



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 363 580**

51 Int. Cl.:
H01L 31/06 (2006.01)
H01L 31/052 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09162378 .5**
96 Fecha de presentación : **10.06.2009**
97 Número de publicación de la solicitud: **2261996**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **15.12.2010**

54 Título: **Célula solar de alta potencia.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
09.08.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
09.08.2011

73 Titular/es: **SUINNO SOLAR Oy**
P.O. Box 346 (Unioninkata 20-22)
00131 Helsinki, FI

72 Inventor/es: **Väänänen, Mikko Kalervo**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

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

Célula solar de alta potencia

Campo técnico de la invención

La invención versa acerca de procedimientos y medios para mejorar la energía generada y la eficacia de las células solares.

Antecedentes

Las células solares fotovoltaicas son el nuevo procedimiento descubierto más recientemente de producción de energía, datando de los sistemas de alimentación de los satélites estadounidenses y soviéticos de la década de 1950. Las células solares fotovoltaicas producen electricidad con un impacto medioambiental muy bajo, y por ello son deseadas por el público. El problema de las células solares fotovoltaicas actuales es que no producen suficiente energía para que su coste las haga económicamente viables.

Por lo tanto, se han sugerido muchas tecnologías para mejorar la eficacia de las células solares. El documento EP 1724841 A1 describe una célula solar de múltiples capas, en la que hay incorporados múltiples módulos de la célula solar y están laminados integralmente, de forma que bandas de longitudes de onda de distinta sensibilidad son tales que, cuanto más corta sea la longitud de onda central en la banda de longitudes de onda de sensibilidad, más cerca está ubicado el módulo al lado incidente de la luz solar. Este documento se cita aquí como referencia. En la actualidad no se conoce cuáles son todos los factores que provocan un punto flaco en la eficacia de la célula solar de múltiples capas. Sin embargo, en base a los estudios del solicitante, la célula solar general en tándem es la más perjudicada por los procedimientos de fotón-fonón que tienen lugar fuera de la banda de máxima eficiencia cuántica de la célula solar, es decir, esto es cuando en un *intervalo de frecuencia* la célula genera mucho calor. También se enumeran los factores individuales relativos a las desventajas en las columnas 1 y 2 del documento US 6689949.

El documento US 6689949 da a conocer una cavidad reflectante fotovoltaica con varias células solares en la cavidad. Las células solares dentro de la cavidad se encuentran bajo filtros que filtran la luz, de forma que el flujo luminoso entrante de fotones es más apropiado para la eficiencia cuántica de la célula solar, es decir, más apropiado para su *respuesta* o la *respuesta del detector*.

La NASA y JPL (Jet Propulsion Laboratory) también han propuesto una técnica alternativa, denominada "Rainbow" en la que se utilizan divisores y concentradores de haz para dividir el espectro solar en distintas bandas y enfocar las distintas bandas de luz en distintas células solares diferenciadas que pueden gestionar mejor el espectro dividido y enfocado. Este sistema requiere una disposición óptica muy complicada, y no se ha materializado en nada práctico hasta ahora.

El documento US 5021100 comprende una célula solar en tándem con un filtro, pero este filtro no es unidireccionalmente transparente ya que un fotón que ha pasado a través del mismo de la primera célula a la segunda célula puede regresar a través del mismo filtro de la segunda capa de la célula a la primera capa sin ningún impedimento ni atrapamiento, creando de ese modo un ruido térmico innecesario en la primera capa de la célula solar.

Resumen

La invención bajo estudio está dirigida hacia un sistema y un procedimiento para solucionar de forma eficaz los problemas de la técnica anterior y conseguir una célula solar más potente.

Un objeto más particular de la invención es presentar el sistema mencionado anteriormente de células solares, que tiene un coste elevado de capital en su diseño, pero en última instancia un coste reducido de producción con grandes economías de escala. Para conseguir esto, la invención introduce una célula solar en tándem en la que cada capa de célula solar trabaja con fotones a energías en las que esa capa de célula solar tiene la máxima eficiencia cuántica.

Un aspecto de la invención implica una célula solar con un reflector de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar. El reflector está dispuesto para reflejar fotones con longitudes de onda adecuadas a la función de eficiencia cuántica de la célula solar de nuevo hacia la célula solar.

En un aspecto de la invención, hay una célula solar en tándem con dos capas de célula solar. Hay un filtro de fotones entre las dos células solares. La célula solar que es incidente a la luz solar está expuesta, y esta capa de célula solar tiene, normalmente, la anchura de banda que es de mayor energía. Los fotones solares entran en esta primera célula solar, y es probable que la parte de mayor energía del espectro solar sea convertida en corriente fotoeléctrica. Algunos fotones de alta energía no interactúan con el semiconductor, y solo pasan a través del mismo o se disocian en fotones y fonones de menor energía por medio del procedimiento de fotón-fonón. Aquellos fotones que aún tienen una energía lo suficientemente elevada para convertirse en corriente fotoeléctrica en la primera capa, es decir $E > E_{bg1}$ de la anchura de banda de la primera célula solar, son reflejados de nuevo hacia la primera capa

de la célula solar por medio del filtro de fotones. Estos fotones tendrán una segunda oportunidad de convertirse en corriente fotoeléctrica. Preferentemente, la primera capa de la célula solar es muy delgada y muy pura, de forma que hay menos tiempo y espacio para los procedimientos no absorbentes, es decir, la conversión de calor por fotones que no coinciden con la anchura de banda. Ahora se hace pasar a los fotones con una energía $E < E_{bg1}$ de la anchura de banda a través del filtro hasta la segunda capa de la célula solar que tiene una anchura de banda menor E_{bg2} . Una gran porción de estos fotones puede interactuar ahora con la segunda anchura de banda. El filtro de fotones recogerá los fotones de menor energía y luego enfocará los fotones de menor energía hacia la segunda capa de la célula solar a través de aberturas muy pequeñas en el otro lado del filtro. Estas pequeñas aberturas son permeables a los fotones. El resto del área en el otro lado del filtro de fotones también está cubierta con un material reflector. Esto es debido a que en la parte inferior de la segunda capa de la célula solar también hay un reflector que refleja fotones que tienen la capacidad de convertirse en corriente fotoeléctrica en la segunda capa de la célula solar volviendo a la segunda capa de la célula solar. Algunos fotones que son reflejados desde este reflector siguen sin ser absorbidos después de haber pasado a través de la segunda capa de la célula solar la segunda vez en su viaje de retorno. Estos fotones son enviados de nuevo por el material reflector que rodea las pequeñas aberturas mencionadas anteriormente. Los reflectores en el lado opuesto del lado incidente de la luz solar del filtro de fotones y en la parte inferior del sistema de célula solar en tándem atrapan los fotones que tienen capacidad para producir corriente fotoeléctrica en la segunda capa de la célula solar, es decir fotones típicamente de $E > E_{bg2}$. Estos fotones rebotan una y otra vez hasta que son absorbidos o se disocian en fotones de energía inferior a E_{bg2} .

En un aspecto de una realización inventiva la célula solar en tándem comprende varias capas de célula solar, y entre dos capas hay un filtro de fotones. Estos filtros de fotones están sintonizados de forma que atraparán solo aquellos fotones que se encuentren a una energía en la que está trabajando la capa de la célula solar con una buena eficiencia cuántica (QE), idealmente cerca de 1. El resto de fotones son pasados simplemente a la siguiente capa por medio del filtro de fotones. De hecho, puede haber muchas capas que son, preferentemente, muy delgadas, o puede estar diseñado de otra manera, de forma que haya una interacción mínima entre la célula solar y la población de fotones a energías en las que la eficiencia cuántica NO es tan buena, es decir alejada de la unidad.

Por eficiencia cuántica se significa su significado general según se define en la Larousse Dictionary of Science and Technology: eficiencia cuántica (Fís): "Número de electrones liberados en una célula fotoeléctrica por fotón de radiación incidente de longitud de onda especificada". El inventor destaca adicionalmente que este parámetro puede ser normalizado para producir la escala típica de 100-0% cuando sea necesario. La eficiencia cuántica es una medida sumamente buena de cuán bien convierte fotones la célula fotoeléctrica en electricidad. La *respuesta del detector* o la *respuesta* es la eficiencia cuántica como una función de la longitud de onda, es decir, dice cómo responde la célula fotoeléctrica a fotones entrantes con distintas energías.

En términos de la célula solar en la presente memoria una eficiencia cuántica (QE) elevada es una QE que es mayor que la QE de otras capas alternativas de la célula solar a la misma energía de fotones. En términos prácticos, la banda de espectro que puede merecer la pena mantener en una capa particular de célula solar es cuando la QE supera el 10%, es decir la QE general de las células solares del mercado actual de venta al por mayor. Sin embargo, se debería considerar aproximadamente el 30-50% como el umbral de QE, si la célula solar en tándem va a sustituir económicamente al petróleo y al gas en las condiciones actuales del mercado. Los fotones a energías en las que la capa de la célula solar tiene una QE inferior al 30-50% deberían ser movidos a otras capas de la célula solar que tengan mayores QE, como se describirá a continuación en la solicitud.

Algunas de las ventajas mencionadas anteriormente de la invención, o todas ellas, se acumulan en una realización en la que puede haber muchas capas de célula solar, por ejemplo cien, de distintas anchuras de banda separadas por filtros reflectantes de fotones como se acaba de describir. Normalmente, una unión semiconductor puede mantener una eficiencia cuántica elevada únicamente en una banda muy estrecha. Cuanto más se aleja de la energía óptima, mayor se vuelve la QE. En una realización de la invención hay cien capas de célula solar que tienen QE elevados en bandas que tienen una anchura de 10-20 nm en el intervalo de longitud de onda. Al utilizar estas células es posible muestrear el espectro solar completo desde 150 nm (UV) hasta 1500 nm (IR) con uniones semiconductoras que operan con una eficiencia cuántica muy elevada. Los filtros de fotones están configurados de forma que la primera capa de la célula solar tendrá fotones de energía 150-160 nm en el intervalo de longitud de onda, la segunda 160-170 nm, la tercera 170-190 nm, y etcétera. Naturalmente, la primera capa de la célula solar solo necesita ser eficiente en la banda de 150 nm-160 nm, lo que es más sencillo de conseguir. Además, debería perturbar tan mínimamente como sea posible a los fotones con una longitud de onda superior a 160 nm. Estos fotones pasarán a las capas que siguen estando atrapados cada uno, como se ha explicado anteriormente, en su propia banda de 10-20 nm con una capa de célula solar que tiene su mejor eficiencia en esa banda.

Una célula solar en tándem según la invención está definida por el contenido de la reivindicación 1 y comprende al menos dos capas de células solares, las capas primera y segunda y está caracterizada porque,

- hay dispuesto un primer filtro de fotones entre la primera capa de la célula solar y la segunda capa de la célula solar,
- la célula solar está dispuesta con el filtro de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar,

- el filtro de fotones está dispuesto para reflejar fotones de cierta energía de nuevo hacia la primera célula solar,
- el filtro de fotones está dispuesto para ser transparente a los fotones de otras energías no dispuestos para ser reflejados, y estos fotones están dispuestos para entrar en la segunda célula solar.

Un procedimiento para producir la célula solar en tándem mencionada anteriormente es según la invención.

- 5 Hay dispuesto un filtro de fotones para reflejar fotones con longitudes de onda inferiores a λ_x desde su primer lado y dispuesto para ser transparente a los fotones de longitudes de onda superiores a λ_x al enfocar los referidos fotones de longitud de onda mayor fuera de aberturas de área pequeña en el otro lado opuesto al primer lado del filtro de fotones y el otro lado del filtro de fotones está dispuesto para reflejar al menos parte de dichos fotones de longitud de onda mayor que λ_x .
- 10 Una célula solar en tándem que comprende al menos dos capas de célula solar está caracterizada porque dicha célula solar en tándem está dispuesta para transportar un fotón entrante a la capa de la célula solar que tiene la mayor eficiencia cuántica (QE) a la energía de dicho fotón entrante en comparación con las otras capas referidas de célula solar en la célula solar en tándem.
- 15 Además, y con referencia a las realizaciones mencionadas anteriormente que acumulan ventajas, en la actualidad se considera que el mejor modo de la invención es una célula solar en tándem de unión doble o triple que tiene uno o dos filtros de fotones de la invención entre las capas de la célula solar, respectivamente.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirá la invención en mayor detalle con referencia a las realizaciones ejemplares según los dibujos adjuntos, en los que

- 20 La Figura 1 demuestra una realización del filtro 10 de fotones como un diagrama de bloques.
- La Figura 2 demuestra una realización de una célula solar inventiva en tándem con dos capas de célula solar como un diagrama 20 de bloques.
- La Figura 3 demuestra una realización 30 de una célula solar inventiva en tándem con cuatro capas de célula solar como un diagrama 30 de bloques.
- 25 La Figura 4 demuestra una realización 40 de la operación de la célula solar inventiva en tándem en términos de espectros, es decir, en el intervalo de energía-longitud de onda.
- La Figura 5 demuestra una realización 50 de la operación de la célula solar inventiva en tándem como un diagrama de flujo.

Algunas de las realizaciones están descritas en las reivindicaciones dependientes.

Descripción detallada de las realizaciones

- La Figura 1 demuestra una realización ejemplar del filtro 100 de fotones en solitario que va a ser colocado entre las dos capas de célula solar en una célula solar en tándem. Se supone que el lado incidente de la luz solar está arriba en esta figura. Los fotones con λ_2 tienen una mayor energía que los fotones con λ_1 , es decir $\lambda_2 < \lambda_1$ en algunas realizaciones, pero también es posible que el filtro 100 esté configurado a la inversa, es decir, que refleje fotones de baja E mientras que deje pasar los fotones de E elevada según la invención. El filtro 100 de fotones tiene una cubierta reflectante 110 en el lado en el que incide el sol. La cubierta reflectante 110 puede ser un filtro Rugate, o cualquier otro filtro de paso de banda óptica según la invención. Bajo la cubierta reflectante hay al menos un medio de enfoque para los fotones que no son reflejados, es decir, los fotones que pasan a través de la cubierta reflectante 110. Estos medios de enfoque que son normalmente lentes de cualquier forma, pueden ser circulares, y se muestran como tales, en la figura, enfocan la población de fotones en una bocina 130 que se va estrechando. Esta bocina puede estar cubierta con material reflectante desde el interior, de forma que los fotones que pasan a través de ella son dirigidos hacia fuera de la al menos una abertura pequeña 140. En algunas realizaciones puede no haber ninguna bocina, pero en estas realizaciones los fotones siguen estando enfocados en un punto pequeño cuando salen del filtro 100. En el lado opuesto a la luz solar incidente la mayoría del área está ocupada por otro reflector 150 de fotones. Las pequeñas aberturas están embebidas en el reflector 150 y solo ocupan una fracción del área del otro lado del filtro 100 de fotones. El reflector 150 está diseñado para volver a reflejar los fotones que entraron en la célula solar por debajo desde la al menos una abertura 140, pero que no interactuaron con la capa de la célula solar, y fueron reflejados en cambio por otro filtro en el otro lado de la segunda capa de la célula solar. En algunas realizaciones, se hace que la relación del área del reflector 150 con respecto a las aberturas 140 sea tan grande como sea posible según la invención.
- 50

El efecto de la modulación espacial que permite la reflexión por medio del reflector 150 puede ser realizado mediante otros medios además de enfocar la entrada en pequeñas aberturas en algunas realizaciones. Por ejemplo,

se podría utilizar en algunas realizaciones un filtro unidireccionalmente transparente para sustituir el medio 120 de enfoque y las aberturas 140 según la invención. En esta realización es importante que la transparencia sea verdaderamente unidireccional, el filtro 100 no debe dejar que aquellos fotones filtrados a través de la siguiente capa vuelvan a la primera capa 200 según la invención.

- 5 El filtro 100, 110, 150 puede ser cualquier filtro de paso de banda, de paso corto, de paso largo y/o de rechazo de banda, un filtro Rugate y/o un filtro de pila de capas diferenciadas según la invención.

Aunque las capas de la célula solar pueden tener un grosor de unos pocos nanómetros en algunas realizaciones de la invención, también es posible que el filtro de fotones sea muy delgado, un grosor de tan solo unos pocos nanómetros según la invención.

- 10 En algunas realizaciones al menos una abertura 140 contiene un elemento de difracción o de dispersión que propaga los fotones desde las aberturas de forma eficaz hacia la segunda célula solar.

- El al menos un medio 120 de enfoque, la bocina 130, la abertura 140, el reflector 110, y/o 150 pueden estar fabricados de cualquier material según la invención. Según la invención, el filtro óptico y/o los componentes reflectores 110, 130, 150 y/o los elementos 120, 121, 140, 141 de enfoque pueden estar fabricados de cualquiera de lo siguiente: papel metalizado reflectante, tal como papel metálico, un espejo de luz ultravioleta/visible/infrarrojo tal como un espejo de aluminio o de oro o dicho espejo o papel metalizado con efecto de espejo con revestimientos opacos metálicos depositados por vacío en sustratos de vidrio de baja expansión, un espejo de aluminio/MgF₂, un espejo de aluminio/SiO₂, un espejo de aluminio/dieléctrico, un espejo de oro protegido y/o un espejo normal y/o cualquier material de filtro Rugate y/o material de pila dieléctrica y/o cualquier filtro de paso de banda, de paso corto, de paso largo y/o de rechazo de banda. La elección del material reflectante y/o de enfoque debería estar basada en la función de reflectancia-longitud de onda del material entre otras cosas prácticas, tales como el coste y la disponibilidad en algunas realizaciones de la invención. En algunas realizaciones es preferente que la reflexión y/o el enfoque sea eficaz hasta el IR extremo, o en cualquier caso que la longitud de onda que equivale a la anchura de banda más pequeña en las capas de la célula solar. La estructura de enfoque también puede ser sustituida con un filtro que es un: filtro Rugate y/o un filtro de pila dieléctrica o un filtro que combina las dos tecnologías referidas para realizar un filtro unidireccional. Esto podría ser realizado de forma que la reflexión interna total esté presente casi siempre en la cara exterior 150 para fotones que han pasado a través del filtro evitando que regresen, debido al ángulo y la energía de distribución de los fotones después del filtro 100. Sin embargo, cuando llegan los fotones del otro lado (110, es decir aquellos que no fueron reflejados), estos fotones están alineados para penetrar a través de la cara 150 desde el interior.

Se debería hacer notar que la realización 10 puede combinarse y permutarse libremente con las siguientes realizaciones 20, 30, 40 y 50 en el texto según la invención.

- La Figura 2 muestra una realización de la invención en la que las dos capas de célula solar están combinadas con los filtros de fotones de la invención para realizar una célula solar inventiva 20 en tándem. La luz solar incidente se encuentra en la parte superior de la figura 2, como se muestra. La primera capa 200 de célula solar o cualquier capa subsiguiente de célula solar mencionada en la presente solicitud puede estar fabricada, normalmente, o puede contener Si (silicio), silicio policristalino, silicio de película delgada, silicio amorfo, Ge (germanio), GaAs (arseniuro de galio), GaAlAs (arseniuro de galio-aluminio), GaAlAs/GaAs, GaP (fosfuro de galio), InGaAs (arsénico de indio-galio), InP (fosfuro de indio), GaAsP/GaP, CdS (sulfuro de cadmio), CIS (diseleniuro de cobre-indio), CdTe (teluro de cadmio), InGaP (fosfuro de indio-galio), AlGaInP (fosfuro de aluminio-galio-indio), InSb (antimoniuro de indio), CIGS (diseleniuro de cobre-indio/galio) y/o InGaN (nitruro de indio-galio) según la invención. Asimismo, la primera capa 200 de la célula solar o cualquier capa subsiguiente de la célula solar mencionada en la presente memoria puede contener cualquier elemento o combinación de aleación, o cualquier material capaz de conseguir el efecto fotoeléctrico descrito en las publicaciones FI20070264, FI20070743, FI20070801, EP 09154530.1, EP 1724 841 A1, Josuke Nakata, "Multilayer Solar Cell", US 6320117, James P. Campbell et al., "Transparent solar cell and method of fabrication", Solar Electricity, Thomas Markvart, 2ª edición, ISBN 0-471-98852-9 y "An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell", Paul Preuss, Research News, Lawrence Berkeley National Laboratory, publicaciones que están todas incorporadas en la presente memoria por referencia según la invención.

- En la figura 2 los fotones incidentes impactan la unión p-n de la célula solar y excitan los electrones, teniendo como resultado, por lo tanto, que se pueda utilizar la corriente fotoeléctrica para alimentar una carga. El primer filtro 100 de fotones está dispuesto entre las capas 200 y 201 de la célula solar, y la célula solar 200 está dispuesta con el filtro 100 de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar. El filtro 100 de fotones está dispuesto para reflejar fotones de nuevo hacia la primera célula solar 200 con energías que se encuentran a energías en las que la primera célula solar 200 tiene una eficiencia cuántica elevada (fotones de λ_2). Por otra parte, el filtro 100 de fotones está dispuesto para ser transparente a los fotones de otras energías o longitudes de onda λ_1 , y estos fotones están dispuestos para entrar en la segunda célula solar (201). Por lo tanto, los fotones que tienen una energía/longitud de onda λ_2 que podría convertirse en corriente fotoeléctrica en la capa 200 de la célula solar son reflejados de nuevo a la capa 200 de la célula solar por el reflector 110.

En algunas realizaciones las capas de la célula solar son muy delgadas para minimizar el corte transversal de difusión de interacciones no deseadas de fotones, es decir, aquellas que ocurren a energías en las que la eficiencia cuántica de la capa de la célula solar es deficiente. Estas interacciones calientan la célula solar. En algunas realizaciones el lado incidente de la luz solar de la célula solar 200 está cubierto por una película semipermeable, o por un revestimiento antirreflejante. En algunas realizaciones hay una película en el lado incidente de la luz solar de la célula solar 200 que solo deja pasar fotones solares, pero no permite que salgan.

Normalmente, el filtro reflector 110 es un filtro Rugate en algunas realizaciones pero puede ser cualquier otro filtro de paso de banda de fotones según la invención. El filtro 110 divide los fotones en dos poblaciones: los fotones reflejados λ_2 y los fotones λ_1 que han pasado a través. En algunas realizaciones de la invención hay una frecuencia/longitud de onda/energía λ_x de corte que divide las poblaciones, en el caso del primer filtro de fotones, denominemos al corte λ_{x100} . En la figura 2 la segunda célula solar 201 está dispuesta con un filtro de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar 111 y también en el lado incidente 150 de la luz solar. El filtro 100 de fotones está dispuesto para enfocar los fotones de otras energías que no son reflejados por el reflector 110, y dichos fotones entran a través de pequeñas aberturas 140 desde el lado del filtro 100 de fotones opuesto al lado incidente de la luz solar. Según entran estos fotones en la segunda capa de la célula solar, son sometidos de nuevo al procedimiento mencionado anteriormente, pero con distintas anchuras de banda y longitudes de onda de corte. Los fotones λ_1 interactúan con la anchura de banda de la segunda capa 201 de la célula solar, es decir, al menos aquellos fotones que tienen la energía para hacerlo.

Se podría resumir que el filtro de fotones de la invención lleva a cabo una *modulación espaciospectral* sobre el espectro solar, es decir, altera la señal/población de los fotones en el espacio espacial (enfoque en pequeñas aberturas) al igual que en el espacio frecuencial (filtrado).

En algunas realizaciones, la segunda célula solar 201 está dispuesta con un segundo filtro 101 de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar. El segundo filtro 101 de fotones divide la población de fotones λ_1 en dos. Denominemos la longitud de onda de corte aquí como λ_{x111} . El segundo filtro 101 de fotones está dispuesto para reflejar fotones de nuevo hacia la segunda célula solar 201 con energías que son energías en las que la segunda célula solar 201 tiene una eficiencia cuántica elevada. Estos fotones están marcados con λ_4 en la figura 2. El primer filtro 100 de fotones también está dispuesto para reflejar fotones de nuevo hacia la segunda célula solar 201 con energías que son energías en las que la segunda célula solar 201 tiene una eficiencia cuántica elevada, con un reflector 150 de fotones que se encuentra en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar en el primer filtro 100 de fotones en algunas realizaciones. Estos fotones están marcados con λ_5 en la figura 2. En algunas realizaciones, las longitudes de onda son las mismas, es decir, estos fotones están marcados con $\lambda_4=\lambda_5$, pero también pueden ser distintas según la invención en otras realizaciones. En algunas realizaciones los filtros 100, 101 de fotones están dispuestos para atrapar los fotones en la segunda célula solar que se encuentran a energías en las que la segunda célula solar 201 tiene una eficiencia cuántica elevada. Los fotones a estas energías estarán rebotando entre los filtros 100, 101 hasta que sean absorbidos por la segunda capa de célula solar, o pasen por un procedimiento de fotón-fonón que permita que se escapen a la población de fotones con energía/longitud de onda λ_3 y salgan a través del filtro 101. En otras palabras, el segundo filtro 101 de fotones está dispuesto para ser transparente a los fotones que no tienen energías en las que la segunda célula solar 201 tiene una eficiencia cuántica elevada, y estos referidos fotones transparentes están dispuestos para entrar en una tercera célula solar 202 (no mostrada aquí), o salir del sistema de célula solar en tándem.

Un procedimiento para producir la célula solar mencionada anteriormente también es según la invención. En algunas realizaciones de la invención se producen, se fabrican y/o se crecen mediante litografía, haz molecular epitaxial (MBE), epitaxia metalorgánica en fase de vapor (MOVPE), procedimiento de crecimiento de cristales de silicio de Czochralski (CZ), procedimiento de crecimiento alimentado por película de bordes definidos (EBF), procedimiento de crecimiento de cristales de silicio de zona flotante, procedimiento de crecimiento de lingotes y/o Epitaxia en fase líquida (LPE) al menos una de las capas de célula solar y/o filtros de fotones. Se puede aplicar cualquier procedimiento de fabricación descrito en las referencias FI20070264, An active solar cell and method of manufacture, FI20070743 Thermodynamically shielded solar cell, FI20070801 Method and means for designing a solar cell, EP 09154530.1 Low cost solar cell, EP 1724 841 A1, Josuke Nakata "Multilayer Solar Cell", US 6320117, James P. Campbell et al., "Transparent solar cell and method of fabrication", Solar Electricity, Thomas Markvart, 2ª edición, ISBN 0-471-98852-9 y "An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell", Paul Preuss, Research News, Lawrence Berkeley National Laboratory, US 6320117, James P. Campbell et al., "Transparent solar cell and method of fabrication", US 6689949, Ugur Ortbasli, Concentrating photovoltaic cavity converters for extreme solar-to-electric conversion efficiencies, US 2008/0251112A1, David G. Jenkins, Concentrating photovoltaic kaleidoscope and method, para producir una célula solar según la invención.

Los componentes del filtro óptico, los elementos reflectantes 110, 111, 130, 131, 150, 151 y/o los elementos 120, 121, 140, 141 de enfoque pueden estar fabricados de cualquiera de los siguientes según la invención: papel metalizado reflectante, tal como papel metálico, un espejo de luz ultravioleta/visible/infrarroja, tal como un espejo de aluminio o de oro o dicho espejo o papel metalizado con efecto de espejo con revestimientos opacos metálicos depositados por vacío sobre sustratos de vidrio de baja expansión, un espejo de aluminio/MgF2, un espejo de

aluminio/SiO₂, un espejo de aluminio/dieléctrico, un espejo de oro protegido y/o un espejo normal y/o cualquier material de filtro Rugate y/o material de pila dieléctrica y/o cualquier filtro de paso de banda, de paso corto, de paso largo y/o de rechazo de banda. La elección del material reflectante y/o de enfoque debería estar basada en la función reflectancia-longitud de onda del material entre otras cosas prácticas tales como el coste y la disponibilidad en algunas realizaciones de la invención. En algunas realizaciones es preferente que la reflexión y/o el enfoque sean eficaces hasta el IR extremo, o en cualquier caso hasta la longitud de onda que es igual a la anchura de banda más pequeña en las capas de la célula solar.

Se debería hacer notar que la realización 20 puede ser combinada y permutada libremente con las realizaciones 10, 30, 40 y 50 anteriores y posteriores en el texto según la invención.

La Figura 3 demuestra una realización de la invención en la que hay cuatro capas de célula solar y tres o cuatro filtros de fotones. Habría que darse cuenta de que un concepto inventivo clave de la invención es conseguir que cada capa de la célula solar trabaje en la banda en la que tenga una eficiencia cuántica (QE) elevada, y que no se mueva en esa banda a otra capa de la célula solar que tenga una QE mejor en esa banda. Por lo tanto, el perfil de QE-longitud de onda de una capa de célula solar tiene una significación en lo referente a cuántas capas de célula solar son implementadas en el diseño. Normalmente para las uniones semiconductoras, cuanto más estrecha sea la banda en torno a la energía óptima, mayor será la eficiencia cuántica.

En una realización de la invención 30 la célula solar en tándem comprende varias capas 200, 201, 202, 203 de célula solar y entre dos capas de célula solar hay un filtro 100, 101, 102 de fotones. Los filtros de fotones están sintonizados, de forma que solo atraparán aquellos fotones que se encuentran a una energía en la que está trabajando la capa de célula solar a una buena eficiencia cuántica (QE), idealmente cercana a 1. El resto de los fotones son simplemente pasados a la siguiente capa por medio del filtro de fotones. Preferentemente, las capas 200, 201, 202 de célula solar son muy delgadas, o están diseñadas de otra manera, de forma que hay una interacción mínima entre la célula solar y la población de fotones a energías en las que la eficiencia cuántica NO es tan buena, es decir, alejada de la unidad. En algunas realizaciones, la última capa de la célula solar, es decir, 203 en este caso, puede ser gruesa. También puede tener un espejo reflectante en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar, o un filtro 103 de fotones que puede estar diseñado para dejar salir los fotones de calor, pero atrapar aquellos fotones con un potencial fotovoltaico de absorción de ancho de banda, es decir, suficiente energía para ser absorbida.

En una realización preferente de la invención la primera capa 200 de célula solar es una capa de GaN con una anchura de banda de 3,4 eV (electronvoltios). La segunda capa 201 de célula solar es una capa de InGaP con una anchura de banda de 1,93 eV en algunas realizaciones de la invención. La tercera capa 202 de célula solar es una capa de silicio policristalino, con una anchura de banda a 1,1 eV en algunas realizaciones de la invención. En algunas realizaciones adicionales de la invención la última capa 203 de célula solar es una capa de InSb con una anchura de banda de 0,17 eV. ¿Cuáles podrían ser las longitudes de onda de corte λ_{xS} ? En la capa 200 los fotones con menos de 3,4 eV son inútiles, dado que no pueden ser absorbidos en corriente fotoeléctrica. Por lo tanto, la λ_{x100} debería ser equivalente a 3,4 eV o similar, es decir, 365 nm, es decir, un espejo de luz UV que dejaría pasar a través del mismo a los fotones con una longitud de onda superior a 365 nm. Por consiguiente, la segunda capa 201 de célula solar de InGaP a 1,93 eV requeriría que la λ_{x101} fuese equivalente a 1,93 eV o similar, es decir 643 nm, es decir, un espejo de luz visible que dejaría pasar fotones a través del mismo con una longitud de onda superior a 643 nm. La tercera capa de silicio polimorfo 202 de célula solar a 1,1 eV requeriría un 1128 nm para la λ_{x102} , es decir, un espejo de luz roja-IR. Los fotones con longitudes de onda superiores a 1128 nm o de umbral similar pasarían a la cuarta capa 203 con un ancho de banda InSb de 0,17 eV $\rightarrow$ 7301 nm. En algunas realizaciones de la invención se haría que esta última capa 203 fuese gruesa, porque todos los fotones restantes deberían interactuar en esta capa 201.

Se debería hacer notar que la realización 30 puede ser combinada y permutada libremente con las realizaciones 10, 20, 40 y 50 anteriores y posteriores en el texto según la invención.

La Figura 4 muestra una realización ejemplar de la invención en espacio de energía, es decir, espacio espectral. El espectro solar incidente 300 va desde 200 nm en UV hasta aproximadamente 2400 nm, es espectro 300 es un espectro solar AM 1,5G de 1000 W/m² encontrado normalmente en la Tierra. La primera capa 200 de la célula solar tiene una respuesta de la célula solar que tiene una energía ligeramente menor que la de GaN y una energía ligeramente mayor que la de InGaP. Tiene una QE razonablemente alta entre 365-645 nm, es decir, luz azul, como se muestra en el gráfico de QE que está superpuesto bajo el espectro 300. Debido a que la respuesta de la célula solar coincide prácticamente con el gran aumento de intensidad fuerte en el espectro incidente 300, el espectro de potencia de corriente fotoeléctrica que muestra la distribución espectral del espectro 400 de potencia de la corriente fotoeléctrica recogida y, por lo tanto, la energía y la potencia generada por la primera capa 200 de la célula solar tiene una forma bastante similar a la respuesta de la primera capa de la célula solar. Sin embargo, el espectro fotónico 401 estará bastante modificado cuando alcanza el primer filtro 100 de fotones. El filtro 100 de fotones modulará *espacioespectralmente* el espectro 401 de fotones en algunas realizaciones de la invención. Preferentemente, el filtro 100 de fotones reflejará los fotones λ_2 con energías más elevadas y longitudes de onda más cortas, es decir, los fotones con una longitud de onda más corta que λ_{x100} que debería ser igual a la anchura de

banda de la capa 200 de la célula solar según la invención. Los fotones λ_1 serán pasados a la segunda capa 201 de la célula solar mediante un medio de enfoque u otro medio de modulación espacial, y esta capa tendrán de nuevo una nueva frecuencia de corte distinta λ_{x101} según la invención en algunas realizaciones. La respuesta 201 de la célula solar convierte la corriente fotoeléctrica de esta población de fotones. El filtro 101 de fotones reflejará los fotones λ_4 de nuevo hacia la capa 201 de la célula solar, y el reflector que hace esto reside en la cara orientada en la misma dirección que el lado incidente de la luz solar. El filtro 100 de fotones tendrá un reflector 150 en torno a las pequeñas aberturas 140 que libera los fotones λ_1 hacia la segunda capa 201. Este reflector volverá a reflejará los fotones λ_5 de nuevo desde el lado opuesto al lado incidente a la luz solar del filtro 100 de fotones, teniendo como resultado un atrapamiento de fotones entre los filtros 100, 101 de fotones, para fotones que pueden interactuar con la anchura de banda de la segunda capa de la célula solar.

Los fotones restantes de baja energía λ_3 son pasados a una tercera capa 202 de célula solar según la invención en algunas realizaciones, o son liberados simplemente fuera de la célula solar en tándem o dejados en la malla en algunas realizaciones de la invención.

Se debería hacer notar que la realización 40 puede ser combinada y permutada libremente con las realizaciones 10, 20, 30 y/o 50 anterior y posteriormente en el texto según la invención.

La Figura 5 muestra una realización de la operación del procedimiento y del dispositivo de la invención como un diagrama 50 de flujo. Se comienza a observar la situación después de que los fotones han entrado en la primera capa 200 de la célula solar. Una vez en la primera capa 200 de la célula solar la población de fotones atraviesa la misma, siendo absorbidos algunos fotones y excitando la corriente fotoeléctrica en esta capa de la célula solar. Después de que los fotones han atravesado la primera capa 200 de la célula solar que es preferentemente bastante delgada, llegan al filtro 100 de fotones en la fase 600 en el que los fotones con una longitud de onda más corta que λ_{x100} son reflejados de nuevo hacia la primera capa 200 de la célula solar. Los fotones incidentes y los reflejados producen la energía fotovoltaica de la célula solar 200.

En la fase 610 los fotones con una longitud de onda más larga que λ_{x100} están enfocados por medio de la al menos una lente 120. Las lentes pueden tener cualquier forma o ser de cualquier material según la invención, pero también pueden ser sustituidas por cualquier otro medio de enfoque, o de hecho por cualquier medio capaz de dividir las poblaciones de fotones de la forma deseada, por ejemplo, por medio de un filtro unidireccional. El quid del asunto del enfoque de los fotones que han pasado a través es llevar a cabo el aspecto espacial de la modulación para conseguir una superficie reflectante suficiente para la otra pared del filtro 100 de fotones orientada a la segunda capa 201 de la célula solar. Es según la invención que se despliegan otros medios equivalentes para el enfoque y la modulación espacial en algunas realizaciones.

En la fase 620 los fotones con una longitud de onda mayor que λ_{x100} entran en la célula solar 201 a través de al menos una abertura 140, que son normalmente muy pequeñas para maximizar el área reflectante 150 de la otra pared del filtro 100 de fotones orientada a la segunda capa 201 de la célula solar. Algunos de estos fotones incidentes generan ahora energía fotovoltaica desde la segunda capa 201 de la célula solar. En la fase 630 los fotones con una longitud de onda más corta que λ_{x101} son reflejados por el filtro 101 de fotones. De esta manera, estos fotones son simplemente reflejados nuevamente a la segunda capa 201 de la célula solar. Algunos de estos fotones reflejados son absorbidos y producen energía fotovoltaica de la célula solar 201.

Algunos de los fotones reflejados pasan a través de la segunda capa 201 de la célula solar de nuevo, sin haber sido absorbidos. Siempre que su longitud de onda sea más corta que λ_{x101} , estos fotones son reflejados de nuevo, esta vez por el reflector 150 del filtro 100 de fotones. En algunas realizaciones de la invención, el reflector 150 del filtro de fotones en la pared orientada a la segunda capa 201 de la célula solar está diseñado para simplemente volver a reflejar todos los fotones o tantos fotones como sea posible en una banda tan ancha como sea posible según la invención. En la fase 630 habrá ahora una población de fotones que rebotan una y otra vez entre los filtros 100, 101 de fotones según la invención. Este atrapamiento de fotones proporciona varias oportunidades para que los fotones sean absorbidos en la segunda capa 201 de la célula solar. En la fase 640 los fotones que ya no tienen una oportunidad de ser convertidos en corriente fotoeléctrica, son enfocados por la lente 121 u otro medio de enfoque. Tiene sentido ajustar el corte λ_{x101} , de forma que vuelve a reflejar todos aquellos fotones que no tienen una oportunidad de ser absorbidos en la segunda capa 201 de la célula solar, pero naturalmente, si no, se puede seleccionar λ_{x101} según la invención, en base a otros criterios de diseño, por ejemplo.

En la fase 650 los fotones con una longitud de onda más larga que λ_{x101} entran en la célula solar 202 preferentemente desde pequeñas aberturas 141 en la pared del filtro 101 de fotones orientada a la tercera capa 202 de la célula solar. El procedimiento se repite en la tercera capa 202 de la célula solar con el mismo principio mencionado anteriormente aunque a longitudes de onda más largas para generar la energía fotovoltaica de la célula solar 202.

Se debería hacer notar que la realización 50 puede ser combinada y permutada libremente con las anteriores realizaciones 10, 20, 30 y 40 en el texto según la invención. También se debería hacer notar que en todas las realizaciones, o en algunas de ellas, además de semiconductores se pueden utilizar anchura de interbanda, tales

como uniones semiconductoras de cascada cuántica para una capa particular de célula solar según la invención. También se debería hacer notar además que las células solares de la invención no necesitan ser necesariamente cuadradas o planas; de hecho, pueden ser realizadas con cualquier forma, por ejemplo una forma esférica en algunas realizaciones, como se describe en el documento FI20070743 Thermodynamically shield solar cell & counterparts or otherwise. Además, se debería hacer hincapié en que en algunas realizaciones de la invención los sistemas de célula solar o de célula solar en tándem de la invención pueden ser realizados en cualquier tamaño, desde estructuras de escala nanométrica hasta estructuras grandes.

También se debería hacer notar que la invención ha sido descrita aquí de forma que la célula solar de mayor anchura de banda y el filtro de mayor paso de banda son aquellos en los que la luz solar incide primero. Se debería hacer notar que la invención también puede ser implementada en el orden inverso, es decir, tener las capas y filtros de menor energía de la célula solar en primer lugar en algunas realizaciones. De hecho, las anchuras de banda de las capas de la célula solar pueden estar en cualquier orden en algunas realizaciones de la invención, el quid está en que estas capas de la célula solar trabajan con fotones que se encuentran a una energía en la que la capa de célula solar tiene un buen QE, y NO trabajan con fotones que se encuentran a una energía en la que la QE es deficiente.

Sin embargo, en algunas realizaciones de la invención es preferente que el material con mayor ancho de banda se encuentre en primer lugar y que la conducción del filtrado y las anchuras de banda en un orden de alta a baja cuando se mueven desde el lado de la luz solar incidente a la parte trasera de la célula solar en tándem, porque esto produce el menor número de absorciones fotoeléctricas por parte de la primera unidad fotoeléctrica de energía generada. En términos coloquiales, los fotones de mayor energía que se absorben en primer lugar crean más energía en un menor número de absorciones, porque las absorciones son de mayor energía. Esto da lugar a un menor número generado de fotones y de fonones de segundo orden, y se desea evitar fotones de poca energía, especialmente si su energía es tan pequeña que cuesta encontrar una anchura de banda lo suficientemente pequeña en las capas consecutivas de la célula solar. Sin embargo, cuando se comienza primero desde el material con bajo ancho de banda, se pueden producir un gran número de absorciones, pero a una energía unitaria baja por absorción. En este caso, los fotones de mayor energía producirán muchos fotones secundarios, y el espectro será "frío", es decir se moverá a fotones de E baja de forma considerablemente más rápida. Una vez que estos fotones comienzan a acercarse a energías que ya no pueden ser recogidas fotoeléctricamente, comienzan a ser parásita y, por lo tanto, no preferentes.

Se debería hacer notar que las realizaciones descritas en el presente documento pueden ser utilizadas en cualquier combinación o permutación con cualquiera de las realizaciones descritas en las otras solicitudes de patente del inventor FI20070264 An active solar cell and method of manufacture, FI20070743 Thermodynamically shielded solar cell, FI20070801 Method and means for designing a solar cell y EP 09154530.1 Low cost solar cell y/o sus homólogas internacionales que están incorporadas ahora explícitamente en la presente solicitud.

Por ejemplo, es preferente el uso de la tensión de polarización como se describe en el documento FI20070264 especialmente en las capas inferiores de la célula solar en algunas realizaciones de la invención para conseguir una conversión fotoeléctrica en anchuras de banda muy reducidas. Por ejemplo, la concentración óptica y las soluciones de blindaje convectivo, conductivo y/o radiactivo del documento FI20070743 pueden ser implementadas de una forma muy útil para garantizar flujos luminosos elevados de fotones según la invención en algunas realizaciones. Asimismo, se puede utilizar el procedimiento de diseño informático del documento FI20070801 para diseñar algunas de las células en tándem según la invención. Se pueden combinar algunas de las realizaciones de reducción del coste del documento EP 09154530.1 con las realizaciones de la presente invención. De esta manera, se pueden derivar muchas realizaciones útiles al combinar las realizaciones de estas cinco solicitudes de patente del mismo inventor que están todas dirigidas al mismo tema: proporcionar una solución fotoeléctrica al problema energético global.

En la actualidad no se conoce cuáles son todos los factores que provocan un punto flaco en la eficacia de la célula solar. Sin embargo, en base a estos estudios del solicitante, la célula solar general en tándem es la más perjudicada por los procedimientos de *fotón-fonón* que tienen lugar fuera de la banda de máxima eficiencia cuántica de la célula solar. El concepto inventivo presentado en la presente solicitud, es decir, el filtrado de la población de fotones de forma que todas las capas de una célula solar en tándem trabajen a sus eficiencias cuánticas óptimas (QE) mejorará mucho la eficiencia de las células solares, y la energía generada por las mismas.

La invención ha sido explicada anteriormente con referencia a las realizaciones mencionadas anteriormente y se han demostrado varias ventajas comerciales e industriales. Los procedimientos y disposiciones de la invención permiten la construcción de una célula solar en la que un gran número de capas muy delgadas de célula solar trabajan cada una casi al 100% de eficiencia cuántica, porque los filtros inventivos de fotones limitan la población de fotones a las bandas más eficaces de las capas de la célula solar, y por lo tanto la invención hace que sea posible una célula solar prácticamente ideal que suministra una potencia cercana a la constante solar de $1,37 \text{ kW/m}^2$ en el espacio y aproximadamente 1 kW/m^2 en la Tierra.

La invención ha sido explicada anteriormente con referencia a las realizaciones mencionadas anteriormente. Sin embargo, es evidente que la invención no está limitada únicamente a estas realizaciones, pero comprende todas las realizaciones posibles dentro del alcance de la invención y las siguientes reivindicaciones de la patente.

Referencias

- 5 FI20070264 An active solar cell and method of manufacture
FI20070743 Thermodynamically shielded solar cell
FI20070801 Method and means for designing a solar cell
EP 09154530.1 Low cost solar cell
EP 1724 841 A1, Josuke Nakata, "Multilayer Solar Cell"
- 10 US 6320117, James P. Campbell et al., "Transparent solar cell and method of fabrication"
US6689949, Ugur Ortabasi, Concentrating photovoltaic cavity converters for extreme solar-to-electric conversion efficiencies.
US 2008/0251112A1, David G. Jenkins, Concentrating photovoltaic kaleidoscope and method. Solar Electricity, Thomas Markvart, 2ª edición, ISBN 0-471-98852-9
- 15 "An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell", Paul Preuss, Research News, Lawrence Berkeley National Laboratory.

REIVINDICACIONES

1. Una célula solar en tándem, que comprende al menos dos capas de células solares, las capas primera y segunda,
 - un primer filtro (100) de fotones dispuesto entre la primera capa (200) de la célula solar y la segunda capa (201) de la célula solar,
 - la primera célula solar (200) está dispuesta con el filtro (100) de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar,
 - el filtro (100) de fotones está dispuesto para reflejar fotones de cierta energía (λ_2) de nuevo hacia la primera célula solar (200),
 - el filtro (100) de fotones está dispuesto para ser transparente a los fotones de otras energías (λ_1) no dispuestos para ser reflejados, y estos fotones están dispuestos para entrar en la segunda célula solar (201),

caracterizada porque, el filtro (100, 101) de fotones está dispuesto para enfocar (120, 121) los referidos fotones de otras energías (λ_1), y los referidos fotones entran a través de pequeñas aberturas (140, 141) procedentes del lado del filtro (100, 101) de fotones opuesto al lado incidente de la luz solar (150), estando dispuesto dicho lado opuesto al lado incidente de la luz solar para comprender un reflector (150) de fotones.
2. Una célula solar en tándem como se reivindica en la reivindicación 1, **caracterizada porque** las referidas ciertas energías (λ_2) son energías en las que la primera capa (200) de la célula solar tiene una mayor eficiencia cuántica (QE) que la segunda capa (201) de la célula solar, y/o las otras referidas energías (λ_1) son energías en las que la segunda capa (201) de la célula solar tiene una mayor eficiencia cuántica (QE) que la primera capa (200) de la célula solar.
3. Una célula solar en tándem como se reivindica en la reivindicación 1, **caracterizada porque**, la segunda célula solar (201) está dispuesta con un reflector de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar (111) y en el lado incidente (150) de la luz solar.
4. Una célula solar en tándem como se reivindica en la reivindicación 1, **caracterizada porque**, el filtro (100, 101, 102, 103) de fotones es un filtro de pila dieléctrica y/o un filtro Rugate y/o una combinación de ambos filtros.
5. Una célula solar en tándem como se reivindica en la reivindicación 1, **caracterizada porque**, la segunda célula solar (201) está dispuesta con un segundo filtro (101) de fotones en el lado opuesto al lado incidente de la luz solar.
6. Una célula en tándem como se reivindica en la reivindicación 5, **caracterizada porque**,
 - el segundo filtro (101) de fotones está dispuesto para ser transparente a los fotones que no se encuentran a energías en las que la segunda célula solar (201) tiene una eficiencia cuántica (QE) elevada,
 - los referidos fotones transparentes están dispuestos para entrar en una tercera célula solar (202).

10

100

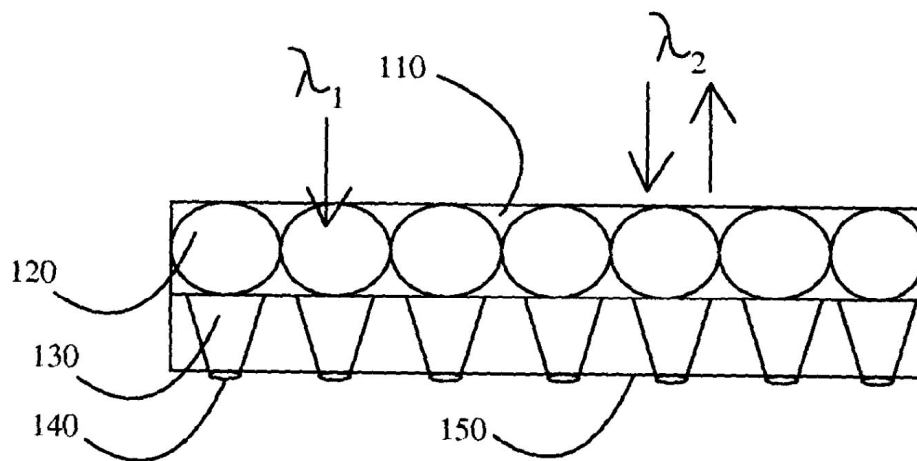


FIG 1.

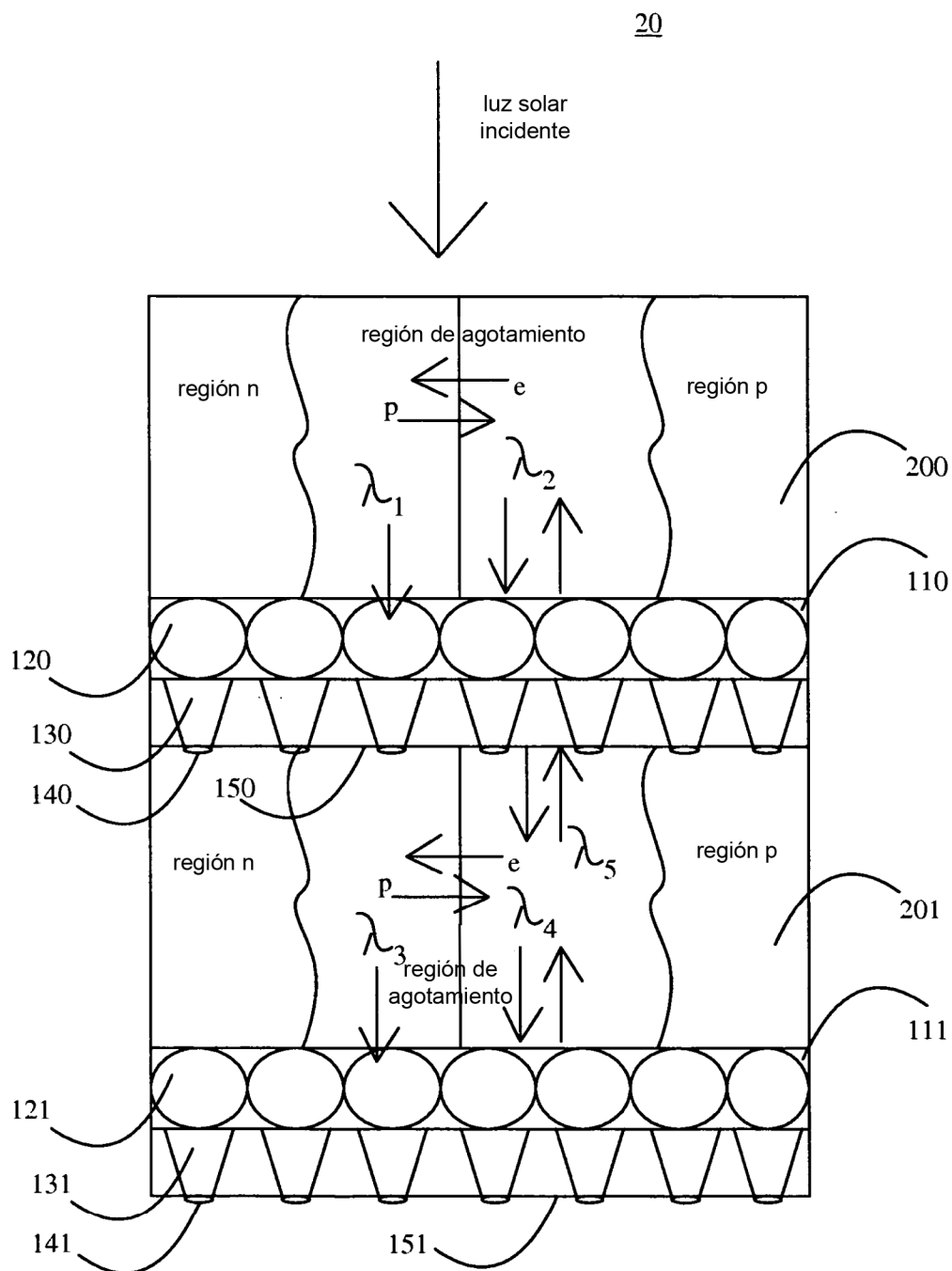


FIG 2.

30

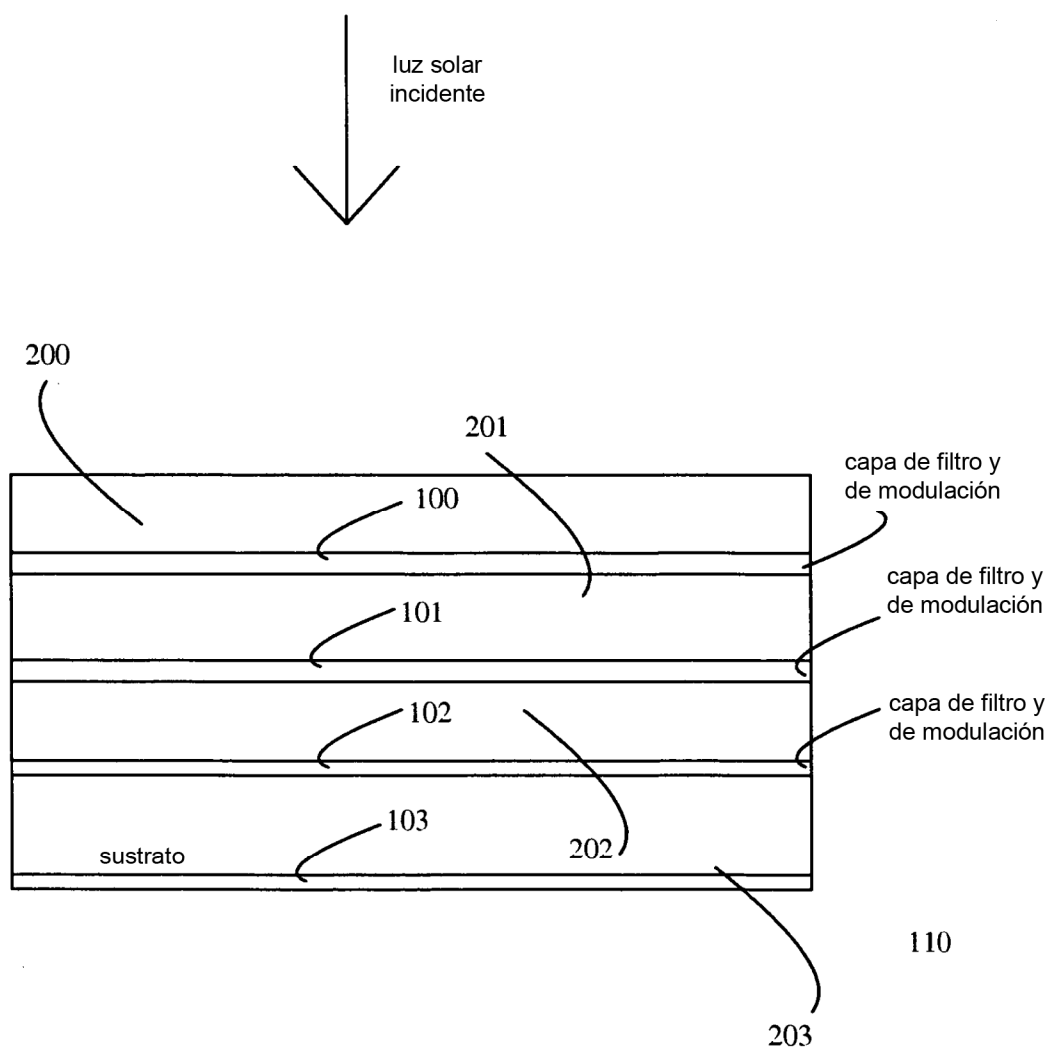


FIG 3.

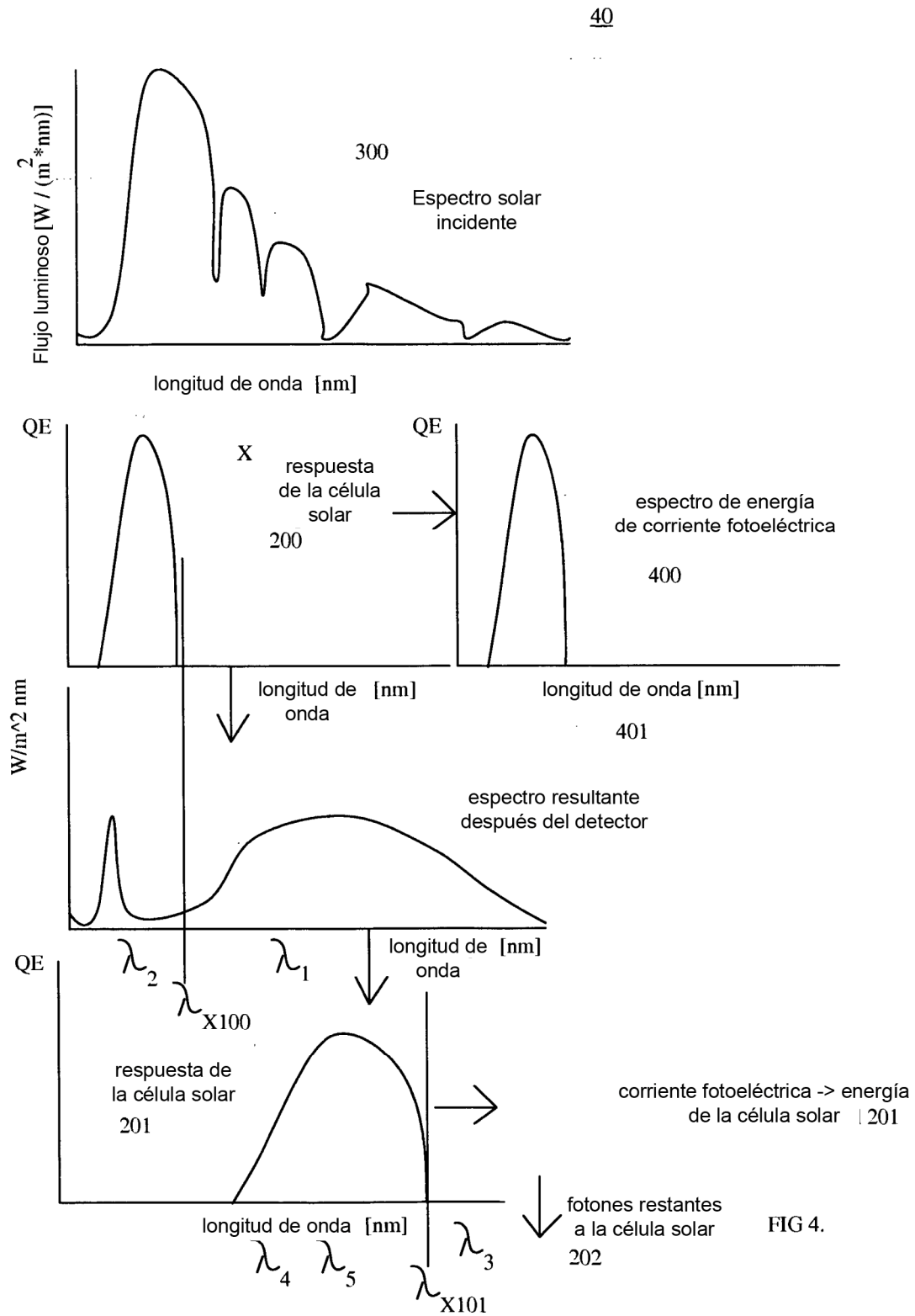


FIG 4.

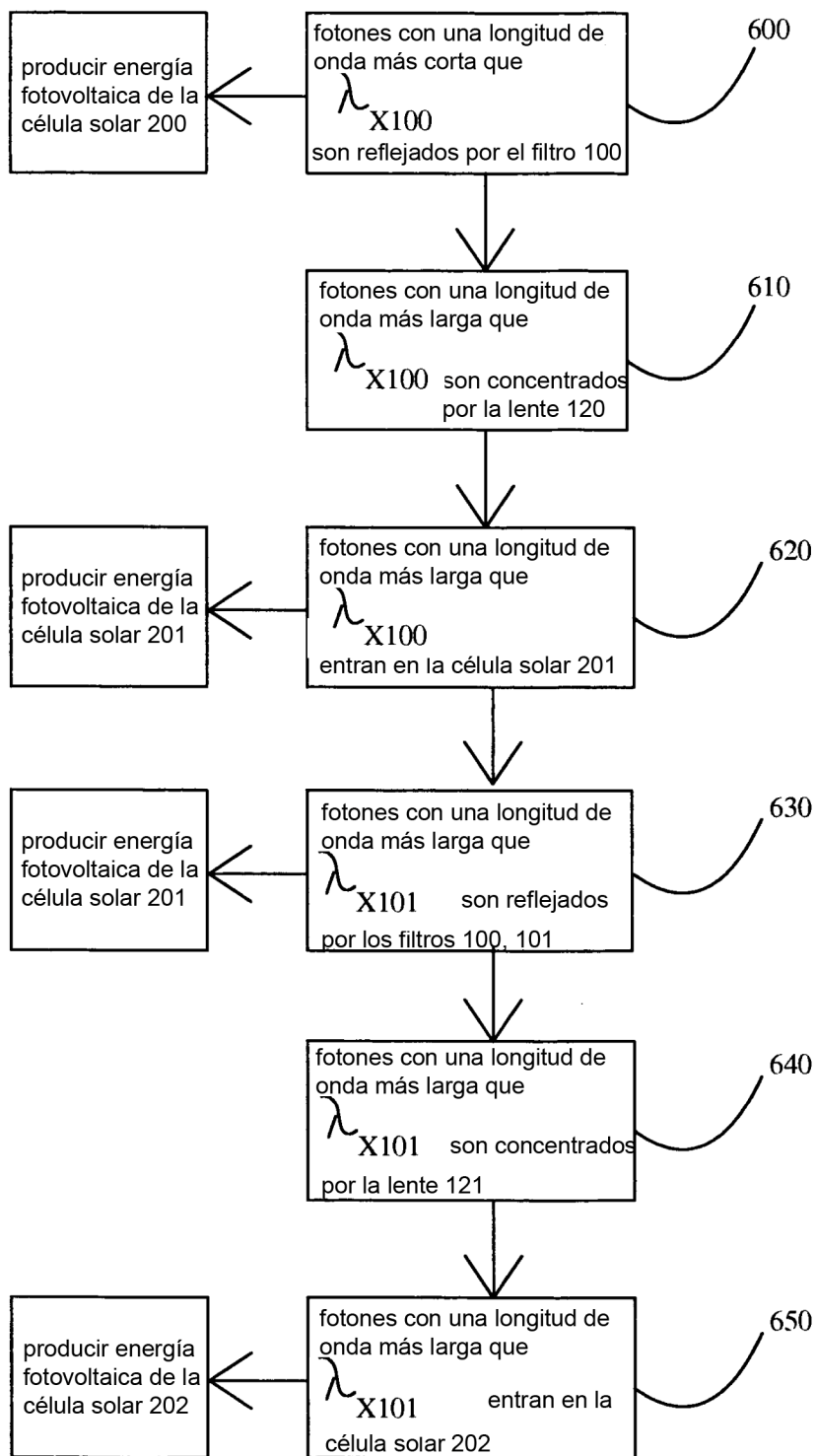
50

FIG 5.