

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 381 979**

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

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **09179651 .6**
96 Fecha de presentación: **21.03.2007**
97 Número de publicación de la solicitud: **2164114**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **17.03.2010**

54 Título: **Dispositivo para la fabricación de un elemento fotovoltaico con un rendimiento estabilizado**

30 Prioridad:
21.03.2006 DE 102006012920

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
04.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
04.06.2012

73 Titular/es:
**UNIVERSITÄT KONSTANZ
UNIVERSITÄTSSTRASSE 10
78464 KONSTANZ, DE**

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

74 Agente/Representante:
Roeb Díaz-Álvarez, María

ES 2 381 979 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

Dispositivo para la fabricación de un elemento fotovoltaico con un rendimiento estabilizado.

5 La presente invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo para la fabricación de un elemento fotovoltaico con un rendimiento estabilizado. En particular, la presente invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo para la fabricación de una célula solar basada en un sustrato que contiene oxígeno y está impurificado con boro o un módulo fotovoltaico en el que están encapsuladas dichas células solares.

10 Las células solares sirven para convertir la luz directamente en energía eléctrica. Para ello, se forma una región provista de la impurificación opuesta correspondiente sobre un semiconductor de tipo P o de tipo N. Se produce una unión PN. Cuando se expone a la luz, se producen pares portadores de carga, que se encuentran separados espacialmente por el gradiente de potencial formado por la unión PN. Los portadores de carga separados de este modo se pueden difundir después en una superficie de la célula solar y se pueden suministrar a un circuito externo mediante unos contactos metálicos formados en la misma.

15 El silicio cristalino es un semiconductor que se emplea frecuentemente para fabricar células solares. Se establece una distinción entre el silicio multicristalino (o policristalino) y monocristalino. Debido a que el silicio monocristalino no presenta bordes de grano que actúen como impurezas y que, por tanto, se comporten como centros de recombinación, presenta una mayor calidad de material, en comparación con el silicio multicristalino, lo que da lugar a un mayor rendimiento potencial de las células solares fabricadas con este material. No obstante, a consecuencia de las etapas de alto consumo de energía que hay que añadir al proceso para obtener el monocristal de silicio, los costes de fabricación del silicio monocristalino son mayores en comparación con los del silicio multicristalino.

20 En la actualidad, se usan principalmente dos procedimientos de obtención de cristales para fabricar el silicio monocristalino. Las obleas de silicio fabricadas mediante el procedimiento de zona flotante (FZ) presentan la mayor calidad, si bien son las más caras y se usan principalmente en el campo de la electrónica. El método de Czochralski (Cz) es menos caro y, por lo tanto, resulta adecuado para emplearlo para la producción de células solares. En el método de Czochralski, se funde silicio en un crisol. Se pone en contacto un cristal semilla monocristalino con el material fundido y después se le hace ascender alejándolo lentamente del material fundido. En este caso, el silicio del material fundido cristaliza sobre la superficie del cristal (semilla) y se forma un monocristal cilíndrico, que normalmente puede tener un diámetro de hasta 30 cm y una longitud de varios metros. Más tarde, este monocristal se corta en obleas con un espesor de aproximadamente 200 a 300 μm .

25 En la actualidad, el silicio Cz de tipo semiconductor P que se usa para fabricar células solares se suele impurificar con boro debido a las ventajas obtenidas por la tecnología del procedimiento. Para ello, durante el método Cz se disuelve boro en el silicio fundido. Debido a sus buenas características de solubilidad, el boro se incorpora en el cristal de silicio producido a partir del material fundido. Se obtiene un cristal de silicio impurificado con boro y, en gran medida, homogéneo.

30 En el método Cz convencional, a menudo se disuelve en el silicio fundido oxígeno liberado por el crisol que, frecuentemente, está hecho de cuarzo (óxido de silicio). El oxígeno se incorpora asimismo en el cristal de silicio.

35 Cuando una célula solar fabricada a partir de silicio Cz se ilumina y/o se le aplica una tensión eléctrica externa, se genera un exceso de portadores minoritarios en la misma y fluye una corriente eléctrica por ella. En este caso, los átomos de oxígeno incorporados en el silicio, junto con los átomos de boro usados para la impurificación, parecen formar defectos que pueden actuar como impurificaciones eléctricamente activas y pueden afectar de forma negativa a las propiedades eléctricas de la célula solar. A consecuencia de la formación de dichos defectos, la calidad del material del sustrato de silicio Cz se deteriora durante las primeras horas de funcionamiento de la célula solar y el rendimiento de la célula solar se reduce hasta alcanzar la saturación a un determinado valor final. Este fenómeno se denomina "degradación inducida por portadores" del silicio Cz; se descubrió en 1972 y ha sido objeto de exhaustivas investigaciones hasta el día de hoy.

40 Con una concentración ventajosa de boro de aproximadamente $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y una concentración típica de oxígeno en silicio Cz de $5 \text{ a } 10 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, el rendimiento de una célula solar en condiciones de funcionamiento se degrada típicamente en unas horas hasta en un 3 % absoluto. Una pérdida de un 1 % absoluto observada frecuentemente en células solares de silicio Cz ya representa una pérdida de más del 6 % relativo con una rendimiento del 16,5 %, que es el típico de las células solares fabricadas industrialmente a base de silicio Cz antes de la degradación. La degradación y, por tanto, la pérdida de rendimiento durante la primera puesta en funcionamiento de las células solares son mayores cuanto más alta es la concentración de boro y/o de oxígeno.

45 Hasta el momento, en la técnica anterior, se conocen sustancialmente dos planteamientos generales sobre la manera de reducir o evitar la degradación. El primero se basa en minimizar la contaminación de oxígeno en el silicio fundido durante el método Cz. Con este fin, se creó el denominado método MCz (Czochralski magnético), mediante el cual se evita el contacto entre el silicio fundido y el crisol de cuarzo durante la producción del cristal mediante una compleja tecnología de campos magnéticos, con lo que se obtiene una reducción en el contenido de oxígeno y, por

tanto, una reducción en la degradación. No obstante, debido a la mayor complejidad de su fabricación, el silicio MCz resulta considerablemente más caro que el silicio Cz normal.

El otro planteamiento se basa en reducir la concentración de boro en el cristal de silicio. Los cálculos han mostrado que se puede lograr un rendimiento óptimo de 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 importante degradación que se produce con esta concentración de boro, actualmente, en la producción industrial de células solares se usan con frecuencia sustratos de silicio Cz con una concentración de boro más baja. A consecuencia de ello, se reduce la degradación y, aunque el rendimiento de la célula solar justo después de su fabricación sea menor que el que se obtendría con una impurificación de aproximadamente $1 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, se puede lograr un mayor rendimiento estable tras la degradación.

En la tesis doctoral de Ji Youn Lee "Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells Passivation and Diffusion", Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Friburgo, 2003, XP002439621, se describe otro planteamiento relevante.

Para evitar completamente el problema de la degradación, en la actualidad también se están realizando intentos de sustituir el boro por otras impurezas, como, por ejemplo, galio. No obstante, a consecuencia de sus características de solubilidad en silicio, el galio presenta el inconveniente decisivo de la enorme dificultad que entraña lograr una distribución homogénea en la totalidad del cristal. Así, cabría esperar una gran cantidad de rechazos a escala industrial, de modo que, hasta el momento, esta variante no se puede considerar viable desde el punto de vista industrial.

Otro procedimiento conlleva el uso de fósforo como impureza y, por consiguiente, el uso de silicio de tipo N como material del sustrato. No obstante, dicho material de sustrato es un material poco corriente en la presente industria fotovoltaica y requeriría una modificación de la totalidad del proceso de producción.

Se ha establecido que la degradación del silicio Cz se puede revertir mediante una etapa llamada de recocido. En dicha etapa de recocido, la oblea de silicio Cz o la célula solar ya procesada se calienta durante unos minutos a temperaturas del orden de aproximadamente 230 °C. Se observó que, mediante dicha etapa de recocido, es posible volver a lograr 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 y oxígeno formados durante la degradación parecen disolverse a consecuencia de la etapa de recocido. Por tanto, nos referimos a defectos metaestables. No obstante, se observó que una célula solar recocida se vuelve a degradar al iluminarla o cuando fluye una corriente a través de la célula, es decir, en condiciones como las que se producen normalmente, por ejemplo, durante el funcionamiento de la célula solar. Por tanto, el estado recocido no parece ser estable en una célula solar en condiciones de funcionamiento.

Para aportar una visión general de los efectos observados hasta el momento en relación con la degradación, y de los intentos de dar con soluciones para evitarla que se han realizado hasta el momento, se hace referencia al documento "Progress in Photovoltaics: Research and Applications", 2000; 8; 537 a 547.

Es posible que exista la necesidad de evitar los problemas arriba descritos. Particularmente, es posible que exista la necesidad de proporcionar un procedimiento y un dispositivo para la fabricación de un elemento fotovoltaico en el que se pueda estabilizar a un alto nivel el rendimiento del elemento fotovoltaico.

Esta necesidad se puede satisfacer mediante el objeto de la invención que se define en la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se especifican formas de realización ventajosas.

Se propone un procedimiento de acuerdo con la invención para fabricar un elemento fotovoltaico tal como, por ejemplo, una célula solar individual o un módulo de células solares completo, que comprende las siguientes etapas: preparación de un sustrato de silicio impurificado con boro y que contenga oxígeno, y la formación de una capa emisora sobre una superficie del sustrato de silicio. De este modo, el procedimiento de acuerdo con la invención se caracteriza porque comprende una etapa complementaria de tratamiento de estabilización, que comprende el mantenimiento de la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo seleccionable de temperaturas y la generación de un exceso de portadores de carga minoritarios en el sustrato de silicio durante el tiempo de tratamiento. El intervalo de temperaturas en este caso posee un límite inferior de temperatura de aproximadamente 50 °C y un límite superior de temperatura de aproximadamente 230 °C.

El sustrato de silicio usado en el procedimiento de acuerdo con la invención puede ser una oblea de silicio Cz que, por ejemplo, esté impurificada 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 posee 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 impurificados con boro y que contengan oxígeno, tales como, por ejemplo, obleas de silicio multicristalino o capas de silicio depositadas a partir de la fase gaseosa o líquida sobre un sustrato de soporte.

Para producir el gradiente de potencial necesario para la separación de los portadores de carga en una célula solar,

de acuerdo con la invención se forma un emisor sobre la superficie del sustrato de silicio. Esta es una región que suele comprender un tipo de semiconductor opuesto al tipo de semiconductor del sustrato. El silicio impurificado con boro suele ser un semiconductor de tipo P. Se puede lograr la formación de una capa emisora sobre una superficie del sustrato, por ejemplo, mediante la difusión interna superficial de una impurificación de tipo N tal como, por ejemplo, fósforo, en el sustrato. Dicha difusión se lleva a cabo típicamente a temperaturas superiores a 800 °C. No obstante, también se pueden usar otros métodos para producir una capa impurificada de tipo N. Por ejemplo, sobre la superficie del sustrato se puede depositar otra capa impurificada de tipo N a partir de una fase gaseosa o líquida. Además, la capa no debe cubrir por completo la superficie del sustrato. Puede ser suficiente si solo se cubre con la capa impurificada de tipo N una región parcial de la superficie del sustrato situada en la parte anterior y/o posterior del sustrato de silicio.

De forma alternativa, el sustrato de silicio impurificado con boro también puede ser un semiconductor de tipo N, por ejemplo, si se compensa en exceso con fósforo. En este caso, el emisor es una región impurificada de tipo P y se puede producir, por ejemplo, mediante difusión interna o aleación interna de boro o aluminio. También se puede llegar al caso de que el emisor y el sustrato sean del mismo tipo de semiconductor, por ejemplo, si las dos regiones poseen estructuras de bandas muy diferentes, de manera que se establezca una curvatura de bandas en su interfaz, lo que da lugar al gradiente de potencial deseado.

Se puede generar un exceso de portadores minoritarios en el sustrato de silicio durante la etapa del tratamiento de estabilización de diversas maneras, tal como se describe detalladamente más adelante. Por ejemplo, además de la concentración de portadores en equilibrio, que depende principalmente de la concentración de la impurificación, se puede generar un exceso de portadores minoritarios en el sustrato de silicio de tipo P en el que haya electrones disponibles como portadores minoritarios, mediante la exposición a luz o produciendo una corriente a través del elemento fotovoltaico mediante la aplicación de una tensión eléctrica externa.

Al mismo tiempo, es decir, durante el tiempo de tratamiento, se debe mantener la temperatura del sustrato dentro del intervalo de temperaturas mencionado anteriormente. Al aumentar el tiempo de tratamiento, aumenta sucesivamente el efecto de estabilización del rendimiento. Cuanto más largo sea el tiempo de tratamiento, mayor será el rendimiento con el que el elemento fotovoltaico se mantiene estable en un funcionamiento posterior. En este contexto, no parece ser significativo que el tiempo de tratamiento se interrumpa temporalmente. Por ejemplo, la iluminación del sustrato o la aplicación de la tensión externa usada para generar el exceso de portadores minoritarios se pueden interrumpir temporalmente y restablecerlas más adelante. La temperatura también se puede reducir temporalmente por debajo de los 50 °C. El único factor importante para el efecto logrado de estabilización del rendimiento es la duración total del periodo del tratamiento durante el cual se mantiene el sustrato en el intervalo de temperaturas y se generan un exceso de portadores minoritarios en el sustrato.

Se ha establecido que el efecto deseado de estabilización del rendimiento del elemento fotovoltaico que se va a lograr con el procedimiento de acuerdo con la invención se puede lograr con temperaturas crecientes del sustrato en un tiempo de tratamiento más corto. De este modo, se selecciona preferentemente un límite inferior de la temperatura de 90 °C, más preferentemente 130 °C, aún más preferentemente 160 °C. También se ha establecido que, a medida que la temperatura se aproxima a un límite superior de 230 °C, disminuye el efecto de estabilización del rendimiento. De este modo, se selecciona preferentemente un límite superior de temperatura del intervalo de temperaturas de 210 °C, más preferentemente 190 °C y aún más preferentemente 180 °C.

De acuerdo con una forma de realización, el procedimiento comprende además una etapa de formación de contactos eléctricos sobre el sustrato de silicio, en la que la etapa de generación del exceso de portadores minoritarios conlleva la aplicación de una tensión eléctrica externa en los contactos. Dicho de otro modo, se forman contactos eléctricos en la célula solar que se va a fabricar y más tarde se usan a su vez para aplicar una tensión en la célula solar. La tensión se aplica preferentemente en la dirección de conducción de la unión PN formada con el sustrato de silicio y la capa impurificada de tipo N. De este modo, debido a la tensión aplicada, se inyectan portadores minoritarios en la región del tipo de semiconductor opuesto correspondiente, a través de la región de carga espacial de la unión PN. El efecto de estabilización del rendimiento del procedimiento de acuerdo con la invención aumenta al aumentar la tensión en la dirección de conducción. Se puede seleccionar la tensión de manera que sea mayor de 0,4 voltios, preferentemente mayor que la tensión a la que la célula solar presenta su punto de potencia máxima en un funcionamiento normal, por ejemplo, mayor de 0,6 Voltios, y, más preferentemente, mayor que la tensión de circuito abierto de la célula solar en un funcionamiento normal, por ejemplo, mayor de 0,7 voltios. El funcionamiento normal de la célula solar debe entenderse, a este respecto, como un funcionamiento en condiciones estándar (25 °C, iluminación con un espectro AM 1,5).

Preferentemente, el sustrato de silicio no se ilumina sustancialmente durante la aplicación de la tensión externa, es decir, en la forma de realización descrita anteriormente en la que el exceso de portadores minoritarios se inyectan mediante una corriente producida al aplicar una tensión externo, la etapa de tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo en la oscuridad. Es suficiente con calentar las células solares ya provistas de contactos en el intervalo de temperaturas deseado y aplicar una tensión externa en los contactos. De este modo, para esta forma de realización no se necesita ningún equipo costoso que requiera gran cantidad de espacio. Las células solares se pueden apilar una encima de otra de manera que se ahorre espacio, en una sala con un control de temperatura adecuado, y simplemente es necesario conectarlas a una fuente de tensión que no resulte costosa.

El procedimiento resulta particularmente ventajoso si se aplica a módulos fotovoltaicos que ya se hayan conectado. En este caso, una pluralidad de células solares se interconecta generalmente en el interior del módulo, parte en serie y parte en paralelo. El propio módulo puede poseer unos contactos eléctricos con los que hacer contacto fácilmente desde el exterior. Por consiguiente, es suficiente con conectar todo el módulo a una fuente de tensión externa cuyo voltaje se corresponda con el voltaje que se desee aplicar a una célula individual multiplicado por el número de células solares conectadas en serie en el interior del módulo. De esta manera, es posible una forma de realización del presente procedimiento de acuerdo con la invención, de particular interés económico, mediante la cual unos módulos solares acabados y listos para funcionar se someten a la etapa del tratamiento estabilizante antes de ser entregados finalmente a los consumidores finales, y se almacenan, por ejemplo, en una sala con un control de temperatura adecuado, al tiempo que se aplica la tensión correspondiente durante un tiempo de tratamiento predeterminado. Los costes de producción añadidos a los de un método de fabricación normal para módulos solares mediante la etapa de tratamiento estabilizante de acuerdo con la invención son, por tanto, mínimos. Por consiguiente, el procedimiento de acuerdo con la invención resulta extremadamente interesante desde el punto de vista económico, ya que se puede lograr un rendimiento estable de los módulos solares fabricados, con un aumento mínimo de los costes, que sea aproximadamente entre un 0,5 y un 2 % absoluto más alto a largo plazo en comparación con módulos solares convencionales que se degradan sensiblemente durante las primeras horas de funcionamiento.

Según otra forma de realización del procedimiento de acuerdo con la invención, la etapa de generación de un exceso de portadores minoritarios comprende la iluminación del sustrato de silicio. Por ejemplo, el sustrato de silicio se puede iluminar desde la cara que actúa como cara orientada 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, se genera un exceso de portadores minoritarios en el silicio mediante la iluminación. La iluminación se lleva a cabo preferentemente usando luz con una longitud de onda menor de 1180 nm y una intensidad de radiación mayor de 1000 W/m². De este modo, para la iluminación se pueden usar lámparas convencionales tales como lámparas halógenas.

En esta forma de realización, para el procedimiento según la invención no es necesario que se haga contacto eléctrico con el sustrato de silicio. La etapa del tratamiento estabilizante 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 actuar con cuidado para garantizar que, durante la posterior metalización, no se usen temperaturas sustancialmente mayores de 200 °C, las cuales podrían anular el efecto estabilizante. Por ejemplo, la metalización se podría llevar a cabo mediante deposición en fase vapor de contactos metálicos.

De acuerdo con otra forma de realización del procedimiento de acuerdo con la invención, el tiempo de tratamiento t, medido en minutos, durante el cual el sustrato se mantiene dentro del intervalo de temperaturas seleccionable 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 seleccionable 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 al tiempo que se aplica una tensión externa sin iluminar el elemento fotovoltaico, "y" es la densidad de corriente de 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 = 12550. Los experimentos que el solicitante ha llevado a cabo 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 convencional degradada y no estabilizada, dicha célula solar estabilizada posee una tensión de circuito abierto que se incrementa en aproximadamente el 50 % del aumento máximo de la tensión de circuito abierto que se puede obtener mediante el recocido. Si se selecciona un tiempo de tratamiento que sea más largo, de manera que se satisfaga la desigualdad anterior para a = 3,272 * 10⁻¹⁴, b = 0,00352, c = 0,934 y x = 12800, se logra una estabilización del rendimiento aún mejor. De este modo, se puede lograr un aumento de aproximadamente el 75 % en la tensión de circuito abierto.

Para el otro caso en el que la etapa de tratamiento estabilizante se lleva a cabo iluminando el elemento fotovoltaico y sin la aplicación de una tensión externa, "y" es la intensidad de iluminación en kW/m². El tiempo de tratamiento t se selecciona preferentemente de manera que satisfaga la anterior ecuación para a = 2,298 * 10⁻¹¹, b = 0,399, c = 1,722 y x = 11100. Los experimentos llevados a cabo 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 convencional, degradada y no estabilizada, dicha célula solar estabilizada presenta una tensión de circuito abierto que se incrementa en aproximadamente el 50 % del aumento máximo de la tensión de circuito abierto que se puede obtener mediante el recocido. Si se selecciona un tiempo de tratamiento que sea más largo, de manera que se satisfaga la desigualdad anterior para a = 5,355 * 10⁻¹¹, b = 0,355, c = 1,349 y x = 11000, se logra una estabilización del rendimiento aún mejor. De este modo se puede lograr un aumento de aproximadamente el 75 % en la tensión de circuito abierto.

Como ya se ha mencionado, el efecto de estabilización del rendimiento del procedimiento aumenta al aumentar el tiempo de tratamiento. Los límites establecidos para el tiempo de tratamiento t tienden a ser límites determinados por criterios económicos en lugar de límites determinados con criterios técnicos, y se seleccionaron de manera que se pueda lograr el mejor efecto posible de estabilización del rendimiento dentro de un tiempo de tratamiento que resulte aceptable atendiendo a aspectos económicos. Los estudios realizados por el solicitante han revelado que se puede lograr una estabilización satisfactoria del rendimiento a temperaturas de tratamiento seleccionadas de manera que sean correspondientemente elevadas, por ejemplo, por encima de 140 °C con tiempos de tratamiento de 30 minutos o, a temperaturas incluso más elevadas, 20 minutos.

Atendiendo a aspectos económicos, es conveniente que el tiempo de tratamiento sea lo más breve posible. Un alargamiento de la etapa de estabilización continúa produciendo una leve mejora en el rendimiento estabilizado, pero esta ya no guarda proporción con el incremento de los costes de producción que acarrea. Por lo tanto, es preferible seleccionar un tiempo de tratamiento que sea inferior a un día, preferentemente inferior a cinco horas y aún más preferentemente inferior a una hora.

De acuerdo con otra forma de realización, el procedimiento de acuerdo con la invención comprende una última etapa de proceso de alta temperatura con temperaturas de proceso superiores a 230 °C, en la que la etapa de tratamiento de estabilización tiene lugar a continuación de la etapa de proceso de alta temperatura. La etapa de proceso de alta temperatura puede ser cualquier etapa de proceso como las que se suelen usar en la fabricación de elementos fotovoltaicos, en particular células solares. Por ejemplo, puede comprender la etapa de difusión mencionada anteriormente para formar la capa impurificada de tipo N. Principalmente, no obstante, esta etapa de difusión no es la última etapa de proceso de alta temperatura. A continuación pueden llevarse a cabo 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 después se incorporan mediante un proceso térmico, puede ser la última etapa del proceso de alta temperatura. En la producción industrial de células solares, a menudo se imprimen contactos metálicos sobre el sustrato de silicio usando una pasta que contiene metal en el procedimiento por serigrafía, y se incorporan en el sustrato mediante un proceso térmico a temperaturas superiores a 600 °C. De acuerdo con los conocimientos actuales, para que funcione el procedimiento de acuerdo con la invención, es decir, para la estabilización del rendimiento, es necesario o por lo menos favorable que la etapa de mantenimiento del sustrato en el intervalo elevado de temperaturas y generación simultánea de un exceso de portadores minoritarios se lleve a cabo después de una etapa última de proceso de alta temperatura, ya que otra etapa de proceso de alta temperatura, es decir, el calentamiento del sustrato a más de 230 °C, podría anular el efecto de estabilización del rendimiento logrado mediante el tratamiento. No obstante, no es importante que el periodo de tratamiento tenga lugar a continuación de la última etapa de alta temperatura. Tras la última etapa de alta temperatura, inicialmente se pueden llevar a cabo otras etapas de temperatura por debajo de 200 °C, por ejemplo, antes de que se establezca la temperatura del sustrato en el intervalo de temperaturas mencionado anteriormente y de que se genere el exceso de portadores minoritarios.

De acuerdo con otra forma de realización, el procedimiento de acuerdo con la invención comprende una etapa de encapsulado del sustrato de silicio en un módulo, en la que la etapa de tratamiento de estabilización tiene lugar a continuación de la etapa de encapsulamiento. Dicho de otro modo, el procedimiento se usa para fabricar un módulo de células solares en el que las células solares procesadas y listas para funcionar se encapsulan en un módulo antes de someterlas al tratamiento a temperatura elevada y de la generación del exceso de portadores minoritarios.

Esta forma de realización presenta la ventaja de que la etapa de tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo simultáneamente para una pluralidad de células solares. No obstante, se debe actuar con cuidado para garantizar que el intervalo de temperaturas se seleccione de forma adecuada durante la etapa de tratamiento estabilizante, es decir, que el módulo no resulte dañado. Por ejemplo, por encima de una temperatura de 180 °C, el cableado usado para conectar las células solares individuales se puede desprender, ya que la soldadura usada se licua. El módulo puede resultar dañado a temperaturas superiores a aproximadamente 140 °C, ya que, a menudo, la película de revestimiento de EVA empleada sufre daños por encima de dicha temperatura.

De acuerdo con otro aspecto de la invención, se propone un procedimiento para estabilizar el rendimiento de un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio impurificado con boro y que contiene oxígeno. 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 estabilizante descrita anteriormente y, de este modo, se estabiliza en un rendimiento que corresponde aproximadamente al rendimiento que se lograría mediante el recocido. Las características de las formas de realización descritas anteriormente del procedimiento de fabricación también se pueden aplicar de forma apropiada a este procedimiento de estabilización.

De acuerdo con otro aspecto más de la invención, se propone un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio impurificado con boro, que contiene oxígeno y que presenta un estado de rendimiento estabilizado, en el que el elemento fotovoltaico presenta un alto rendimiento, como el que se puede lograr mediante el recocido, en el que el rendimiento de la célula solar disminuye menos de un 5 % relativamente, preferentemente menos de un 2 % relativamente, con iluminación. El elemento fotovoltaico de acuerdo con la invención se puede obtener, por ejemplo, mediante el procedimiento de fabricación descrito anteriormente.

A partir de la siguiente descripción de formas de realización preferidas y las figuras adjuntas, los expertos en la materia deducirán otros detalles, características y ventajas de la invención.

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

10 La Figura 2 muestra una gráfica en la que se ofrecen los resultados de mediciones relativas al cambio en el rendimiento absoluto de una célula solar fabricada de acuerdo con la invención, en función del tiempo de tratamiento de la etapa de tratamiento estabilizante, a diversas temperaturas de tratamiento entre 45 °C y 85 °C, cuando se induce una corriente en la célula solar, en la oscuridad.

15 La Figura 3 muestra una gráfica en la que se ofrecen los resultados de mediciones relativas al cambio en el rendimiento de una célula solar fabricada de acuerdo con la invención, en función del tiempo de tratamiento de la etapa de tratamiento estabilizante, a una temperatura de tratamiento de 120 °C y con una iluminación de aproximadamente 1000 W/m², sin aplicar una tensión externa.

20 A continuación, en la presente memoria descriptiva, se presentará, haciendo referencia a la figura 1, un modelo que se puede usar para sustanciar el efecto de estabilización del rendimiento logrado con el procedimiento de acuerdo con la invención. No obstante, cabe señalar que las relaciones causales exactas que dan lugar a la estabilización del rendimiento lograda mediante el procedimiento de acuerdo con la invención no se entendieron aún de forma detallada en el momento de redactar la presente solicitud de patente. Por lo tanto, el modelo propuesto y los resultados de mediciones ofrecidos para respaldarlo no deberían limitar en modo alguno el alcance de la protección tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

25 Hasta el momento, se conocían dos estados diferentes del silicio Cz impurificado con boro y que contiene oxígeno, en un modelo simplificado. En lo sucesivo, el primer estado, que se indica como (A) en la fig. 1, se denominará "estado recocido". En este estado, no parece haber ninguna impureza, o parece que hay muy pocas, causadas por boro y oxígeno, que fomenten la recombinación y, de ese modo, provoquen un deterioro en el rendimiento de una célula solar, o bien estas impurezas son eléctricamente inactivas. En el estado (A), el oxígeno contenido en el cristal de silicio actúa sólo débilmente como centro activo de recombinación. Debido a que el estado (A) se mide de forma habitual inmediatamente después del recocido, es decir, un tratamiento térmico en la oscuridad que revierte la degradación, recibe el nombre de "recocido".

35 El segundo estado, indicado como (B) en la fig. 1, se denomina "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 sustitucional. La formación de complejos de boro-oxígeno tiene lugar con iluminación o con un flujo de corriente en particular a temperaturas inferiores a 50 °C, como las que se registran típicamente durante el funcionamiento normal de una célula solar. A diferencia del estado (A), el estado degradado (B) presenta impurezas de recombinación fuertemente activas que reducen de forma decisiva la longitud de difusión eficaz de los portadores minoritarios y, por tanto, son responsables del deterioro de las propiedades eléctricas de la célula solar.

45 Los estudios llevados a cabo por el solicitante de la presente solicitud de patente sugieren que, además de estos dos estados conocidos, también existe otro estado (C) en el silicio Cz. En lo sucesivo, este estado se denominará "estado regenerado". En este estado, al igual que en el estado (A), parece que no hay centros de recombinación activos, o que hay muy pocos, o son eléctricamente inactivos. A diferencia del estado recocido (A), el estado regenerado (C), de acuerdo con los hallazgos obtenidos hasta el momento, es estable en el tiempo durante el posterior funcionamiento de la célula solar con iluminación o con un flujo de corriente.

50 El procedimiento de acuerdo con la invención muestra una manera de llevar al elemento fotovoltaico desde el estado degradado (B) al estado regenerado (C) en el que las propiedades eléctricas de la célula solar se restablecen de nuevo hasta alcanzar un nivel que corresponde sustancialmente al estado inicial o recocido (A).

55 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 que se presenta en la presente memoria descriptiva, parece ser necesaria, ya que los estudios realizados por el solicitante revelan que la célula solar parece "saber" si se encuentra en el estado recocido degradable (A) o bien en el estado regenerado estable (C). Según parece, esto requiere la existencia de estados (A) y (C) microscópicamente diferentes aunque no haya ningún hallazgo microscópico detallado relativo a su composición disponible para el estado regenerado (C) que se acaba de presentar.

60 Aún no se ha establecido una diferenciación directa de los estados (A) y (C) a causa de la similitud de las propiedades eléctricas. Para determinar si los estados (A) ó (C) están presentes en un cristal de silicio Cz o cómo se dividen ambos estados, todos los defectos del estado (A) se deben trasladar al estado (B), es decir, la célula solar se debe degradar. Si se compara ahora el estado final degradado con el de la degradación completa del estado recocido (A) (es decir, tras una etapa de recocido por encima de 200 °C), la desviación constituye una medida de la población de los estados (A) y (C).

65

Los estados individuales (A), (B) y (C) parecen ser capaces de pasar parcialmente de uno a otro dependiendo de las condiciones de iluminación, corriente y temperatura. En este contexto, una transición de (A) a (B) se denomina “degradación”. La transición inversa de (B) a (A) se denomina “recocido”. Una transición de (B) a (C), como la que se puede lograr mediante el procedimiento de acuerdo con la invención, se denomina “regeneración”. Hasta el momento, la transición inversa de (C) directamente a (B) no ha sido observada experimentalmente. De acuerdo con los estudios realizados por el solicitante en condiciones de funcionamiento, las células solares fabricadas mediante el procedimiento de acuerdo con la invención se mantuvieron estables durante al menos 137 h, con respecto a su rendimiento, y el rendimiento se mantuvo sustancialmente en el nivel del estado recocido. De este modo, se supone 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 suele llevar a cabo durante un periodo de entre 10 y 30 minutos, y que también se denomina “recocido”. La transición inversa de (A) directamente a (C) aún no ha sido observada experimentalmente.

El camino de reacción que lleva de (A) a (B) (degradación) se puede activar mediante la iluminación y/o un flujo de corriente inducida, pero también presenta una fuerte dependencia de la temperatura. Por consiguiente, se describe como asistida térmicamente. De acuerdo con los hallazgos obtenidos hasta el momento, las reacciones de recocido de (B) a (A) y (C) a (A) se activan de forma exclusivamente térmica, es decir, la reacción se intensifica al aumentar la temperatura. Si en este caso no se fuerza ninguna degradación nueva, el sistema se puede transferir completamente al estado (A) con una determinada combinación de temperatura y tiempo. Parece que la reacción de regeneración de (B) a (C) es asistida térmicamente, es decir, parece activarse mediante la iluminación y/o el flujo de corriente inducida, pero avanza de manera considerablemente más rápida a temperaturas más altas.

Las transiciones entre los estados individuales compiten entre sí. De acuerdo con los hallazgos obtenidos hasta el momento, la transición que predomina depende principalmente de las condiciones de temperatura y, posiblemente, de la concentración del exceso de portadores minoritarios. En condiciones tales como las seleccionadas para el procedimiento de acuerdo con la invención, predomina la transición del estado degradado (B) al estado regenerado (C). Cuanto más se transfiera el cristal de silicio al estado (C), mayor será el alcance de la estabilización del rendimiento de una célula solar correspondiente.

En ciertos estudios, como los que se muestran a continuación en la presente memoria descriptiva, entre otros, en referencia a las gráficas trazadas en las figuras 2 y 3, se han obtenido relaciones referentes al modo en que el efecto de estabilización del rendimiento del procedimiento de acuerdo con la invención depende de parámetros del proceso.

La figura 2 muestra la pérdida de rendimiento en porcentaje absoluto en función del tiempo de tratamiento a diversas temperaturas cuando la célula solar que se estudia se regenera con un flujo de corriente de 20 mA/cm² en la oscuridad. Se puede observar que la degradación ocasionada aproximadamente en el instante cero y la pérdida de rendimiento correspondiente se recuperan de nuevo aproximadamente en el transcurso del tiempo del tratamiento de regeneración, y la regeneración avanza más rápido cuanto mayor es la temperatura de regeneración que se seleccione. Otros estudios han mostrado que este efecto también parece continuar a mayores temperaturas de hasta más de 160 °C. No se observó ninguna regeneración perceptible a temperaturas inferiores a 50 °C. A 65 °C, la regeneración avanza muy lentamente e incluso tras 160 horas, la pérdida de rendimiento debida a la degradación solo ha disminuido aproximadamente hasta la mitad. Mientras que a 85 °C, la regeneración exhaustiva aún requiere más de 80 horas, a 110 °C se lleva a cabo en solo aproximadamente 2 horas, a 140 °C este tiempo se reduce hasta aproximadamente 40 minutos, y a 160 °C se midieron aproximadamente 25 minutos (en la fig. 2 no aparecen las mediciones para 110 °C, 140 °C y 160 °C).

Se observó un efecto similar cuando se iluminó la célula solar con luz en lugar de hacer que pasara una corriente a través de la misma, en la oscuridad, al igual que en el caso descrito anteriormente. En este caso, se estableció que el tiempo de tratamiento necesario 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 el proceso de tratamiento estabilizante aproximadamente en un factor de 8. La proporcionalidad parece mantenerse hasta una intensidad de iluminación de por lo menos 1000 W/m², bajo una iluminación aún más fuerte la aceleración disminuye y parece alcanzar la saturación.

La figura 3 muestra resultados de mediciones que muestran el rendimiento de una célula solar fabricada de acuerdo con la invención, en función del tiempo de tratamiento. La célula solar se iluminó a 120 °C con aproximadamente 1000 W/m² usando una lámpara halógena. No se aplicó ninguna tensión externa. Se puede observar que se logra una regeneración casi total tras aproximadamente 35 minutos.

Con respecto a la dependencia de la temperatura, se estableció que el efecto de regeneración del procedimiento de acuerdo con la invención parece disminuir a partir de una temperatura de aproximadamente 190 °C. En el momento actual, esto se interpreta 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 recocido degradable (A) y, por consiguiente, el sistema no pasa ya principalmente al estado regenerado (C) sino también parcialmente al estado recocido no estable (A).

Hasta el momento no se ha observado la regeneración directa desde el estado recocido (A) al estado regenerado (C) sin

desviarse a través del estado degradado (B). Si se crea un exceso de portadores minoritarios además del mantenimiento a temperatura elevada (al igual que en los estudios que se muestran en la fig. 2 y en la fig. 3), se observa que, partiendo de un estado inicial recocido (A), la célula solar se degrada inicialmente, pero después se recupera sucesivamente en el posterior transcurso de la etapa del tratamiento de estabilización y pasa al estado regenerado (C).

No obstante, el principio de funcionamiento mencionado anteriormente se puede usar para deducir cómo se puede determinar si una célula solar acabada se fabricó usando el procedimiento de acuerdo con la invención: la célula solar fabricada de acuerdo con la invención se encuentra en el estado regenerado de rendimiento estabilizado (C) tal como se describe más arriba. No obstante, se puede transferir al estado recocido no estable (A) mediante una etapa de recocido a temperaturas de aproximadamente 230 °C. Si después de dicha etapa de recocido, una célula solar objeto de estudio se degrada durante el posterior funcionamiento normal hasta alcanzar un rendimiento por debajo del rendimiento estable original de la misma célula solar, entonces se puede determinar que la célula solar se fabricó originalmente usando el procedimiento de acuerdo con la invención y que se estabilizó en lo referente a su rendimiento.

Por último, se describen formas de realización ejemplares del procedimiento de acuerdo con la invención en las que la etapa estabilizadora se integró en un procedimiento convencional de fabricación de una célula solar.

Una oblea de silicio Cz disponible comercialmente se sometió inicialmente a un ataque químico y una limpieza para eliminar los daños de los cortes superficiales producidos en la oblea por el corte del cristal de silicio Cz. Después, se difunde una capa emisora conductora de tipo N en la superficie de la oblea mediante difusión de POCl_3 . Después, se imprimieron unos contactos anteriores en rejilla sobre la capa emisora mediante una técnica de serigrafía usando una pasta de película gruesa que contenía plata y una pantalla con la geometría correspondiente. Después de que la pasta de película gruesa se hubiera secado 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. Después, tanto el contacto frontal como el posterior se sometieron a un tratamiento térmico para incorporarlos en la superficie de la oblea, a una temperatura de entre 700 y 900 °C en un horno continuo. Tras esta última etapa de alta temperatura, en principio, la célula solar está lista para funcionar, es decir, posee la unión PN necesaria para separar los pares de portadores de carga generados por la luz y unos contactos anteriores y posteriores para transportar los pares de portadores de carga separados de este modo.

La célula solar lista para funcionar se somete ahora a la etapa de tratamiento estabilizador de acuerdo con la invención. En este caso, la célula solar se coloca en una placa térmica y se calienta, por ejemplo, a una temperatura de 160 °C. Al mismo tiempo, la célula solar se ilumina mediante una lámpara halógena por su lado anterior, generándose así un exceso de portadores minoritarios en la célula solar. La célula solar se mantiene en este estado durante aproximadamente 30 minutos. Después se puede enfriar y conducirla a un procesamiento adicional, por ejemplo, el cableado y encapsulado en módulos.

En otra posible forma de realización, la célula solar lista para funcionar se conecta en serie con otras células solares a través de unas tiras de contacto soldadas en sus contactos anteriores 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 unas conexiones para el módulo. Las conexiones del módulo se conectan después a una fuente de tensión externa cuyo voltaje se selecciona de manera que se aplique un voltaje de aproximadamente 0,7 voltios a cada una de las células solares conectadas en serie. Los módulos así dispuestos con la tensión se almacenan después durante aproximadamente una hora en una sala calentada de forma adecuada a, por ejemplo, 140 °C.

La invención también se puede entender con respecto a los siguientes ejemplos:

1. Un procedimiento para la fabricación de un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado, que comprende las siguientes etapas:

provisión de un sustrato de silicio impurificado con boro y que contenga oxígeno; formación de una capa emisora sobre una superficie del sustrato de silicio; caracterizado porque el procedimiento también comprende una etapa de tratamiento de estabilización, que comprende: mantenimiento de la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento dentro de un intervalo de temperaturas seleccionable que posee un límite inferior de temperatura de 50 °C y un límite superior de temperatura de 230 °C y generación de un exceso de portadores de carga minoritarios en el sustrato de silicio durante el tiempo del tratamiento.

2. El procedimiento según el ejemplo 1, en el que el límite inferior de temperatura es de 90 °C, preferentemente 130 °C, más preferentemente 160 °C, y en el que el límite superior de temperatura superior es de 210 °C, preferentemente 190 °C, más preferentemente 180 °C.

3. El procedimiento según el ejemplo 1 o 2, que también comprende una etapa de formación de contactos eléctricos sobre el sustrato de silicio, en el que la etapa de generación de un exceso de portadores minoritarios conlleva la aplicación de una tensión eléctrica externa en los contactos.

4. El procedimiento según el ejemplo 3, en el que la tensión se aplica en la dirección de conducción de la unión PN formada con el sustrato de silicio y la capa emisora.

5. El procedimiento según el ejemplo 3 o 4, en el que la tensión aplicada es mayor de 0,4 V, preferentemente mayor de 0,6 V y más preferentemente mayor de 0,7 V.

5 6. El procedimiento según el ejemplo 3, 4 o 5, en el que el sustrato de silicio no se ilumina sustancialmente durante la aplicación de la tensión externa.

7. El procedimiento según uno cualquiera de los ejemplos 3 a 6, en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual se mantiene el sustrato dentro del intervalo de temperaturas seleccionable viene dado por:

10

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

en la que T es la temperatura media en °C del intervalo de temperaturas seleccionable, durante el tiempo de tratamiento, "y" es la densidad de corriente a través del elemento fotovoltaico creada por la tensión aplicada en A/cm², y $a = 4,247 * 10^{-14}$, $b = 0,00286$, $c = 0,887$ y $x = 12550$, preferentemente $a = 3,272 * 10^{-14}$, $b = 0,00352$, $c = 0,934$ y $x = 12800$.

15

8. El procedimiento según uno cualquiera de los ejemplos 1 a 5, en el que la etapa de generación del exceso de portadores minoritarios comprende la iluminación del sustrato de silicio

20

9. El procedimiento según el ejemplo 8, en el que la iluminación tiene lugar usando una luz con una longitud de onda inferior a 1180 nm.

10. El procedimiento según el ejemplo 8 o 9, en el que la iluminación tiene lugar usando luz con una intensidad de radiación mayor de 10 W/m², preferentemente mayor de 100 W/m² y más preferentemente mayor de 1000 W/m².

25

11. El procedimiento según uno cualquiera de los ejemplos 1 a 10, en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual se mantiene el sustrato dentro del intervalo de temperaturas seleccionable viene dado por:

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

30

en la que T es la temperatura media en °C del intervalo de temperaturas seleccionable, 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 $x = 11100$, y preferentemente $a = 5,355 * 10^{-11}$, $b = 0,355$, $c = 1,349$ y $x = 11000$.

35

12. El procedimiento según uno cualquiera de los ejemplos precedentes, que comprende además una última etapa de proceso de alta temperatura con temperaturas de proceso superiores a 230 °C, en el que la etapa de tratamiento de estabilización tiene lugar a continuación de la etapa de proceso de alta temperatura.

40

13. El procedimiento según uno cualquiera de los ejemplos precedentes, que también comprende una etapa de encapsulamiento del sustrato de silicio en un módulo, en el que la etapa de tratamiento de estabilización tiene lugar a continuación de la etapa de encapsulamiento.

14. Un procedimiento para la estabilización del rendimiento de un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio impurificado con boro y que contiene oxígeno, que comprende las etapas de:

45

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

50

generación de un exceso de portadores minoritarios en el elemento fotovoltaico durante el tiempo de tratamiento.

15. Un elemento fotovoltaico que comprende un sustrato de silicio impurificado con boro, que contiene oxígeno y que presenta un estado de rendimiento estabilizado, en el que el elemento fotovoltaico presenta un alto rendimiento, como el que se puede lograr mediante el recocido, caracterizado porque el rendimiento de la célula solar disminuye menos de un 5 % relativamente, preferentemente menos de un 2 % relativamente, con iluminación.

55

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo para la fabricación de un elemento fotovoltaico con rendimiento estabilizado o para la estabilización del rendimiento de un elemento fotovoltaico, en el que el dispositivo está adaptado para llevar a cabo las siguientes etapas:

recepción de un sustrato de silicio impurificado con boro y que contiene oxígeno con una capa emisora formada sobre la superficie del sustrato de silicio;

caracterizado porque el dispositivo también está adaptado para llevar a cabo una etapa de tratamiento de estabilización, que comprende:

mantenimiento de la temperatura del sustrato durante un tiempo de tratamiento t dentro de un intervalo de temperaturas seleccionable que posee un límite inferior de temperatura de 50 °C y un límite superior de temperatura de 230 °C y generación de un exceso de portadores de carga minoritarios en el sustrato de silicio durante el mismo tiempo de tratamiento t.

2. El dispositivo según la reivindicación 1, en el que el sustrato de silicio comprende unos contactos eléctricos formados sobre el mismo, en el que el dispositivo también está adaptado para, en la etapa de generación de un exceso de portadores minoritarios, aplicar una tensión eléctrica externa en los contactos.

3. El dispositivo según la reivindicación 2, en el que el dispositivo está adaptado para aplicar la tensión en la dirección de conducción de la unión PN formada con el sustrato de silicio y la capa emisora.

4. El dispositivo según la reivindicación 2 o 3, en el que la tensión aplicada es mayor de 0,4 V, preferentemente mayor de 0,6 V y más preferentemente mayor de 0,7 V.

5. El dispositivo según la reivindicación 2, 3 o 4, en el que el sustrato de silicio no se ilumina sustancialmente durante la aplicación de la tensión externa.

6. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual se mantiene el sustrato dentro del intervalo de temperaturas seleccionable 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 en °C del intervalo de temperaturas seleccionable, durante el tiempo de tratamiento, "y" es la densidad de corriente a través del elemento fotovoltaico creada por la tensión aplicada en A/cm², y a = 4,247 * 10⁻¹⁴, b = 0,00286, c = 0,887 y x = 12550, preferentemente a = 3,272 * 10⁻¹⁴, b = 0,00352, c = 0,934 y x = 12800.

7. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el dispositivo está adaptado para recibir simultáneamente una pluralidad de sustratos de silicio que han sido apilados previamente uno encima del otro de manera que se ahorre espacio.

8. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el dispositivo está adaptado para, en la etapa de generación del exceso de portadores minoritarios, iluminar el sustrato de silicio.

9. El dispositivo según la reivindicación 8, en el que la iluminación tiene lugar usando una luz con una longitud de onda inferior a 1180 nm.

10. El dispositivo según la reivindicación 8 o 9, en el que la iluminación tiene lugar usando luz con una intensidad de radiación mayor de 10 W/m², preferentemente mayor de 100 W/m² y más preferentemente mayor de 1000 W/m².

11. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el tiempo de tratamiento t en minutos durante el cual se mantiene el sustrato dentro del intervalo de temperaturas seleccionable 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 en °C del intervalo de temperaturas seleccionable, 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 = 11100, y preferentemente a = 5,355 * 10⁻¹¹, b = 0,355, c = 1,349 y x = 11000.

12. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el dispositivo está

adaptado para recibir simultáneamente una pluralidad de sustratos de silicio que han sido encapsulados previamente en un módulo.

5 13. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el dispositivo una fuente de tensión para la aplicación de una tensión correspondiente a una tensión que desee aplicar a una célula solar individual multiplicada por el número de células solares conectadas en serie y recibidas en el interior del dispositivo.

10 14. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el dispositivo comprende una placa térmica y/o una sala que se pueda calentar de manera adecuada para almacenar el sustrato de silicio y mantenerlo a una temperatura elevada durante la etapa de tratamiento de estabilización.