

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 737 977**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/0352** (2006.01)

**H01L 31/0376** (2006.01)

**H01L 31/20** (2006.01)

**H01L 31/18** (2006.01)

**H01L 21/265** (2006.01)

**H01L 21/26** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.03.2012 PCT/IB2012/000867**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.10.2012 WO12131496**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.03.2012 E 12728117 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2019 EP 2689473**

54 Título: **Convertidor fotovoltaico con estructura de emisor mejorada basada en componentes de silicio y un método para la producción del convertidor fotovoltaico**

30 Prioridad:  
**25.03.2011 US 201161457428 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.01.2020**

73 Titular/es:  
**SEGTON ADVANCED TECHNOLOGY (100.0%)  
31 Avenue du maréchal Haig  
78000 Versailles, FR**

72 Inventor/es:  
**KUZNICKI, ZBIGNIEW y  
MEYRUEIS, PATRICK**

74 Agente/Representante:  
**DÍAZ DE BUSTAMANTE TERMINEL, Isidro**

ES 2 737 977 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Convertidor fotovoltaico con estructura de emisor mejorada basada en componentes de silicio y un método para la producción del convertidor fotovoltaico.

5

**CAMPO DE LA INVENCION**

Esta invención se refiere a una estructura de emisor mejorada de dispositivos novedosos de interfaz múltiple para una conversión de luz a electricidad en un convertidor fotovoltaico para producir electricidad a partir de la luz, en particular a partir de la radiación solar y un método para su producción.

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Esta invención se deriva de la estructura esquemática del emisor fotovoltaico desvelado anteriormente de acuerdo con el documento WO 2010/089624 a nombre de los mismos inventores Zbigniew T. KUZNICKI y Patrick MEYRUEIS.

Este dispositivo fotovoltaico anterior es capaz de explotar fotones de alta energía, en particular fotones UV y visibles, además de fotones cercanos al IR, comprendiendo dicho dispositivo una losa, oblea o chip de material fotovoltaico de tipo p o de tipo n producido de acuerdo con las reivindicaciones de método del documento WO 2010/089624, que tienen una superficie superior destinada a estar expuesta a radiación fotónica, que tienen una unión P-N integrada que delimita una parte emisora y una parte de base, que tienen medios de recogida y extracción de portadores delantero y trasero y que comprenden al menos un área o región específicamente diseñada o adaptada para absorber fotones de alta energía o energéticos y ubicada adyacente o cerca de al menos una heterointerfaz. Este dispositivo se caracteriza porque dicha losa, oblea o chip de material fotovoltaico comprende también al menos un campo o región de metamaterial que forma una cavidad de generación de portadores secundarios de baja energía, que es contigua o próxima a la al menos un área o región de absorción para la fotones energéticos y sometida a un campo eléctrico integrado o aplicado que tiene una intensidad suficiente para retirar y alejar los electrones secundarios liberados por los electrones primarios calientes de sus sitios iniciales dentro del área o región de metamaterial en cuestión, a una velocidad suficiente para evitar su regrese a dicha región o campo de metamaterial, formando de este modo una subestructura que realiza una conversión de múltiples etapas, en el que la densidad de lagunas dobles dentro del o de los campos o regiones metametálicos es mayor que  $10^{18}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup>, preferentemente mayor que  $10^{19}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup> de la manera más preferente mayor que  $10^{20}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup> y la conducción entre el metamaterial y el material de tipo n adyacente respectivamente tiene una constante de tiempo que está en el máximo de la misma magnitud que la constante de tiempo de la generación de portadores secundarios, en el que el espesor de la o cada capa de material semiconductor amorfo plano está comprendido entre 10 nm y 50 nm y en el que el ancho del o de los campos o regiones de metamaterial asociadas en forma de una o varias capas continuas o discontinuas, es menor que 10 nm, teniendo el material semiconductor preferentemente un espesor comprendido dentro de 5 μm y 500 μm, preferentemente entre 10 μm y 280 μm.

Esta invención anterior también se caracteriza por un límite de recogida de portadores designado aquí como CCL, que es el límite que separa el emisor en dos partes: el emisor superior que es una zona muerta electrónicamente, y el emisor inferior que es completamente activo electrónicamente. Como se muestra en la figura 1, el convertidor está compuesto por una capa superficial conectada a un electrodo de rejilla frontal y una base conectada a un electrodo trasero y, entre ellos, una estructura de emisor dividida en un emisor superior y un emisor inferior. Los espesores de los emisores superiores e inferiores se designan respectivamente como «du» y «dl» (figura 1). Estos emisores superiores e inferiores están separados por la zona límite llamada CCL para límite de recogida de portadores. Esta estructura de emisor fotovoltaico es fácilmente visible en la figura 1 en la que el límite CCL se muestra mediante una línea negra continua.

El CCL se puede definir como la interfaz con sus posibles portadores generados de bloqueo de barrera para moverse hacia la unión de recogida PN. Por lo tanto, los portadores de signos opuestos generados dentro del emisor superior no pueden ser recogidos porque no es posible separar cada uno de ellos del otro con respecto al CCL.

El objetivo de la presente invención es múltiple.

El primero es proceder a la recogida de la totalidad de la población fotogenerada de portadores libres de todos los componentes del convertidor de luz en electricidad, es decir, particularmente del emisor superior ubicado entre la cara frontal y el sistema estratificado de silicio a escala nanométrica.

El segundo es reducir y, preferentemente, cancelar el efecto de CCL para aumentar considerablemente la eficiencia de conversión.

El último es mejorar aún más la eficiencia de conversión mediante modificaciones adecuadas de la capa de silicio

amorfizado.

Esta mejora se obtiene a través de la presente invención por medio de al menos una doble transformación que resulta de un haz de amorfización que barre la oblea de silicio. El proceso de barrido adecuado conduce a una capa amorfizada discontinua o localmente delgada y muy fina. El proceso se puede realizar mediante un proceso de implantación por haz de iones o un proceso de irradiación por haz de electrones. Los iones pueden ser, por ejemplo, iones de silicio o fósforo.

El efecto CCL se suprime mediante una discontinuidad de la estructura adecuada o, por ejemplo, mediante la conducción de túnel a través de CCL localmente adelgazado.

En tal caso, la estructura transporta portadores a través de zonas delgadas especiales limitadas, los portadores que deben alcanzar la unión PN de recogida. Pueden pasar a través de los pasajes cristalinos de la subestructura enterrada o a través de zonas muy delgadas donde el espesor de la estructura enterrada es tan reducido que puede aparecer el efecto de conducción de túnel. Todos estos pasajes no deben estar demasiado espaciados con respecto a los movimientos del portador a lo largo de la subestructura enterrada, es decir, los movimientos perpendiculares a la unión PN de recogida.

Estos y otros beneficios de esta invención quedarán claros a partir de la siguiente descripción con referencia a los dibujos.

Además de los documentos de la técnica anterior mencionados, se conoce más técnica anterior a partir del documento US 5 935 345 A y la siguiente bibliografía no de patentes:

JIANMING LI ET AL: "35% EFFICIENT NONCONCENTRATING NOVEL SILICON SOLAR CELL", APPLIED PHYSICS LETTERS, A I P PUBLISHING LLC, US, vol. 60, no. 18, 4 de mayo de 1992 (04/05/1992), páginas 2240-2242, XP000275864, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.107042

KUZNICKI Z T ET AL: "Active Substructures and Active Interfaces for Very High Efficient Single-Crystal Si Solar Cells", PROCEEDINGS OF THE 14TH EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 30 de junio de 1997 (30/06/1997), - 4 de julio de 1997 (04/07/1997), páginas 2469-2472, XP002160781, Barcelona-ESPAÑA

KUZNICKI Z T ET AL: "MULTIINTERFACE SOLAR CELLS ON SINGLE-CRYSTAL SILICON", PROCEEDINGS OF THE 14TH EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 30 de junio de 1997 (30/06/1997), - 4 de julio de 1997 (04/07/1997), páginas 150-153, XP001136005, Barcelona-ESPAÑA, ISBN: 978-1-901675-03-0

KUZNICKI Z T ET AL: "Enhanced absorbance of a strained nanoscale Si-layered system", APPLIED PHYSICS LETTERS, A I P PUBLISHING LLC, US, vol. 82, no. 24, 16 de junio de 2003 (16/06/2003), páginas 4241 -4243, XP012034365, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.1582365

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La figura 1 es una vista en sección transversal esquemática de un emisor fotovoltaico de acuerdo con el documento WO 2010/089624, donde se muestra la zona CCL por medio de una gran línea negra continua;

Las figuras 2 a 7 son vistas esquemáticas en sección transversal de un emisor fotovoltaico mejorado donde se suprime el CCL, en las que, más particularmente:

La figura 2 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado en la que la forma de a-Si es la de una ondulación;

La figura 3 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado en la que la forma de a-Si es la de un trapecio; la figura 4 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado similar a la de la figura 2 pero con discontinuidades;

La figura 5 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado similar a la de la figura 3 pero con discontinuidades;

La Figura 6 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado con tres sistemas estratificados de Si a escala nanométrica enterrados, es decir, tres capas de a-Si amorfizadas enterradas a diferentes profundidades;

La figura 7 es una vista esquemática en sección transversal de una capa de silicio amorfizado que es sustancialmente la misma que la de la figura 6 pero con la segunda capa desplazada con respecto a la primera y tercera capas;

Las figuras 8-10 son vistas en planta esquemáticas de una oblea que muestra tres patrones diferentes de barrido

con haz de iones o de electrones que comprende el uso de pasajes de longitud, pasajes cruzados y pasajes oblicuos;

Las figuras 11 y 12 son vistas esquemáticas de las puntas de los haces de amorfización y las formas creadas de este modo, en las que, más particularmente:

5 La figura 11 desvela el uso de un patrón que comprende varios pasajes cercanos y el uso de una corriente de haz de iones relativamente baja; y

La figura 12 desvela el uso de un patrón que comprende un solo pasaje y el uso de una corriente de haz de iones relativamente alta.

### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES ILUSTRADAS

10 El objeto de la presente invención se define en las reivindicaciones independientes 1 (producto) y 7 (proceso).

La oblea de silicio se trata primero de acuerdo con el método desvelado en el documento WO 2010/089624.

#### 1. INSERCIÓN DE LA CAPA DE SILICIO AMORFIZADA DENTRO DE LA OBLEA DE CRISTAL INDIVIDUAL.

Este proceso se realiza mediante una implantación por haz de iones o mediante una irradiación por haz de electrones. Los iones son, por ejemplo, preferentemente iones de silicio o iones de fósforo.

15 El propósito general es crear un relieve que consiste en una sucesión de salientes separados por huecos o discontinuidades como se muestra en las figuras 2 a 7 en o con la capa de silicio amorfizado a-Si.

20 Estas formas se separan de la masa cristalina de silicio c-Si por una nanocapa de nanometamaterial MTM que es un metamaterial derivado del silicio cristalino c-Si mediante una implantación por haz de iones o una irradiación por haz de electrones. Este metamaterial MTM de esta nanocapa está designado por la etiqueta <c-Si>. Se inserta en el lado de silicio monocristalino de la heterointerfaz entre el silicio amorfizado/cristalino (a-Si/c-Si). Las etiquetas a-Si y c-Si son las mismas que se definen en las figuras de los dibujos.

Durante uno de estos procesos se produce la inserción por penetración de los iones o electrones dentro de la estructura y la interacción con ella y finalmente la estabilización a cierta profundidad.

25 Este proceso de inserción mediante implantación o irradiación se produce después de tener la estructura de unión PN integrada que resulta de una difusión de dopaje P particular o por epitaxia. Por lo tanto, la unión PN ya está integrada y el perfil de dopaje P es un perfil fuertemente dopado y, al mismo tiempo, la parte N de esta unión PN debe estar muy dopada y después se puede producir el proceso de barrido.

30 Esta inserción puede lograrse barriendo la estructura con un haz de iones o con un haz de electrones para proceder con un proceso de implantación de iones o de irradiación de electrones con más o menos energía y dosis, es decir, más o menos corriente de iones o velocidad de electrones.

Se usan etapas de barrido con un haz de implantación de iones o irradiación por un haz de electrones. Como se muestra en las figuras, se puede proceder por una corriente de haz de iones baja con múltiples pasajes cercanos o por una corriente de haz de iones alta con un pasaje cada vez necesario para la amorfización controlada localmente, como se ilustra mediante las figuras 11 y 12 relevantes.

35 Se pueden usar varios pasajes cercanos con haces de dosis de baja energía como se muestra en la figura 11 o un solo pasaje con un haz de dosis de alta energía (figura 12).

El barrido puede proceder con uno o varios pasajes y después desplazar los haces para crear discontinuidades entre las concavidades o salientes, es decir, las tiras a-Si (figuras 8 a 10).

40 El barrido con el haz de electrones es más o menos el mismo para obtener los patrones de barrido como se muestra en las figuras relacionadas.

Una manera alternativa es barrer primero a lo largo de una dirección de la oblea y después a lo largo de otra dirección de la oblea perpendicular a la primera como se muestra en la figura 9. También es posible barrer primero de manera recta y luego de manera oblicua como se muestra en la figura 10.

45 Las tiras designadas por a-Si entre las líneas mostradas en estas figuras 8 a 10 definen el ancho del pasaje o pasajes del haz para formar los salientes del material de a-Si con los límites creados por el trabajo de implantación de iones o irradiación de electrones que es el metamaterial MTM derivado de silicio cristalino y etiquetado <c-Si>.

La energía de implantación de iones varía de 10 a 300 keV y la dosis de iones está comprendida entre  $5 \times 10^{14}$  cm<sup>-2</sup> y  $5 \times 10^{16}$  cm<sup>-2</sup> con un perfil fuertemente dopado.

La energía de irradiación de electrones, es decir, el potencial de aceleración varía de 200 keV a 5 MeV.

5 La corriente del haz de iones o la energía de depósito dependen del perfil iónico. Se requiere al menos un pasaje si la carga implantada es suficiente para obtener la amorfización. Pero se necesitan varios pasajes para acumular localmente la energía de depósito si la carga única no es suficiente para obtener la amorfización del silicio que se encuentra en estado cristalino.

Si el perfil de dopaje se lleva previamente al emisor, se pueden usar iones de silicio para operar una amorfización oculta en la estructura de silicio mediante la autoimplantación de silicio.

La punta del haz debe tener la forma adecuada, así como los ajustes de enfoque para garantizar un resultado adecuado.

10 Las formas que se muestran en las figuras 2, 3 y 4, es decir, la sucesión de salientes separados por huecos o discontinuidades demuestran la creación de pasajes entre ellos a través de los cuales los portadores pasarán por un efecto de túnel.

15 Una vez implantada, la capa amorfizada a-Si tiene zonas de interfaz no coincidentes con los cristales de silicio circundantes. Como esta interfaz no coincidente no tiene ningún interés práctico, es necesario un tratamiento térmico para hacer este dispositivo utilizable.

## 2. TRATAMIENTO TÉRMICO

Después sigue el tratamiento térmico que hará que los límites sean adecuadamente delgados y claros, y que consta de varios ciclos térmicos.

Para obtener una interfaz de c-Si/a-Si abrupta, se aplica un tratamiento térmico adecuado.

20 Por ejemplo, el tratamiento térmico consiste en una etapa de recocido continuo inicial, seguida de al menos un ciclo de secuencias de recocido discontinuas sucesivas.

25 La velocidad de recocido debe limitarse para evitar defectos estructurales. La baja temperatura se selecciona para estabilizar la epitaxia en estado sólido, por ejemplo, aproximadamente 100 °C, mientras que la alta temperatura es aproximadamente 500 °C. Cada exposición a alta temperatura dura, por ejemplo, de 2 a 5 minutos, con un tiempo de recuperación de, por ejemplo, 1 a 4 minutos, que puede reducirse por medio de gradientes apropiados de temperatura. Por ejemplo, son necesarios de tres a seis ciclos.

Una vez completado el tratamiento térmico, los límites de c-Si/a-Si entre las fases del material son limpios, claros y precisos.

30 El emisor descrito anteriormente se usará en un convertidor de luz a electricidad que debe completarse con electrodos delanteros y traseros, así como con diferentes componentes convencionales y con un bloque o plataforma óptica adecuada para concentrar la radiación solar en la oblea.

El convertidor de luz a electricidad producido de este modo da como resultado una alta eficiencia de conversión, de modo que la superficie activa total no tiene que ser grande y, por lo tanto, se requiere una óptica de concentración apropiada.

35

## REIVINDICACIONES

1. Un convertidor fotovoltaico, que comprende una estructura de emisor hecha de componentes de silicio capaces de convertir fotones de alta energía en electrones libres en particular UV y fotones visibles así como fotones IR, esta estructura de emisor forma parte de una losa, oblea o chip de material fotovoltaico de tipo p o de tipo n,

- teniendo dicha losa, oblea o chip una superficie superior destinada a ser expuesta a radiación fotónica principalmente a radiación solar, que tiene una unión PN integrada que delimita la parte emisora y una parte de base, que tiene electrodos delanteros y traseros y que comprende al menos un área o región específicamente diseñada o adaptada para absorber fotones de alta energía o energéticos y ubicada adyacente o cerca de una heterointerfaz entre el silicio amorfizado y cristalino (a-Si y c-Si),

- comprendiendo dicho emisor del material fotovoltaico también al menos una región de metamaterial MTM que forma una cavidad de generación de portadores secundarios de baja energía, que es contigua o próxima a la al menos una zona o región de absorción para los fotones energéticos y se somete a un campo eléctrico integrado o aplicado que tiene una intensidad suficiente para retirar y alejar los electrones secundarios liberados por los electrones calientes primarios de sus sitios iniciales dentro de la región de metamaterial MTM en cuestión, a una velocidad suficiente para evitar su retorno a dicha región de metamaterial MTM, formando de este modo una subestructura que realiza conversión de múltiples etapas, en el que la densidad de las lagunas dobles dentro de la o las regiones de metamaterial MTM es mayor que  $10^{18}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup>, preferentemente mayor que  $10^{19}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup>, de la manera más preferente mayor que  $10^{20}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup> y la conducción entre el metamaterial MTM y el material de tipo n adyacente respectivamente tiene una constante de tiempo que está en el máximo de la misma magnitud que la constante de tiempo de generación de portadores secundarios,

**caracterizado porque,**

dicha estructura de emisor comprende

- tres capas de material de silicio amorfo enterradas a diferentes profundidades y conformadas por un proceso de inserción, depósito o implantación de iones o electrones en un relieve hecho de una sucesión de salientes separados por huecos o discontinuidades en forma de una o varias capas continuas o discontinuas

- en el que los salientes son tiras, estas tiras están hechas del silicio amorfo a-Si con una superficie superior e inferior modificada que consiste en el metamaterial MTM, en el que las tiras son, cada una de ellas, resultado de al menos un paso de un haz para la implantación de iones o la irradiación de electrones.

2. Convertidor fotovoltaico de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la sucesión de salientes son tiras en sucesión, estos relieves están hechos de silicio amorfizado a-Si con una superficie superior e inferior modificada que consiste en un metamaterial MTM y separadas por huecos o discontinuidades en las que el metamaterial MTM se deriva de silicio cristalino y en las que el metamaterial MTM se inserta en el lado de silicio monocristalino de la heterointerfaz entre el silicio amorfizado/cristalino, en el que las tiras resultan, cada una, de al menos un paso de un haz para la implantación de iones o la irradiación de electrones y el metamaterial MTM se deriva de silicio cristalino por medio de una implantación por haz de iones o una irradiación por haz de electrones.

3. Convertidor fotovoltaico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la forma de la capa de silicio amorfizado es la de una sucesión de una ondulación continua o discontinua o una sucesión de formas de trapecio continuas o discontinuas.

4. Convertidor fotovoltaico de acuerdo con la reivindicación anterior, **caracterizado porque** la segunda capa (media) de material de silicio amorfo está desplazada con respecto a la primera y la tercera capas.

5. Convertidor fotovoltaico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el metamaterial MTM es un silicio cristalino fuertemente dopado <c-Si>.

6. Convertidor fotovoltaico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** comprende al menos dos capas o campos a escala nanométrica de metamaterial semiconductor continuo o discontinuo, estando al menos uno de los cuales enterrado dentro del espesor de dicho material en la parte emisora

o de base e íntimamente asociado con un área o región continua o discontinua respectiva de material semiconductor amorfizado, que comprende el mismo tipo de impurezas dopantes y que forma, con la capa o el campo de metamaterial MTM asociado respectivamente, una subestructura, en el que las al menos dos capas o campos a escala nanométrica de metamaterial semiconductor continuo o discontinuo se forman simultáneamente o en ciclos de producción sucesivos.

7. Un método para producir un convertidor fotovoltaico de acuerdo con la reivindicación 1, siendo el convertidor fotovoltaico capaz de absorber y explotar fotones de alta energía o energéticos, en particular fotones UV y visibles, en el que el método comprende las etapas de:

- a) proporcionar o producir un material fotovoltaico de tipo p o de tipo n convencional hecho de uno o varios materiales semiconductores cristalinos inorgánicos que tiene una superficie superior destinada a estar expuesta a radiación fotónica, que tiene una unión PN integrada que delimita una parte emisora y una parte de base y que comprende al menos un área o región específicamente diseñada, tratada o adaptada para absorber fotones de alta energía o energéticos, localizada adyacente a o cerca de al menos una heterointerfaz entre silicio amorfizado y cristalino (a-Si y c-Si);

- b) generar o mantener defectos estructurales dentro de un área de tipo n de dicha parte emisora del material que consiste en lagunas dobles capaces de funcionar como centros de generación secundarios de baja energía agrupados en una o varias formaciones nanométricas y persistentes en proceso de producción y condiciones de conversión fotovoltaica;

- c) introducir, en particular difundir o implantar, impurezas dopantes de tipo n, tales como fósforo o arsénico, de acuerdo con una intensidad, energía y perfil determinados para poner las lagunas dobles en un estado de carga eléctrica en el que están saturadas con electrones enlazados débilmente y para proporcionar una excelente conducción dentro de dicha o cada región de impurezas implantadas, tal como conducción de tipo metálico en material semiconductor altamente dopado,

en el que las etapas b) y c) se realizan de tal manera que dan como resultado la creación de al menos un campo o región de metamaterial basado en semiconductores, tal como una región de transición de la heterointerfaz,

- d) proporcionar un campo eléctrico integrado o un medio para aplicar un campo eléctrico que abarque o se extienda sobre dicho o cada campo o región de metamaterial y muestre una intensidad suficiente para retirar y alejar dichos electrones secundarios liberados de sus sitios iniciales dentro del área o región de metamaterial en cuestión, a una velocidad suficiente para evitar su retorno a dicha región o campo de metamaterial,

- e) proporcionar una sucesión de salientes a un nivel de material semiconductor amorfo conformado por un proceso de inserción, depósito o implantación de iones o electrones en un relieve hecho de una sucesión de salientes separados por huecos o discontinuidades en forma de una o varias capas continuas o discontinuas,

en el que dicho método también comprende, preferentemente después de la etapa c), y/o después de e) al menos una etapa de tratamiento térmico del material de duración e intensidad determinadas, con un balance energético total del tratamiento térmico para una capa de metamaterial plana a escala nanométrica continua enterrada dentro de la parte emisora del material fotovoltaico que es aproximadamente equivalente al de un recocido térmico continuo de una duración de aproximadamente 30 a 50 minutos, preferentemente de aproximadamente 40 minutos, a una temperatura comprendida entre 450 °C y 600 °C, preferentemente de aproximadamente 500 °C,

en el que el al menos un campo o región de metamaterial se crea, como resultado de las etapas b) y c) anteriores, en un área ubicada continua o próxima al área o región de absorción para los fotones energéticos de la radiación fotónica que impacta en dicho material fotovoltaico, al menos dentro del intervalo de termalización de los electrones primarios liberados directamente por dichos fotones energéticos y que colisionan con los centros de generación de baja energía de metamaterial que liberan electrones de generación secundarios en un procesamiento de múltiples etapas, cuyo orden depende de la energía restante retenida por los electrones primarios en el momento de su colisión de generación,

en el que el ajuste de los parámetros de las etapas sucesivas de producción operacional es tal que el espesor de la o cada capa de material semiconductor amorfo plano está comprendido entre 10 nm y 50 nm y que el ancho del o de los campos o regiones del material asociado respectivamente, en forma de capas continuas o discontinuas, es menor que 10 nm, teniendo el material semiconductor preferentemente un espesor comprendido entre 5 μm y 500 μm, preferentemente entre 10 μm y 280 μm, y,

en el que las etapas b) y c) se realizan además de modo que, por un lado, la densidad de lagunas dobles dentro del o de los campos o regiones de metamaterial es mayor que  $10^{18}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup>, preferentemente mayor que  $10^{19}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup>, de la manera más preferente mayor que  $10^{20}$  lagunas dobles/cm<sup>3</sup> y, por otro lado, la conducción entre el metamaterial y el material de tipo n adyacente respectivamente tiene una constante de tiempo que está en el máximo de la misma magnitud que la constante de tiempo de generación de portadores secundarios.

8. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** los iones de silicio se usan para operar una amorfización enterrada en la estructura de silicio mediante la autoimplantación de silicio.
- 5 9. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** los iones usados para la implantación son iones de silicio o fósforo.
10. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** mediante una implantación por haz de iones o una irradiación por haz de electrones, el metamaterial MTM se inserta en el lado de silicio monocristalino de la heterointerfaz (a-Si/c-Si) entre el silicio amorfizado y cristalino.
- 10 11. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** la energía de implantación de iones varía de 10 a 300 keV y la dosis de iones está comprendida entre  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  y  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  con un perfil fuertemente dopado.
- 15 12. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** consiste en amorfizar al menos áreas o regiones pequeñas y repetitivas del material semiconductor para crear áreas o regiones de absorción correspondientes para los fotones energéticos, y después preservar los defectos estructurales generados durante la amorfización.
- 20 13. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** comprende formar una capa o campo de metamaterial MTM semiconductor continuo o discontinuo asociado íntimamente con un área o región continua o discontinua de material semiconductor amorfizado, ubicada en o cerca de la superficie superior del material semiconductor, formando el campo y la región conjuntamente una subestructura frontal de acuerdo con un patrón de barrido.
- 25 14. Método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado porque** después del proceso de inserción mediante implantación por haz de iones o irradiación por haz de electrones, se produce un tratamiento térmico que consiste en una etapa inicial de recocido continuo, seguida de al menos un ciclo de secuencias de recocido discontinuo sucesivas, **porque** la velocidad de recocido debe limitarse para evitar defectos estructurales, **porque** la baja temperatura se selecciona para estabilizar la epitaxia en estado sólido, por ejemplo, aproximadamente 100 °C, mientras que la alta temperatura es aproximadamente 500 °C y **porque** cada exposición a altas temperaturas dura, por ejemplo, de 2 a 5 minutos con un tiempo de recuperación de, por ejemplo, 1 a 4 minutos, que puede reducirse por medio de gradientes de temperatura apropiados y **porque** son necesarios de tres a seis ciclos usando, por ejemplo, un recocido por láser o un recocido RTA/RTP combinado con depósito de capa epitaxial para adaptar la geometría en términos de disposición, distancias, restricciones de termalización y optimización de la constante de tiempo.
- 30 35

FIG.1

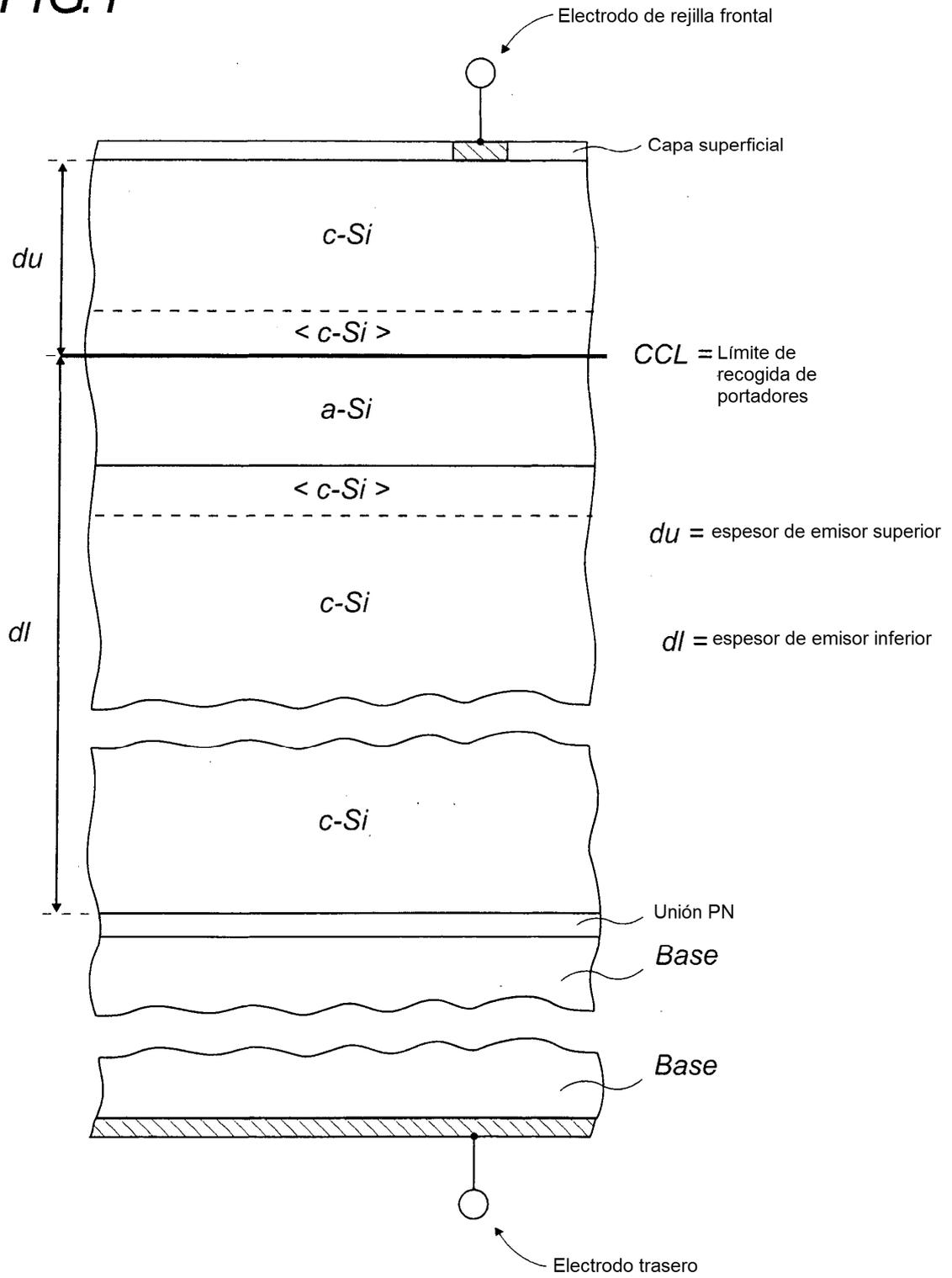


FIG.2

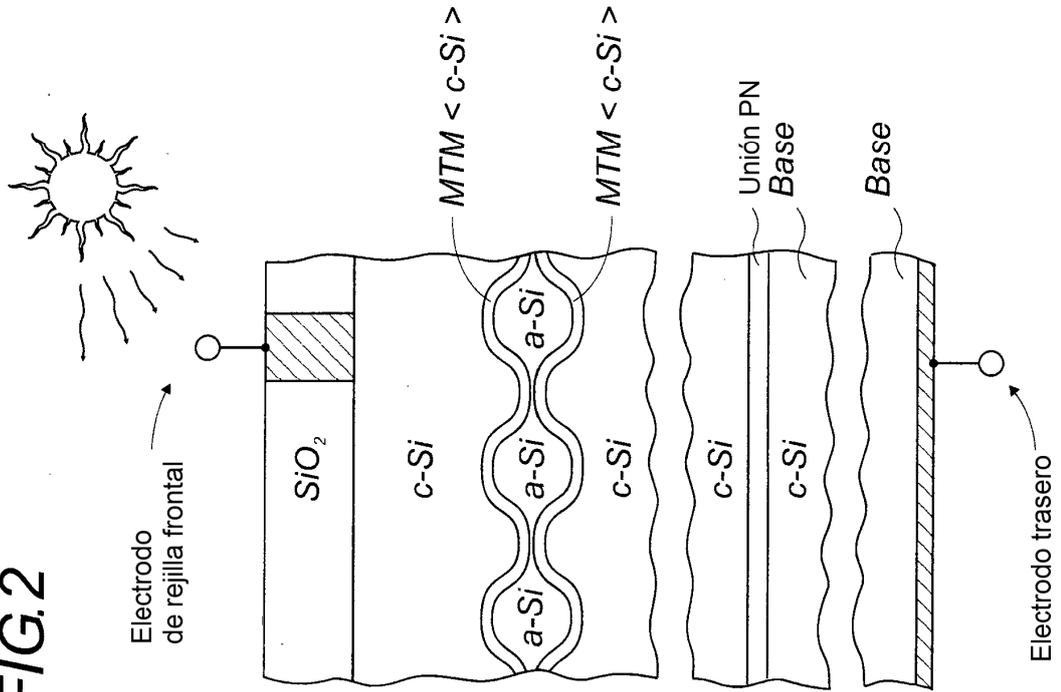


FIG.3

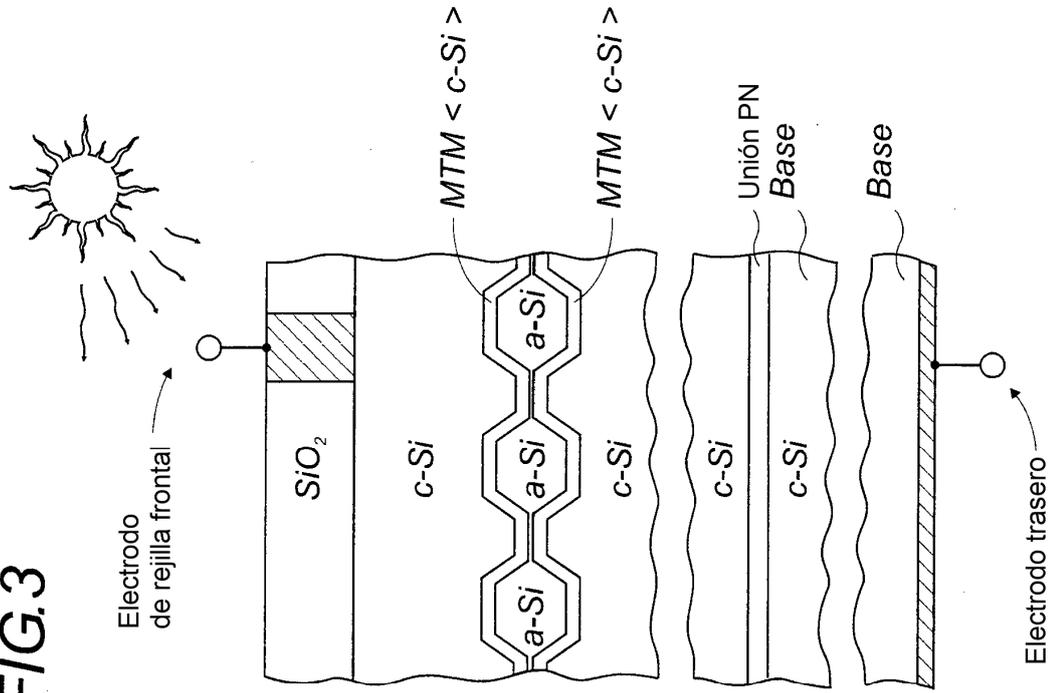


FIG.4

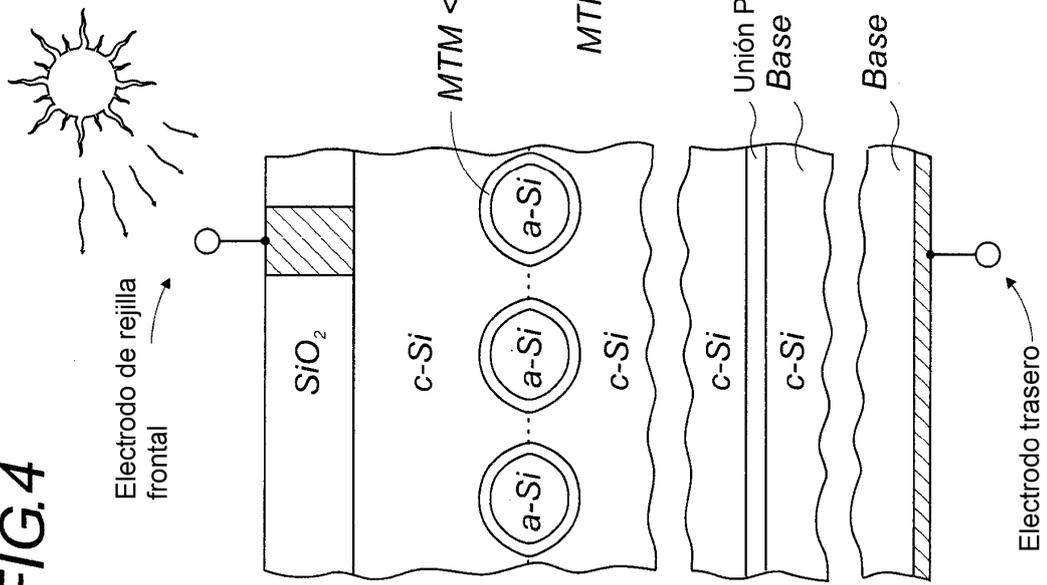


FIG.5

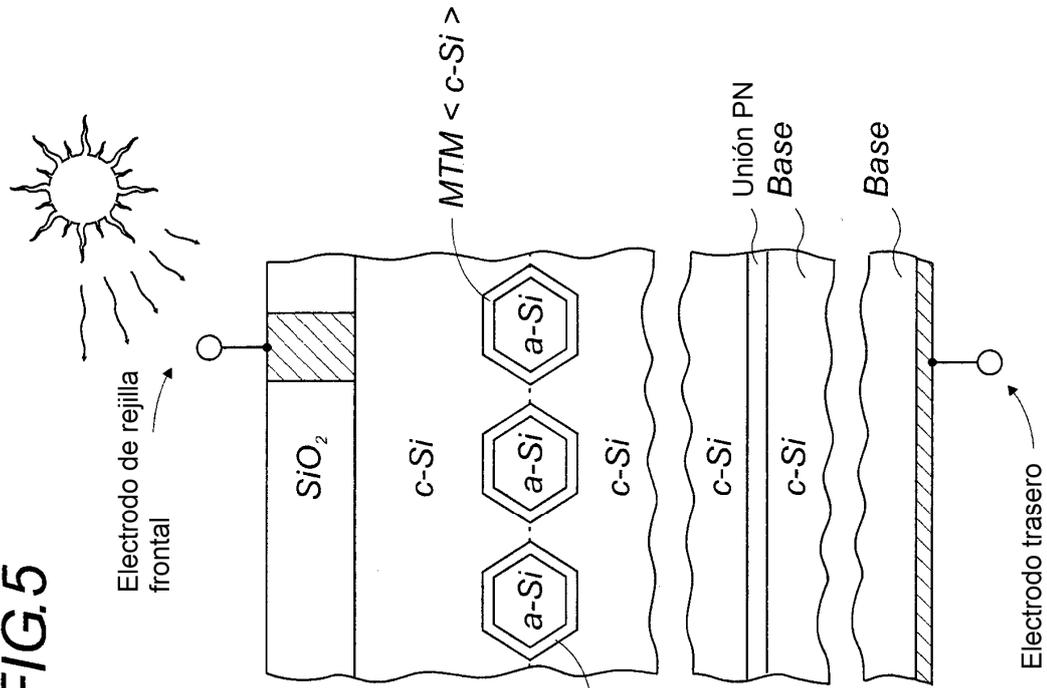


FIG.6

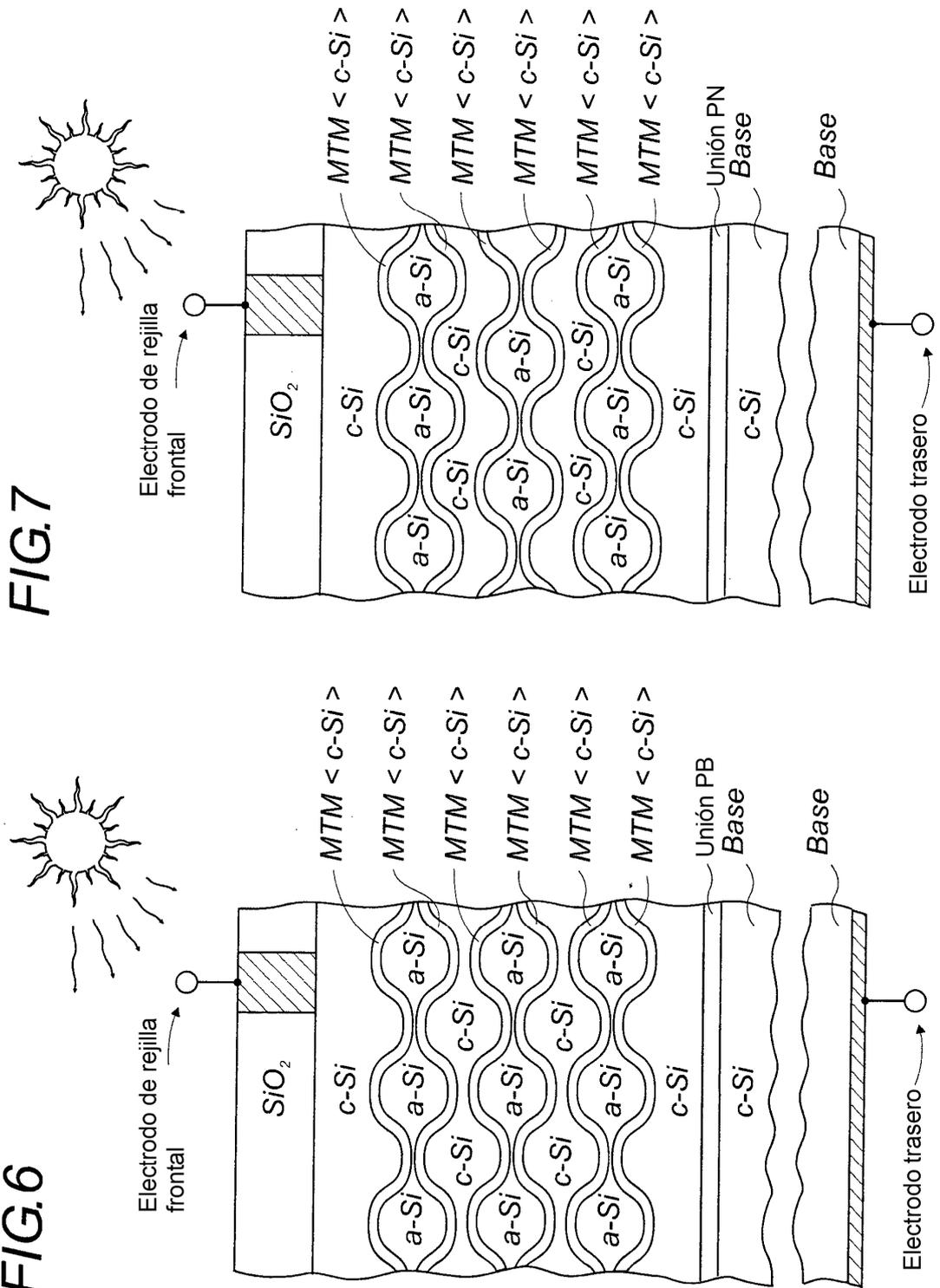


FIG.7

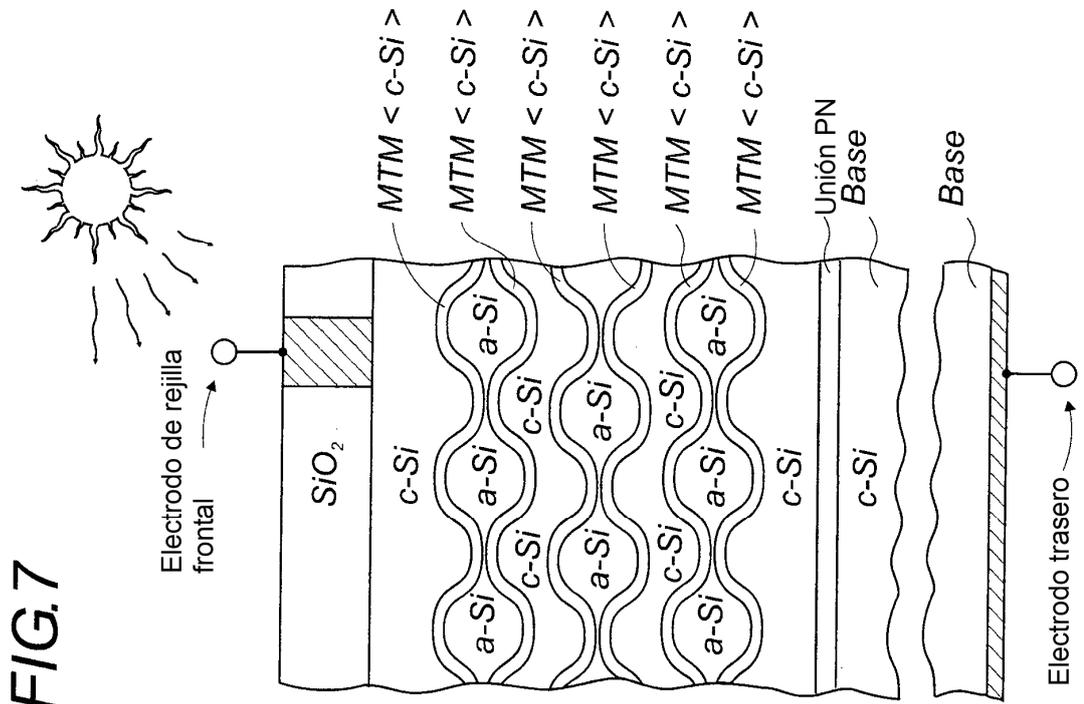


FIG.8

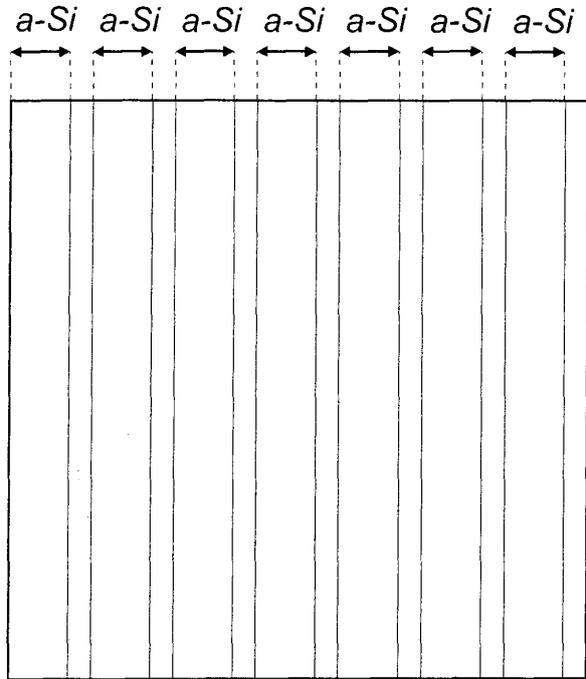


FIG.9

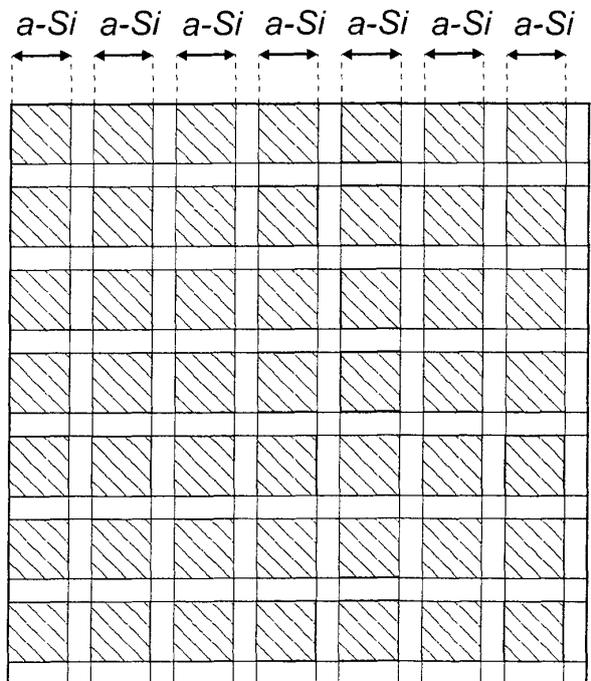


FIG.10

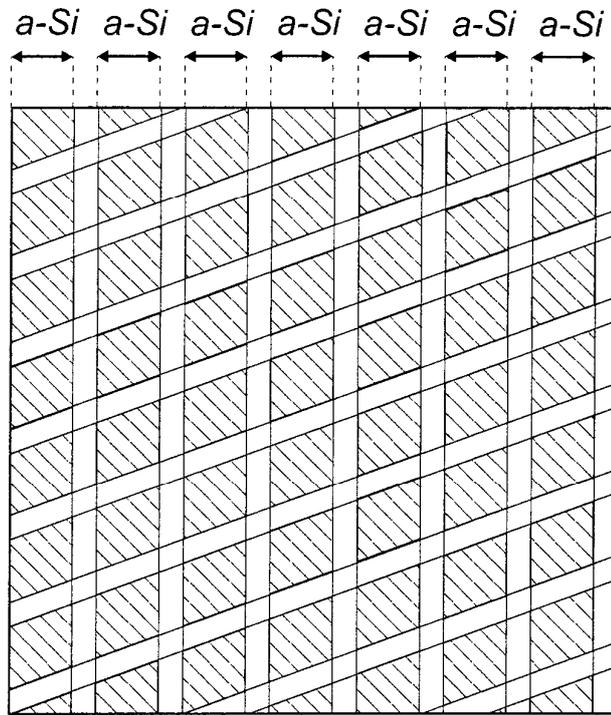


FIG.11

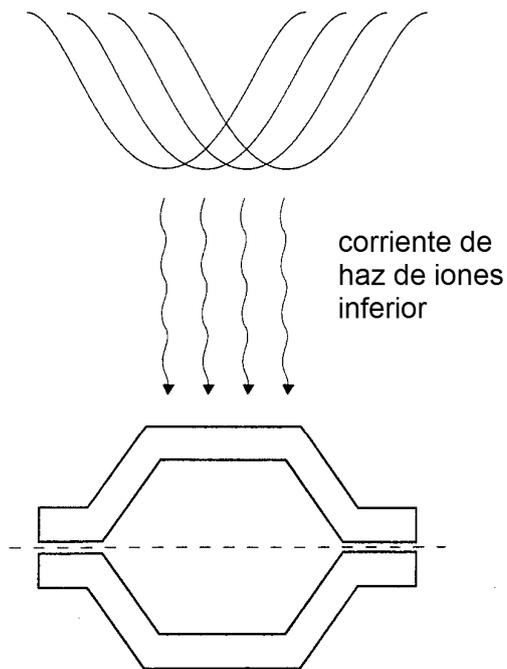


FIG.12

