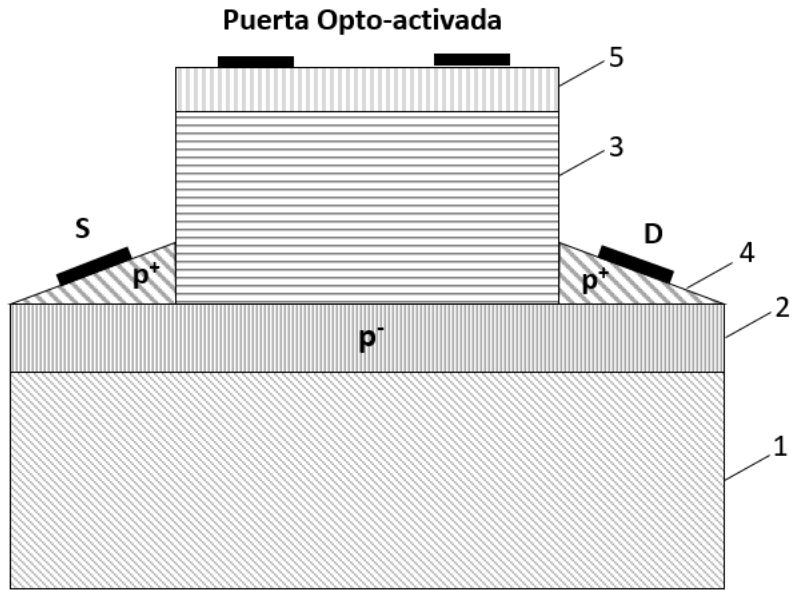


FIG. 5

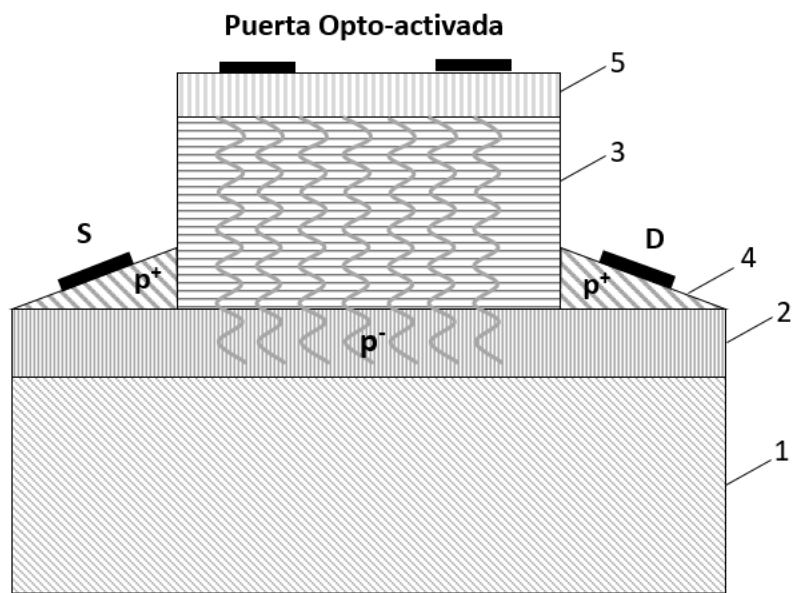


FIG. 6