(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
09 de julio de 2020 (09.07.2020)

WIPO | PCT

(10) Número de publicación internacional
WO 2020/141245 A1

(51) Clasificación internacional de patentes:
H01L 31/10 (2006.01) *H01L 31/0352* (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2019/070897

(22) Fecha de presentación internacional:
30 de diciembre de 2019 (30.12.2019)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P201831304 30 de diciembre de 2018 (30.12.2018) ES

(71) Solicitante: **UNIVERSIDAD DE GRANADA** [ES/ES]; HOSPITAL REAL., AVDA. DEL HOSPICIO S/N, 18071 GRANADA (ES).

(72) Inventores: **NAVARRO MORAL, Carlos**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES). **GÁMIZ PÉREZ, Francisco**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES). **MÁRQUEZ GONZÁLEZ, Carlos**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES). **SAMPEDRO MATARÍN, Carlos**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES). **DONETTI, Luca**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES). **NAVARRO MORAL, Santiago**; Universidad de Granada, Escuelta Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación., Dpto de Electrónica y, Tecnología de Computadores, 18071 Granada (ES).

(74) Mandatario: **ESCUDERO PRIETO, Nicolás Enrique**; TRIBALYTE IDEAS, Gta. Quevedo 8, 6° 2, 28015 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))*
— *antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))*

(54) **Title:** METHOD FOR DETECTING RADIATION AND PARTICLES USING A SEMICONDUCTOR DIODE BASED ON ENERGY BAND MODULATION

(54) **Título:** PROCEDIMIENTO DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN Y PARTÍCULAS EMPLEANDO UN DIODO SEMICONDUCTOR POR MODULACIÓN DE BANDAS DE ENERGÍA

(57) **Abstract:** The present invention describes a method that allows particles or radiation to be detected by using a diode based on energy band modulation. The use of the invention is of particular interest for detecting incident radiation from charged particles or electromagnetic waves. Therefore, the invention also relates to devices for detecting particles or radiation, which comprise at least one diode based on energy band modulation and the means necessary to carry out detection.

(57) **Resumen:** La presente invención describe un procedimiento que permite la detección de partículas o radiación empleando un diodo por modulación de bandas de energía.La utilización de esta invención resulta especialmente interesante para detectar radiación incidente de partículas cargadas u ondas electromagnéticas, por lo que también son objeto de la invención los dispositivos para la detección de partículas o radiación, que comprenden al menos un diodo por modulación de bandas de energía y los medios necesarios para llevar a cabo la detección.

WO 2020/141245 A1

PROCEDIMIENTO DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN Y PARTÍCULAS EMPLEANDO UN DIODO SEMICONDUCTOR POR MODULACIÓN DE BANDAS DE ENERGÍA

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se puede categorizar dentro del sector de la Física, concretamente en el área de los Dispositivos Semiconductores y más concretamente en el del uso de semiconductores como instrumentos de medida.

ESTADO DE LA TÉCNICA

Detección de partículas o radiación

La necesidad de detectar fuentes de radiación se hace vital para ciertos ámbitos y campos de uso cotidiano. El uso de detectores de radiación permite aplicaciones que van desde las comunicaciones ópticas hasta el campo de la alimentación y el envasado de productos, pasando por otras áreas como su empleo en investigación en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, del inglés "*large hadron collider*") en Ginebra.

Algunos detectores que se han utilizado ampliamente en el pasado (y aún hoy) comprenden tubos multiplicadores, cristales de centelleo, contadores G-M ("*Geiger-Muller*") y detectores basados en semiconductores. De entre los posibles detectores de radiación el uso de materiales semiconductores como sensores de partículas y radiación está ampliamente extendido gracias a su mayor eficiencia. Las primeras versiones eran conocidas como cristales contadores (del inglés "*crystal counters*") pero los detectores modernos se conocen como detectores de estado sólido o detectores basados en diodos semiconductores.

Además de una mayor eficiencia, los detectores de estado sólido tienen otras cualidades muy ventajosas como un tamaño compacto, fácil configuración en su geometría y mayor velocidad. Como contrapartida, los detectores basados en semiconductores están limitados a tamaños reducidos y su funcionalidad puede resultar degradada por daños inducidos por la propia radiación.

De los materiales semiconductores disponibles, el silicio (Si) se erige como dominante, principalmente en diodos para la espectroscopia de partículas cargadas. Otros semiconductores de la columna IV en la tabla periódica como el germanio (Ge) se emplean más para detectar rayos gamma. El uso de materiales más exóticos, aquellos formados por heteroestructuras de las columnas III-V y II-VI, es más restringido por el coste inherente a los

materiales empleados.

El mecanismo habitual en la detección de fuentes de radiación en dispositivos semiconductores, como por ejemplo el silicio, es la generación de carga en forma de pares electrón-hueco (electrones que se ven excitados desde la banda de valencia, donde generan una vacante o hueco, hasta la banda de conducción) que modifican la conductividad del material. Esto es posible gracias a la absorción de energía que la radiación cede cuando incide en el dispositivo detector. La detección de la corriente, denominada fotocorriente, que esta carga (pares electrón-hueco) puede generar es el principio de operación de dispositivos tales como: fotodiodos p-n (unión de semiconductor con dopado aceptador-donador) o p-i-n (unión de semiconductor con dopado aceptador-intrínseco-donador), fotodiodos de avalancha o APD (del inglés *"avalanche photo diodes"*), fotomultiplicadores y fotorresistores o LDR (del inglés "*light-dependent resistor*"). Todos ellos principalmente basados en la detección de radiación electromagnética.

En cuanto a la detección de partículas cargadas, el principio es análogo. La partícula incidente cede parte de su energía a medida que atraviesa el dispositivo semiconductor dando lugar de nuevo a la generación de carga en forma de pares electrón-hueco que darán lugar asimismo a una corriente. Algunos sensores en semiconductores ya existentes incluyen detectores microstrip o SSD (del inglés "*silicon strip detectors"*) o sensores sensibles a la posición o PSD (del inglés "*position sensitive detectors*").

Diodo por modulación de bandas de energía

El diodo por modulación de bandas de energía es un dispositivo semiconductor cuya estructura se corresponde típicamente con un diodo p-i-n (silicio dopado tipo aceptador/intrínseco/donador) fabricado en tecnología SOI (silicio-sobre-aislante) con dos terminales de control, uno superior que no cubre completamente la zona intrínseca y otro inferior bajo toda la estructura (Figura 1, arriba) [US20130069122A1]. Alternativamente puede implementarse de forma análoga con una estructura sin terminal del control superior y doble terminal de control inferior (Figura 1, centro) o en un caso extremo con un diodo p-n-p-n sin necesidad de terminales de control. Este último caso permite emplear tecnología de silicio convencional en la que todo el sustrato es silicio cristalino, también conocida como tecnología bulk, salvando la necesidad de usar SOI (Figura 1, abajo) pero limitando de forma notable su utilidad dado que su sensibilidad no es ajustable por medio de la polarización. Su implementación se realiza preferentemente en tecnología planar (Figura 1) aunque no obvia

que pueda fabricarse en estructuras tridimensionales tipo FinFET, transistores tri-gate o nanohilos sea cual sea su forma o relación de aspecto.

Este dispositivo se puede aplicar también para protección de dispositivos ante descargas electrostáticas (ESD) [Y. Solaro et al., "*Z2-FET: A promising FDSOI device for ESD protection*"], como celda de memoria dinámica DRAM [J. Wan et al., *"A Compact Capacitor-Less High-Speed DRAM Using Field Effect-Controlled Charge Regeneration"*] o como sensor de carga superficial [A. Padilla, *"Feedback FET: a novel transistor exhibiting steep switching behavior at low bias voltages*"].

Sin embargo, el solicitante no conoce ningún documento que describa o sugiera el uso de diodos de modulación de banda para detectar partículas o radiación electromagnética.

OBJETO DE LA INVENCIÓN

El primer objeto de la presente invención es un procedimiento que permite la detección de partículas o radiación empleando un diodo por modulación de bandas de energía.

La utilización de esta invención resulta especialmente interesante para detectar radiación incidente de partículas cargadas u ondas electromagnéticas, por lo que también un segundo objeto de la invención es un dispositivo, en adelante "*dispositivo de la invención*", para la detección de partículas o radiación, que comprende al menos un diodo por modulación de bandas de energía y los medios necesarios para llevar a cabo la detección. Estos dispositivos pueden ser, sin excluir otros posibles dispositivos, Fotodiodos p-n o p-i-n, fotodiodos de avalancha o APD (del inglés *"avalanche photo diodes"*), fotomultiplicadores, sensores microstrip o SSD (del inglés "*silicon strip detectors"*), sensores sensibles a la posición o PSD (del inglés "*position sensitive detectors*"), fotorresistores o LDR (del inglés "*light-dependent resistor*").

La utilización del dispositivo objeto de la invención para detectar partículas o radiación presentan las siguientes ventajas en relación con el estado de la técnica conocido por el solicitante:

- Consumo despreciable de energía en estado previo a la detección.
- Operación en temperatura ambiente sin necesidad de refrigeración.
- Diseño compacto permitiendo alta resolución espacial.
- Alto valor de la relación señal/ruido en el dispositivo, SNR (Signal to Noise Ratio).
- Alta velocidad de detección.

- Bajo coste.
- Compatibilidad con la fabricación CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) permitiendo fácil co-integración con otros circuitos y elementos para el procesado.
- Fácil ajuste de la sensibilidad en función de la polarización y geometría del dispositivo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Figura 1.- Representación esquemática del corte longitudinal (dirección ánodo-cátodo) de tres estructuras diferentes de un diodo por modulación de bandas de energía, donde cada número representa: **1**- Substrato semiconductor. **2**- Terminal de control inferior principal, *BG*, también referido como *GP* (*Ground Plane*). **3**- Óxido de Silicio/dieléctrico enterrado o BOX (*Buried OXide*). **4**- Dieléctrico para aislamiento lateral. **5**- Terminal de cátodo, *K*. **6**- Cuerpo del dispositivo. **7**- Óxido de Silicio/dieléctrico frontal para aislar contacto de control superior. **8**- Terminal de control superior que no cubre completamente el cuerpo del dispositivo, FG. **9**- Terminal de ánodo, *A*. **10**- Terminal de control inferior secundario, BG2, también referido como GP2. **11**- Cuerpo del dispositivo con dopado aceptador tipo p. **12**- Cuerpo del dispositivo con dopado donador tipo n.

Figura 2.- Representación esquemática de una partícula (**13**) o radiación (**14**) incidiendo en la ventana (**15**) del diodo por modulación de bandas de energía.

Figura 3.- Curva I-V (intensidad-voltaje) característica del diodo por modulación de bandas de energía demostrando la rápida transición entre las regiones de baja conductividad (**16**) y la de alta conductividad (**17**) que ocurre a un voltaje V_{ON} (**18**). La transición inversa se produce en V_{OFF} (**19**). El rango de tensiones útiles como detector de partículas o radiación queda comprendido entre V_{ON} Y V_{OFF}.

Figura 4.- Esquema de polarización típica del diodo por modulación de bandas de energía con el terminal de cátodo *K* como referencia, V_K. **20**- Polarización entre terminales de control superior *FG* y cátodo *K*, V_{FG}. **21**- Polarización entre terminales de ánodo *A* y cátodo *K*, V_A. **22**- Polarización entre terminales de control inferior principal *BG* y cátodo *K*, V_{BG}. **23**- Polarización entre terminales de control inferior secundario *BG2* y cátodo *K*, V_{BG2}.

Figura 5.- Corte longitudinal (dirección ánodo-cátodo) del potencial electrostático (equivalentemente energía), que muestra como la modulación de las barreras de energía en el cuerpo propia del diodo detector: cuando las barreras son grandes la conductividad es baja y, al colapsar (V_{ON}), la conductividad aumenta enormemente de forma abrupta. **24**- Región de ánodo. **25**- Región de cátodo. **26**- Barrera de potencial inducida por la polarización de control superior *FG* (V_{FG}), control inferior secundario (V_{BG2}) o el propio dopado de la región próxima al ánodo. **27**- Barrera de potencial inducida por la polarización de control inferior *BG* (V_{BG}), o por el propio dopado de la región próxima al cátodo. **28**- Colapso de la barrera provocado por electrones difundidos desde el cátodo. **29**- Colapso de la barrera provocado por huecos difundidos desde el ánodo.

Figura 6.- Diagrama de flujo para la calibración del diodo por modulación de bandas de energía.

Figura 7.- Simulación por ordenador del comportamiento del dispositivo ante el impacto de una partícula (**30**) y su posterior puesta a cero (**31**) para diferentes polarizaciones de ánodo. La polarización en el resto de terminales es constante. **32**- $V_A<V_{OFF}$. **33**- $V_{OFF}<V_A<V_{ON}$. **34**- $V_A>V_{ON}$. Solo en **33** el detector es funcional.

Figura 8.- Densidad de carga generada por una partícula que impacta en la zona sin terminal de control superior en la configuración preferente del diodo detector.

Figura 9.- Curva I_A-V_A para la calibración del diodo por modulación de bandas de energía. V_{ON} = 1.035 V y V_{OFF} = 0.740 V.

Figura 10.- Respuesta temporal del diodo por modulación de bandas de energía ante el impacto de una partícula cargada en t=0.02 s y su posterior puesta a cero en t=0.10 s para diferentes polarizaciones de ánodo.

Figura 11.- Corrientes del diodo por modulación de bandas de energía tras el impacto de una partícula en función del parámetro LET para varias tensiones de ánodo.

Figura 12.- Carga generada bajo el terminal de control superior, en el centro de la misma, en función de la longitud de dicho terminal.

EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN

Definiciones

El término "*modulación de bandas de energía*" comprende el mecanismo por el que un diodo, bajo condiciones de polarización adecuadas, presenta dos estados de conducción (conductividad) claramente diferenciados (con varios ordenes de magnitud) en los que el paso de uno a otro ocurre de forma abrupta gracias a un mecanismo de realimentación positiva. El estado de baja conductividad se obtiene cuando entre las regiones de ánodo y cátodo aparecen una o más barreras de energía que limitan la difusión normal de portadores que se da en un diodo sin modulación de bandas de energía. Estas barreras pueden ser inducidas por terminales de control adicionales, por cambios en el dopado entre ánodo y cátodo o por una combinación de ambas causas. El mecanismo de realimentación positiva tiene lugar como consecuencia de la difusión de portadores (huecos desde el ánodo y electrones desde el cátodo) que se introducen en el cuerpo y reducen las barreras. A unas condiciones de polarización determinadas, el proceso se vuelve inestable y la difusión de un portador (hueco por ejemplo) incrementa la difusión del otro tipo de portador (electrón en este caso) y viceversa dando lugar a un colapso en las barreras y a un aumento súbito en la conductividad.

El término "*diodo por modulación de bandas de energía*" o, por simplicidad en esta descripción, "*diodo*" hace referencia a un dispositivo que comprende una unión de materiales semiconductores de distinto tipo de dopado y/o diferente banda prohibida *(band gap*, en inglés) y presenta dos zonas de operación de conductividad muy diferentes, de forma que la transición entre dichas zonas de operación se produce de forma abrupta por la modulación de bandas de energía. Estos dispositivos pueden contener una o varias regiones espaciales con distinto dopado entre sus extremos siempre que el dispositivo presente finalmente dos zonas de operación con conductividad diferente.

A modo de ejemplo no excluyente, el término "*diodo*" comprende dispositivos con uniones tipo p-n (dopado aceptador junto a dopado donador), p-i-n (dopado aceptador junto a dopado donador con una región intrínseca entre ambas) y p-n-p-n (dopado aceptador, donador, aceptador y donador).

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "*comprende*" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

A lo largo de este documento se empleará una notación que utiliza en símbolo "," como

separador decimal.

Procedimiento de la Invención

En su primer aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento, en adelante "*procedimiento de la invención*", para detectar partículas y radiación empleando un diodo por modulación de bandas de energía.

Concretamente, el procedimiento de la invención comprende detectar un cambio en el estado de conducción de un diodo por modulación de bandas de energía. Este cambio en el estado de conducción se produce por el impacto de una partícula (13, Figura 2) en la región (en adelante "*ventana*", 15 en Figura 2) que no cubre/n el/los terminal/es de control superior/es, o bien o por la exposición de dicha ventana a una fuente de radiación electromagnética (14, Figura 2).

El solicitante ha comprobado mediante simulación asistida por ordenador que la interacción entre una partícula o radiación y la red cristalina del diodo por modulación de bandas de energía permite generar una carga (pares electrón-hueco) capaz de modificar el estado de conducción del dispositivo y por tanto permitiendo detectar el impacto o la incidencia de la radiación.

En una realización preferente, el procedimiento de la invención comprende una etapa previa de polarización del diodo, que permite modificar su sensibilidad y discriminar el tipo de partícula o radiación que se pretende detectar.

Etapa de polarización

Bajo condiciones de polarización adecuadas, un diodo por modulación de bandas de energía presenta unas características eléctricas singulares dónde destaca la presencia de dos regiones con conductividades muy diferentes.

Por un lado, la región de menor conductividad (16, Figura 3) se obtiene como consecuencia de las barreras de energía presentes en el cuerpo del dispositivo. Dichas barreras de energía se inducen con la polarización de control superior, FG, e inferior, BG, (2 y 8 en la Figura 1, arriba), con la polarización de ambos terminales de control inferiores, BG y BG2 (2 y 10 en la Figura 1, centro) o de forma independiente por el propio dopado del cuerpo del dispositivo (11 y 12 en la Figura 1, abajo).

Por otro lado, la región de mayor conductividad (17, Figura 3) se corresponde con la corriente del diodo cuando las barreras de energía se han colapsado. Dicho colapso de las barreras de energía ocurre debido a la presencia de carga (electrones y/o huecos en la región intrínseca). Dado que la conmutación entre ambas regiones ocurre como consecuencia de un proceso inestable de realimentación positiva, el cambio entre regiones es casi instantáneo (18 y 19, Figura 3).

Los criterios para seleccionar una polarización determinada atienden, en orden, al correcto funcionamiento como diodo por modulación de bandas de energía, la sensibilidad de detección y finalmente el consumo de potencia:

1) Para una operación de detección adecuada, el diodo por modulación de bandas de energía requiere estar polarizado en la región de baja conductividad (16, Figura 3). En una realización preferente, para lograr las barreras en las bandas de energía, se cumplirá:
   a) La tensión de control superior V_{FG} (20, Figura 4, arriba) habrá de ser nula o positiva mientras que la tensión de control inferior V_{BG} (22, Figura 4, arriba) deberá ser nula o negativa.
   b) La tensión de control inferior secundaria V_{BG2} (23, Figura 4, centro) ha de ser nula o positiva mientras que la tensión de control inferior V_{BG} (22, Figura 4, centro) deberá ser nula o negativa.
   c) Debido a su ausencia, no hay polarización de los terminales de control. Las barreras se inducen automáticamente gracias al dopado complementario de la región de cuerpo (11 y 12, Figura 1, abajo).

   Otras configuraciones (tensión y dopado) que den origen al estado de baja conductividad son asimismo posibles. El objetivo es bloquear la difusión de portadores, huecos desde el ánodo (24, Figura 5) y electrones desde el cátodo (25, Figura 5), mediante barreras de energía (26 y 27, Figura 5). Todo este proceso depende del propio diodo detector (geometría y arquitectura) así como de su distancia e inclinación hasta la fuente de radiación.
2) La tensión de ánodo V_A (20, Figura 4) será positiva y siempre inferior a la tensión de disparo, $V_A<V_{ON}$ (18, Figura 3) y superior a la de corte, $V_A>V_{OFF}$ (19, Figura 3). Donde V_{ON} y V_{OFF} dependen de los materiales en el dispositivo, su dopado, la geometría, la temperatura y, de existir, las polarizaciones V_{FG}, V_{BG} y V_{BG2} (20, 22 y 23 respectivamente en la Figura 4).

3) La carga generada por la partícula o radiación incidente desplazará transitoriamente V_{ON} (18, Figura 3) hacia tensiones inferiores (V_{ON} se reduce). Eventualmente, este desplazamiento implicará que $V_A > V_{ON}$ haciendo conmutar el diodo por modulación de bandas de energía hacia la región de alta conductividad (17, Figura 3 y 28/29, Figura 5) y detectando la incidencia de la partícula o radiación.
4) Dado que una menor carga generada por la partícula o radiación se traduce en un menor desplazamiento de V_{ON}, con el fin de incrementar la sensibilidad del detector, V_A se polarizará tan cerca de V_{ON} como se requiera sin llegar nunca a excederla.
5) En última instancia, se tratará de emplear la menor tensión posible en todos los terminales cumpliendo las condiciones anteriores para ahorrar energía.

El ajuste de polarización también permite una posible corrección ante una degradación debida al tiempo o al impacto previo de las partículas detectadas. Para esto, el procedimiento de la invención comprende, en otra realización preferente, una etapa de "puesta a cero".

Etapa de "reset" o puesta a cero

Con objeto de reiniciar las condiciones de detección tras la incidencia de una partícula o radiación, el detector ha de recuperar sus condiciones iniciales evacuando el exceso de carga. Para ello se cambia la polarización del diodo para que la tensión de ánodo V_A (21, Figura 4) sea menor que V_{OFF}, por ejemplo nula.

Para acelerar el proceso, las tensiones de control superior y/o inferior/es V_{FG}, V_{BG} y V_{BG2} (20, 22 y 23 respectivamente en la Figura 4) también pueden hacerse nulas simultáneamente.

Etapa de calibración

Como etapa inicial previa al uso como detector del diodo por modulación de bandas de energía, se contempla una etapa de calibración en la que se ajustarán finalmente las tensiones de cada terminal. Dicho proceso de calibrado (esquematizado en la Figura 6) tiene como fin último la caracterización DC (del inglés "*direct current*") del dispositivo de la invención para extraer el rango de tensiones útiles del dispositivo. Para ello se monitorizará la característica corriente-voltaje en el ánodo, en adelante I_A-V_A (Figura 3):

1) Dependiendo de la implementación final, se habrán de definir inicialmente las tensiones V_{FG}, V_{BG} y V_{BG2} (20, 22 y 23 respectivamente en la Figura 4) que correspondan en cada caso, cumpliendo siempre con las condiciones de polarización antes descritas.

2) Se extraerá la curva I_A-V_A en sentido ascendente (desde 0 hasta superar la tensión de disparo del diodo) y descendente (hasta que la corriente vuelva a ser la del nivel de baja conductividad) dando lugar a las tensiones V_{ON} y V_{OFF} (18 y 19, Figura 3).
3) Conocidas las tensiones características, se procede a irradiar el dispositivo de la invención con la fuente de partículas o radiación que se desea detectar. Es importante ajustar la dosis y energía de la fuente al valor mínimo que se pretende detectar así como su distancia y ángulo de emisión. El diodo por modulación de bandas de energía detectará a partir de ese umbral.
4) A continuación comienza un proceso iterativo donde se incrementa V_A desde V_{OFF} gradualmente (sin exceder V_{ON}) hasta conseguir que el dispositivo de la invención conmute. Dos casos alternativos se presentan:
    a) El dispositivo conmuta para $V_{OFF}<V_A<V_{ON}$. La tensión de ánodo a la que conmuta será la empleada y la calibración concluye.
    b) El diodo no conmuta satisfaciendo $V_{OFF}<V_A<V_{ON}$. El diodo, en su configuración actual no permite la detección de dicha fuente de partículas o radiación. Se puede variar la polarización del dispositivo volviendo al paso 1 de la calibración. De no existir una polarización válida, se propone la sustitución del diodo con otro con una geometría diferente con mayor sensibilidad.

Se contempla la posibilidad de que el proceso de puesta a cero y de calibrado se realicen de forma manual o automática, en este último caso comprendiendo el objeto de la invención también todos los elementos software y hardware necesarios para dicho fin.

En caso de que el diodo no contase con terminales de control superior e inferior (Figura 1, abajo), no existe un método de calibración y el ajuste de la sensibilidad se lleva a cabo durante la fabricación, modulando los niveles de dopado del diodo.
La sensibilidad del diodo depende de la polarización y de la arquitectura y geometría del mismo. En general se cumple que la sensibilidad se incrementa cuando:

- V_A tiende a V_{ON}. La concentración de carga para abatir las barreras se reduce haciendo al dispositivo más sensible.
- La longitud del terminal de control superior (cuando ésta existe) se reduce. La generación ante la incidencia de una partícula o radiación decae con la distancia. Reduciendo la longitud de del terminal de control se incrementan las posibilidades de generar carga bajo el mismo para facilitar el colapso de las barreras.

- El espesor de la zona sin cubrir por el terminal de control superior se incrementa.

En una realización preferente, el procedimiento de la invención comprende las siguientes etapas:

- Etapa de calibración.
- Etapa de detección, que a su vez comprende:
    1) Puesta a cero.
    2) Aplicar las tensiones de polarización obtenidas durante la calibración.
    3) Monitorizar la corriente del diodo por modulación de bandas de energía:
        a) Si la corriente es baja, no hay fuente de partículas o radiación incidiendo en el dispositivo o su sensibilidad no es lo suficientemente baja.
        b) Si la corriente aumenta, se ha detectado una fuente de partículas o radiación.

Dependiendo del tipo y dosis de radiación se pueden llegar a producir defectos en la red cristalina del diodo induciendo degradación en la detección. Por tanto es posible tener que realizar la calibración tras cada etapa de detección o no.

Dispositivo de la Invención

El segundo objeto de la presente invención es un dispositivo para la detección de partículas y/o radiación, en adelante *"dispositivo de la invención"* que comprende al menos un diodo por modulación de bandas de energía.

Adicionalmente, el dispositivo comprende medios para la detección de los niveles de corriente mediante amplificadores, comparadores y su circuitería asociada, así como la misma para la alimentación del sensor.

En una realización preferente, al menos un diodo, preferentemente todos los diodos comprendidos en el dispositivo de la invención, es un diodo planar.

En otra realización particular, el diodo comprendido en el dispositivo de la invención está confeccionado en tecnología tridimensional tipo FinFET, transistor tri-gate o nanohilos de cualquier tamaño y relación de aspecto.

Del mismo modo, aunque la estructura del diodo se fabricará empleando principalmente silicio, se puede confeccionar de forma equivalente con otros materiales semiconductores como

pueden ser elementos de los grupos III-V o II-VI (homoestructuras y heteroestructuras) u otros materiales bidimensionales como grafeno o TMDs (del inglés "*transition metal dichalcogenide monolayers*") o combinación de los anteriormente mencionados.

En una realización particular, el dispositivo de la invención comprende al menos un diodo polarizado.

Como se ha explicado anteriormente, el diodo se polariza para que esté siempre funcionando como detector. Como en dicho estado, el diodo presenta baja conductividad, no hay corriente o ésta es muy pequeña, y por tanto no hay consumo de potencia o éste es mínimo. Una vez que se genera la carga debido al impacto de una partícula o a la exposición ante una fuente de radiación, el dispositivo conmuta y presenta una corriente alta.

El comportamiento del dispositivo ante el impacto de una partícula altamente energética depende de la polarización. Se observa como atendiendo a la polarización de ánodo (30, Figura 7) el impacto de la partícula permite hacer conmutar el dispositivo. Si la tensión de ánodo (21, Figura 4) es inferior a V_{OFF} (19, Figura 3) o superior a V_{ON} (18, Figura 3), el dispositivo de la invención nunca alcanza (32, Figura 7) o siempre se encuentra (34, Figura 7) en la región de alta conductividad (17, Figura 3), respectivamente, y no funciona como detector de radiación. Solo en la región intermedia el dispositivo puede funcionar detectando la incidencia de radiación por partículas u ondas electromagnéticas (33, Figura 7). Tras la detección, el estado inicial del detector se puede reestablecer de nuevo eficientemente con una operación de puesta a cero (31, Figura 7) de forma sencilla y rápida.

La generación de carga se propaga por todo el dispositivo (Figura 8). Dado que la conmutación está controlada principalmente por la carga presente en el cuerpo, al reducir sus dimensiones, se mejora tanto la sensibilidad (más carga) como su integración (más pequeño).

En una realización preferente, las dimensiones del diodo detector empleado en el dispositivo de la invención están comprendidas entre 10 micras hasta 50 nanómetros de longitud. La anchura del dispositivo es asimismo altamente configurable variando entre configuraciones con 50 nanómetros hasta 100 micras.

Del mismo modo aumentando el espesor del silicio en la zona sin cubrir por el terminal de control se consigue aumentar la energía que la partícula cede generando más carga y por lo tanto mejorando la sensibilidad.

Así, en una realización preferente, el silicio de la zona sin terminal de control superior del diodo detector empleado en el dispositivo de la invención tiene un espesor de entre 5 y 100 nanómetros. En la zona cubierta por el terminal de control superior, el espesor oscila entre 5 y 20 nanómetros. Otras dimensiones y geometrías a las anteriormente mencionadas son asimismo posibles.

El ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie del detector puede ser utilizados como ajuste de la sensibilidad, por lo que en otra realización preferente, el dispositivo de la invención comprende los medios (mecanismos y elementos) necesarios para poder ajustar dicho ángulo.

Por otro lado, la distancia entre fuente y detector pueden ser utilizados como ajuste de la sensibilidad, por lo que en otra realización preferente, el dispositivo de la invención comprende los medios (mecanismos y elementos) necesarios para poder ajustar dicha distancia.
Los medios empleados pueden permitir llevar a cabo estos ajustes (ángulo y distancia) de forma manual o automática y de forma presencial y remota.

En otra realización preferente, el dispositivo comprende los terminales (metales y vías) necesarias para una adecuada aplicación de las tensiones necesarias para la polarización y su correcto funcionamiento. Además de esto se puede contemplar el uso de potenciómetros regulables de forma que su sensibilidad puede ser ajustada con la polarización *in situ*. Esto permite ajustar el sensor para optimizar la detección en función de la partícula o radiación que se quiera detectar / discriminar el tipo de partícula o radiación que detecta.
Este ajuste de polarización también permite una posible corrección ante una degradación debida al tiempo o al impacto previo de las partículas detectadas.

En otra realización particular, el dispositivo de la invención comprende una pluralidad de diodos detectores con iguales o diferentes sensibilidades.

Se contemplan distintas posibilidades o una combinación de las mismas:

- Detector de posición: una matriz con detectores idénticos permitirá, una vez calibrados y ajustados a la fuente de radiación a detectar, identificar el/los lugar/es de incidencia.
- Identificación de la fuente: una matriz con detectores con diferente sensibilidad, una vez calibrados a diferentes dosis o fuentes de radiación, permite acotar la energía, por tanto la naturaleza, de la partícula/radiación en base a qué detectores conmutan o no.

La implementación física de la matriz de detectores atiende a cualquier estructura bidimensional o tridimensional para optimizar la detección.

Modo de operación

Para llevar a cabo del procedimiento de la invención mediante el dispositivo de la invención, se llevarán a cabo los siguientes pasos:

- Mediante uno o varios dispositivos adecuados, preferentemente fuentes de tensión estable, ya sean pilas o baterías para implementar un detector portátil o una fuente de alimentación conectada a la red, se procederá a realizar la etapa de calibración del dispositivo anteriormente descrita en función de la radiación a detectar. La inclinación, distancia y los valores de polarización serán conocidos desde este momento.
- Una vez calibrado, la corriente del detector será monitorizada para discernir posibles cambios hacia un nivel de corriente muy superior, en cuyo caso la detección es positiva y se ha de indicar por medio de señales de cualquier tipo (ópticas, acústicas o eléctricas entre otras).
- Para finalizar, se realiza la puesta a cero del detector para estar preparando ante una nueva detección.

Este proceso es ampliable a una multitud de sensores, en cuyo caso la calibración se ha de realizar individualmente o en conjunto para una o diferentes fuentes de radiación con una o varias intensidades.

MODOS DE REALIZACIÓN DE LA INVENCIÓN

Para comprobar la viabilidad de la invención (Figuras 9-12) se ha simulado con ordenador un diodo por modulación de bandas de energía con un terminal de control superior. La longitud total es de 400 nanómetros (repartidos por igual entre la zona cubierta o no por el terminal de control) y una anchura de 100 nanómetros. Los espesores son de 22 nanómetros en la parte sin terminal de control superior y de 7 nanómetros en el resto. El perfil de dopado se corresponde con un diodo p-i-n (las concentraciones son, respectivamente, de (p) boro $\approx 10^{21}$ cm^{-3}, (i) boro 10^{16} cm^{-3} y (n) arsénico $\approx 10^{21}$ cm^{-3}).

La calibración comienza fijando las tensiones para inducir las barreras de energía y permitir el estado de baja conducción. Se elige V_{FG} = 1.2 V y V_{BG} = -1 V con V_K = 0 V. A continuación se extrae la curva I_A-V_A para obtener los valores V_{ON} y V_{OFF} (Figura 9).

Una vez conocidas las tensiones útiles de ánodo (aquellas comprendidas entre V_{ON} y V_{OFF}) se estudia el comportamiento ante la incidencia de una partícula cargada. La Figura 10 ilustra la respuesta temporal del detector ante el impacto de una partícula en t=0.02 s y su posterior puesta a cero en t=0.1 s para diferentes tensiones de ánodo (V_A). En esta realización, la partícula incidente representa cualquier conjunto de una o varias partículas cuyo coeficiente LET (del inglés "*linear energy transfer*"), definido como la cantidad de energía que la partícula cede por unidad de longitud *dE/dx*, en silicio sea de ≈13 keV/μm.

Se observa cómo, tras el impacto, el nivel de corriente es bajo si V_A<V_{OFF} (V_A = 0.7 V) o no cambia si V_A>V_{ON} (V_A=1.1 V). Solo cuando V_{OFF} < V_A < V_{ON} (V_A = 0.8, 0.9 y 1.0 V) el dispositivo conmuta indicando el impacto de una partícula. Finalmente se aprecia cómo la puesta a cero (en t=0.1 s) permite recuperar las corrientes iniciales. Durante el proceso de calibrado se habría incrementado V_A de forma gradual hasta alcanzar la conmutación.

La Figura 11 muestra la corriente de ánodo tras el impacto de la partícula para diferentes LET y tensiones de ánodo. Se aprecia como la sensibilidad aumenta (se requiere menor LET) para conmutar a medida que V_A tiende a V_{ON}. La figura 12 ilustra la dependencia de la carga generada bajo el terminal de control superior en función de la longitud de dicho terminal. Al reducir la longitud, la carga que la partícula genera en la zona sin terminal de control alcanza más efectivamente la región bajo el contacto permitiendo abatir las barreras de energía más fácilmente.

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento para detectar partículas y radiación que comprende la detección de un cambio en el estado de conducción de un diodo por modulación de bandas de energía.

2.- Procedimiento, según reivindicación anterior, que comprende la polarización previa del diodo.

3.- Procedimiento, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una etapa, tras la detección de una partícula o una radiación, en la que se cambia la polarización del diodo para que la tensión del ánodo sea nula.

4.- Procedimiento, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las siguientes etapas:

- Etapa de calibración.
- Etapa de detección, que a su vez comprende:
  - Cambiar la polarización del diodo para que la tensión de ánodo sea menor que de corte, preferentemente, anular las tensiones de control superior y/o inferior/es simultáneamente.
  - Aplicar las tensiones de polarización obtenidas durante la calibración.
  - Monitorizar la corriente del diodo por modulación de bandas de energía:
    - Si la corriente es baja, no hay fuente de partículas o radiación incidiendo en el dispositivo o su sensibilidad no es lo suficientemente baja.
    - Si la corriente aumenta, se ha detectado una fuente de partículas o radiación. Tras la detección se procede a la puesta a cero del dispositivo para una nueva detección.

5.- Dispositivo para la detección de partículas y/o radiación, que comprende al menos un diodo por modulación de bandas de energía.

6.- Dispositivo según la reivindicación anterior caracterizado por que al menos un diodo es planar.

7.- Dispositivo según la reivindicación 5 caracterizado por que al menos un diodo está confeccionado en tecnología tridimensional.

8.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, caracterizado por que al menos un diodo está polarizado.

9.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado por que las dimensiones de al menos un diodo están comprendidas entre 50 nanómetros y 10 micras de longitud y entre 50 nanómetros y 100 micras de anchura.

10.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 9, caracterizado por el silicio de la zona sin terminal de control de al menos un diodo tiene un espesor comprendido entre 5 y 100 nanómetros. El espesor de la región bajo el terminal de control superior oscila entre 5 y 20 nanómetros.

11.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 10, que además comprende medios para poder ajustar el ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie del detector que no se encuentra cubierta por un terminal de control superior.

12.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 11, que además comprende medios para poder ajustar la distancia entre fuente y el detector.

13.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 12, que además comprende potenciómetros regulables dispuestos de forma que su sensibilidad puede ser ajustada con la polarización.

14.- Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 13, que comprende una pluralidad de diodos con diferentes sensibilidades.

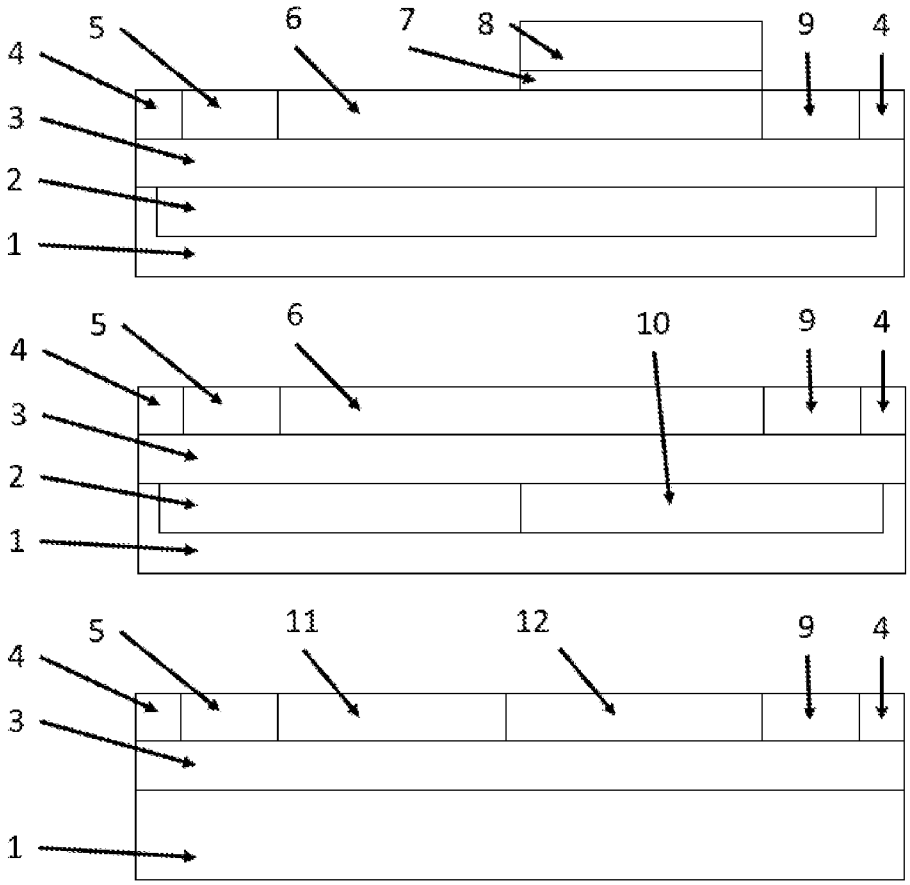


Figura 1

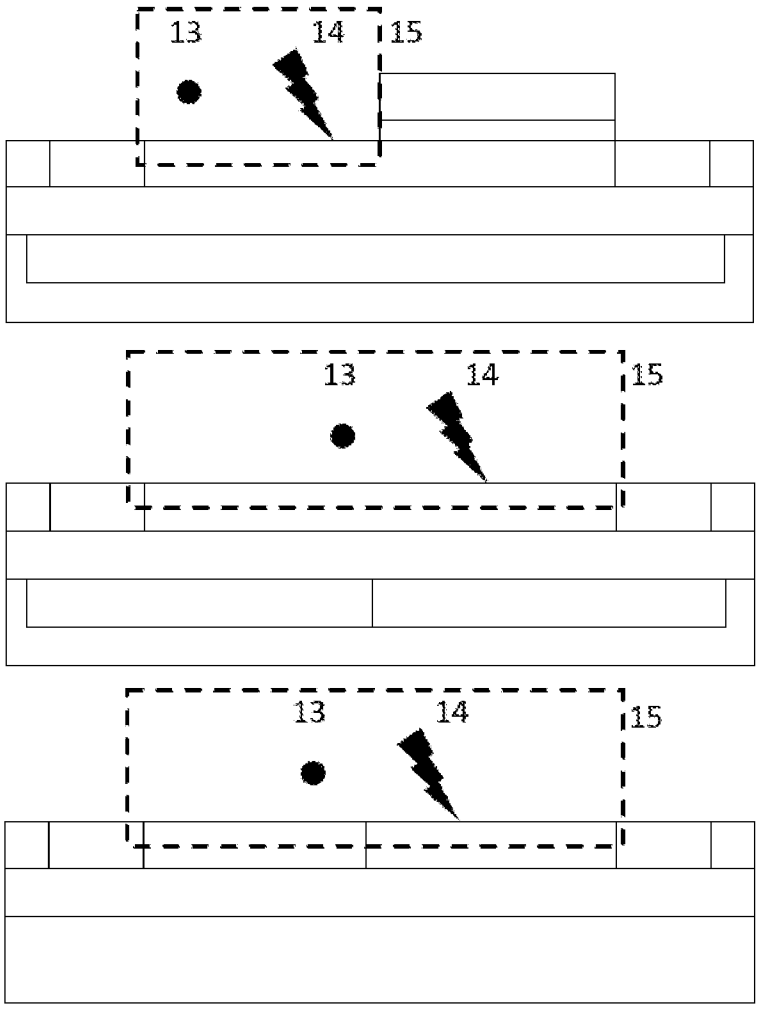


Figura 2

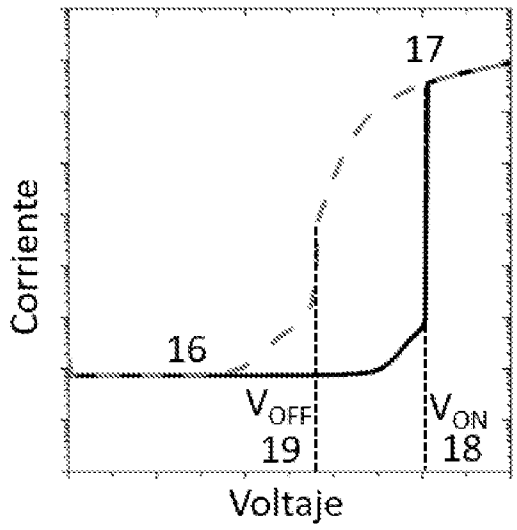


Figura 3

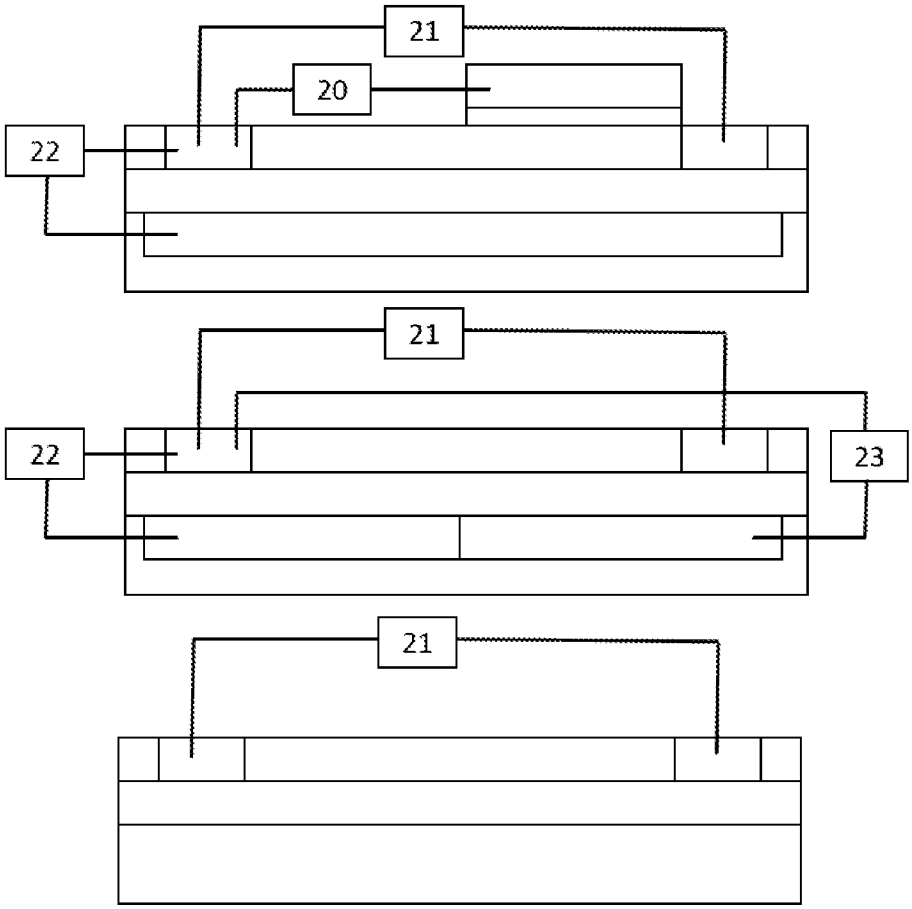


Figura 4

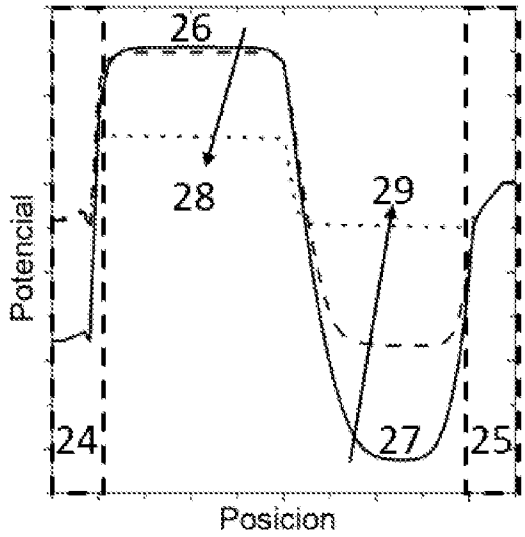


Figura 5

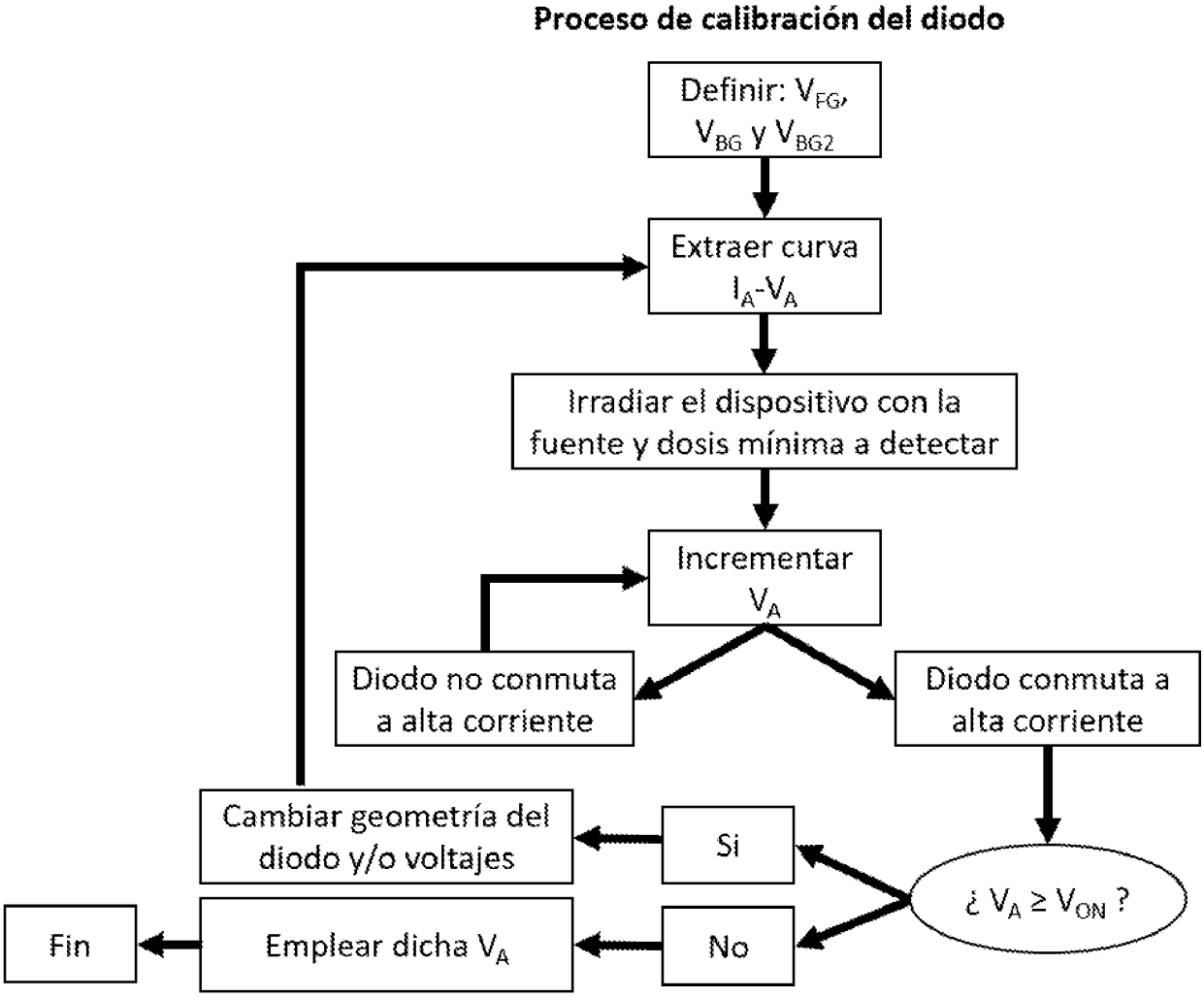


Figura 6

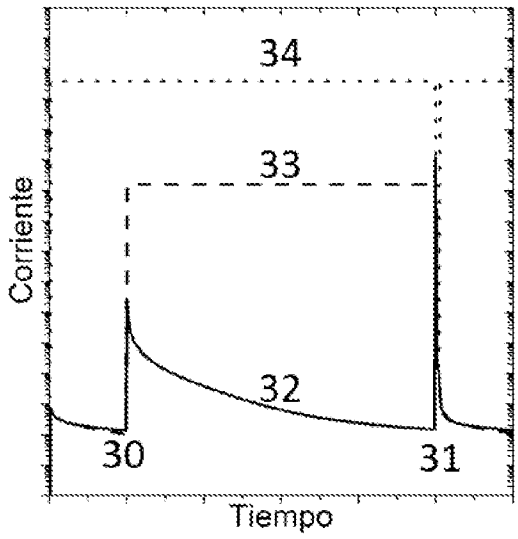


Figura 7

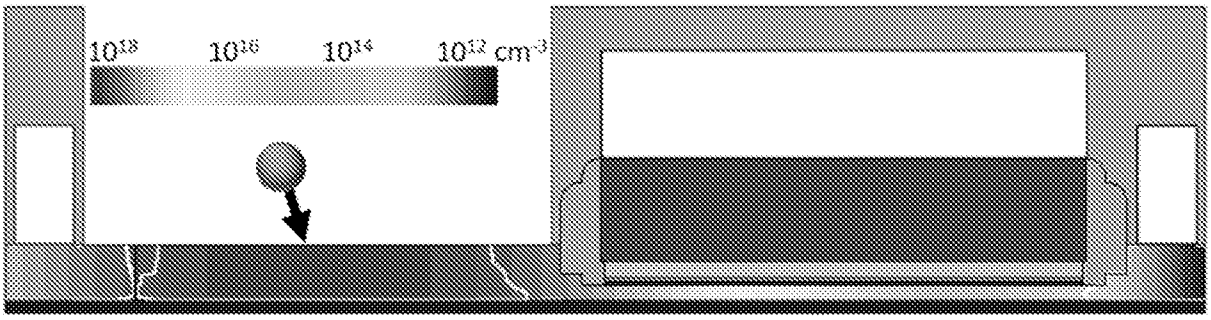


Figura 8

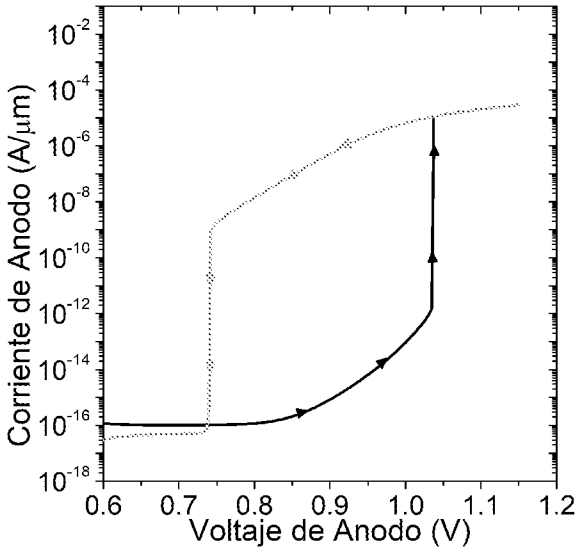


Figura 9

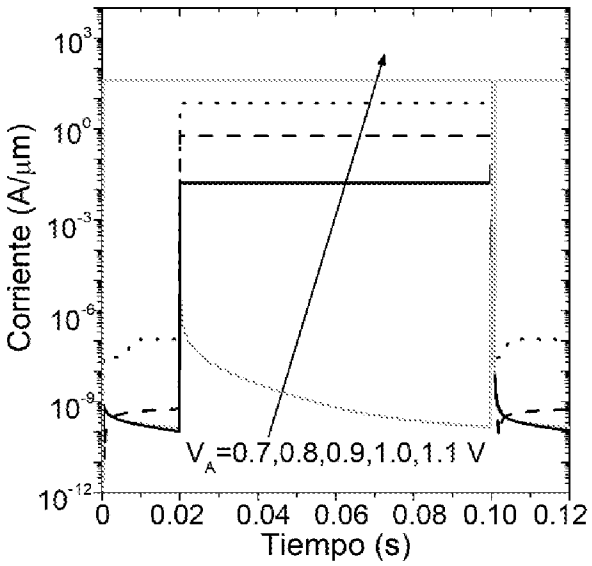


Figura 10

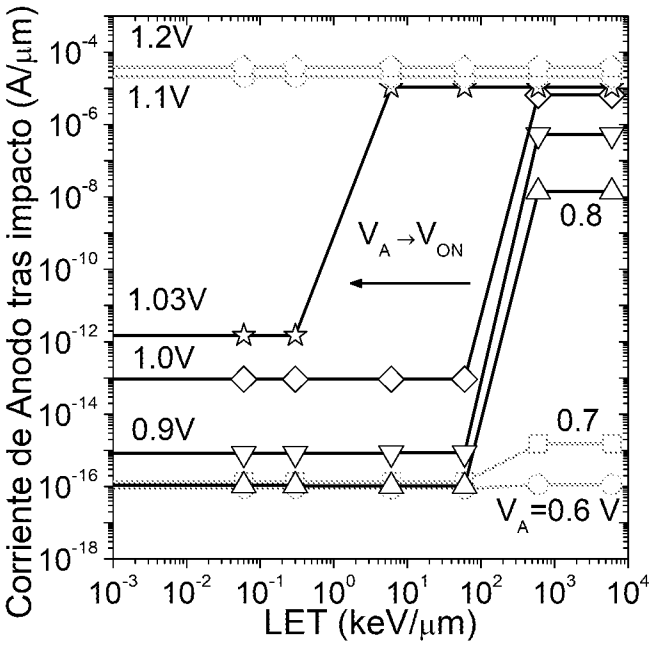


Figura 11

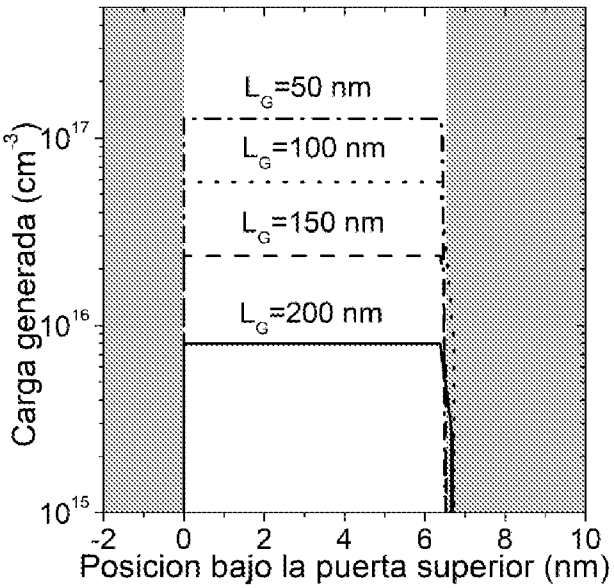


Figura 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2019/070897

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/10 (2006.01)
H01L31/0352 (2006.01)
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, NPL, XPESP, XPAIP, XPI3E, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	CN 108807567 A (SHANGHAI INST TECH PHYSICS CAS) 13/11/2018, Abstract from DataBase EPODOC. Retrieved from EPOQUE the whole document.	1, 2 3-14
Y	Bordakevich; Kielbowicz; López Grande; Larotonda. Módulo de conteo de fotones basado en fotodiodos de avalancha. 01/12/2017 [on line] [retrieved 01/06/2020]. Retrieved from internet URL: http://www.researchgate.net/publication/323688739_Modulo_de_conteo_de_fotones_basado_en_fotodiodos_de_avalancha	3-14
A	EP 0162942 A1 (MAX PLANCK GESELLSCHAFT) 04/12/1985, page 1, line 14 to page 20, line 35; figures 1-14.	1-14

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"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)
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
02/06/2020	**(04/06/2020)**
Name and mailing address of the ISA/ OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España) Facsimile No.: 91 349 53 04	Authorized officer J. Botella Maldonado Telephone No. 91 3495382

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/ES2019/070897

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
CN108807567 A	13.11.2018	NONE	
EP0162942 A1	04.12.1985	US4775881 A	04.10.1988
		JPS6193681 A	12.05.1986
		JPH0469825B B2	09.11.1992

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº
PCT/ES2019/070897

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD
H01L31/10 (2006.01)
H01L31/0352 (2006.01)
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, NPL, XPESP, XPAIP, XPI3E, INSPEC

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
X Y	CN 108807567 A (SHANGHAI INST TECH PHYSICS CAS) 13/11/2018, Resumen de la base de datos EPODOC. Recuperado de EPOQUE todo el documento.	1, 2 3-14
Y	Bordakevich; Kielbowicz; López Grande; Larotonda. Módulo de conteo de fotones basado en fotodiodos de avalancha. 01/12/2017 [en línea] [recuperado el 01/06/2020]. Recuperado de internet URL: http://www.researchgate.net/publication/323688739_Modulo_de_conteo_de_fotones_basado_en_fotodiodos_de_avalancha	3-14
A	EP 0162942 A1 (MAX PLANCK GESELLSCHAFT) 04/12/1985, página 1, línea 14 a página 20, línea 35; figuras 1-14.	1-14

☐ 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:
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.
"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).
"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.
"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.
"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"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.
"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.	Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
02/06/2020	**04 de junio de 2020 (04/06/2020)**
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 J. Botella Maldonado Nº de teléfono 91 3495382

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ES2019/070897

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
CN108807567 A	13.11.2018	NINGUNO	
EP0162942 A1	04.12.1985	US4775881 A	04.10.1988
		JPS6193681 A	12.05.1986
		JPH0469825B B2	09.11.1992