(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
06 de enero de 2022 (06.01.2022)

WIPO | PCT

(10) Número de publicación internacional
WO 2022/003220 A1

(51) Clasificación internacional de patentes:
G01T 1/29 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2021/070420

(22) Fecha de presentación internacional:
08 de junio de 2021 (08.06.2021)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P202030673 01 de julio de 2020 (01.07.2020) ES

(71) Solicitantes: **CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)** [ES/ES]; C/ Serrano, 117, 28006 Madrid (ES). **UNIVERSIDAD DE CÁDIZ** [ES/ES]; C/ Benito Pérez Galdós, s/n, 11002 Cádiz (ES). **UNIVERSIDAD DE SEVILLA** [ES/ES]; Pabellón de Brasil, Pº de las Delicias, s/n, 41013 Sevilla (ES).

(72) Inventores: **CERVERA GONTARD, Lionel**; UNIVERSIDAD DE CÁDIZ, C/ Benito Pérez Galdós, s/n, 11002 Cádiz (ES). **LEÑERO BARDALLO, Juan Antonio**; UNIVERSIDAD DE CÁDIZ, C/ Benito Pérez Galdós, s/n, 11002 Cádiz (ES). **CARMONA GALÁN, Ricardo**; UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Pabellón de Brasil, Pº de las Delicias, s/n, 41013 Sevilla (ES).

(74) Mandatario: **PONS ARIÑO, Ángel**; Glorieta de 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, IT, 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, ST, SV, SY, TH,

(54) **Title:** SENSOR FOR MEASURING ELECTRON ENERGY IN SCANNING ELECTRON MICROSCOPES

(54) **Título:** DETECTOR PARA MEDIR LA ENERGÍA DE ELECTRONES EN MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS DE BARRIDO

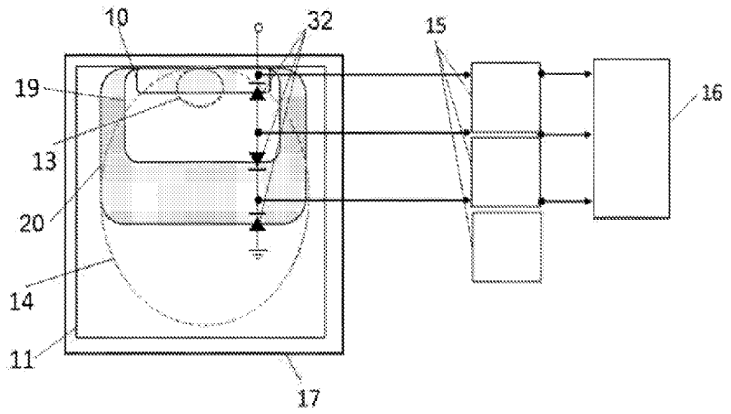


FIG. 3

(57) **Abstract:** The invention describes a sensor for measuring the energy of a beam of electrons (12) generated in a scanning electron microscope (SEM) (1). The sensor (29) is solid state and is produced with two or three vertically stacked diffusion layers (10, 19, 20), forming a sensor with vertically stacked photodiodes (17, 18). When the electrons (12) hit the sensor with vertically stacked photodiodes (17, 18), they generate photo currents that allow the energy and intensity of the beam of electrons (12) to be measured independently.

(57) **Resumen:** La invención describe un detector para medir la energía de un haz de electrones (12) generados en un microscopio electrónicos de barrido, denominados SEM (1). El detector (29) es de estado sólido fabricado con dos o tres difusiones (10, 19, 20) apiladas verticalmente, formando un sensor con fotodiodos apilados verticalmente (17, 18). Cuando los electrones (12) impactan en el sensor con fotodiodos apilados verticalmente (17, 18) generan unas fotocorrientes que permiten medir de manera independiente la energía y la intensidad del haz de los electrones (12).

WO 2022/003220 A1

[Continúa en la página siguiente]

TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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))*

DETECTOR PARA MEDIR LA ENERGÍA DE ELECTRONES EN MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS DE BARRIDO

DESCRIPCIÓN

OBJETO DE LA INVENCIÓN

La invención propuesta se encuadra dentro del diseño microelectrónico de sensores o detectores para su uso en microscopios electrónicos. Concretamente se describe un nuevo tipo de sensor o detector para medir la energía de electrones en microscopios electrónicos.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Los microscopios electrónicos son una tecnología habilitadora profusamente empleada en la ciencia y la tecnología porque permite el estudio físico y químico de estructuras con dimensiones, que van desde la escala atómica hasta escalas de cientos de micrómetros, desde dispositivos semiconductores o catalizadores hasta productos farmacéuticos o biomoléculas.

Existen varios tipos de microscopios electrónicos. La presente invención describe un sensor para detectar electrones en el tipo de microscopios electrónicos de barrido conocidos por su acrónimo SEM del inglés, *Scanning Electron Microscopy*. Estos microscopios SEM operan con electrones primarios (EP) acelerados con energías ajustables entre 0.1 keV y 30 keV. En los microscopios SEM un haz de electrones se enfoca en un punto de la muestra y se obtienen imágenes escaneando secuencialmente la sonda punto-a-punto.

Tal y como se muestra en la figura 1, cuando un material (7) colocado dentro del SEM (1) es bombardeado con un fino haz de electrones primarios (4) o EPs, se producen una multitud de procesos que generan nuevos electrones o fotones (2, 3, 5, 6) que pueden medirse con sensores para obtener información del material. Una parte de los EPs son electrones transmitidos (8) (ET), otros son restrodispersados (BSE), se generan electrones secundarios (SE), y también fotones en el rango ultravioleta-visible-infrarrojo (CL) y fotones rayos-X.

Cada una de estas señales de electrones y fotones se miden con diferentes sensores que están localizados en distintas ubicaciones del microscopio SEM. Los sensores tienen en común que disponen de algún tipo de circuito electrónico para medir la intensidad de la señal a partir de la cual se obtiene información de las propiedades del material que se estudia.

A continuación, se describe el estado de la técnica para medir los electrones en microscopios electrónicos.

En primer lugar, los filtros de energía para electrones, que se utilizan para medir la energía de los electrones, son fabricado con lentes electromagnéticas. Estas lentes electromagnéticas sirven para dispersar los electrones en función de su energía y para enfocarlos en un centelleador que emite fotones en el espectro visible.

Los fotones generados se detectan con un sensor electrónico formado por una matriz de pixeles que contienen fotodiodos. Cada pixel de esta matriz genera una señal asociada a un rango de energía, y el conjunto de señales es un espectro que contiene la información sobre la composición química de la muestra. Los filtros de energía permiten obtener espectros con resoluciones energéticas del orden de unos pocos electrón-voltios (5 eV o menos) y operan en modo integración.

Los filtros de energía para electrones presentan una serie de limitaciones:

- Las lentes electromagnéticas al igual que las lentes ópticas sufren de aberraciones y por ello el “filtro de electrones” es un dispositivo que requiere ser fabricado con técnicas de mecanizado de alta precisión y circuitos electrónicos de control complejos.

- Para poder obtener un espectro de energía el “filtro de energías” debe ser colocado debajo de la muestra de material que quiere analizarse. Pero el filtro por diseño es un sistema voluminoso difícil de integrar en el espacio limitado de los microscopios SEM. De hecho, actualmente estos filtros sólo se emplean en otro tipo de microscopios llamados TEM (Microscopio Electrónico de Transmisión).

- En un microscopio SEM, los electrones EP del haz son acelerados con un valor de energía variable entre 0.3 keV y 30 keV. Además, el haz de electrones se

desplaza sobre la muestra ya que es un microscopio de barrido, cubriendo área de grandes dimensiones, típicamente de varios micrómetros cuadrados, μm^2. Todo esto hace muy difícil diseñar un "filtro de energías" para SEM que sea funcional, ya que las aberraciones de las lentes electromagnéticas dependerán del punto de entrada del haz de electrones en el filtro y de la energía del haz de electrones. Un filtro sería inviable para poder obtener mapas químicos de grandes áreas del material como suele ser el caso de las aplicaciones más comunes de los SEM.

En segundo lugar, se utilizan también para medir los electrones en microscopios electrónicos los detectores de estado sólido para electrones. Se ha mencionado que los filtros de energía no se emplean en los SEM. Los detectores de electrones (PE, SE, BSE o ET) en los SEM son dispositivos de estado sólido que miden sólo la intensidad de la señal.

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de ionización que produce los electrones al impactar en el material del sensor contenido en los detectores. En los sensores más comunes el material es silicio de alta pureza con una corriente de fuga muy baja. La principal característica distintiva de estos sensores es la existencia de un campo eléctrico transversal generado por una serie de electrodos que hace que los portadores de carga resultantes del impacto de un electrón "se desvíen" hacia unos electrodos de recolección. La carga en su movimiento hacia los electrodos genera unas débiles corrientes eléctricas que se miden con un circuito electrónico amplificador que convierte la corriente en una señal eléctrica medible.

Es importante entender que la ionización del sensor de estado sólido produce una carga variable que depende de la intensidad y de la energía de las partículas incidentes. Y con los sensores de estado sólido descritos no es posible diferenciar si los cambios en la señal eléctrica medida se deben a un cambio de intensidad o a un cambio de la energía de los electrones incidentes.

En resumen, no existe ningún dispositivo que permita medir la energía de los electrones en un SEM. Los únicos dispositivos existentes son "filtros de energía" que por sus características sólo se emplean en microscopios TEM, pero no en los SEM.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención describe un detector de electrones de estado sólido que permite medir la intensidad y la energía de electrones PE (Electrones Primarios), ET (Electrones Transmitidos), SE (Electrones Secundarios), BSE (Electrones retrodispersados) que se generan en un microscopio SEM (microscopio electrónico de barrido), que permite superar las limitaciones de los "filtros de energía" electromagnéticos.

Es conocido que al ionizar un sensor de estado sólido se genera una carga, siendo este un fenómeno físico que se emplea para medir la energía de los electrones incidentes.

Un ejemplo de sensor de estado sólido son los fotodiodos que se emplean para medir la intensidad de un haz de fotones (la luz). Consisten en una región de semiconductor con dopado de tipo n+ (alta concentración de impurezas donadoras) en un sustrato de silicio tipo p, en el que predominan las impurezas aceptoras.

Son empleados profusamente en los pixeles de los sensores de las cámaras de fotografía. Cuando la luz incide en el fotodiodo se generan portadores libres que se miden con un circuito electrónico amplificador. La señal eléctrica (fotocorriente) es proporcional a la intensidad de la luz y al color (la energía de los fotones) de la luz, pero con un fotodiodo no es posible distinguir qué parte de la señal se debe al color y cuál a la intensidad.

El detector que se describe en la presente invención se basa en un circuito integrado con dos o tres fotodiodos en un sustrato de silicio. Estos dos o tres fotodiodos se fabrican Apilados Verticalmente (que se denominarán FAV de aquí en adelante). O de otro modo, los sensores FAV son fotodiodos que son fabricados en el mismo punto del sustrato de silicio, pero a distintas profundidades. Su fabricación se lleva a cabo en *foundries* o fundidoras (fábricas de circuitos integrados) y se emplea tecnología CMOS que incluyen la posibilidad de realizar difusiones *deep-n well* de manera estándar.

Los sensores FAV se inventaron para medir la energía (el color) de fotones en

aplicaciones ópticas y se conocen en inglés como "*vertically-stacked photodiodes*". La energía de los fotones con un sensor FAV se mide aprovechando los distintos índices de absorción/penetración de los fotones en el silicio. Al usar dos o tres fotodiodos apilados, es posible descorrelacionar la energía de los fotones de la intensidad de la iluminación.

El detector de la invención comprende un sensor FAV para medir la energía de electrones en lugar de fotones. Al igual que en el caso de los fotones, cuando los electrones penetran en el sensor FAV se ionizan los átomos y se generan portadores de carga en los fotodiodos apilados. La carga generada en cada fotodiodo del sensor FAV depende de la energía de los electrones incidentes. La carga generada por un electrón en cada fotodiodo apilado se mide con dos o tres circuitos electrónicos asociados, que convierten la carga en señales eléctricas (fotocorrientes). Estas señales eléctricas se pueden analizar para obtener la energía de los electrones.

Las señales eléctricas del sensor FAV se pueden amplificar y medir de dos modos:

- Modo Conteo: La señal eléctrica se procesa a alta velocidad para detectar el impacto de cada electrón individual que llega al sensor FAV. Así, midiendo un gran número de electrones y su energía es posible obtener un espectro de energía. Este modo de medir la energía de los electrones uno a uno es lo que se conoce como modo conteo o Geiger.
- Modo Integrador: La señal eléctrica se mide durante un tiempo, resultado de medir la suma de la carga generada en el sensor FAV por todos los electrones que han impactado en ese intervalo de tiempo. De este modo se obtiene una energía promedio de los electrones.

El detector propuesto en la invención presenta las siguientes ventajas:

- Empleando un sensor de estado-sólido con dos o tres fotodiodos apilados verticalmente es posible medir separadamente la intensidad o la energía de los electrones incidentes en el sensor.
- Operando el sensor en modo integrador puede obtenerse la energía promedio de los electrones generados en un punto del material que se analiza. Operando el sensor en modo conteo puede obtenerse un espectro de energía de los

electrones en un punto del material que se analiza.

- Al poder medir la energía de los electrones, algo que no se hace actualmente en los SEM, es posible obtener imágenes con contraste químico en un SEM.
- Al ser un sensor de estado sólido que se fabrica con tecnologías estándar es muy compacto en tamaño, no requiere el uso de filtros electromagnéticos y es barato de fabricar.

Los sensores FAV son estructuras que ya se emplean para medir el color de los fotones y se han usado como pixeles en cámaras fotográficas. Aunque los sensores FAV se emplean para medir el color de fotones ópticos, no es evidente su aplicabilidad a la medición del color (energía) de los electrones en microscopios electrónicos. Fundamentalmente esto es así porque la física de la absorción/penetración de los electrones en el silicio son diferentes a los de los fotones ópticos. Los fotones ópticos son bosones, partículas sin carga eléctrica y de baja energía mientras que los electrones son fermiones de carga negativa que pueden ser de alta energía en un microscopio electrónico.

Las profundidades de las difusiones del sensor FAV que pueden fabricarse con las tecnologías CMOS están limitadas a profundidades máximas de unos 5 µm. Ese rango es compatible con los rangos de absorción de los fotones ópticos visibles (rango azul a rojo). En el caso de los electrones, en algunas aplicaciones se emplean electrones acelerados a 300 kV y que son absorbidos en el silicio en rangos de hasta 200 µm. En estos casos los sensores FAV no servirían para medir la energía de los electrones.

A pesar de las diferencias entre electrones y fotones, se han realizado simulaciones que demuestran que cuando un microscopio electrónico es operado con electrones de bajas energías relativas como las típicamente usadas en los microscopios SEM (que emplean electrones acelerados por debajo de 30 kV), entonces la profundidad de absorción máxima de los electrones en el silicio del sensor es compatible con la profundidad a la que pueden fabricarse los sensores FAV y que es de unos 5 µm.

Otra diferencia es que las dimensiones espaciales de los sensores FAV usados en aplicaciones ópticas (el tamaño de los pixeles) son muy pequeñas, del orden de 5 µm -10 µm. Para que los sensores FAV tengan utilidad en los SEM deben tener

dimensiones espaciales mucho mayores.

Por ejemplo, si se usa un sensor FAV para medir electrones ET, el tamaño del sensor FAV debe ser mayor que las dimensiones máximas con el que se hace el barrido del haz de electrones. Para los usos más comunes de los microscopios SEM, el barrido del haz de electrones varía entre 0.1 µm y 190 µm. Es decir, si se pretende barrer con el haz de electrones una superficie cuadrada de dimensiones B x B, el tamaño del FAV debe tener una dimensión lateral C, con C > B. Y por tanto las dimensiones del FAV para su uso en un SEM deberá ser de unos 200 micrómetros (µm).

Otra diferencia es que los detectores en un microscopio SEM están en vacío, con lo cual el calor que se genera en el chip no se disipa. Esto no sucede generalmente en aplicaciones ópticas. El detector de la presente invención comprende por tanto un sensor de temperatura que permita hacer un control de temperatura para evitar el sobrecalentamiento.

Por último, los sensores ópticos suelen llevar una tapa de cristal para proteger el chip del polvo y la humedad. La tapa de cristal es transparente a los fotones. En la aplicación que se propone, para SEM, los electrones no podrían atravesar la tapa de cristal y por tanto hay que eliminarla. De modo que para proteger el sensor FAV de polvo y humedad el detector comprende una tapa protectora retráctil.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de esta descripción, un juego de figuras en las que, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra las distintas señales generadas en un microscopio SEM.

Figura 2.- Muestra un esquema de un fotodiodo convencional formado por una fina difusión n+ de aproximadamente 1 µm en un sustrato de silicio tipo p.

Figura 3.- Muestra un detector de estado sólido FAV con tres difusiones.

Figura 4.- Muestra un detector de estado sólido FAV con dos difusiones.

Figura 5.- Muestra un esquema del sistema detector de electrones.

Figura 6.- Muestra un esquema de posibles localizaciones del detector en un SEM para poder medir distintos electrones.

Figura 7.- Muestra una posible realización del circuito que amplifica la señal de un fotodiodo del FAV.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

Se describe a continuación, con ayuda de las figuras 1 a 7, una realización preferente del detector (29) para medir la energía de un haz de electrones (12) en microscopios electrónicos de barrido SEM (1).

En la figura 1 se muestran las distintas señales generadas en un microscopio SEM (1) con el que se va a combinar el presente detector (29) para medir la energía de los electrones (12). En la figura se observa una fuente de electrones (1), que genera unos electrones primarios (4) que interaccionan con una muestra de material (7). Como resultado de esta interacción se generan electrones secundarios (SE) (6), electrones retrodispersados (BSE) (3), electrones transmitidos (ET) (8), fotones de rayos X (2) y fotones ópticos (CL) (5).

Por su parte, en la figura 2 se muestra un esquema de un fotodiodo convencional (9) del estado de la técnica, que comprende una capa fina de difusión n+ (10) de aproximadamente 1 µm sobre en un sustrato de silicio tipo p (11). Un electrón (12) que incida en el fotodiodo (9), al igual que un fotón, genera portadores de carga en un volumen. El ancho y profundidad de ese volumen varía según la energía del electrón.

Por ejemplo, se muestran en la figura 2 dos volúmenes para electrones incidentes (12), un primer volumen de 10 keV (13) y un segundo volumen de 30 keV (14). La densidad

de estos electrones incidentes (12) se puede medir con un circuito electrónico amplificador (15), conectado a uno de los terminales del fotodiodo, según se indica en la figura 2,, siendo la señal resultante proporcional a la energía y la intensidad del haz de electrones incidentes (12).

Por su parte, el detector (29) de la presente invención comprende, en primer lugar, un sensor con fotodiodos apilados verticalmente (17, 18) (FAV), que se muestra en detalle en las figuras 3, y 4. Estos se fabrican empleando tecnologías de fabricación CMOS estándar. Sobre el sensor con FAV (17, 18) se difunde, empleando pasos convencionales, sobre un sustrato de silicio (11), dos o tres difusiones (10, 19, 20) con dopados distintos. Concretamente, en un sustrato de silicio (11) tipo p, hay que poder fabricar un sensor FAV (17, 18) apilando difusiones (10, 19, 20) del tipo n+, *p-well*, y *deep n-well*.

Por otra parte, como se muestra en las figuras 3 y 4, cada difusión (10, 19, 20) forma con la difusión (10, 19, 20) inmediatamente superior fotodiodos (32), en los que uno de sus terminales se conecta a un circuito electrónico (15) amplificador.

El circuito electrónico (15) conectado a cada difusión (10, 19, 20) debe ser capaz de amplificar corrientes eléctricas débiles y generar una señal de salida. El circuito electrónico (15) debe ser capaz de medir las fotocorrientes generadas por los fotodiodos, o bien detectar pulsos inducidos por el impacto de un electrón individual.

La señal generada puede ser de tipo analógica y/o digital y será medida, procesada y visualizada con la ayuda de un sistema de computación externo realizado con un microcontrolador o un ordenador.

En la figura 3 se muestra una realización del detector (29), en la que el sensor de estado sólido FAV (17) comprende tres difusiones. Como se refleja en la figura, el sensor FAV de tres difusiones (17) comprende tres difusiones apiladas con dopados tipo n+ (10), p (19) y una difusión deep n-well (20). Se muestra así mismo en la figura, en línea discontinua, el alcance de unos electrones incidentes (12) de 10KeV (13) y de 30KeV (14).

Las difusiones apiladas (10, 19, 20) tienen un grosor de 0.2µm, 1µm y 2µm. Las tres uniones de las difusiones forman respectivamente el fotodiodo (32) más cercano a la superficie, el intermedio y el más profundo. Los grosores de las difusiones (10, 19, 20) de un FVA de dos difusiones (17) serán aproximadamente de 1µm y 2µm. La anchura del sensor FAV (17) es variable, entre 5 µm a 1000 µm.

Cada difusión (10, 19, 20) está conectada a un circuito electrónico (15) que amplifica la corriente generada en cada difusión (10, 19, 20) por el impacto de los electrones (12) generados en un SEM (1). Esos circuitos electrónicos (15) permiten medir las corrientes en modo conteo o integración, y enviar los datos a un módulo de procesamiento/almacenamiento (16).

En la figura 4 se muestra una realización alternativa del dispositivo, en la que el sensor de estado sólido FAV (18) comprende dos difusiones (19, 20). En este caso el sensor FAV de dos difusiones (18) comprende dos difusiones apiladas (19, 20), una con dopado tipo p (19) y una difusión deep n-well (20). Se muestra así mismo en la figura, en línea discontinua, el alcance de unos electrones incidentes (12) de 10KeV (13) y de 30KeV (14).

En este caso, las difusiones apiladas (19, 20) tienen un grosor de entre 0.2 µm- 1 µm (10). La anchura del sensor FAV (18) es variable, entre 5 µm a 1000 µm. Cada difusión (19, 20) está conectada a un circuito electrónico (15) que amplifica la corriente generada en cada en cada difusión (19, 20) por el impacto de electrones (12) generados en un microscopio SEM (1). Esos circuitos electrónicos (15) permiten medir las corrientes en modo conteo o integración, y enviar los datos a otros módulos de procesamiento/almacenamiento (16).

Operando los microscopios con electrones de bajas energías relativas como las típicamente usadas en los SEM (1) de entre 0.2keV y 30keV, la profundidad de absorción de los electrones (12) es compatible con la profundidad máxima de 5µm a la que se puede fabricar un diodo con tecnología CMOS estándar.

La anchura del sensor FAV (17, 18) debe ser mayor que las dimensiones máximas con el que se hace el barrido del haz de electrones (12). Por ejemplo, para medir los electrones transmitidos (ET) en un microscopio SEM (1), el barrido del haz de electrones (12) puede variar entre 0.1µm y 190µm. Por lo tanto, es recomendable que la anchura (dimensión transversal) del sensor FAV (17, 18) para medir ET en un microscopio SEM (1) sea superior a unos 200µm aproximadamente.

En la figura 6 se representa un esquema de las posibles localizaciones del detector (29) en un SEM (1) para poder medir distintos electrones: Por encima de la muestra para medir electrones retrodispersados (BSE) (3), por debajo de la muestra para medir electrones transmitidos (ET) (8), en un lateral para medir electrones secundarios (SE) (6). En este último caso, los electrones son atraídos hacia el detector (29) con una rejilla metálica (30) conectada a un potencial eléctrico positivo.

En la figura 5 se muestra un esquema del detector (29) de electrones. Además del sensor FAV (17, 18), el detector (29) comprende un circuito integrado (21) (chip CMOS). Sobre el circuito integrado se posiciona el sensor FAV (17, 18) separado espacialmente del circuito electrónico (15). El circuito electrónico (15) amplifica las corrientes eléctricas de los fotodiodos (32) del sensor FAV (17, 18).

El circuito integrado (21) comprende además un sensor de temperatura (22) y unas conexiones externas para medir las señales amplificadas del sensor FAV (17, 18), concretamente, una conexión de medida de la temperatura (23), una conexión de medida de una señal de entrada (24) (*trigger* o disparo) para poder sincronizar el detector (29) con el SEM (1). Además, el detector (29) comprende una conexión externa (25) para alimentar todos los componentes del detector (29).

Por otra parte, y como se muestra en la figura 5, el detector (29) comprende una tapa protectora retráctil (26) movida por un sistema mecánico (27) asociado, necesaria para proteger el circuito integrado (21) de humedad y polvo, y un sistema de refrigeración por conducción (28) en contacto con el circuito integrado (21).

En la figura 7, se presenta una posible implementación eléctrica del circuito electrónico (15) que amplifica la señal de un fotodiodo (32) del sensor FAV (17, 18). El circuito

electrónico (15) sigue el esquema *Integrate-and-Fire* (I&F), en el que los fotodiodos (32) están conectados a un oscilador (31) ajustable que conmuta entre dos estados a una velocidad definida por la corriente de entrada generada en el fotodiodo (32). El oscilador (31) genera pulsos de tensión con una frecuencia proporcional a la fotocorriente del diodo (32) que se conecta a su entrada.

La presente invención tiene una aplicación industrial directa como accesorio necesario en los microscopios electrónicos de barrido, SEM (1).

Esta tecnología ofrecería oportunidades para el desarrollo de nuevos detectores (29), más baratos y compactos. Además, al poder medir la energía de los electrones (12) generados en un SEM (1), permitirían nuevas aplicaciones adicionales. Por ejemplo, al poder "filtrar" las imágenes según la energía (color) de los electrones (12) podría:

- Eliminarse la contribución inelástica a las imágenes, lo que permitiría por ejemplo la visualización mejorada de materiales orgánicos y muestras biológicas.

- Obtener espectros de energía sin necesidad de "filtros de electrones/fotones".

- Obtener de manera sencilla imágenes con contraste químico independientemente de la intensidad o energía primaria del haz de electrones (12).

REIVINDICACIONES

1.- Detector (29) para medir la energía de electrones (12) en microscopios electrónicos de barrido (1), que comprende:

- al menos un sensor de fotodiodos apilados verticalmente (17, 18) que comprende un sustrato de silicio (11), sobre el que se apilan al menos dos difusiones (10, 19, 20) con dopados diferentes, formándose entre difusiones (10, 19, 20) con distinto dopaje una unión, de manera que cada unión entre difusiones (10, 19, 20) forma un fotodiodo (32) de conexión que genera una fotocorriente al recibir el impacto de los electrones (12),
- unos circuitos electrónicos (15) conectados a cada fotodiodo (32), que miden las fotocorrientes que circulan por cada fotodiodo (32), o detectan pulsos de fotocorrientes inducidas por el impacto de un electrón (12), y
- un módulo de procesamiento y almacenamiento (16) conectado a los circuitos electrónicos (15).

2.- El detector (29) de la reivindicación 1, en el que el sensor con fotodiodos apilados verticalmente (18) comprende dos difusiones (10, 19) siendo una primera difusión (10) más próxima al haz de electrones (12) de tipo n+, y una difusión más alejada (19) del haz de electrones (12) de tipo p.

3.- El detector (29) de la reivindicación 2, en el que las difusiones (10, 19) tienen un grosor de aproximadamente de 1µm y 2µm respectivamente.

4.- El detector (29) de la reivindicación 1, en el que el sensor con fotodiodos apilados verticalmente (18) comprende tres difusiones (10, 19, 20) siendo una primera difusión (10) más próxima al haz de electrones (12) de tipo n+, una difusión intermedia (19) de tipo p, y una difusión más alejada (20) del haz de electrones (12) de tipo *deep n-well*.

5.- El detector (29) de la reivindicación 4, en el que las difusiones (10, 19, 20) tienen un grosor de 0.2µm, 1µm y 2µm aproximadamente respectivamente.

6.- El detector (29) de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un sensor de temperatura (22) asociado a el al menos un sensor de fotodiodos apilados verticalmente (17, 18).

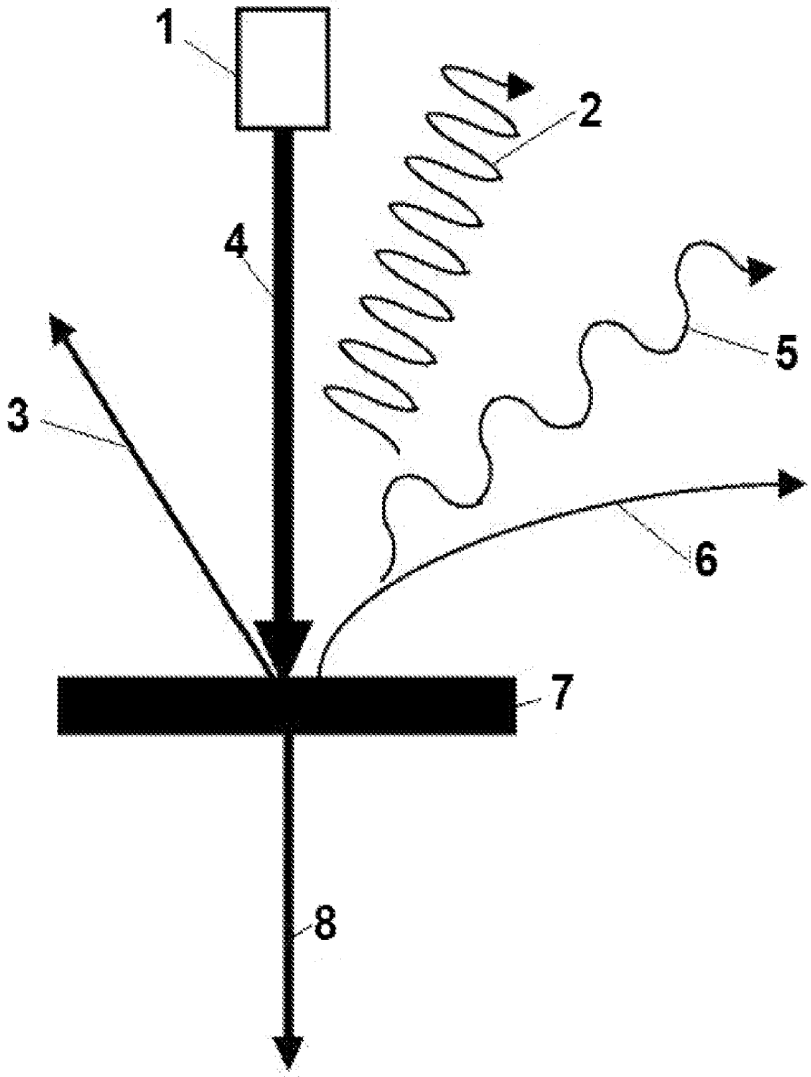
7.- El detector (29) de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente una conexión de medida (24) de una señal de entrada de disparo de sincronización entre el detector (29) y el microscopio electrónico de barrido (1).

8.- El detector (29) de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente una tapa protectora retráctil (26) movida por un sistema mecánico (27) asociado, de protección del al menos un sensor de fotodiodos apilados verticalmente (17, 18).

9.- El detector (29) de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un sistema de refrigeración por conducción (28) en contacto con el al menos un sensor de fotodiodos apilados verticalmente (17, 18).

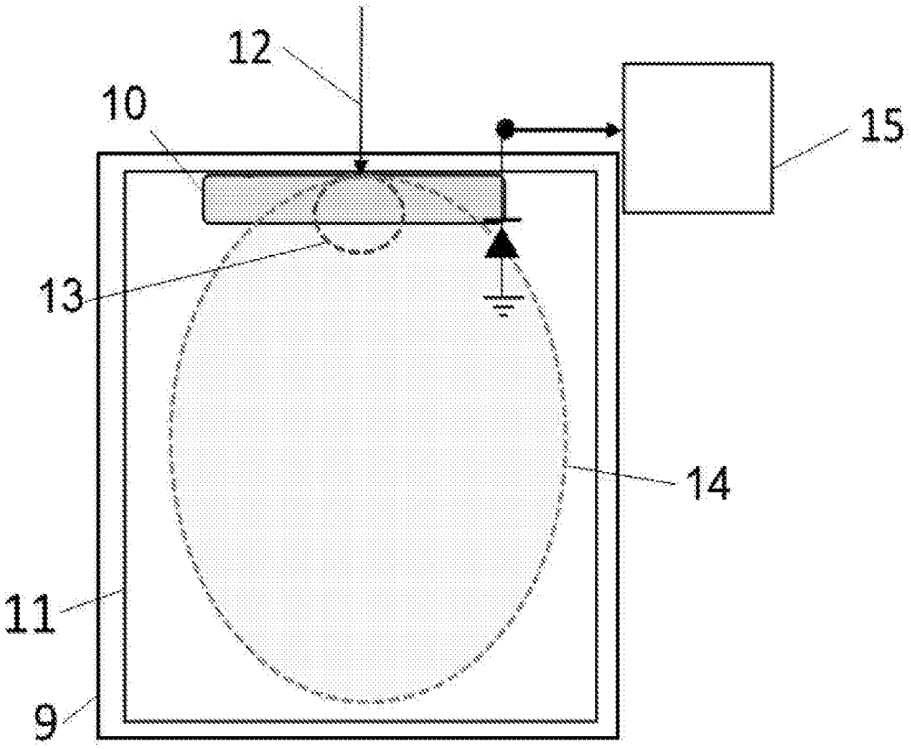
10.- El detector (29) de la reivindicación 1, en el que el circuito electrónico (15) comprende un oscilador (31) ajustable que conmuta entre dos estados a una velocidad definida por la fotocorriente generada en el fotodiodo (32).

DIBUJOS



(Estado de la técnica)

FIG. 1



(Estado de la técnica)

FIG. 2

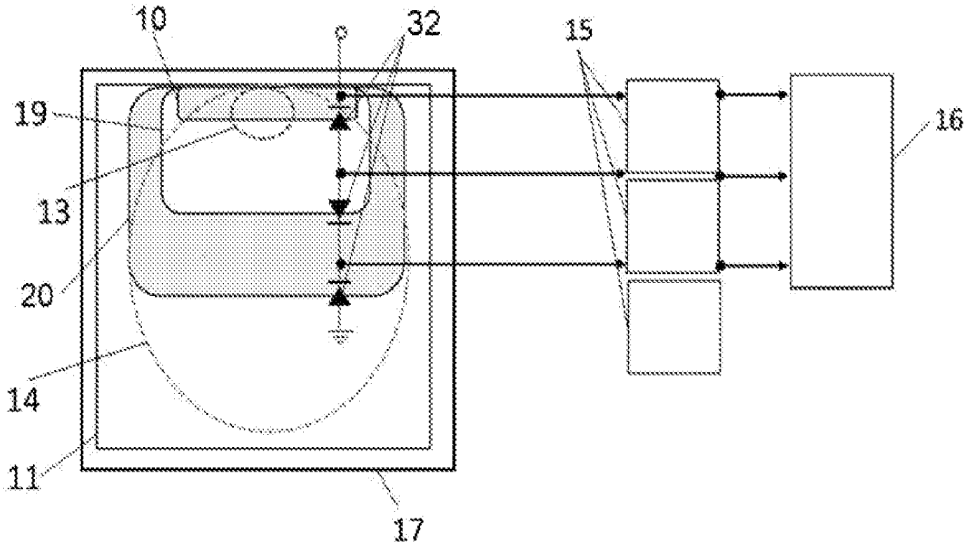


FIG. 3

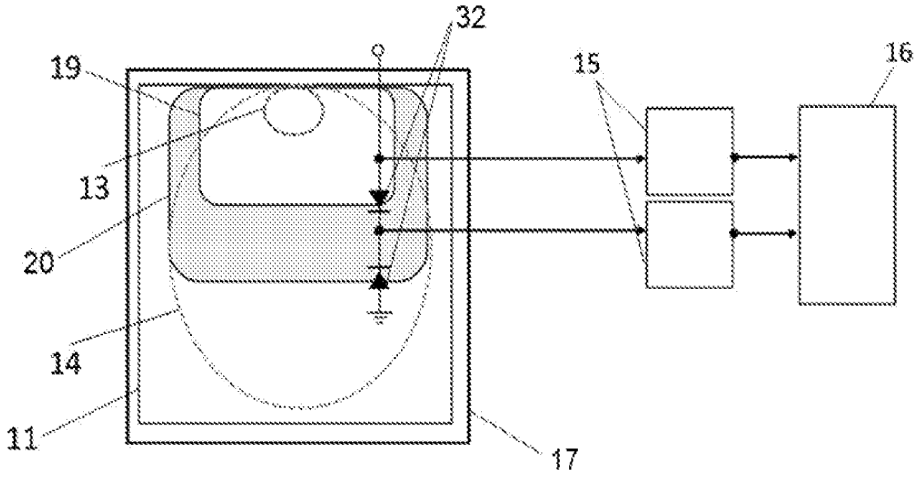


FIG. 4

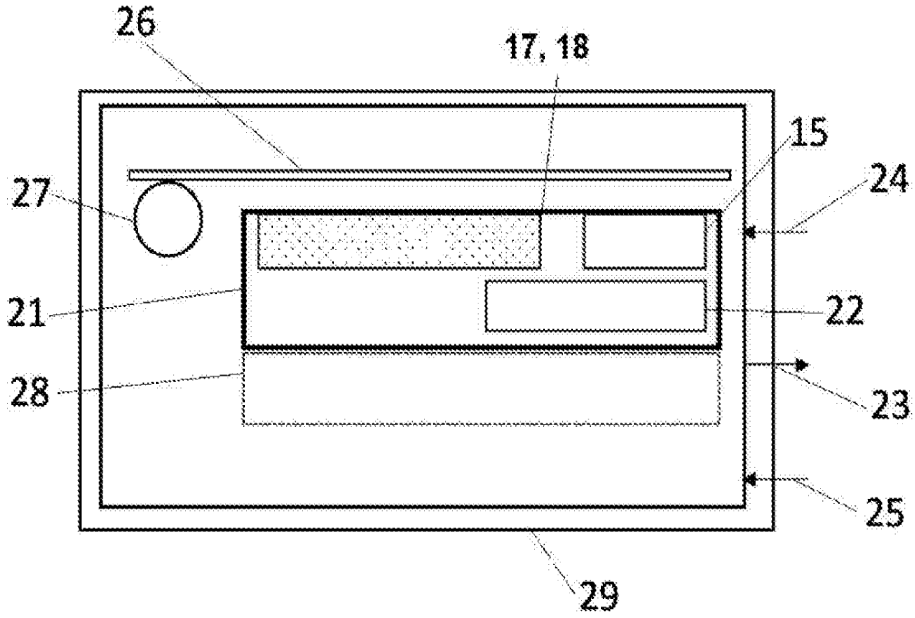


FIG. 5

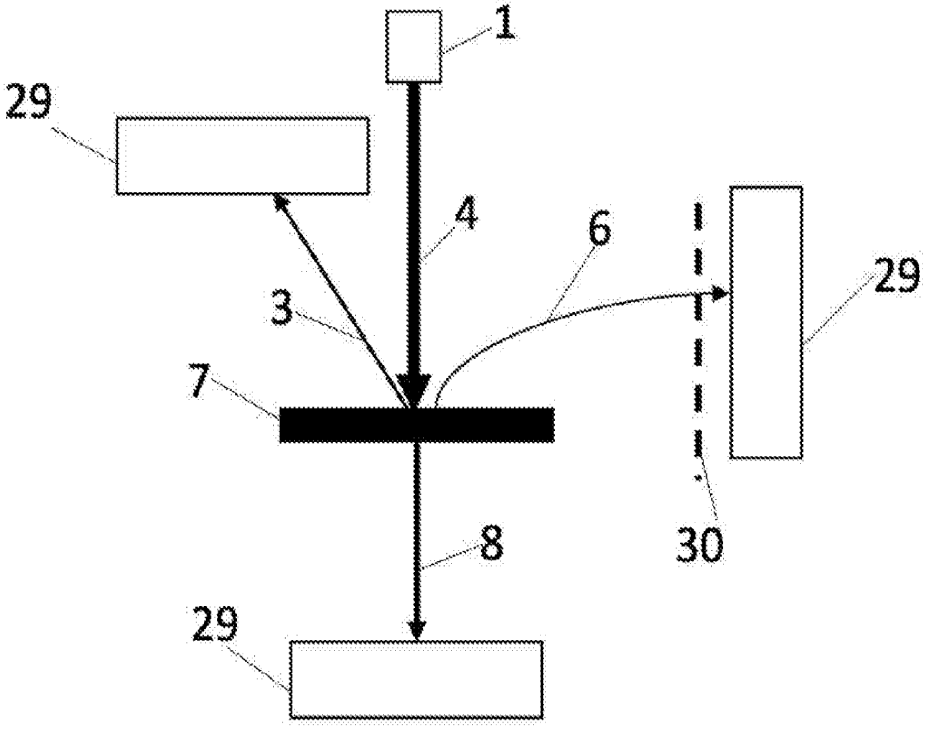


FIG. 6

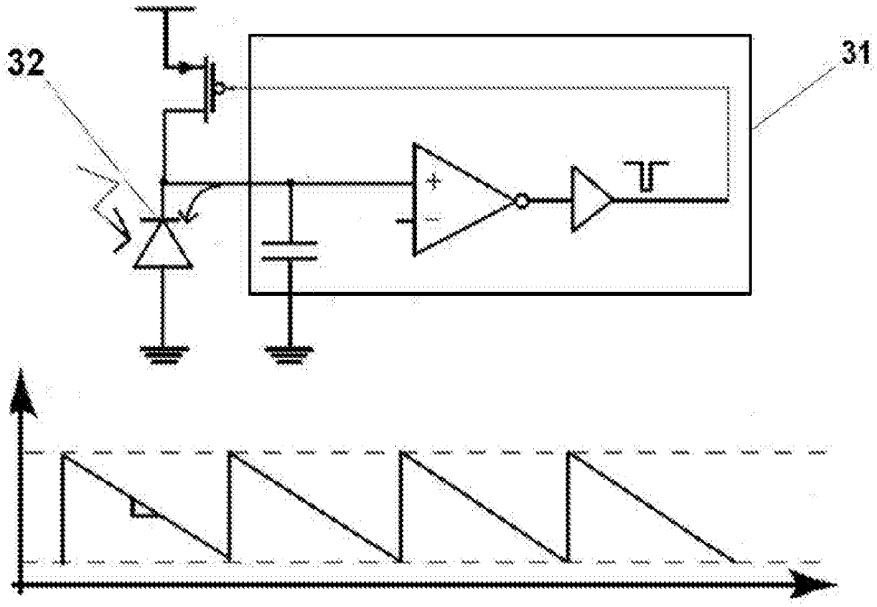


FIG. 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2021/070420

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01T1/29 (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)
G01T, G01N, G02B

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, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001305234 A (NIKON CORP) 31/10/2001, abstract; paragraphs [0001]-[0021]; figures.	1-3, 7, 10
A	SAKIC, A et al.: "High-Efficiency Silicon Photodiode Detector for Sub-keV Electron Microscopy". IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, October 2012, Vol. 59, Nº 10, pages 2707-2714 [on line][retrieved on 22/01/2021], see the whole document.	1-3, 7, 10
A	WO 2005/117145 A1 (ISIS INNOVATION LIMITED) 08/12/2005, abstract; page 2, line 23 – page 6, line 5; figures.	1-3, 7, 10
A	US 4119852 A (ROUGEOT, H.) 10/10/1978.	-

☐ 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
23/09/2021	**(27/09/2021)**
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 Ó. González Peñalba Telephone No. 91 3495475

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/ES2021/070420

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP2001305234 A	31.10.2001	NONE	
WO2005117145 A1	08.12.2005	JP2008500689 A	10.01.2008
		JP4815434B B2	16.11.2011
		AT451721T T	15.12.2009
		US2009206428 A1	20.08.2009
		US7888761 B2	15.02.2011
		US2007262404 A1	15.11.2007
		EP1756874 A1	28.02.2007
		EP1756874 B1	09.12.2009
US4119852 A	10.10.1978	JPS5295283 A	10.08.1977
		GB1515482 A	28.06.1978
		FR2345815 A1	21.10.1977
		FR2345815 B1	18.08.1978
		DE2703324 A1	18.08.1977
		DE2703324 C2	15.10.1981

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2021/070420

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD
G01T1/29 (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)
G01T, G01N, G02B

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, INSPEC

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	JP 2001305234 A (NIKON CORP) 31/10/2001, resumen; párrafos [0001] - [0021]; figuras.	1-3, 7, 10
A	SAKIC, A et al.: "High-Efficiency Silicon Photodiode Detector for Sub-keV Electron Microscopy". IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, octubre de 2012, Vol. 59, Nº 10, páginas 2707-2714 [en línea] [recuperado el 22/01/2021], véase todo el documento.	1-3, 7, 10
A	WO 2005/117145 A1 (ISIS INNOVATION LIMITED) 08/12/2005, resumen; página 2, línea 23 – página 6, línea 5; figuras.	1-3, 7, 10
A	US 4119852 A (ROUGEOT, H.) 10/10/1978.	-

☐ 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.
23/09/2021	**27 de septiembre de 2021 (27/09/2021)**
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 Ó. González Peñalba Nº de teléfono 91 3495475

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ES2021/070420

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
JP2001305234 A	31.10.2001	NINGUNO	
WO2005117145 A1	08.12.2005	JP2008500689 A	10.01.2008
		JP4815434B B2	16.11.2011
		AT451721T T	15.12.2009
		US2009206428 A1	20.08.2009
		US7888761 B2	15.02.2011
		US2007262404 A1	15.11.2007
		EP1756874 A1	28.02.2007
		EP1756874 B1	09.12.2009
US4119852 A	10.10.1978	JPS5295283 A	10.08.1977
		GB1515482 A	28.06.1978
		FR2345815 A1	21.10.1977
		FR2345815 B1	18.08.1978
		DE2703324 A1	18.08.1977
		DE2703324 C2	15.10.1981