



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 338 822**

51 Int. Cl.:
H01L 31/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07723459 .9**

96 Fecha de presentación : **21.03.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **1997157**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **03.12.2008**

54 Título: **Método para fabricar un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado.**

30 Prioridad: **21.03.2006 DE 10 2006 012 920**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
12.05.2010

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
12.05.2010

73 Titular/es: **Universität Konstanz
Universitätsstrasse 10
78464 Konstanz, DE**

72 Inventor/es: **Herguth, Axel;
Kas, Martin;
Hahn, Giso;
Melnyk, Ihor y
Schubert, Gunnar**

74 Agente: **Mir Plaja, Mireia**

ES 2 338 822 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

Método para fabricar un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado.

5 La presente invención se refiere a un método para fabricar un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado. En particular, la presente invención se refiere a un método para fabricar una célula solar basada en un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro, o un módulo fotovoltaico en el que se encapsulan dichas células solares.

10 Las células solares se usan para convertir luz directamente en energía eléctrica. Con este fin, en un semiconductor de tipo p ó n se forma una región que presenta el dopaje correspondientemente opuesto. Se produce una unión pn. Al exponerla a la luz, se producen pares de portadores de carga, quedando separados espacialmente los mismos por el gradiente de potencial formado por la unión pn. A continuación, los portadores de carga separados de esta manera se pueden difundir hacia una superficie de la célula solar y se pueden suministrar a un circuito externo mediante contactos metálicos formados en el mismo.

15 El silicio cristalino es un semiconductor usado frecuentemente para fabricar células solares. Se distingue entre silicio multicristalino (o policristalino) y monocristalino. Como el silicio monocristalino no tiene límites de grano que actúan como impurezas y, por lo tanto, sirven como centros de recombinación, el mismo presenta una calidad de material mayor en comparación con el silicio multicristalino, dando como resultado un mayor rendimiento potencial para células solares fabricadas a partir del mismo. No obstante, como consecuencia de las etapas adicionales del proceso, que consumen mucha energía, requeridas para estirar el monocristal de silicio, los costes de fabricación para el silicio monocristalino son más altos en comparación con el silicio multicristalino.

20 En la actualidad, se usan principalmente dos métodos de estirado del cristal para fabricar silicio monocristalino. Las obleas de silicio fabricadas con el método de la zona flotante (FZ) presentan la calidad más alta aunque son las más caras y se usan principalmente en el campo de la electrónica. El método Czochralski (Cz) es menos caro y, por lo tanto, resulta adecuado para ser usado para la producción en serie de células solares. En el método Czochralski, se funde silicio en un crisol. Se hace que un cristal semilla de un monocristal entre en contacto con la masa fundida y a continuación el mismo se estira hacia arriba separándolo lentamente de la masa fundida. En este caso, silicio de la masa fundida cristaliza sobre la superficie del cristal (semilla) y se forma un monocristal cilíndrico, el cual puede tener típicamente un diámetro de hasta 30 cm y una longitud de varios metros. A continuación, este monocristal se corta en obleas de un grosor de aproximadamente entre 200 y 300 μm .

25 En la actualidad, el silicio de Cz del tipo semiconductor p que se usa para fabricar células solares se dopa habitualmente con boro debido a ventajas en la tecnología del proceso. Con este fin, durante el método Cz se disuelve boro en la masa fundida de silicio. Como consecuencia de su buen comportamiento en cuanto a solubilidad, el boro llega a incorporarse en el cristal de silicio estirado de la masa fundida. Se obtiene un cristal de silicio dopado con boro, en gran medida homogéneo.

30 En el método Cz convencional, frecuentemente se disuelve oxígeno en la masa fundida de silicio, que ha sido liberado del crisol el cual consta frecuentemente de cuarzo (óxido de silicio). El oxígeno se incorpora de modo similar en el cristal de silicio.

35 Cuando se ilumina una célula solar fabricada a partir de silicio de Cz y/o se aplica un voltaje externo a la misma, se generan en ella portadores minoritarios en exceso y en la misma fluye una corriente eléctrica. En este caso, los átomos de oxígeno incorporados al silicio junto con los átomos de boro usados para el dopaje parecen formar defectos que pueden actuar como impurezas eléctricamente activas y pueden influir negativamente en las propiedades eléctricas de la célula solar. Como consecuencia de la formación de dichos defectos, la calidad del material del sustrato de silicio de Cz se deteriora durante las primeras horas de funcionamiento de la célula solar y el rendimiento de la célula solar cae hasta que alcanza la saturación en un cierto valor final. Este fenómeno se designa como “degradación inducida por portadores” del silicio de Cz, fue descubierto en 1972 y ha sido objeto de investigaciones exhaustivas hasta el momento actual.

40 Con una concentración ventajosa de boro de aproximadamente $1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y una concentración típica de oxígeno en el silicio de Cz de entre $5 \text{ y } 10 * 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, el rendimiento de una célula solar en condiciones de funcionamiento se degrada típicamente hasta en un 3% absoluto en unas pocas horas. Una pérdida de un 1% absoluto observada frecuentemente en células solares de silicio de Cz ya representa una pérdida de más del 6% relativo a un rendimiento del 16,5%, que es típico de células solares fabricadas industrialmente basadas en silicio de Cz antes de la degradación. La degradación, y por lo tanto la pérdida de rendimiento durante el funcionamiento inicial de las células solares, es mayor cuanto más elevada sea la concentración de boro y/u oxígeno.

45 El documento “Rapid Thermal Processing of Silicon solar cells-Passivation and diffusion” de Ji Youn Lee, PHD Thesis, Fraunhofer Institut für Solare Energysysteme, Freiburg, 2003, describe un método para realizar tratamientos térmicos de células solares de silicio.

50 Hasta el momento en la técnica anterior, se conocen sustancialmente dos planteamientos generales sobre cómo se puede reducir o evitar la degradación. El primer planteamiento se basa en minimizar la contaminación de oxígeno de las masas fundidas de silicio durante el método Cz. Con este fin, se desarrolló el denominado método MCz

ES 2 338 822 T3

(Czochralski Magnético) con el cual, mediante tecnología compleja de campos magnéticos, se evita el contacto entre la masa fundida de silicio y el crisol de cuarzo durante la producción del cristal, dando como resultado una reducción del contenido de oxígeno y, por lo tanto, una disminución de la degradación. No obstante, como consecuencia de la fabricación más compleja, el silicio de MCz resulta considerablemente más caro que el silicio de Cz normal.

5

El otro planteamiento se basa en la reducción de la concentración de boro en el cristal de silicio. Los cálculos han mostrado que se puede lograr un rendimiento óptimo para la célula solar usando un sustrato de silicio que tenga una concentración de boro de aproximadamente $1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Para reducir la degradación considerable que se produce con esta concentración de boro, en la producción industrial de células solares se usan frecuentemente en el momento actual sustratos de silicio de Cz que tienen una concentración de boro inferior. Como consecuencia, se reduce la degradación y aunque el rendimiento de la célula solar directamente después de su fabricación es menor que el correspondiente a un dopaje de aproximadamente $1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, se puede lograr un rendimiento estable mayor después de la degradación.

10

Para evitar completamente el problema de la degradación, actualmente también se están realizando intentos de sustituir el boro por otros dopantes tales como, por ejemplo, galio. No obstante, como consecuencia de su comportamiento en cuanto a solubilidad en silicio, el galio presenta la desventaja decisiva de que es extremadamente difícil lograr una distribución homogénea en el cristal completo. De este modo, se deberían esperar cantidades elevadas de rechazos a escala industrial de manera que esta variante no se puede considerar industrialmente viable hasta el momento.

15

Otro procedimiento conlleva el uso de fósforo como dopante y, por lo tanto, el uso de silicio de tipo n como material del sustrato. No obstante, dicho material de sustrato es inhabitual en la industria fotovoltaica existente y requeriría una modificación del proceso completo de producción.

20

Se ha establecido que la degradación del silicio de Cz es reversible mediante una etapa denominada de recocido. En dicha etapa de recocido, la oblea de silicio de Cz ó la célula solar ya procesada se calienta durante unos pocos minutos a temperaturas del orden de aproximadamente 230°C . Se observó que, a través de dicha etapa de recocido, se puede lograr nuevamente el rendimiento original de la célula solar o la longitud de difusión original de los portadores minoritarios en el sustrato de silicio antes de la degradación. Los defectos de boro-oxígeno formados durante la degradación aparentemente se disuelven como consecuencia de la etapa de recocido. De este modo, se habla de defectos metaestables. No obstante, se observó que una célula solar recocida se degrada nuevamente al situarse bajo iluminación o cuando fluye una corriente a través de la célula, es decir, bajo condiciones tales como las que se producen de forma convencional, por ejemplo, durante el funcionamiento de la célula solar. De este modo, el estado recocido parece no ser estable en una célula solar bajo condiciones de funcionamiento.

25

30

Para obtener una visión general de los efectos observados hasta el momento en relación con la degradación y de los intentos de soluciones de evitar esto aplicados hasta el momento, se hace referencia a Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000; 8; 537-547.

35

Puede que exista una necesidad de evitar los problemas antes descritos. Particularmente, puede que exista una necesidad de proporcionar un método para fabricar un elemento fotovoltaico, en el que se pueda estabilizar a un nivel elevado el rendimiento del elemento fotovoltaico.

40

Esta necesidad se puede satisfacer con un método según se define en las reivindicaciones 1, 5, 11 y 12. En las reivindicaciones dependientes se especifican realizaciones ventajosas.

45

Se propone un método para fabricar un elemento fotovoltaico tal como, por ejemplo, una célula solar individual o un módulo completo de células solares, que comprende las siguientes etapas: preparar un sustrato de silicio que contenga oxígeno, dopado con boro, y formar una capa emisora sobre una superficie del sustrato de silicio. De este modo, el método según la invención está caracterizado porque comprende una etapa adicional de tratamiento de estabilización, que comprende mantener la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionare de temperaturas y generar portadores de carga minoritarios en exceso en el sustrato de silicio durante el tiempo de tratamiento. El intervalo de temperaturas en este caso tiene un límite inferior de temperatura de aproximadamente 50°C y un límite superior de temperatura de aproximadamente 230°C .

50

El sustrato de silicio usado en el método según la invención puede ser una oblea de silicio de Cz que, por ejemplo, esté dopada con boro con una concentración de aproximadamente entre $1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $3 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Dependiendo de la fabricación, dicha oblea presenta una concentración específica de oxígeno de, por ejemplo, entre $5 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $3 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. No obstante, también se pueden usar otros sustratos de silicio que contengan oxígeno, dopados con boro, tales como, por ejemplo, obleas de silicio multicristalino o capas de silicio depositadas desde la fase gaseosa o líquida sobre un sustrato de soporte.

55

60

Para producir el gradiente de potencial requerido para la separación de los portadores de carga en una célula solar, según la invención se forma un emisor sobre la superficie del sustrato de silicio. Esta es una región que habitualmente comprende un tipo de semiconductor opuesto al tipo de semiconductor del sustrato. El silicio dopado con boro es habitualmente un semiconductor de tipo p. Se puede lograr la formación de una capa emisora sobre una superficie del sustrato, por ejemplo, mediante difusión interna superficial de un dopante de tipo n tal como, por ejemplo, fósforo hacia el sustrato. Dicha difusión se lleva a cabo típicamente a temperaturas por encima de 800°C . No obstante, también es posible usar otros métodos para producir una capa dopada tipo n. Por ejemplo, sobre la superficie del sustrato se

65

puede depositar una capa adicional dopada tipo n desde una fase gaseosa o líquida. Además, la capa no debe cubrir completamente la superficie de sustrato. Puede ser suficiente si solamente se cubre con la capa dopada tipo n una región parcial de la superficie del sustrato en la parte frontal y/o posterior del sustrato de silicio.

5 Alternativamente, el sustrato de silicio dopado con boro también puede ser un semiconductor de tipo n, por ejemplo, si el mismo se compensa en exceso con fósforo. En este caso, el emisor es una región dopada tipo p y se puede producir, por ejemplo, mediante difusión interna o aleación interna de la concentración de dopante, se pueden dar el caso de que el emisor y el sustrato sean del mismo tipo de semiconductor, por ejemplo, si las dos regiones tienen estructuras de bandas altamente diferentes de manera que se establezca un doblamiento de bandas en su interfaz, que produzca el gradiente de potencial deseado.

10 Se pueden generar portadores minoritarios en exceso en el sustrato de silicio durante la etapa del tratamiento de estabilización de varias maneras, según se describe detalladamente más adelante. Por ejemplo, además de la concentración de portadores en equilibrio que depende principalmente de la concentración de dopante, se pueden generar portadores minoritarios en exceso en el sustrato de silicio del tipo p en el que haya disponibles electrones como portadores minoritarios, mediante exposición a luz o produciendo una corriente a través del elemento fotovoltaico por aplicación de un voltaje externo.

15 Al mismo tiempo, es decir, dentro del tiempo de tratamiento, la temperatura del sustrato se debe mantener dentro del intervalo antes mencionado de temperaturas. Al aumentar el tiempo de tratamiento, aumenta sucesivamente el efecto de estabilización del rendimiento. Cuanto mayor sea el tiempo de tratamiento, más elevado será el rendimiento en el que permanece estable el elemento fotovoltaico en un funcionamiento posterior. En este contexto, parece que no es significativo si el tiempo de tratamiento se interrumpe temporalmente. Por ejemplo, la iluminación del sustrato o la aplicación del voltaje externo usado para generar los portadores minoritarios en exceso se puede interrumpir temporalmente y restablecer en un momento posterior. La temperatura también se puede reducir temporalmente por debajo de 50°C. Para el efecto logrado de estabilización del rendimiento es importante únicamente la duración completa del tratamiento durante el cual el sustrato se mantiene en el intervalo de temperaturas y se generan portadores minoritarios en exceso en el sustrato.

20 Se ha establecido que el efecto deseado de estabilización del rendimiento del elemento fotovoltaico que se va a lograr con el método según la invención se puede lograr con temperaturas crecientes del sustrato dentro de un tiempo de tratamiento más breve. De este modo, el límite inferior de la temperatura se selecciona preferentemente como 90°C, más preferentemente 130°C, todavía más preferentemente 160°C. Se ha establecido además que a medida que la temperatura se aproxima a un límite superior de 230°C, se reduce el efecto de estabilización del rendimiento. De este modo, el límite de temperatura superior del intervalo de temperaturas se selecciona preferentemente como 210°C, más preferentemente 190°C y todavía más preferentemente 180°C.

25 Según un aspecto, el método comprende además una etapa de formación de contactos eléctricos sobre el sustrato de silicio, en el que la etapa de generación de portadores minoritarios en exceso conlleva la aplicación de un voltaje eléctrico externo a los contactos. En otras palabras, se forman contactos eléctricos en la célula solar a fabricar y los mismos se usan a continuación a su vez para aplicar un voltaje a la célula solar. El voltaje se aplica preferentemente en la dirección de conducción de la unión pn formada con el sustrato de silicio y la capa dopada tipo n. Como consecuencia del voltaje aplicado, se inyectan por lo tanto portadores minoritarios a través de la región de carga espacial de la unión pn hacia la región del tipo de semiconductor respectivamente opuesto. El efecto de estabilización del rendimiento del método según la invención aumenta al aumentar el voltaje en la dirección de conducción. El voltaje se puede seleccionar de manera que sea mayor que 0,4 Voltios, preferentemente mayor que el voltaje en el que la célula solar presenta su punto de potencia máxima en el funcionamiento normal, por ejemplo, mayor que 0,6 Voltios, y más preferentemente mayor que el voltaje de circuito abierto de la célula solar en funcionamiento normal, por ejemplo, mayor que 0,7 Voltios. En relación con esto, el funcionamiento normal de la célula solar debería interpretarse como funcionamiento bajo condiciones normalizadas (25°C, iluminación con un espectro AM 1,5).

30 Preferentemente, el sustrato de silicio no se ilumina sustancialmente durante la aplicación del voltaje externo, es decir, en la realización previamente descrita en la que se inyectan portadores minoritarios en exceso por medio de una corriente producida al aplicar un voltaje externo, la etapa de tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo a oscuras. Es suficiente con calentar las células solares ya provistas de contactos en el intervalo deseado de temperaturas y aplicar un voltaje externo a los contactos. De este modo, para esta realización no se necesita ningún equipo caro que requiera una cantidad elevada de espacio. Las células solares se pueden apilar una sobre otra de manera que se ahorre espacio, en una sala controlada adecuadamente por temperatura, y simplemente es necesario conectarlas a una fuente de voltaje económica.

35 El método es particularmente ventajoso si se aplica a módulos fotovoltaicos que ya han sido conectados. En este caso, una pluralidad de células solares se interconecta de forma general dentro del módulo, parcialmente en serie y parcialmente en paralelo. El propio módulo puede tener contactos eléctricos con los que contacte fácilmente desde el exterior. Consecuentemente, es suficiente con conectar el módulo completo a una fuente de voltaje externa cuyo voltaje se corresponda con el voltaje deseado a aplicar a una célula individual multiplicado por el número de células solares conectadas en serie dentro del módulo. De este modo, es posible una realización del presente método según la invención, de interés económico particular, con la cual módulos solares listos para funcionar, acabados, se someten a la etapa de tratamiento de estabilización antes de ser entregados finalmente a los consumidores finales almacenándolos,

ES 2 338 822 T3

por ejemplo, en una sala controlada adecuadamente por temperatura, mientras se aplica el voltaje correspondiente durante un tiempo de tratamiento predeterminado. De este modo, los costes en los que se incurre, además de los de un método de fabricación normal para módulos solares, mediante la etapa de tratamiento de estabilización según la invención, son mínimos. Así, el método según la invención es económico ya que se puede lograr un rendimiento estable para los módulos solares fabricados, con un aumento mínimo de los costes, que es aproximadamente entre un 0,5 y un 2% absoluto mayor a largo plazo en comparación con módulos solares convencionales que se degradan notablemente en las primeras horas de funcionamiento.

Según otra realización del método de acuerdo con la invención, la etapa de generación de portadores minoritarios en exceso comprende iluminar el sustrato de silicio. Por ejemplo, el sustrato de silicio se puede iluminar desde el lado que actúa como lado encarado al sol en la célula solar acabada. Si la energía fotónica de la luz usada para la iluminación es mayor que la banda de energía prohibida del silicio, mediante la iluminación se generan portadores minoritarios en exceso en el silicio. La iluminación se lleva a cabo preferentemente usando luz a una longitud de onda menor que 1.180 nm y que tenga una intensidad de radiación mayor que 1.000 W/m². De este modo, para la iluminación se pueden usar lámparas convencionales tales como lámparas halógenas.

En esta realización, no es necesario, para el método según la invención, que se haga contacto eléctricamente con el sustrato de silicio. La etapa de tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo, por ejemplo, antes de que se apliquen los contactos eléctricos a la célula solar. No obstante, en este caso, se debe tener cuidado en garantizar que, durante la metalización posterior, no se usen temperaturas sustancialmente mayores que 200°C, las cuales podrían anular el efecto de estabilización. Por ejemplo, la metalización se podría llevar a cabo mediante deposición de vapor de contactos metálicos.

El tiempo de tratamiento t , medido en minutos, durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo seleccionare de temperaturas se selecciona de acuerdo con las siguientes condiciones:

$$t \geq \frac{a}{(y+b)^c} * \exp\left(\frac{x}{(T+273)}\right)$$

en la que T es la temperatura media del intervalo seleccionare de temperaturas en grados centígrados durante el tiempo de tratamiento, a , b , c y x son constantes.

Para el caso en el que la etapa de tratamiento de estabilización se lleva a cabo mientras se aplica un voltaje externo sin iluminar el elemento fotovoltaico, y es la densidad de corriente correspondiente a la corriente producida en la célula en A/cm². El tiempo de tratamiento t se selecciona preferentemente de manera que satisfaga la ecuación anterior para $a = 4,247 * 10^{-14}$, $b = 0,00286$, $c = 0,887$ y $x = 12.550$. Experimentos efectuados por el solicitante han revelado que, con este tiempo de tratamiento mínimo, se logra la suficiente estabilización del rendimiento del elemento voltaico. En comparación con una célula solar no estabilizada, degradada, convencional, dicha célula solar estabilizada tiene un voltaje de circuito abierto que se incrementa en aproximadamente el 50% del aumento máximo del voltaje de circuito abierto obtenible mediante recocido. Se logra todavía una mejor estabilización del rendimiento si el tiempo de tratamiento se selecciona para que sea mayor de manera que se satisfaga la desigualdad anterior para $a = 3,272 * 10^{-14}$, $b = 0,00352$, $c = 0,934$ y $x = 12.800$. De este modo se puede lograr un aumento de aproximadamente el 75% en el voltaje de circuito abierto.

Para el otro caso en el que la etapa de tratamiento de estabilización se lleva a cabo iluminando el elemento fotovoltaico y sin aplicar un voltaje externo, y es la intensidad de iluminación en kW/m². El tiempo de tratamiento t se selecciona preferentemente de manera que satisfaga la ecuación anterior de, por ejemplo, la reivindicación 1 para $a = 2,298 * 10^{-11}$, $b = 0,399$, $c = 1,722$ y $x = 11.100$. Experimentos efectuados por el solicitante han revelado que, con este tiempo de tratamiento mínimo, se logra una estabilización suficiente del rendimiento del elemento fotovoltaico. En comparación con una célula solar no estabilizada, degradada, convencional, dicha célula solar estabilizada presenta un voltaje de circuito abierto que se incrementa en aproximadamente el 50% del aumento máximo del voltaje de circuito abierto obtenible mediante recocido. Se logra todavía una mejor estabilización del rendimiento si el tiempo de tratamiento se selecciona para que sea mayor de manera que se satisfaga la desigualdad anterior para $a = 5,355 * 10^{-11}$, $b = 0,355$, $c = 1,349$ y $x = 11.000$. De este modo se puede lograr un aumento de aproximadamente el 75% en el voltaje de circuito abierto.

Tal como ya se ha mencionado, el efecto de estabilización del rendimiento del método aumenta al aumentar el tiempo de tratamiento. Los límites especificados para el tiempo de tratamiento t tienden a ser límites determinados económicamente en lugar de límites determinados técnicamente, y se seleccionaron de manera que se pueda lograr el mejor efecto posible de estabilización del rendimiento dentro de un tiempo de tratamiento que sea aceptable desde el punto de vista económico. Estudios llevados a cabo por el solicitante han revelado que se puede lograr una estabilización satisfactoria del rendimiento a temperaturas de tratamiento seleccionadas de manera que sean correspondientemente altas, por ejemplo, por encima de 140°C con tiempos de tratamiento de 30 minutos o, a temperaturas incluso mayores, 20 minutos.

ES 2 338 822 T3

Desde el punto de vista económico, es deseable que el tiempo de tratamiento sea lo más breve posible. Una prolongación de la etapa de estabilización sigue produciendo una ligera mejora en el rendimiento estabilizado pero la misma ya no es proporcional al incremento de costes en los que se incurre de esta manera. Por lo tanto, es preferible seleccionar el tiempo de tratamiento de manera que sea menor que un día, preferentemente menor que cinco horas y todavía más preferentemente menor que una hora.

Según otra realización, el método según la invención comprende una última etapa del proceso de alta temperatura con temperaturas del proceso por encima de 230°C, en el que la etapa de tratamiento de estabilización viene a continuación de la etapa del proceso de alta temperatura. La etapa del proceso de alta temperatura puede ser cualquier etapa del proceso tal como la que se usa habitualmente en la fabricación de elementos fotovoltaicos, en particular células solares. Por ejemplo, puede comprender la etapa de difusión antes mencionada para formar la capa dopada tipo n. No obstante, en la mayoría de los casos, esta etapa de difusión no es la última etapa de alta temperatura del proceso. A continuación pueden venir otros procesos en los que, por ejemplo, una etapa de proceso de metalización, en la que se aplican contactos metálicos al sustrato de silicio y a continuación los mismos se someten a cocción, puede ser la última etapa del proceso de alta temperatura. En la producción industrial de células solares, frecuentemente se imprimen contactos metálicos sobre el sustrato de silicio usando una pasta que contiene metal, en el método de serigrafía, y los mismos se someten a cocción en el sustrato a temperaturas por encima de 600°C. Según los conocimientos actuales, para el funcionamiento del método según la invención, es decir, para la estabilización del rendimiento, es necesario o por lo menos favorable que la etapa de mantener el sustrato en el intervalo elevado de temperaturas y generar simultáneamente portadores minoritarios en exceso se lleve a cabo después de una etapa última del proceso de alta temperatura ya que otra etapa del proceso de alta temperatura, es decir, el calentamiento del sustrato a más de 230°C, podría anular el efecto de estabilización del rendimiento logrado con el tratamiento. No obstante, no es importante que el tiempo de tratamiento venga directamente a continuación de la última etapa de alta temperatura. Después de la última etapa de alta temperatura, se pueden llevar a cabo inicialmente otras etapas cualesquiera a otra temperatura por debajo de 200°C, por ejemplo, antes de que la temperatura del sustrato se fije al intervalo de temperaturas antes mencionado y se generen los portadores minoritarios en exceso.

Según otra realización, el método según la invención comprende una etapa de encapsulado del sustrato de silicio en un módulo, en el que la etapa de tratamiento de estabilización viene a continuación de la etapa de encapsulación. En otras palabras, el método se usa para fabricar un módulo de células solares en el que las células solares listas para funcionar, ya procesadas, se encapsulan en un módulo antes de que las mismas se sometan al tratamiento a temperatura elevada y a la generación de portadores minoritarios en exceso.

Esta realización tiene la ventaja de que la etapa del tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo simultáneamente para una pluralidad de células solares. No obstante, se debe tener cuidado en garantizar que el intervalo de temperaturas se seleccione adecuadamente dentro de la etapa de tratamiento de estabilización, es decir, que el módulo no sufra desperfectos. Por ejemplo, por encima de una temperatura de 180°C, el cableado usado para conectar las células solares individuales puede llegar a soltarse ya que la soldadura usada se licua. Temperaturas por encima de aproximadamente 140°C pueden provocar desperfectos en el módulo ya que la película laminada de EVA usada frecuentemente sufre desperfectos por encima de dicha temperatura.

Según otro aspecto de la invención, se propone un método para estabilizar el rendimiento de un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro. En este caso, un elemento fotovoltaico convencional acabado, por ejemplo, una célula solar o un módulo solar completo, se somete a la etapa de tratamiento de estabilización descrita anteriormente y, de este modo, se estabiliza en un rendimiento que se corresponde aproximadamente con el rendimiento que se logra mediante el recocido. Las características de las realizaciones previamente descritas del método de fabricación también se pueden aplicar apropiadamente a este método de estabilización.

Con métodos como los propuestos en el presente documento, se puede obtener un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro, y que presenta un estado estabilizado en cuanto a rendimiento, en el que el elemento fotovoltaico presenta un rendimiento elevado tal como el que se puede lograr mediante recocido, en el que el rendimiento de la célula solar cae en menos de un 5% relativamente, preferentemente menos de un 2% relativamente, bajo iluminación.

Los expertos en la materia deducirán, a partir de la siguiente descripción de realizaciones preferidas y las figuras adjuntas, otros detalles, características y ventajas de la invención.

La figura 1 muestra un modelo de tres estados con el que se puede explicar el modo de funcionamiento del método según la invención.

La Figura 2 muestra una gráfica que proporciona los resultados de mediciones referentes al cambio del rendimiento absoluto de una célula solar fabricada según la invención, en función del tiempo de tratamiento de la etapa de tratamiento de estabilización a varias temperaturas de tratamiento entre 45°C y 85°C cuando se induce una corriente en la célula solar a oscuras.

La Figura 3 muestra una gráfica que proporciona los resultados de mediciones referentes al cambio del rendimiento de una célula solar fabricada según la invención, en función del tiempo de tratamiento de la etapa de tratamiento de

estabilización a una temperatura de tratamiento de 120°C y bajo una iluminación de aproximadamente 1.000 W/m² sin aplicar un voltaje externo.

A continuación, en el presente documento se expondrá, en referencia a la Figura 1, un modelo que se puede usar para sustanciar el efecto de estabilización del rendimiento, logrado con el método según la invención. No obstante, se indica que las relaciones causales exactas que dan como resultado la estabilización del rendimiento lograda con el método según la invención no fueron interpretadas todavía de forma detallada en el momento de redactar la presente solicitud de patente. El modelo propuesto y los resultados de mediciones ofrecidos para respaldar el mismo no deberían, por lo tanto, limitar en modo alguno el ámbito de protección según definen las reivindicaciones adjuntas.

Hasta el momento, se conocían dos estados diferentes para silicio de Cz, que contenía oxígeno, dopado con boro, en un modelo simplificado. Al primer estado, mostrado como (A) en la Fig. 1, se le designa en lo sucesivo como “estado recocido”. En este estado, parece que no hay impurezas, o que hay muy pocas, provocadas por boro y oxígeno, que promuevan la recombinación y, por lo tanto, provoquen un deterioro en el rendimiento de una célula solar, o estas impurezas están eléctricamente inactivas. En el estado (A), oxígeno contenido en el cristal de silicio actúa solamente de forma débil como centro activo de recombinación. Como el estado (A) se mide de forma habitual directamente después del recocido, es decir, un tratamiento térmico a oscuras que corrige la degradación, al mismo se le designa como “recocido”.

Al segundo estado, mostrado como (B) en la Fig. 1, se le designa como “estado degradado”. La degradación se activa supuestamente por la formación de un defecto en el que se forman complejos a partir de oxígeno intersticial y boro sustitutivo. La formación de complejos de boro-oxígeno tiene lugar bajo iluminación o bajo un flujo de corriente en particular a temperaturas por debajo de 50°C, tales como las que se producen típicamente durante el funcionamiento normal de una célula solar. Por contraposición al estado (A), el estado degradado (B) presenta impurezas de recombinación fuertemente activas las cuales reducen decisivamente la longitud de difusión efectiva de los portadores minoritarios y, por lo tanto, son responsables del deterioro de las propiedades eléctricas de la célula solar.

Estudios efectuados por el solicitante de la presente solicitud de patente sugieren que, además de estos dos estados conocidos, existe también otro estado (C) en el silicio de Cz. A este estado se le asignará en lo sucesivo como “estado regenerado”. En este estado, tal como en el estado (A), parece que no hay centros de recombinación activos, o que hay muy pocos, o los mismos están eléctricamente inactivos. Por contraposición al estado recocido (A), el estado regenerado (C), según hallazgos realizados hasta el momento, es estable en el tiempo durante el funcionamiento posterior de la célula solar bajo iluminación o bajo un flujo de corriente.

El método según la invención muestra una manera de transferir el elemento fotovoltaico desde el estado degradado (B) al estado regenerado (C) en el que las propiedades eléctricas de la célula solar se recuperan nuevamente hasta un nivel que se corresponde sustancialmente con el estado inicial o recocido (A).

La suposición de un tercer estado adicional, es decir, la transición desde el modelo de dos estados conocido hasta el momento hacia el modelo de tres estados expuesto en el presente documento, parece ser necesaria ya que estudios realizados por el solicitante revelan que la célula solar parece “conocer” si se encuentra en el estado recocido degradable (A) o en el estado regenerado estable (C). Parece que esto requiera la existencia de estados (A) y (C) microscópicamente diferentes aun cuando no haya disponibles, para el estado regenerado (C) recién introducido, hallazgos microscópicos detallados referentes a su composición.

No se ha obtenido todavía una diferenciación directa de estados (A) y (C) debido a las propiedades eléctricas similares. Para determinar si los estados (A) ó (C) están presentes en un cristal de silicio de Cz ó cómo se dividen los dos estados, todos los defectos del estado (A) se deben transferir al estado (B), es decir, la célula solar se debe degradar. Si se compara entonces el estado final degradado con el de la degradación completa del estado recocido (A) (es decir, después de una etapa de recocido por encima de 200°C), la desviación es una medida de la población de estados (A) y (C).

Los estados individuales (A), (B) y (C) parecen poder pasar parcialmente de uno a otro dependiendo de las condiciones de iluminación, corriente y temperatura. En este contexto, a una transición desde (A) a (B) se le designa como degradación. A la transición inversa desde (B) a (A) se le designa como recocido. A una transición desde (B) a (C), tal como la que se puede lograr con el método según la invención, se le designa como regeneración. La transición inversa desde (C) directamente a (B) no ha sido observada experimentalmente hasta el momento. Según estudios realizados por el solicitante bajo condiciones de funcionamiento, células solares fabricadas con el método según la invención resultaron estables durante por lo menos 137 h con respecto a su rendimiento, permaneciendo este último sustancialmente en el nivel del estado recocido. Por lo tanto, se considera que el estado regenerado (C) es en gran medida temporalmente estable. Se puede lograr una transición desde el estado regenerado (C) al estado recocido (A) mediante una etapa de recocido a aproximadamente 230°C, que se lleva a cabo habitualmente durante entre 10 y 30 minutos, y a la que se le designa también como recocido. La transición inversa desde (A) directamente a (C) no ha sido observada experimentalmente todavía.

La vía de reacción desde (A) a (B) (degradación) se puede excitar por iluminación y/o flujo de corriente inducido aunque también presenta una fuerte dependencia de la temperatura. Se ha descrito por lo tanto como asistida térmicamente. Según hallazgos realizados hasta el momento, las reacciones de recocido desde (B) a (A) y (C) a (A) se

activan de forma puramente térmica, es decir, la reacción se intensifica con el aumento de la temperatura. Si en este caso no se fuerza una nueva degradación, el sistema se puede transferir completamente al estado (A) con una cierta combinación de temperatura-tiempo. La reacción de regeneración desde (B) a (C) parece ser asistida térmicamente, es decir, parece activarse por iluminación y/o flujo de corriente inducida aunque avanza de forma considerablemente más rápida a temperaturas mayores.

Las transiciones entre los estados individuales compiten entre ellas. Según hallazgos realizados hasta el momento, la transición que resulta dominante depende principalmente de las condiciones de temperatura y posiblemente de la concentración de portadores minoritarios en exceso. Bajo condiciones tales como las seleccionadas para el método según la invención, predomina la transición del estado degradado (B) al estado regenerado (C). Cuanto más cristal de silicio se transfiera al estado (C), más ampliamente se estabilizará el rendimiento de una célula solar correspondiente.

Estudios tales como los que se muestran a continuación en el presente documento, entre otros, en referencia a las gráficas representadas en las Figuras 2 y 3, han dado lugar a relaciones sobre cómo el efecto de estabilización del rendimiento del método según la invención depende de parámetros del proceso.

La Figura 2 muestra la pérdida de rendimiento en porcentaje absoluto en función del tiempo de tratamiento para varias temperaturas cuando la célula solar bajo estudio se regenera bajo un flujo de corriente de 20 mA/cm² a oscuras. Puede observarse que la degradación provocada aproximadamente en el tiempo cero y la pérdida asociada de rendimiento se recuperan aproximadamente de nuevo en el transcurso del tiempo de tratamiento de regeneración, y la regeneración avanza más rápido cuanto mayor sea la temperatura de regeneración seleccionada. Otros estudios han mostrado que este efecto también parece tener continuidad a temperaturas mayores hasta valores más altos que 160°C. No se observó ninguna regeneración perceptible a temperaturas por debajo de 50°C. A 65°C, la regeneración avanza muy lentamente e incluso después de 160 horas, la pérdida de rendimiento debida a la degradación únicamente se ha reducido aproximadamente a la mitad. Mientras que a 85°C, una regeneración amplia requiere todavía más de 80 horas, a 110°C la misma se produce después de solo aproximadamente 2 horas, a 140°C este tiempo se reduce hasta aproximadamente 40 minutos ya 160°C se midieron aproximadamente 25 minutos (en la Fig. 2 no se representan las mediciones para 110°C, 140°C y 160°C).

Se observó un efecto similar cuando la célula solar se iluminó con luz en lugar de hacer que pasara corriente a través de la misma a oscuras tal como en el caso antes descrito. En este caso, se estableció que el tiempo de tratamiento requerido para lograr una regeneración específica es sustancialmente proporcional a la intensidad de la iluminación. Una fuente de luz que sea diez veces más fuerte puede acelerar aproximadamente el proceso de tratamiento de estabilización en un factor de 8. La proporcionalidad parece mantenerse hasta una intensidad de iluminación de por lo menos 1.000 W/m², bajo una iluminación todavía más fuerte la aceleración disminuye y parece llegar a la saturación.

La Figura 3 muestra resultados de mediciones que muestran el rendimiento de una célula solar fabricada según la invención, en función del tiempo de tratamiento. La célula solar se iluminó a 120°C con aproximadamente 1.000 W/m² usando una lámpara halógena. No se aplicó ningún voltaje externo. Puede observarse que se logra una regeneración casi completa después de aproximadamente 35 minutos.

Con respecto a la dependencia de la temperatura, se estableció que el efecto de regeneración del método según la invención parece disminuir a partir de una temperatura de aproximadamente 190°C. Esto se interpreta, en el momento actual, como que a partir de esta temperatura aumenta la competición debida a la transición desde el estado degradado (B) o desde el estado regenerado (C) al estado recocado degradable (A) y, consecuentemente, el sistema ya no cambia principalmente hacia el estado regenerado (C) sino también parcialmente hacia el estado recocado no estable (A).

No se ha observado hasta el momento una regeneración directa desde el estado recocado (A) al estado regenerado (C) sin el desvío a través del estado degradado (B). Si se genera un exceso de portadores minoritarios además del mantenimiento a temperatura elevada (tal como en los estudios mostrados en la Fig. 2 y en la Fig. 3), se observa que, partiendo de un estado inicial recocado (A), la célula solar inicialmente se degrada, aunque a continuación se recupera sucesivamente en el transcurso posterior de la etapa del tratamiento de estabilización y pasa al estado regenerado (C).

No obstante, el principio de funcionamiento antes mencionado se puede usar para deducir cómo se puede determinar si una célula solar acabada se fabricó usando el método según la invención: la célula solar fabricada según la invención se encuentra en el estado regenerado estabilizado en rendimiento (C) tal como se ha descrito anteriormente. No obstante, la misma se puede transferir al estado recocado no estable (A) mediante una etapa de recocado a temperaturas de aproximadamente 230°C. Si, después de dicha etapa de recocado, una célula solar bajo estudio se degrada durante el funcionamiento normal posterior a un rendimiento por debajo del rendimiento estable original correspondiente a la misma célula solar, se puede determinar consecuentemente que la célula solar se fabricó originalmente usando el método según la invención y se estabilizó con respecto a su rendimiento.

Finalmente, se describen realizaciones ilustrativas del método según la invención en las que la etapa de estabilización se integró en un método convencional para fabricar una célula solar.

Una oblea de silicio de Cz disponible comercialmente se sometió inicialmente a ataque químico y se limpió para eliminar los desperfectos de cortes superficiales producidos en la oblea por el corte del cristal de silicio de Cz. A continuación, se realiza una difusión de una capa emisora de conducción n en la superficie de la oblea mediante difusión de

ES 2 338 822 T3

POCl₃. A continuación se imprimieron contactos de rejilla frontales sobre la capa emisora mediante serigrafía usando una pasta de película gruesa, que contenía plata, y una pantalla de geometría correspondiente. Después de haber secado la pasta de película gruesa en un horno continuo, se imprimió una pasta de película gruesa, que contenía aluminio, sobre el lado posterior de la oblea para formar el contacto posterior. A continuación, el contacto tanto frontal como posterior se sometieron a cocción en la superficie de la oblea a una temperatura de entre 700 y 900°C en un horno continuo. Después de esta última etapa de alta temperatura, la célula solar está en principio lista para funcionar, es decir, tiene la unión pn requerida para separar pares de portadores de carga generados por la luz, y contactos frontales y posteriores para transportar los pares de portadores de carga separados de esta manera.

10 La célula solar lista para funcionar se somete a continuación a la etapa de tratamiento de estabilización según la invención. En este caso, la célula solar se coloca en una placa calefactora y se calienta, por ejemplo, a una temperatura de 160°C. Al mismo tiempo, la célula solar se ilumina por medio de una lámpara halógena sobre su lado frontal, generándose de este modo portadores minoritarios en exceso en la célula solar. La célula solar se mantiene en este estado durante aproximadamente 30 minutos. A continuación se puede enfriar y llevar a un procesado adicional, por ejemplo, cableado y encapsulado en módulos.

20 En una realización alternativa, la célula solar lista para funcionar se conecta en serie con otras células solares a través de tiras de contacto soldadas en sus contactos frontales y posteriores y se encapsula en un módulo usando una película de EVA (etileno acetato de vinilo). Las tiras de contacto se conectan eléctricamente a conexiones para el módulo. A continuación, las conexiones del módulo se conectan a una fuente de voltaje externa cuyo voltaje se selecciona de tal manera que se aplique un voltaje de aproximadamente 0,7 voltios a cada una de las células solares conectadas en serie. Los módulos situados de esta manera bajo aplicación de voltaje se almacenan entonces durante aproximadamente una hora en una sala calentada de forma adecuada a, por ejemplo, 140°C.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ES 2 338 822 T3

REIVINDICACIONES

5 1. Método para fabricar un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado, que comprende las siguientes etapas:

proporcionar un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro;

formar una capa emisora sobre una superficie del sustrato de silicio;

10 formar contactos eléctricos sobre el sustrato de silicio;

en el que el método comprende además una etapa de tratamiento de estabilización, que comprende:

15 mantener la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionable de temperaturas que tiene un límite de temperatura inferior de 50°C y un límite de temperatura superior de 230°C y

generar portadores de carga minoritarios en exceso en el sustrato de silicio durante el tiempo del tratamiento;

20 en el que la etapa de generar portadores minoritarios en exceso conlleva la aplicación de un voltaje eléctrico externo a los contactos;

25 en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo seleccionable de temperaturas viene dado por:

$$30 \quad t \geq \frac{a}{(y + b)^c} * \exp\left(\frac{x}{(T + 273)}\right)$$

35 en la que T es la temperatura media del intervalo seleccionable de temperaturas en °C durante el tiempo de tratamiento, y es la densidad de corriente a través del elemento fotovoltaico producida por el voltaje aplicado, en A/cm², y $a = 4,247 * 10^{-14}$, $b = 0,00286$, $c = 0,887$ y $x = 12.550$, preferentemente $a = 3,272 * 10^{-14}$, $b = 0,00352$, $c = 0,934$ y $x = 12.800$.

40 2. Método según la reivindicación 3, en el que el voltaje se aplica en la dirección de conducción de la unión pn formada con el sustrato de silicio y la capa emisora.

45 3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que el voltaje aplicado es mayor que 0,4 V, preferentemente mayor que 0,6 V y más preferentemente mayor que 0,7 V.

4. Método según la reivindicación 1, 2 ó 4, en el que el sustrato de silicio no se ilumina sustancialmente durante la aplicación del voltaje externo.

50 5. Método para fabricar un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado, que comprende las siguientes etapas:

proporcionar un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro;

55 formar una capa emisora sobre una superficie del sustrato de silicio;

en el que el método comprende además una etapa de tratamiento de estabilización, que comprende:

60 mantener la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionable de temperaturas que tiene un límite de temperatura inferior de 50°C y un límite de temperatura superior de 230°C y

generar portadores de carga minoritarios en exceso en el sustrato de silicio durante el tiempo del tratamiento;

65 en el que la etapa de generar los portadores minoritarios en exceso comprende iluminar el sustrato de silicio;

ES 2 338 822 T3

en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo seleccionable de temperaturas viene dado por:

$$t \geq \frac{a}{(y+b)^c} * \exp\left(\frac{x}{(T+273)}\right)$$

en la que T es la temperatura media del intervalo seleccionable de temperaturas en °C durante el tiempo de tratamiento, y es la intensidad de radiación en kW/m², y $a = 2,298 * 10^{-11}$, $b = 0,399$, $c = 1,722$ y $x = 11.100$, y preferentemente $a = 5,355 * 10^{-11}$, $b = 0,355$, $c = 1,349$ y $x = 11.000$.

6. Método según la reivindicación 5, en el que la iluminación tiene lugar usando luz que tiene una longitud de onda más corta que 1.180 nm.

7. Método según la reivindicación 5 ó 6, en el que la iluminación tiene lugar usando luz que tiene una intensidad de radiación mayor que 10 W/m², preferentemente mayor que 100 W/m² y más preferentemente mayor que 1.000 W/m².

8. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el límite de temperatura inferior es 90°C, preferentemente 130°C, más preferentemente 160°C y en el que el límite de temperatura superior es 210°C, preferentemente 190°C, más preferentemente 180°C.

9. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una última etapa de alta temperatura del proceso con temperaturas del proceso por encima de 230°C, en el que la etapa de tratamiento de estabilización viene a continuación de la etapa del proceso de alta temperatura.

10. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una etapa de encapsulación del sustrato de silicio en un módulo, en el que la etapa de tratamiento de estabilización viene a continuación de la etapa de encapsulación.

11. Método para estabilizar el rendimiento de un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro, que comprende las etapas;

mantener la temperatura del elemento fotovoltaico durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionable de temperaturas que tiene un límite de temperatura inferior de 50°C, preferentemente 90°C, más preferentemente 130°C y todavía más preferentemente 160°C y un límite de temperatura superior de 230°C, preferentemente 210°C, más preferentemente 190°C y todavía más preferentemente 180°C, y generar portadores minoritarios en exceso en el elemento fotovoltaico durante el tiempo de tratamiento;

en el que la etapa de generar portadores minoritarios en exceso conlleva la aplicación de un voltaje eléctrico externo a contactos eléctricos del elemento fotovoltaico;

en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo seleccionable de temperaturas viene dado por:

$$t \geq \frac{a}{(y+b)^c} * \exp\left(\frac{x}{(T+273)}\right)$$

en la que T es la temperatura media del intervalo seleccionable de temperaturas en °C durante el tiempo de tratamiento, y es la densidad de corriente a través del elemento fotovoltaico producida por el voltaje aplicado, en A/cm², y $a = 4,247 * 10^{-14}$, $b = 0,00286$, $c = 0,887$ y $x = 12.550$, preferentemente $a = 3,272 * 10^{-14}$, $b = 0,00352$; $c = 0,934$ y $x = 12.800$.

12. Método para estabilizar el rendimiento de un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio que contiene oxígeno, dopado con boro, que comprende las etapas:

mantener la temperatura del elemento fotovoltaico durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionable de temperaturas que tiene un límite de temperatura inferior de 50°C, preferentemente 90°C, más preferentemente 130°C y todavía más preferentemente 160°C y un límite de temperatura superior de 230°C, preferentemente 210°C, más preferentemente 190°C y todavía más preferentemente 180°C y

ES 2 338 822 T3

generar portadores minoritarios en exceso en el elemento fotovoltaico durante el tiempo de tratamiento;

en el que la etapa de generar los portadores minoritarios en exceso comprende iluminar el elemento fotovoltaico;

5 en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo seleccionable de temperaturas viene dado por:

$$10 \quad t \geq \frac{a}{(y+b)^c} * \exp\left(\frac{x}{(T+273)}\right)$$

15 en la que T es la temperatura media del intervalo seleccionable de temperaturas en °C durante el tiempo de tratamiento, y es la intensidad de radiación en kW/m², $a = 2,298 * 10^{-11}$, $b = 0,399$, $c = 1,722$ y $x = 11.100$, y preferentemente $a = 5,355 * 10^{-11}$, $b = 0,355$, $c = 1,349$ y $x = 11.000$.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

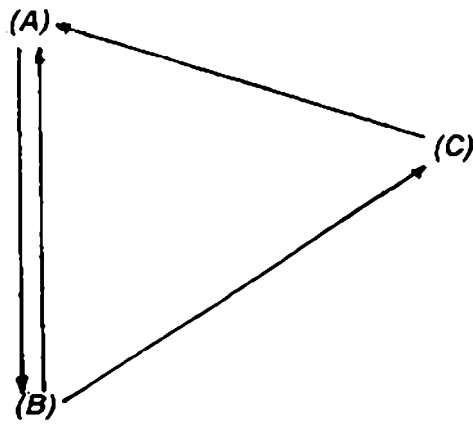


Fig. 1

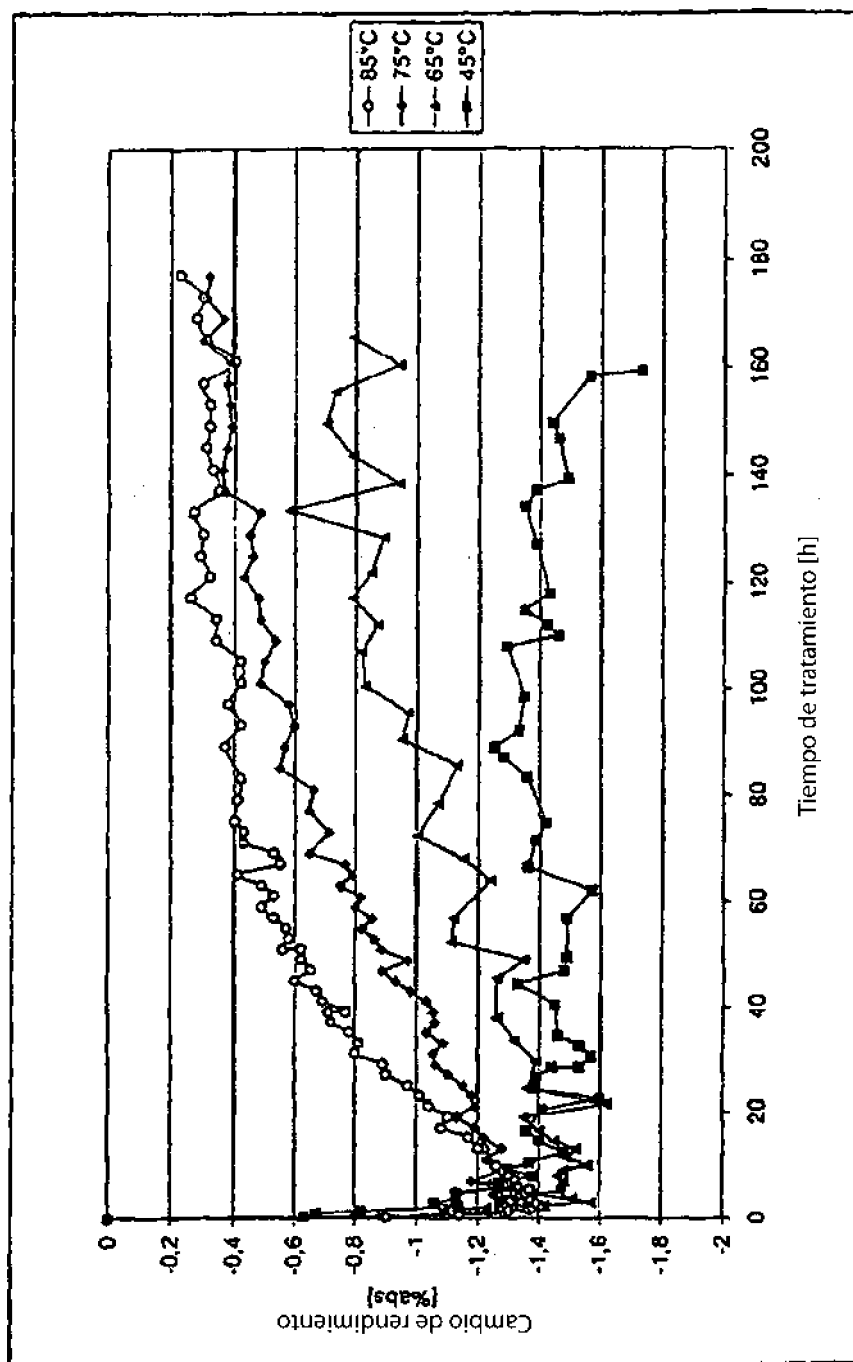


Fig. 2



Fig 3