

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 011 483**

51 Int. Cl.:

H01L 31/0725 (2012.01)

H01L 31/0747 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.12.2021** **PCT/FR2021/052295**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.06.2022** **WO22129757**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.12.2021** **E 21848274 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2024** **EP 4264677**

54 Título: **Estructura simplificada de células solares en tándem con dos terminales que tienen un material de unión de óxido transparente conductor**

30 Prioridad:

18.12.2020 FR 2013592

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.04.2025

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (50.00%)
25 Rue Leblanc, Bat Le Ponant
75015 Paris, FR y
3SUN S.R.L. (50.00%)**

72 Inventor/es:

**PUAUD, APOLLINE;
MATHERON, MURIEL y
MUNOZ, MARIA-DELFINA**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 3 011 483 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

Estructura simplificada de células solares en tándem con dos terminales que tienen un material de unión de óxido transparente conductor

Campo técnico

- 5 La presente invención se refiere al campo de los dispositivos fotovoltaicos, en particular de las células fotovoltaicas de tipo tándem de perovskita sobre heterojunción de silicio con 2 terminales.

La invención se refiere a una estructura simplificada que tiene propiedades (foto)eléctricas comparables a las de una estructura en tándem convencional.

Estado de la técnica anterior

- 10 Las células solares permiten convertir una parte del rango espectral de la radiación solar en energía. Para aumentar el rendimiento de esta conversión, es posible fabricar estructuras de arquitectura en tándem que comprendan dos subconjuntos (es decir, una célula inferior y una célula superior), que absorban en los diferentes rangos espectrales.

- 15 Son posibles numerosas configuraciones. La célula 10 inferior puede ser, por ejemplo, una célula de perovskita, de CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$), o incluso puede tratarse de una célula a base de silicio, por ejemplo, con homojunción o con heterojunción de silicio (HET-Si o SHJ para «*Silicon HeteroJunction solar cell*»), de tipo PERC («*Passivated Emitter and Rear Contact*») o TopCon («*Tunnel Oxide Passivated Contact*») o incluso una célula PERT tipo N con doble difusión de fósforo.

- 20 La célula 30 superior puede ser, por ejemplo, una célula de perovskita, orgánica o multiunión (MJSC) a base de materiales III-V (AlGaAs , GaInP , GaAs).

Las dos subcélulas pueden ser apiladas una sobre la otra según un esquema NIP/NIP (Figura 1A) o PIN/PIN (Figura 1B).

- 25 A título ilustrativo, en el caso de las estructuras en tándem de tipo perovskita sobre heterojunción de silicio con 2 terminales, la estructura de tipo NIP comprende convencionalmente desde la cara posterior hacia la cara delantera (Figura 1A):

- una célula 10 inferior que comprende una capa 11 de silicio amorfo dopado con N, un sustrato 12 de silicio cristalino dispuesto entre dos capas 13, 14 intrínsecas de silicio amorfo, una capa 15 de silicio amorfo dopado con P, - una zona 20 de recombinación,

- 30 - una célula 30 superior que comprende: una capa 33 de tipo N, una capa 31 activa hecha de un material de perovskita, una capa 32 de tipo P.

Los electrodos inferior 40 y superior 50 así como los contactos 60, 70 eléctricos llegan a completar la estructura.

En el caso de una estructura de tipo PIN, las capas de tipo P y N están invertidas (Figura 1B). Un ejemplo de una tal estructura fotovoltaica en tándem se describe en la Figura 1 del documento CN 111554764 A.

- 35 Cada subcélula 10, 30 de la estructura en tándem incluye capas las cuales permiten separar y seleccionar las cargas según su polaridad.

- 40 La zona 20 de recombinación entre las dos subcélulas se denomina «unión de recombinación» ya que permite que las cargas se recombinen. Generalmente, está formada por una capa de óxido conductor transparente o de una unión de túnel (dos capas muy dopadas, una de tipo N y otra de tipo P). Esta zona de recombinación permite la conexión en serie de las subcélulas y, por tanto, la suma de sus tensiones. Debe conducir a la recombinación de los electrones generados en la célula 30 superior y los agujeros generados en la célula 10 inferior para un tándem de estructura NIP (Figura 1A) y lo contrario para una estructura PIN (Figura 1B).

Sin embargo, estas estructuras en tándem requieren numerosas etapas para ser fabricadas, lo cual aumenta los costes de fabricación y el número de capas y de interfaces susceptibles de reducir el rendimiento (añadiendo resistencia en serie, resistencias de contacto, de recombinaciones no deseadas, etc.).

- 45 Se ha demostrado que una estructura en tándem de tipo NIP que comprende una célula superior de perovskita y una célula inferior a base de silicio cristalino y poli-Si puede funcionar posicionando directamente la célula superior sobre la célula inferior (Shen y otros. «*In situ recombination junction between p-Si and TiO₂ enables high-efficiency monolithic perovskite/Si tandem cells*», *Science Advances*, 2018; 4: eaau9711). Más particularmente, se deposita una capa de TiO_2 de tipo N mediante ALD directamente sobre el silicio P dopado de la célula inferior. Luego, se depositan una capa de perovskita y una capa de tipo P en PTAA. El
- 50

funcionamiento de esta estructura se hace posible gracias a la baja resistividad de contacto entre la capa ALD de TiO₂ y el silicio P dopado de la célula inferior.

De manera similar, se ha fabricado una estructura en tándem de perovskita sobre homojunción de silicio depositando directamente la capa de SnO₂ de tipo N de la célula superior de perovskita sobre la capa de tipo P de la célula inferior (Zheng y otros. «*Large area efficient interface layer free monolithic perovskite/homo-junction-silicon tandem solar cell over 20 % efficiency*», Energy Environ. Sci., 2018, 11, 2432-2443).

Sin embargo, hasta la fecha, no existe una estructura en tándem de perovskita simplificada sobre heterojunción de silicio, a base de silicio amorfo y de silicio cristalino. En efecto, la heterojunción de silicio amorfo/silicio cristalino es muy sensible a la temperatura utilizada durante el procedimiento. Además, la deposición de la capa activa de perovskita se realiza generalmente por medio líquido y, por lo tanto, depende en gran medida del sustrato sobre el cual se deposita, así como de las etapas de fabricación implementadas, lo cual hace que sea muy difícil realizar una modificación de su arquitectura.

Exposición de la invención

Un objetivo de la presente invención es proponer una estructura en tándem de perovskita sobre heterojunción de silicio a base de silicio amorfo y de silicio cristalino con dos terminales que presente buenas propiedades eléctricas y que sea más sencilla y menos costosa de fabricar.

Para ello, la presente invención propone una estructura en tándem con 2 terminales que comprenda las características de la reivindicación 1.

La invención se distingue fundamentalmente de la técnica anterior por la utilización de un material de unión de óxido transparente conductor (OTC o TCO para «*Transparent Conductive Oxides*») el cual desempeña no sólo la función de unión de recombinación sino también la de selección de cargas (contacto de tipo N) para una de las células en la estructura en tándem. Por tanto, la estructura en tándem funciona, incluso si una de las dos subcélulas está desprovista de una capa de tipo N; la función de esta capa de tipo N es entonces garantizada por la propia capa de óxido transparente conductor.

Esta estructura simplificada es más sencilla de fabricar con respecto a las estructuras solares en tándem convencionales. La reducción del número de etapas del procedimiento de fabricación conduce a una reducción de los costes de fabricación.

Según una primera variante de realización que no forma parte de la invención, la estructura en tándem es de tipo NIP. La segunda célula está desprovista de la capa de tipo N. En otras palabras, la segunda célula está formada por la capa activa de un material de perovskita y la segunda capa de tipo P. La capa activa de un material de perovskita está entonces en contacto directo con la capa de unión de TCO la cual desempeña, por tanto, la función de capa de tipo N para la estructura en tándem de tipo NIP.

Según esta primera variante de realización, la estructura puede comprender desde la cara posterior hacia la cara delantera:

- la primera célula solar de heterojunción de silicio a base de silicio amorfo y de silicio cristalino que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera:

- una capa N de silicio amorfo dopado, la primera capa intrínseca de silicio amorfo, el sustrato de silicio cristalino, la segunda capa intrínseca de silicio amorfo, y la primera capa de tipo P de silicio amorfo dopado,

- la capa de unión de TCO de tipo N,

- comprendiendo la segunda célula solar de tipo perovskita desde la capa de unión hacia la cara delantera: la capa activa de un material de perovskita y la segunda capa de tipo P, de preferencia de PTAA.

Una tal arquitectura presenta diversas ventajas: la interfaz (p)a-Si:H/TCO presenta buenas propiedades de recombinación y como el apilamiento de la célula inferior es homogéneo, la deposición de la capa de perovskita sobre el TCO también es homogénea.

Según la invención, la estructura en tándem es de tipo PIN. La primera célula está desprovista de una capa de tipo N: la primera célula está formada por un sustrato de silicio cristalino, recubierto a cada lado por una capa intrínseca de silicio amorfo, y la capa de tipo P (la capa tipo P es la primera capa del apilamiento comenzando desde la cara posterior). No existe una capa de tipo N entre el sustrato de silicio cristalino y la capa de unión de TCO: la capa de unión está en contacto directo con la segunda capa intrínseca de silicio amorfo.

Según esta segunda variante de realización, la estructura puede comprender desde la cara posterior hacia la cara delantera:

- la primera célula solar de heterojunción de silicio a base de silicio amorfo y de silicio cristalino que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera: la primera capa de tipo P de silicio amorfo dopado, la primera capa intrínseca de silicio amorfo, el sustrato de silicio cristalino, la segunda capa intrínseca de silicio amorfo, - la capa de unión de TCO de tipo N,

- 5 - comprendiendo la segunda célula solar de tipo perovskita desde la capa de unión hacia la cara delantera: una capa de P, de preferencia de PTAA o de TFB, la capa activa de un material de perovskita y una capa de tipo N, de preferencia de SnO_2 o formada por una bicapa PCBM/ SnO_2 o PCBM/BCP.

La célula superior de tipo perovskita es, en este caso, una célula convencional (es decir, la capa de perovskita se deposita sobre la capa de tipo P). Una tal célula es conocida y puede realizarse fácilmente con procedimientos convencionales.

10 Ventajosamente, la capa de unión tiene un espesor de 2 a 30 nm.

Ventajosamente, la capa de unión tiene una conductividad superior a 10 S.cm^{-1} .

Según una variante ventajosa de realización, la capa de unión está de ITO.

15 Según otra variante ventajosa de realización, la capa de unión está de AZO, ZnO, IWO, IZO, IZrO o SnO_{2-x} con x superior a 0 y estrictamente inferior a 2.

Ventajosamente, el material de perovskita tiene por fórmula $\text{Cs}_x\text{FA}_{1-x}\text{Pb}(\text{I}_{1-y}\text{Br}_y)_3$ (con $x < 0,20$; $0 < y < 1$).

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán del complemento de descripción que sigue.

Es evidente que este complemento de descripción se da únicamente a título ilustrativo del objeto de la invención y en ningún caso debe interpretarse como una limitación de este objeto.

20 Breve descripción de los dibujos

La presente invención se comprenderá mejor con la lectura de la descripción de ejemplos de realización dados simplemente a título indicativo y en modo alguno limitativo haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

25 La Figura 1A, ya comentada en la técnica anterior, representa, de manera esquemática y en sección, una estructura en tándem de tipo NIP con dos terminales.

La Figura 1B, ya comentada en la técnica anterior, representa, de manera esquemática y en sección, una estructura en tándem de tipo PIN con dos terminales.

La Figura 2A representa, de manera esquemática y en sección, una estructura en tándem simplificada de tipo NIP con dos terminales, según un modo de realización que no forma parte de la invención.

30 La Figura 2B representa, de manera esquemática y en sección, una estructura en tándem simplificada de tipo PIN con dos terminales, según la invención.

35 Las Figuras 3A, 3B y 3C son gráficos que representan el EQE y el valor '1-Rtot' en función de la longitud de onda (correspondiendo Rtot a la reflexión total del apilamiento de la célula (sin la metalización en la cara delantera), obtenidos por simulación óptica para las estructuras en tándem con una unión de ITO delgada (12 nm), de tipo PIN o NIP, y que tengan, respectivamente, ya sea dos caras pulidas, o una cara posterior texturizada o las dos caras texturizadas; 'ref' correspondan a las estructuras en tándem convencionales y 'simp' a las estructuras en tándem simplificadas, según los modos de realización particulares de la invención; las estructuras en tándem simplificadas se diferencian de las estructuras convencionales por la ausencia de una capa de polaridad N en una de las subcélulas.

40 Las diferentes partes representadas en las figuras no están necesariamente según una escala uniforme, para hacer las figuras más legibles.

En la descripción de más adelante, los términos los cuales dependen de la orientación, tales como «arriba» / «superior», «abajo» / «inferior», etc. de una estructura se aplican considerando que el dispositivo en tándem y la estructura de prueba están orientados de la manera ilustrada en las figuras.

45 Exposición detallada de modos de realización específicos

Primero se hará referencia a las Figuras 2A y 2B las cuales representan estructuras 100 en tándem simplificadas.

Las estructuras 100 en tándem comprenden desde la cara posterior hacia la cara delantera (es decir, la cara destinada para recibir la radiación luminosa representada por las flechas) un apilamiento multicapa que forma:

- una primera célula 110 (o célula inferior para «*bottom cell*») con heterojunción de silicio (HET-Si o SHJ para «*Silicon HeteroJunction solar cell*») a base de silicio amorfo y de silicio cristalino, posicionada en la cara posterior,

5 - una capa 120 de unión de óxido transparente conductor (también denominada capa de unión y de recombinación), que sirve para contactar eléctricamente las dos subcélulas de la estructura 100 en tándem y que permita que las cargas se recombinen,

- una segunda célula 130 (o célula superior para «*top cell*») de tipo perovskita posicionada en la cara delantera.

La estructura 100 en tándem puede ser una estructura de tipo NIP (Figura 2A) o de tipo PIN (Figura 2B).

10 Más particularmente, la estructura de tipo NIP (o de emisor estándar) comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera (Figura 2A):

15 - una primera célula 110 solar de heterojunción de silicio; a base de silicio amorfo y de silicio cristalino; y que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera: una capa de silicio amorfo dopado con N (también denominada capa 111 de silicio amorfo hidrogenado dopado con N y también indicada (n) a-Si :H), un sustrato 112 de silicio cristalino dopado (típicamente un sustrato de silicio cristalino dopado con n también indicado c-Si (n)) dispuesto entre dos capas 113, 114 intrínsecas de silicio amorfo (también denominadas capas de (i) a-Si :H o de silicio amorfo hidrogenado intrínseco), y una capa 115 de silicio amorfo dopado con P (también indicada (p) a-Si :H para silicio amorfo hidrogenado dopado con p),

- una capa 120 de unión de óxido transparente conductor de tipo N (también denominado por el acrónimo anglosajón TCO),

20 - una segunda célula 130 solar de tipo perovskita que comprende, desde la capa 120 de unión hacia la cara delantera, una capa 131 activa de un material de perovskita y una capa 132 de tipo P.

Para esta estructura de tipo NIP, la capa 131 activa de la segunda célula 130 está directamente en contacto con la capa 120 de unión, por lo tanto, no hay ninguna capa interpuesta entre las dos.

25 Más particularmente, la estructura de tipo PIN (o de emisor invertido) comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera (Figura 2B) un apilamiento multicapa que forma:

- una primera célula 110 solar con heterojunción de silicio a base de silicio amorfo y de silicio cristalino que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera: una capa 115 de silicio amorfo dopado con P ((p) a-Si :H), una primera capa 113 intrínseca de silicio amorfo ((i) a-Si :H), un sustrato 112 de silicio cristalino dopado de tipo N (sustrato c-Si (n)) y una segunda capa 114 intrínseca de silicio amorfo ((i) a-Si :H),

30 - una capa 120 de unión de TCO

- una segunda célula 130 solar de tipo perovskita que comprende desde la capa de unión hacia la cara delantera: una capa 132 de tipo P, una capa 131 activa de un material de perovskita, una capa 133 de tipo N.

35 Para esta estructura de tipo PIN, la segunda capa 114 intrínseca de silicio amorfo de la primera célula 110 está directamente en contacto con la capa 120 de unión; por lo tanto, no hay ninguna capa interpuesta entre los dos.

En estas diferentes variantes de realización, la capa 120 de unión de TCO puede tener un espesor de 2 a 30 nm y de preferencia entre 2 nm y 15 nm.

La conductividad de la capa 120 de unión de TCO es, por ejemplo, superior a 10 S.cm^{-1} .

40 La capa 120 de unión puede ser de óxido de indio-estaño (ITO), óxido de zinc (ZnO), óxido de zinc dopado con aluminio (AZO), óxido de indio y tungsteno (IWO), óxido de indio y zinc (IZO), óxido de indio dopado con circonio (IZrO) o de dióxido de estaño (SnO_{2x} con $0 < x < 2$).

La banda prohibida de la capa 120 de unión de TCO va desde 2,8 hasta 4 eV.

La capa 120 de unión de ITO tiene una banda de conducción de -4,2 a -5,2 eV. Para los otros óxidos dopados mencionados anteriormente, la banda de conducción va desde -4 hasta -5,2 eV.

45 De preferencia, la capa 120 de unión es de ITO.

El sustrato 12 de silicio de la célula inferior puede pulirse o texturizarse (por ejemplo, puede tratarse de una texturización en forma de pirámides de 2 μm). Las capas amorfas de la célula inferior que tienen un espesor de unos pocos nanómetros adoptarán la forma de la texturización del sustrato.

Las tasas de dopaje de tipo p/n de las capas 111 y 115 están, por ejemplo, entre 10^{18} y $10^{19} / \text{cm}^3$.

La capa 133 de tipo N de la segunda célula de perovskita se denomina «capa de transporte de electrones» (o EIL para «*Electron Injection Layer*» o ETL para «*Electron Transport Layer*»).

La capa 133 de tipo N es, por ejemplo, un óxido metálico tal como el óxido de zinc (ZnO), el óxido de zinc dopado con aluminio también llamado AZO (ZnO :Al), el óxido de titanio (TiO₂) o el óxido de estaño (SnO₂). También se puede tratar de un apilamiento de [6,6]-fenil-C₆₁-butanoato de metilo y de SnO₂ (PCBM/SnO₂) o de [6,6]-fenil-C₆₁-butanoato de metilo y de batocuproína (PCBM/BCP).

El material de perovskita de la capa 131 activa de la segunda célula 130 solar tiene la fórmula general ABX₃ con A representando uno o más cationes orgánicos monovalentes, tales como el amonio, como el metilamonio o el formamidinio, o incluso un catión metálico monovalente, como el cesio o el rubidio; representando B un catión metálico divalente como Pb, Sn, Ag o una de sus mezclas; y representando X uno o más aniones halógenos.

Más particularmente, el material de perovskita puede tener por fórmula particular H₂NCHNH₂PbX₃ o CH₃NH₃PbX₃ siendo X un halógeno. Se puede tratar, por ejemplo, de yoduro de plomo metilamonio CH₃NH₃PbI₃. De preferencia, el material de perovskita tiene por fórmula Cs_xFA_{1-x}Pb(I_{1-y}Br_y)₃.

La capa 132 de tipo P de la segunda célula 130 también se denomina «capa de transporte de agujero» (o HTL para «*Hole Transport Layer*»).

La capa 132 de tipo P es, por ejemplo, un compuesto orgánico como el Poli(3,4-etilendioxitiofeno)Poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS), el [poli(bis 4-fenil){2,4,6-trimetilfenil}amina]] (PTAA), el [Poli(N,N'-bis(4-butilfenil)-N,N'-bis(fenil)-bencidina] (Poli-TPD), el 2,2',7,7'-Tétrakis[N,N-di(4-metoxifenil)amino]-9,9'-espirobifluoreno (espiro-OMeTAD), el N₄,N₄'-bis(4-((3-etiloxetano-3-il)metoxi)hexil)fenil)-N₄,N₄'-difenil-[1,1'-bifenil]-4,4'-diamina (OTPD), el poli[(9,9-dioctilfluorenil-2,7-diil)-co-(4,4'-(N-(4-sec-butilfenil)difenilamina))] (TFB) o el pireno, o incluso un óxido metálico tal como un óxido de molibdeno, un óxido de vanadio o un óxido de tungsteno. También podría obtenerse a partir de fosfonato(s), silanos o ácidos carboxílicos.

La estructura 100 en tándem también puede comprender:

- un primer electrodo 140 (electrodo inferior) dispuesto en la cara posterior; el electrodo 140 inferior puede ser, ventajosamente, opaco o de transparencia limitada, por ejemplo, un óxido transparente conductor tal como, especialmente ITO, IOH (óxido de indio hidrogenado), o AZO,

- un segundo electrodo 150 (electrodo superior) dispuesto en la cara delantera del dispositivo; el segundo electrodo es eléctricamente conductor y ópticamente transparente, de manera que deje pasar los fotones hasta la capa 131 activa de la célula 130 superior. Este electrodo 150 puede ser de óxido transparente conductor, típicamente de óxido de indio-estaño (ITO) o de óxido de zinc dopado con aluminio (ZnO :Al), o incluso puede estar formado de un polímero transparente conductor que comprende nanocables de plata, por ejemplo,

- reanudaciones 160 de contacto en la cara posterior y reanudaciones 170 de contacto en la cara delantera; las reanudaciones de contacto pueden ser, por ejemplo, de oro, de aluminio o de plata (depositadas, por ejemplo, por evaporación, o impresos mediante serigrafía, impresión por chorro de tinta, etc.).

Ejemplos ilustrativos y no limitativos de un modo de realización:

Se realizaron simulaciones ópticas de diferentes estructuras utilizando el software CROWM, teniendo en cuenta los índices ópticos de las capas, su espesor y el estado de superficie (totalmente plana, texturizada, etc.). Estas simulaciones se efectúan entre 310 y 1200 nm con el espectro solar AM1.5. Los índices ópticos se extrajeron mediante elipsometría a partir de las capas experimentales.

La Tabla 1 clasifica los espesores (nm) de las capas simuladas para las arquitecturas de tipo NIP.

	Estructura de referencia NIP	Estructura simplificada NIP
Cara delantera de ITO	180	180
PTAA	30	30
Perovskita	250 y 415	250 y 415
SnO ₂	30	-
Capa de unión de ITO rec.	12	12
a-Si:H (p)	19	19

a-Si:H (i)	5	5
c-Si	280000	280000
a-Si:H (i)	5	5
a-Si:H (n)	8	8
Cara posterior de ITO	70	70
Ag	200	200

La Tabla 2 clasifica los espesores (nm) de las capas simuladas para las arquitecturas de tipo PIN.

	Estructura de referencia PIN	Estructura simplificada PIN
Cara delantera de ITO	180	180
SnO ₂	30	30
Capa activa de perovskita	250 y 415	250 y 415
PTAA	30	30
Capa de unión en ITO rec.	12	12
a-Si:H (n)	8	-
a-Si:H (i)	5	5
c-Si	280000	280000
a-Si:H (i)	5	5
a-Si:H (p)	19	19
Cara posterior de ITO	70	70
Ag	200	200

- 5 La perovskita utilizada en las simulaciones es de tipo $\text{Cs}_x\text{FA}_{1-x}\text{Pb}(\text{I}_{1-y}\text{Br}_y)_3$ (con $x < 0,20$; $0 < y < 1$), se utilizaron dos espesores diferentes para obtener menos diferencia de corriente entre las dos subcélulas cuando se modifica el estado de superficie.

Las Figuras 3A, 3B y 3C representan los valores de EQE y $1-R_{\text{tot}}$ obtenidos mediante simulaciones ópticas para las diferentes estructuras en tándem de las tablas 1 y 2.

- 10 Los resultados presentados corresponden a estructuras en tándem cuya capa activa de la célula superior es un material de perovskita de 250 nm de espesor cuando la cara delantera está pulida y de 415 nm de espesor cuando está texturizada.

- 15 Este estudio mediante simulación óptica demuestra que las estructuras NIP y PIN en tándem simplificadas con una unión de ITO fina son viables independientemente de la texturización. En efecto, estas estructuras simplificadas presentan ópticamente muy pocas diferencias con las estructuras completas convencionales y tienen el mismo potencial óptico.

Además, la siguiente tabla 3 da los valores de J_{sc} y R_{tot} obtenidos mediante simulaciones ópticas, PCE estimados para $\text{FF} = 75\%$ y $V_{\text{oc}}=1.8$ V. Esta tabla muestra que las corrientes de cortocircuito resultantes son muy similares.

ES 3 011 483 T3

Cara delantera	Cara posterior	NIP/PIN	Figura	J_{sc} PK (mA/cm ²)	J_{sc} Si (mA/cm ²)	PCE (%)	R_{tot} (mA/cm ²)
Estructura en tándem de referencia							
pulido	texturizado	NIP	1A	16.95	16.58	22.38	9.2
pulido	texturizado	PIN	1B	16.93	16.79	22.67	9.69
pulido	pulido	NIP	1A	16.95	15.79	21.32	11.41
pulido	pulido	PIN	1B	16.93	16.09	21.72	11.83
texturizado	texturizado	NIP	1A	19.67	20	26.55	2.9
texturizado	texturizado	PIN	1B	19.99	20.1	26.99	3.06
Estructura en tándem simplificada							
pulido	texturizado	NIP	2A	16.58	17.16	22.38	8.73
pulido	texturizado	PIN	2B	16.91	16.88	22.79	9.67
pulido	pulido	NIP	2A	16.58	16.36	22.09	11.18
pulido	pulido	PIN	2B	16.91	16.13	21.78	11.85
texturizado	texturizado	NIP	2A	19.42	20.32	26.22	2.69
texturizado	texturizado	PIN	2B	19.99	20.12	26.99	3.05

REIVINDICACIONES

1. Estructura (100) fotovoltaica en tándem con 2 terminales de tipo PIN que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera:
 - una primera célula (110) solar de heterojunción de silicio que comprende una primera capa (115) de tipo P de silicio amorfo dopado y un sustrato (112) de silicio cristalino dopado de tipo N dispuesto entre una primera capa (113) intrínseca de silicio amorfo y una segunda capa (114) intrínseca de silicio amorfo,
 - una capa (120) de unión,
 - una segunda célula (130) solar de tipo perovskita que comprende una segunda capa (132) de tipo P, una capa (131) activa de un material de perovskita y una capa (133) de tipo N,
- 5
- 10 caracterizada porque la capa (120) de unión está hecha de óxido transparente conductor (TCO),
y porque la capa (120) de unión está en contacto con la segunda capa (114) intrínseca de silicio amorfo de la primera célula (110) solar y con la segunda capa (132) de tipo P de la segunda célula (130) solar,
desempeñando la capa (120) de unión la función de capa de tipo N en la primera célula (110) solar.
- 15
2. Estructura (100) en tándem según la reivindicación 1, caracterizada porque la capa (120) de unión es de ITO.
3. Estructura (100) en tándem según la reivindicación 1, caracterizada porque la capa (120) de unión es de AZO, ZnO, IWO, IZO, IZrO o SnO_{2-x} con x superior a 0 y estrictamente inferior a 2.
4. Estructura (100) en tándem según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque la capa (120) de unión tiene un espesor de 2 a 30 nm y de preferencia entre 2 nm y 15 nm.
- 20
5. Estructura (100) en tándem según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque la capa (120) de unión tiene una conductividad superior a 10 S.cm^{-1} .
6. Estructura (100) en tándem según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque la estructura (100) en tándem comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera:
 - la primera célula (110) solar de heterojunción de silicio a base de silicio amorfo y de silicio cristalino que comprende desde la cara posterior hacia la cara delantera: la primera capa (115) de tipo P de silicio amorfo dopado, la primera capa (113) intrínseca de silicio amorfo, el sustrato (112) de silicio cristalino dopado con N y la segunda capa (114) intrínseca de silicio amorfo,
 - la capa (120) de unión de TCO de tipo N,
 - la segunda célula (130) solar de tipo perovskita que comprende desde el material de unión hacia la cara delantera: una capa (132) de tipo P de PTAA o de TFB, la capa (131) activa de un material de perovskita y una capa (133) de tipo N de SnO_2 o formada por una bicapa PCBM/ SnO_2 .
- 25
- 30
7. Estructura (100) en tándem según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque el material de perovskita tiene por fórmula $\text{Cs}_x\text{FA}_{1-x}\text{Pb}(\text{I}_{1-y}\text{Br}_y)_3$ (con $x < 0,20$; $0 < y < 1$).

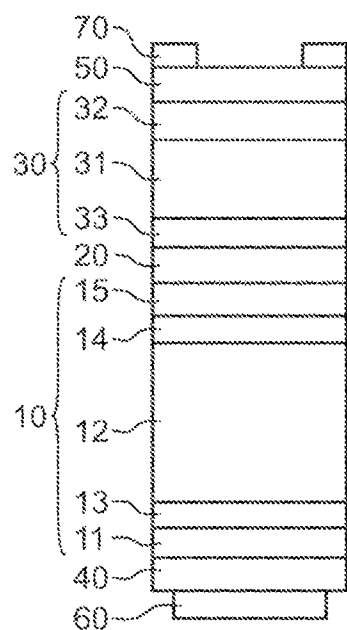


FIG. 1A

Técnica anterior

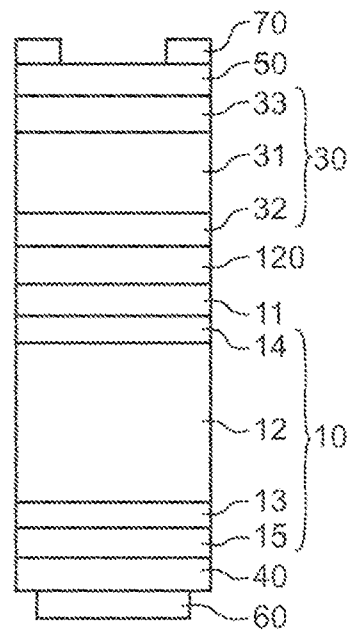


FIG. 1B

Técnica anterior

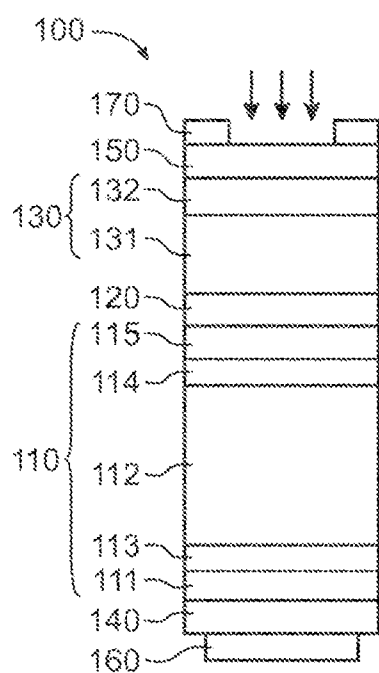


FIG. 2A

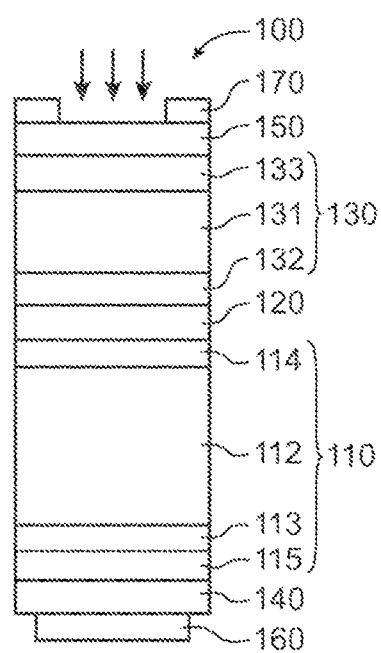


FIG. 2B

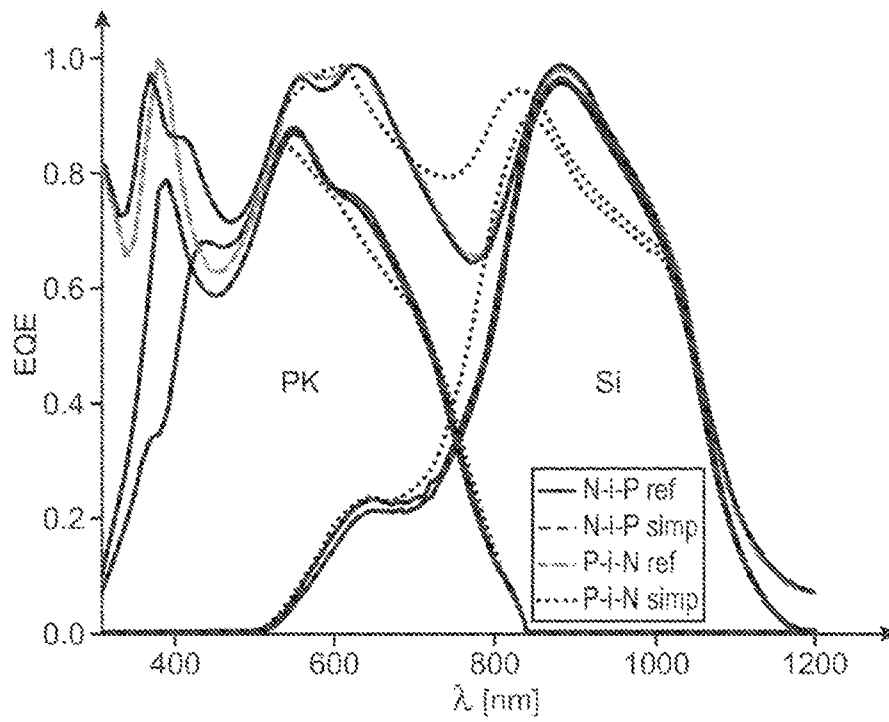


FIG. 3A

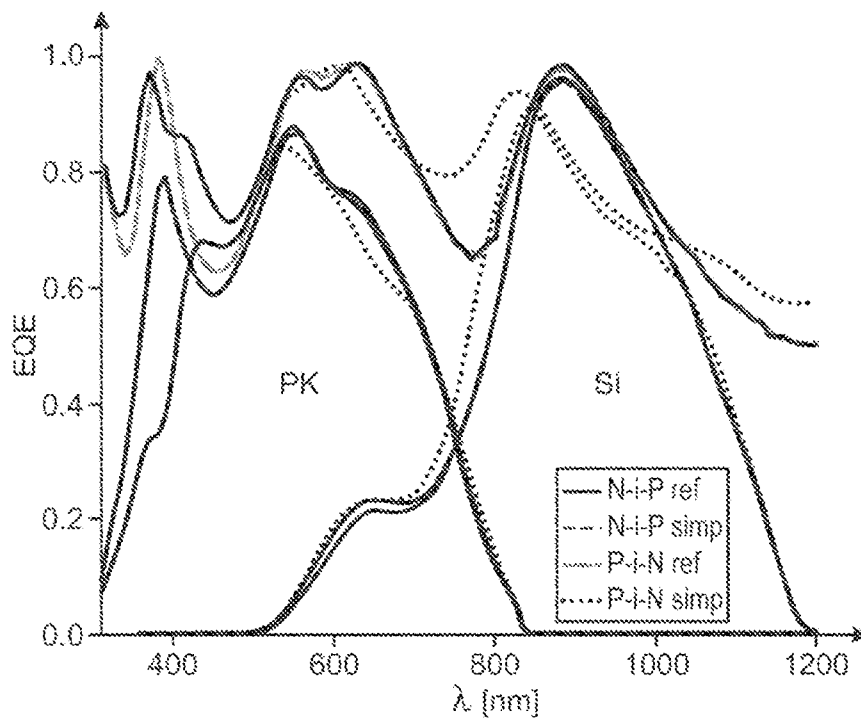


FIG. 3B

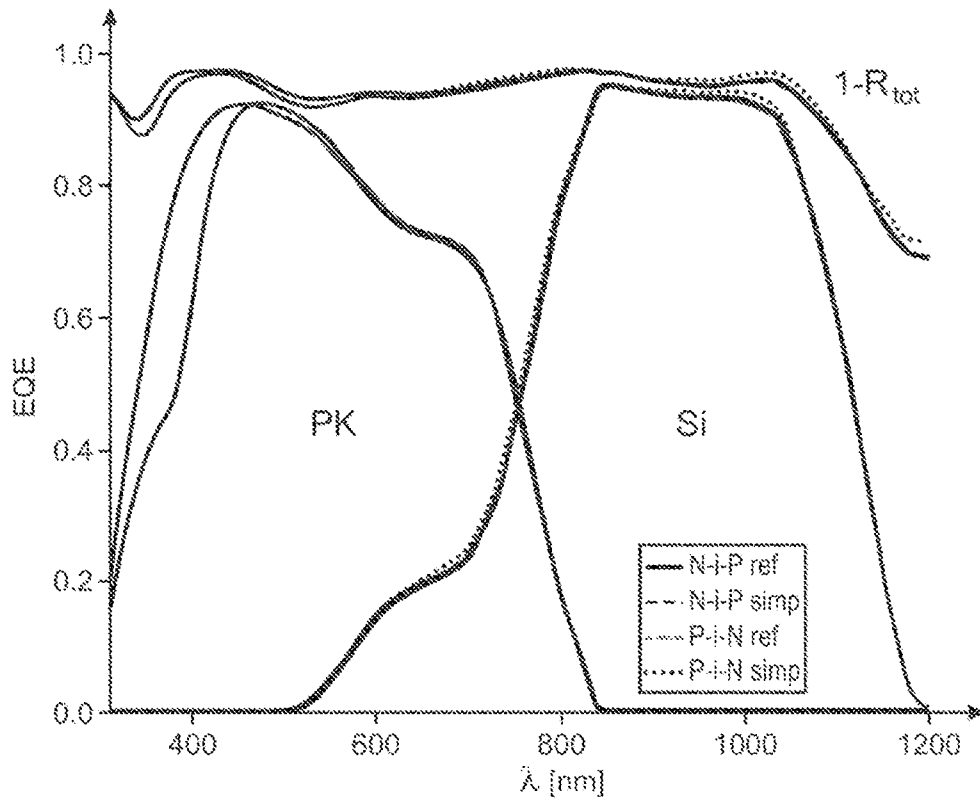


FIG.3C