

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 830 766**

51 Int. Cl.:

H01L 31/18 (2006.01)
H01L 31/068 (2012.01)
H01L 21/677 (2006.01)
H01L 21/67 (2006.01)
F27B 9/06 (2006.01)
F27B 9/40 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.09.2013** **PCT/EP2013/070104**
87 Fecha y número de publicación internacional: **31.12.2014** **WO14206504**
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2013** **E 13770893 (9)**
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.09.2020** **EP 3014663**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada**

30 Prioridad:

26.06.2013 DE 102013010575

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.06.2021

73 Titular/es:

UNIVERSITÄT KONSTANZ (100.0%)
Universitätsstrasse 10
78464 Konstanz, DE

72 Inventor/es:

HERGUTH, AXEL y
WILKING, SVENJA

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 830 766 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

Procedimiento y dispositivo para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un procedimiento para producir un elemento fotovoltaico con una eficiencia estabilizada mediante una etapa de tratamiento de estabilización. En particular, la invención se refiere a un procedimiento para producir una célula solar a base de un sustrato de silicio con contenido de oxígeno y dopado con boro. La invención se refiere además a un dispositivo para tratar un sustrato de silicio en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico, estando configurado el dispositivo para llevar a cabo la etapa de tratamiento de estabilización del procedimiento según la invención.

Antecedentes técnicos

Las células solares, como elementos fotovoltaicos, sirven para transformar luz en corriente eléctrica. Los pares portadores de carga generados por luz, que se han separado físicamente por ejemplo en una unión pn entre un área emisora y un área de base, han de ser conducidos a un circuito eléctrico externo con ayuda de contactos eléctricos de la célula solar. Para ello se han de prever disposiciones de contactos tanto en el emisor como en la base de la célula solar.

Actualmente, las células solares se fabrican generalmente a base de silicio como material de sustrato semiconductor. En este contexto, los sustratos de silicio se proporcionan a menudo en forma de obleas monocristalinas o multicristalinas. En muchos casos se ha observado que en las células solares producidas a base de obleas de silicio cristalinas pueden aparecer efectos de degradación que con el tiempo pueden reducir la eficiencia de la célula solar. Se han observado pérdidas de eficiencia significativas hasta de más de un 1% abs.

En el documento DE 10 2006 012 920 B3 se describe un procedimiento para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada. La invención descrita en dicho documento tiene su origen, al menos en parte, en los mismos inventores que la presente solicitud. Entonces se constató que la eficiencia de un elemento fotovoltaico se puede estabilizar, es decir, que se puede prevenir una degradación, llevando a cabo una etapa de tratamiento de estabilización en el elemento fotovoltaico, en la que éste se mantiene durante un tiempo suficiente dentro de un área de temperatura elevada y al mismo tiempo se generan portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato de silicio, por ejemplo mediante iluminación o mediante aplicación de una tensión eléctrica.

Sin embargo, hasta ahora se había partido de la base de que los tiempos de proceso, durante los cuales un sustrato de silicio ha de ser sometido a una etapa de tratamiento de estabilización, han de ser relativamente largos para poder lograr una estabilización suficiente de la eficiencia. Esto puede conducir a retrasos y, por lo tanto, a la formación de un cuello de botella en la producción, sobre todo en caso de una línea de fabricación industrial automatizada.

Otras informaciones relativas a posibilidades de producir células solares y en este contexto eventualmente influir en las eficiencias o estabilizar las mismas, se proporcionan, entre otros lugares, en:

- LIM BIANCA ET AL: "Solar cells on low-resistivity boron-doped Czochralski-grown silicon with stabilized efficiencies of 20%", APPLIED PHYSICS LETTERS, tomo 93, nº 16, 20 de octubre de 2008 (2008-10-20), páginas 162102, XP012111972, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.3003871;

- WILKINGS ET AL: "Influence of hydrogen on the regeneration of boron-oxygen related defects in crystalline silicon", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, tomo 113, nº 19, 21 de mayo de 2013 (2013-05-21), páginas 194503-194503, XP012174152, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.4804310;

- GEORG KRUGEL ET AL: "Impact of Hydrogen Concentration on the Regeneration of Light Induced Degradation", ENERGY PROCEDIA, tomo 8, 17 de abril de 2011 (2011-04-17), - 20 de abril de 2011 (2011-04-20), páginas 47-51, XP028263042, ISSN: 1876-6102, DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2011.06.100;

- R. SØNDENÅ ET AL: "LIGHT INDUCED DEGRADATION IN MONOCRYSTALLINE SILICON WAFERS MADE FROM THE METALLURGICAL ROUTE", PROCEEDINGS OF THE 25TH EUPVSEC, 6 de septiembre de 2010 (2010-09-06), - 10 de septiembre de 2010 (2010-09-10), páginas 1586-1590, XP040531032, VALENCIA-ESPAÑA DOI: 10.4229/25thEUPVSEC2010-2CV.1.45 ISBN: 978-3-936338-26-3

- FR 2 949 607 A1

- US 2013/102129 A1

- EP 2 863 413 A2 (un documento según el art. 54(3) CPE)

- FR 2 966 980 A1

Compendio de la invención

Por lo tanto, puede existir la necesidad de un procedimiento mejorado para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada. En particular, puede existir la necesidad de un procedimiento de este tipo que posibilite una estabilización de la eficiencia en tiempos de proceso cortos. Además puede existir la necesidad de un dispositivo para tratar un sustrato de silicio en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico, que posibilite la realización de la etapa de tratamiento de estabilización del procedimiento descrito.

Dichas necesidades se pueden satisfacer con el procedimiento o el dispositivo según las reivindicaciones independientes. En las reivindicaciones subordinadas y en la siguiente descripción se presentan formas de realización de la invención.

De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, tal como se define en la reivindicación 1, se describe un procedimiento para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada, que presenta las siguientes etapas. Se prepara un sustrato de silicio. En una superficie del sustrato de silicio se configura una capa emisora. En el sustrato de silicio se configuran además contactos eléctricos. El procedimiento se caracteriza por que complementariamente se realiza una etapa de tratamiento de estabilización. Ésta comprende una incorporación selectiva de hidrógeno en el sustrato de silicio. Una vez incorporado el hidrógeno en el sustrato de silicio se generan portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato de silicio mientras el sustrato de silicio está a una temperatura superior a 230°C. El hidrógeno se incorpora a temperaturas superiores a 650°C y a continuación se lleva a cabo un enfriamiento hasta 450°C con una rampa con una tasa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 10 K/s.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, tal como se define en la reivindicación 12, se describe un dispositivo para el tratamiento de un sustrato de silicio en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico, estando configurado el dispositivo para llevar a cabo la etapa de tratamiento de estabilización del procedimiento según la invención.

El dispositivo está configurado como un horno de paso continuo con una pluralidad de zonas que se pueden regular con temperaturas diferentes, y presenta un dispositivo de iluminación con cuya ayuda se pueden generar portadores de carga minoritarios en el sustrato de silicio. En este contexto, la temperatura de las zonas se puede regular de tal modo y el dispositivo, incluyendo el dispositivo de iluminación, puede estar configurado de tal modo que un sustrato de silicio que pasa por el horno de paso continuo en primer lugar se calienta brevemente en una zona de alta temperatura a una temperatura superior a 650°C, después se enfría en una zona de enfriamiento con una tasa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 10 K/s a una temperatura inferior a 450°C, y luego se mantiene en una zona de mantenimiento de temperatura a una temperatura entre 230°C y 450°C, opcionalmente durante al menos 10 s, y, al mismo tiempo o a continuación, el sustrato de silicio se ilumina con una intensidad de iluminación superior a 0,3 kW/m² a una temperatura superior a 230°C.

Sin limitar el ámbito de protección de la invención, algunas ideas con respecto a formas de realización del procedimiento según la invención o del dispositivo según la invención se pueden considerar como basadas, entre otras cosas, en los conceptos y conocimientos descritos a continuación:

La posibilidad de proteger o estabilizar un sustrato de silicio, utilizado en el marco de la producción de un elemento fotovoltaico, mediante una etapa de tratamiento de estabilización adecuada contra una degradación posterior, que en otro caso se produce durante el funcionamiento del elemento fotovoltaico, a veces también designada como regeneración, se conoce desde hace mucho tiempo. En el documento DE 10 2006 012 920 B3 se describen detalladamente detalles con respecto a cómo se puede llevar a cabo una etapa de tratamiento de estabilización y cuáles son los mecanismos de acción subyacentes.

Ahora se ha constatado que, con ayuda de etapas de proceso adicionales o parámetros de proceso elegidos adecuadamente, la tasa de regeneración durante la etapa de tratamiento de estabilización se puede aumentar considerablemente y, por lo tanto, el tiempo durante el cual se debía llevar a cabo la etapa de tratamiento de estabilización con el fin de lograr una estabilización suficiente de la eficiencia para el elemento fotovoltaico finalmente producido se puede mantener lo más bajo posible.

En particular se observó que una tasa de regeneración parece depender de forma determinante de las cantidades de hidrógeno presentes en el sustrato de silicio durante el proceso de regeneración propiamente dicho, es decir, mientras se generan portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato de silicio con una temperatura de sustrato elevada. Además parece ser importante cómo está distribuido el hidrógeno dentro del sustrato de silicio y en qué estado de enlace se encuentra dicho hidrógeno dentro del sustrato de silicio.

Por ello se propone en primer lugar incorporar hidrógeno de forma selectiva en el sustrato de silicio. Esto puede tener lugar de diferentes modos, tal como se describe detalladamente más abajo. Se ha comprobado que resulta ventajoso mantener a continuación el sustrato de silicio, al menos brevemente, por ejemplo a lo largo de al menos 5 s o al menos 10 s, dentro de un intervalo de temperatura de 230°C a 450°C. Parece que se puede elegir un tiempo de mantenimiento tanto más corto, cuanto mayor es la temperatura mantenida del sustrato de silicio. Se supone que este mantenimiento del sustrato de silicio a una temperatura elevada influye positivamente en el estado de enlace del hidrógeno previamente incorporado. A continuación se puede llevar a cabo el proceso de regeneración propiamente dicho

generando portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato de silicio mientras éste se mantiene a una temperatura elevada de al menos más de 230°C, pero preferiblemente inferior a 450°C. En caso dado, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar en el sustrato de silicio ya durante el mantenimiento anteriormente descrito del sustrato de silicio dentro del intervalo de temperatura entre 230°C y 450°C.

- 5 Se ha observado que el proceso de regeneración se puede acelerar considerablemente mediante la incorporación selectiva de hidrógeno y la regeneración subsiguiente a temperatura elevada. En lugar de requerir para ello al menos varios minutos, como se suponía hasta ahora, se parte de la base de que la regeneración se puede llevar a cabo en un plazo de unos segundos y que, por lo tanto, toda la etapa de tratamiento de estabilización se puede llevar a cabo adecuadamente en un solo dispositivo, como por ejemplo un horno de paso continuo.
- 10 Esto puede permitir, por ejemplo dentro de una secuencia de producción frecuentemente utilizada en la industria, en la que contactos aplicados por serigrafía se hornean en un horno de paso continuo, modificar el horno de paso continuo de tal modo que al mismo tiempo también se pueda llevar a cabo la etapa de tratamiento de estabilización. Por lo tanto, mediante un horno de paso continuo de este tipo, adecuadamente modificado, se pueden llevar a cabo simultáneamente tanto una formación de contactos mediante horneado de estructuras de pasta metálica serigrafiadas como una regeneración del sustrato de silicio y, por lo tanto, una estabilización de la eficiencia de la célula solar finalmente producida.

- 20 El hidrógeno se incorpora a una temperatura superior a 650°C y a continuación se lleva a cabo un enfriamiento hasta 450°C con una rampa con una tasa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 10 K/s, preferiblemente al menos 20 K/s, más preferiblemente al menos 30 K/s y aún más preferiblemente al menos 60 K/s. En otras palabras, el sustrato de silicio se puede calentar en primer lugar a más de 650°C para introducir el hidrógeno, y a continuación enfriar rápidamente a menos de 450°C, debiendo tener lugar al menos el enfriamiento hasta 550°C con especial rapidez con una tasa de enfriamiento de al menos 10 K/s.

- 25 A altas temperaturas, claramente superiores a 450°C, en particular superiores a 550°C, el hidrógeno puede difundirse dentro del sustrato de silicio y distribuirse en el mismo del modo más homogéneo posible con mucha rapidez, es decir, en un plazo de unos segundos o fracciones de segundos. Por ejemplo, a temperaturas suficientemente altas, el hidrógeno de una capa con contenido de hidrógeno aplicada sobre el sustrato de silicio se puede difundir rápidamente en el sustrato de silicio subyacente.

- 30 Sin embargo, se ha identificado el riesgo de que, si las altas temperaturas predominan durante demasiado tiempo y la fuente de hidrógeno se agota con el tiempo, el hidrógeno puede salir de nuevo del sustrato de silicio por difusión, es decir, se puede producir una efusión de hidrógeno. En particular en la superficie del sustrato de silicio, es decir, allí donde se encuentra por ejemplo la capa emisora en la célula solar acabada y, por lo tanto, donde la célula solar es especialmente sensible frente a efectos de degradación a causa de defectos, se puede producir un empobrecimiento de hidrógeno. Dado que el hidrógeno parece apoyar de forma determinante una regeneración que se ha de llevar a cabo posteriormente, debería evitarse en la mayor medida posible una efusión de hidrógeno.

- 35 Por ello se propone, después de una incorporación de hidrógeno a una temperatura suficientemente alta, reducir la temperatura con mucha rapidez, es decir, enfriar el sustrato de silicio a una alta tasa de enfriamiento hasta menos de 450°C, para mantener lo más corto posible el intervalo de tiempo durante el cual el hidrógeno podría salir del sustrato de silicio por difusión. Dicho enfriamiento rápido se ha de procurar en particular cuando la fuente de hidrógeno amenaza con agotarse, es decir, cuando después de una fase de alta temperatura demasiado larga ya no puede suministrarse más hidrógeno, o cuando la fuente de hidrógeno ya no puede liberar más hidrógeno, por ejemplo debido a temperaturas demasiado bajas.
- 40

A continuación, el sustrato de silicio se puede mantener a temperaturas inferiores a 450°C durante un tiempo suficiente, ya que a estas temperaturas relativamente bajas apenas se produce efusión de hidrógeno, pero el hidrógeno probablemente puede adoptar dentro del sustrato de silicio un estado de enlace adecuado para una regeneración.

- 45 De acuerdo con una forma de realización, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar durante la regeneración mediante iluminación con una intensidad de iluminación superior a 0,3 kW/m², preferiblemente superior a 1 kW/m², aún más preferiblemente superior a 3 kW/m², con luz con longitudes de onda inferiores a 1180 nm.

- 50 Se ha observado que una regeneración se produce más rápidamente, es decir, que una tasa de regeneración es mayor, cuanto mayor es la densidad de los portadores de carga minoritarios excedentes. Los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar mediante iluminación dentro del sustrato de silicio, entre otros métodos. Por lo tanto, una alta intensidad de iluminación puede favorecer una regeneración rápida.

De acuerdo con una forma de realización, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar a una temperatura del silicio entre 230°C y 450°C, preferiblemente entre 230°C y 400°C, más preferiblemente entre 230°C y 350°C y aún más preferiblemente entre 230°C y 300°C.

- 55 Si bien hasta la fecha se partía de la base de que la tasa de regeneración primero aumenta con una temperatura creciente por encima de 50°C, en particular por encima de 90°C, pero que después parece disminuir de nuevo por encima de aproximadamente 180°C, probablemente debido a efectos concurrentes, ahora se ha constatado que,

mediante una incorporación previa de hidrógeno y opcionalmente un mantenimiento subsiguiente del sustrato de silicio a una temperatura adecuada durante un tiempo adecuadamente largo, el sustrato de silicio se puede tratar claramente de tal modo que se puede llevar a cabo un proceso de regeneración también a temperaturas más altas, superiores a 230°C. En este contexto, la regeneración parece desarrollarse más rápidamente a una temperatura más alta. Mediante el hidrógeno previamente incorporado y el tratamiento térmico previo, los efectos concurrentes opuestos parecen producirse de forma más débil o claramente más lenta que los efectos que se desarrollan de forma acelerada debido al tratamiento previo y que ocasionan la regeneración. Por ello, estos efectos concurrentes parecen contrarrestar considerablemente los efectos de regeneración solo en caso de temperaturas sustancialmente más altas, por ejemplo claramente superiores a 300°C. Por lo tanto, en conjunto, una regeneración del sustrato de silicio se puede acelerar considerablemente gracias al tratamiento previo y las temperaturas sustancialmente más altas que éste posibilita durante el proceso de regeneración propiamente dicho.

De acuerdo con una forma de realización, el procedimiento presentado puede comprender un depósito de una capa con contenido de hidrógeno sobre una superficie del sustrato de silicio, pudiendo servir esta capa como fuente de hidrógeno durante la incorporación de hidrógeno en el sustrato de silicio.

Dicho depósito de una capa con contenido de hidrógeno es tecnológicamente fácil de realizar. Por ejemplo, la capa con contenido de hidrógeno puede estar configurada como una capa de nitruro de silicio hidrogenado, es decir, una capa de nitruro de silicio mezclada con hidrógeno. Una capa de este tipo se puede depositar, por ejemplo, mediante procedimientos probados industrialmente, como por ejemplo PECVD (*plasma enhanced chemical vapour deposition* - depósito químico en fase de vapor asistido por plasma). A temperaturas elevadas, desde la capa con contenido de hidrógeno se puede difundir hidrógeno al interior del sustrato de silicio.

De acuerdo con una forma de realización, la capa con contenido de hidrógeno puede estar cubierta con al menos una capa adicional de barrera de difusión, que es menos permeable al hidrógeno que la propia capa con contenido de hidrógeno. La capa adicional puede actuar como barrera de difusión hacia el exterior, por ejemplo durante la incorporación de hidrógeno en el sustrato de silicio a altas temperaturas, de modo que si bien el hidrógeno se puede difundir desde la capa con contenido de hidrógeno al interior del sustrato de silicio, apenas se puede difundir en la atmósfera circundante. La capa de barrera de difusión se puede configurar por ejemplo con un material dieléctrico de densidad suficiente.

De acuerdo con una forma de realización, el sustrato de silicio revestido con la capa con contenido de hidrógeno se puede transportar a continuación a través de zonas de temperatura adecuadamente regulada en un horno de paso continuo.

En dicha configuración del procedimiento, especialmente fácil de implementar industrialmente, por ejemplo después de formar la capa emisora en la superficie del sustrato de silicio se puede depositar una capa de material dieléctrico con contenido de hidrógeno, como por ejemplo una capa de nitruro de silicio hidrogenado, en la superficie del sustrato de silicio. Esta capa se puede depositar con un espesor adecuado, de modo que posteriormente también puede actuar, por ejemplo, como capa antirreflectante, capa de pasivación o espejo dieléctrico para la célula solar. En este contexto también se puede aplicar por ejemplo una capa de $\text{SiN}_x\text{:H}$ más densa como capa de barrera de difusión sin un gran gasto adicional, por ejemplo adaptando correspondientemente flujos de gas de silano y amoníaco (como gases precursores). De este modo también se puede formar un revestimiento antirreflectante doble, posiblemente ventajoso, eligiendo apropiadamente los espesores.

A continuación, en caso dado se pueden imprimir estructuras de contacto por serigrafía sobre esta capa. En una etapa de alta temperatura común, los sustratos de silicio preparados de este modo se transportan a través de un horno de paso continuo y en este proceso atraviesan diferentes zonas de temperatura, de modo que, por un lado, se pueden hornear los contactos aplicados por serigrafía y, por otro lado, ajustando un perfil de temperaturas adecuado dentro del horno de paso continuo, simultáneamente también se llevan a cabo al menos partes de la etapa de tratamiento de estabilización, con el fin de estabilizar en conjunto la eficiencia de la célula solar. Por ejemplo, el hidrógeno contenido en la capa con contenido de hidrógeno puede penetrar en el sustrato de silicio durante la etapa de horneado a más de 650°C, a continuación el sustrato se puede enfriar rápidamente a menos de 550°C, preferiblemente a menos de 450°C, y después se puede mantener allí durante un tiempo de, por ejemplo, al menos 10 s a temperaturas preferiblemente inferiores a 450°C. Con un tratamiento previo de este tipo ya dentro del horno de paso continuo, la regeneración propiamente dicha se puede llevar a cabo mediante generación de portadores de carga minoritarios excedentes a temperatura elevada.

De acuerdo con una forma de realización, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar en una etapa de procedimiento subsiguiente, por ejemplo después de mantener el sustrato de silicio dentro del intervalo de temperatura de 230°C a 450°C. En otras palabras, después de incorporar hidrógeno en el sustrato de silicio, el sustrato de silicio se puede mantener en primer lugar a una temperatura elevada sin que se generen portadores de carga minoritarios excedentes. Por lo tanto, el sustrato de silicio hidrogenado inicialmente solo se somete a un tratamiento previo y el proceso de regeneración propiamente dicho se lleva a cabo posteriormente por separado, en el mismo dispositivo o en otro dispositivo.

Alternativamente, de acuerdo con una forma de realización, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar en una etapa de procedimiento común junto con el mantenimiento del sustrato de silicio dentro del intervalo de temperatura de 230°C a 450°C. En otras palabras, se ha observado que la etapa de mantenimiento del sustrato de silicio a una temperatura de 230 a 450°C se puede combinar con la etapa de generación de portadores de carga minoritarios excedentes a temperaturas superiores a 230°C. En este contexto, los portadores de carga minoritarios excedentes se pueden generar ya en el sustrato de silicio, por ejemplo por iluminación, siempre que el sustrato de silicio se siga manteniendo a una temperatura de 230 a 450°C. De este modo, en conjunto se puede contar con un acortamiento considerable del tiempo de la etapa de tratamiento de estabilización.

De acuerdo con una forma de realización, un dispositivo diseñado especialmente para la realización de la etapa de tratamiento de estabilización en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico puede presentar un dispositivo de enfriamiento para el enfriamiento activo del sustrato de silicio dentro de una zona de enfriamiento. En este contexto, por un enfriamiento activo se puede entender que el sustrato de silicio no desprende calor al entorno de forma pasiva fundamentalmente por irradiación, sino que una pérdida de calor del sustrato de silicio se apoya activamente a través de otras medidas y/o efectos, como por ejemplo convección forzada.

De acuerdo con una forma de realización, el dispositivo de enfriamiento puede presentar, por ejemplo, un ventilador para insuflar un gas refrigerante en la zona de enfriamiento. Por ejemplo, el dispositivo de enfriamiento puede estar diseñado para insuflar gas inerte, por ejemplo nitrógeno, de forma selectiva localmente en la zona de enfriamiento. En este contexto, el gas puede presentar una temperatura baja, por ejemplo en el ámbito de la temperatura ambiente, preferiblemente al menos claramente por debajo de 100°C, no obstante al menos claramente por debajo de 300°C. La temperatura y un flujo del gas insuflado se pueden elegir adecuadamente de tal modo que dentro de la zona de enfriamiento se produzca una alta tasa de enfriamiento deseada para el sustrato de silicio, por ejemplo de más de 60 K/s.

Se ha de señalar que en la presente memoria se describen posibles características y ventajas de formas de realización de la invención en parte con referencia a un procedimiento según la invención y en parte con referencia a un dispositivo según la invención. Los expertos reconocerán que las características descritas se pueden intercambiar o combinar de forma adecuada y en particular también se pueden transferir del procedimiento de forma análoga al dispositivo, o viceversa.

Los expertos reconocerán además que un procedimiento según la invención para producir un elemento fotovoltaico puede comprender otras etapas de procedimiento, por ejemplo etapas de limpieza, etapas para formar capas dieléctricas adecuadas como capas antirreflectantes, capas de pasivación, capas de espejo, etc., otras etapas para formar contactos eléctricos o áreas dopadas adicionales dentro del sustrato de silicio, etc. El dispositivo descrito para la realización de la etapa de tratamiento de estabilización también puede presentar otras características estructurales y funcionales además de las características descritas, tal como se pueden utilizar ventajosamente por ejemplo en la producción de una célula solar de silicio.

Breve descripción de los dibujos

Los aspectos, características y ventajas de la invención anteriormente descritos, y otros posibles, se evidencian a partir de la siguiente descripción de formas de realización específicas con referencia a los dibujos adjuntos, no debiendo interpretarse la descripción ni los dibujos como limitativos de la invención.

La figura 1 muestra un modelo de tres estados con el que se pueden explicar estados de defecto dentro de un sustrato de silicio y transiciones relacionadas con ello entre estados individuales, como por ejemplo una degradación o una regeneración.

La figura 2 muestra un dispositivo para tratar un sustrato de silicio en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico según una forma de realización de la presente invención.

La figura 3 muestra un perfil de temperaturas de un sustrato durante el paso a través del dispositivo representado en la figura 2.

Las figuras solo son esquemáticas y no están a escala. Los símbolos de referencia iguales en las figuras designan características iguales o con el mismo efecto.

Descripción de formas de realización preferibles de la invención

Las formas de realización descritas a continuación se refieren en el sentido más amplio a un procedimiento para la pasivación o neutralización de efectos eléctricamente activos en elementos fotovoltaicos basados en silicio, como por ejemplo células solares o módulos solares. Los defectos pueden consistir en particular en defectos correlacionados con boro-oxígeno, tal como se describen en la literatura, que pueden reducir considerablemente la calidad (descrita mediante la vida útil (estadística) de los portadores de carga minoritarios) del material de partida y de parámetros de rendimiento eléctrico de la célula solar dependientes del mismo (corriente, tensión, eficiencia bajo iluminación), sobre todo de silicio o células solares monocristalinos, pero en general también multicristalinos. No se ha de excluir un efecto del procedimiento propuesto en la presente memoria también sobre otros defectos.

Una célula solar o un módulo solar se utilizan para transformar energía de luz ultravioleta/visible/infrarroja incidente directamente en energía eléctricamente útil sin emplear calor como forma intermedia. Para ello se aprovecha el efecto fotoeléctrico, en el que los electrones en un material semiconductor (por ejemplo silicio) son excitados por radiación electromagnética más allá de una anchura de banda energéticamente prohibida y, por lo tanto, absorben al menos una energía correspondiente a la anchura de banda prohibida del semiconductor. En este contexto, los expertos hablan de la excitación de un par electrón-hueco, ya que el electrón excitado (ahora móvil) abandona su átomo original y en el átomo original (neutro) queda una carga positiva excedente (un electrón "faltante" = hueco). Si el electrón móvil excitado es capturado de nuevo por un átomo (con carga positiva), la energía almacenada entre tanto (correspondiente a la anchura de banda prohibida) se pierde de nuevo. En este caso, los expertos hablan de la recombinación de un par electrón-hueco. Un proceso de recombinación requiere forzosamente al menos un electrón y un hueco.

Para poder utilizar la energía capturada de la luz, se han de separar los electrones y los huecos entre sí. En una célula solar típica, esto se realiza de tal modo que, en el componente, un área rica en electrones (dopada de tipo n) y un área empobrecida de electrones y rica en huecos (dopada de tipo p) limitan entre sí y se forma una, así llamada, unión pn. Debido a las diferencias de concentración de electrones móviles o huecos en las áreas adyacentes y a la difusión de los portadores de carga resultante de ello, en la unión pn se forma una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial posibilita una separación física de pares electrón-hueco, con lo que se impide la recombinación, y la energía almacenada se puede poner a disposición de un consumidor externo a través de contactos metálicos correspondientemente dispuestos separados por polaridades. En la literatura común se puede obtener una descripción más detallada.

Para que se pueda producir esta separación física de un par electrón-hueco, el portador de carga minoritario, es decir, el portador de carga complementario al tipo de semiconductor del material de absorción de un sustrato semiconductor, se ha de poder difundir desde el material de absorción en el área de la unión pn. Si el material de absorción presenta múltiples defectos activos de recombinación, que pueden unir electrones y huecos alternativamente entre sí y, por lo tanto, producen un proceso de recombinación, el consumidor externo pierde energía que en otro caso se podría utilizar eléctricamente y el rendimiento eléctrico de la célula solar se deteriora.

Por lo tanto, la densidad de los defectos o la vida útil media (fácilmente mensurable) resultante de ello son una magnitud determinante para la calidad de un material semiconductor y el rendimiento eléctrico de las células solares producidas con éste.

Como material de absorción para células solares se puede utilizar silicio cristalino, en el que se generan pares electrón-hueco. En este contexto, los expertos distinguen entre material monocristalino y material multicristalino, estando compuesto el material multicristalino por una pluralidad de cristalitas individuales debido al procedimiento de producción utilizado. En este contexto, los diferentes procedimientos de producción implican diferentes propiedades del material.

En el caso del silicio monocristalino, por regla general se utiliza el procedimiento según Czochralski (Cz-Si), en el que se saca un monocristal de silicio de la masa fundida de silicio. El silicio bruto utilizado es generalmente de alta pureza y no presenta ninguna contaminación digna de mención, en particular con oxígeno. Sin embargo, en el procedimiento de Czochralski, en el estado actual de la técnica se utiliza un crisol de cuarzo (SiO_2) eventualmente revestido que es atacado debido a la alta reactividad química del silicio, las temperaturas utilizadas (temperatura de fusión del silicio: 1410°C), la convección en la masa fundida y la rotación del crisol, y se disuelve parcialmente en la masa fundida residual. En general, a causa de ello en la masa fundida se produce de forma no deseable un enriquecimiento de oxígeno procedente del crisol de cuarzo, que se incorpora como una impureza en el monocristal de silicio. Por regla general, el contenido de oxígeno intersticial de Cz-Si está dentro del intervalo de 5×10^{17} a $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. En este contexto, el límite superior está dado por la solubilidad. Solo mediante procedimientos avanzados, por ejemplo con ayuda de campos magnéticos que interfieren en la convección en la masa fundida, se pueden lograr de forma fiable menores concentraciones de oxígeno en todo el cristal en el procedimiento de Czochralski.

El material monocristalino producido según el procedimiento "floatzone" (de zona flotante), que produce cristales de silicio de alta pureza y en particular también pobres en oxígeno sobre todo para la industria electrónica, se utiliza raras veces en la producción de células solares a base de silicio debido a su coste elevado.

El silicio multicristalino se produce por regla general en un proceso diferente, en el que una masa fundida de silicio se cristaliza de forma dirigida (por ejemplo, procedimiento de Bridgeman) en un molde de cuarzo (revestido), formándose en este contexto generalmente múltiples cristalitas en lugar de un monocristal. A diferencia del procedimiento de Czochralski, en este caso la masa fundida no rota y el movimiento de convección es menor. Por este motivo, el molde de cuarzo utilizado es menos atacado por la masa fundida de silicio y llega menos oxígeno a la masa fundida de silicio. Dependiendo del procedimiento, el contenido de oxígeno del material multicristalino resulta más bajo que en el caso del procedimiento de Czochralski y por regla general está dentro del intervalo de 5×10^{16} a $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Sin embargo, en caso de una ejecución correspondiente, las cristalitas pueden alcanzar el tamaño de las células solares posteriormente producidas, de modo que prácticamente se trata de un material monocristalino. En este contexto, los expertos hablan de material cuasimonocristalino, pero que puede presentar un menor contenido de oxígeno en comparación con materiales producidos según el método de Czochralski.

Con frecuencia, la calidad del material multicristalino es menor que la del material monocristalino comparable, ya que los límites de grano entre cristalitas adyacentes actúan como fuertes centros de recombinación y pueden resultar problemáticos para la técnica de proceso. A causa de ello, las células solares monocristalinas presentan por regla general mayores eficiencias que las células solares multicristalinas comparables.

Para poder generar una unión pn, el material de absorción ha de estar dopado. El material se puede producir rico en electrones (tipo n), eligiéndose por regla general fósforo como material de dopaje, o rico en huecos (tipo p), eligiéndose por regla general boro o galio como material de dopaje. Sin embargo, debido a su mejor (prácticamente igual) comportamiento de solubilidad en el cristal y la masa fundida, el boro se distribuye más uniformemente que el galio a lo largo de la dirección de crecimiento del cristal de silicio, y por ello es más común como material de dopaje que el galio. También son usuales los dopajes mixtos intencionados o no intencionados. Los dopajes usuales oscilan dentro del intervalo de 1×10^{14} a $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, dependiendo el valor concretamente utilizado de la polaridad del material de absorción y de la arquitectura de la célula solar.

Además es sabido que, en caso de presencia simultánea de boro y oxígeno en el cristal de silicio, en cuestión de horas se forman o se pueden activar defectos correlacionados con boro-oxígeno bajo iluminación o inyección de portadores de carga incluso a temperatura ambiente, es decir, en condiciones de funcionamiento típicas de células y módulos solares, que, como centros de fuerte acción de recombinación, pueden limitar la vida útil de los portadores de carga minoritarios y, por lo tanto, también el rendimiento eléctrico de la célula solar/del módulo solar. En este contexto, los expertos hablan de degradación correlacionada con boro-oxígeno (véase la figura 1: transición del estado inactivo (recocido) A por degradación al estado activo (degradado) B) o de la limitación por defectos correlacionados con boro-oxígeno. En este contexto también es común la designación menos precisa de degradación inducida por luz, que no solo se debe a defectos correlacionados como boro-oxígeno, sino que también es atribuible a otros defectos inducidos por luz.

Los defectos correlacionados con boro-oxígeno activados y por lo tanto activos en relación con la recombinación (véase la figura 1: estado B) se pueden llevar de nuevo a un estado inactivo en relación con la recombinación mediante un calentamiento durante poco tiempo a 100-200 o 100-300°C en la oscuridad (véase la figura 1: transición del estado activo B mediante recocido al estado inactivo A). Sin embargo, en caso de una nueva iluminación o inyección de portadores de carga se produce de nuevo la degradación correlacionada con boro-oxígeno, por lo que los defectos también se designan como metaestables.

En este contexto, la densidad de los defectos (activados) depende de forma aproximadamente lineal de la concentración de boro y de forma aproximadamente cuadrática de la concentración de oxígeno en el sustrato de silicio. Por lo tanto, este efecto afecta en particular a materiales de silicio ricos en oxígeno dopados con boro, producidos según el procedimiento de Czochralski. Por consiguiente, las células solares basadas en sustratos ricos en oxígeno (contenido 1×10^{18} o al menos $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) muy dopados (contenido de boro 1×10^{16} o al menos $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) pueden presentar una eficiencia significativamente reducida (pérdida de eficiencia abs. $\sim 1\%$). Las pérdidas por degradación concretas pueden variar en función de la arquitectura utilizada para la célula solar.

No obstante, también se ha comprobado que materiales de silicio multicristalinos por regla general con menor contaminación por oxígeno muestran el efecto al igual que materiales de silicio en los que el boro no constituye el material de dopaje dominante, en particular también materiales dopados con fósforo parcialmente compensados con adiciones de boro.

Hasta ahora se conocen sobre todo cuatro enfoques para solucionar o evitar el problema de la degradación correlacionada con boro-oxígeno.

Un primer enfoque comienza con la minimización de la contaminación por oxígeno no deseada del cristal de silicio. Por un lado, revestimientos novedosos del crisol de cuarzo han de impedir la disolución del mismo. Por otro lado, sobre todo en el procedimiento de Czochralski, se utilizan campos magnéticos con los que se suprime el movimiento por convección de la masa fundida de silicio directamente en el crisol de cuarzo, con lo que se puede minimizar la erosión en el crisol de cuarzo. El silicio MCz producido correspondientemente presenta concentraciones de oxígeno correspondientemente más bajas, dentro del intervalo de 1×10^{17} a $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Sin embargo, por regla general, el proceso de producción es caro y más propenso a fallos en comparación con el proceso normal.

El segundo enfoque se basa en la reducción de la concentración de boro en el material de partida. Los cálculos teóricos muestran que el potencial de eficiencia sin la limitación por defectos correlacionados con boro-oxígeno es máximo en caso de dopajes de alrededor de $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mientras que al tener en cuenta la degradación correlacionada con boro-oxígeno es máximo con dopajes más bajos. Sin embargo, el potencial de eficiencia máximo disminuye con la disminución del dopaje, de modo que, si bien los materiales menos dopados muestran menos pérdidas por degradación, no es posible aprovechar por completo el potencial de eficiencia máximo. El dopaje óptimo del sustrato de silicio depende de la arquitectura concreta de la célula solar. Este enfoque es seguido actualmente sobre todo por la mayoría de los fabricantes que utilizan los materiales con concentraciones de boro dentro del intervalo de 1×10^{15} a $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ con silicio Cz rico en oxígeno.

En el tercer enfoque, el boro como material de dopaje se sustituye, por ejemplo, por galio. Se ha comprobado que al utilizar galio no se producen defectos correspondientes o éstos son inactivos en relación con la recombinación. Sin embargo, a diferencia del boro, el galio no presenta un comportamiento de solubilidad óptimo en cristal y masa fundida, por lo que producir un cristal dopado homogéneamente a lo largo de la dirección de cristalización constituye un reto técnico. La consecuencia de ello consiste en una mayor cantidad de desechos de material y una mayor propensión a fallos del proceso y, por lo tanto, en unos costes más altos. Por ello es dudoso que este enfoque sea económicamente viable.

El cuarto enfoque aprovecha el hecho de que el defecto correlacionado con boro-oxígeno no solo se puede presentar en un estado inactivo (véase la figura 1: estado A) y un estado activo (véase la figura 1: estado B), que se pueden transformar uno en el otro mediante inyección de portadores de carga, es decir, degradación, o mediante calentamiento en la oscuridad, es decir, recocido, sino también en un tercer estado "regenerado" inactivo en relación con la recombinación (véase la figura 1: estado C), que, según el conocimiento actual, se forma mediante regeneración a partir del estado activo B.

Este estado se caracteriza en particular por que (a) tiene una actividad de recombinación débil o insignificante y (b), a diferencia del estado inactivo inicialmente presente, es estable bajo iluminación o inyección de portadores de carga a temperaturas $< 150^{\circ}\text{C}$, es decir, no se produce una nueva activación de los defectos y, por lo tanto, una degradación.

De acuerdo con los conocimientos disponibles hasta la fecha, el paso del defecto activo, es decir, del estado B, al tercer estado inactivo C requiere una inyección de portadores de carga, por ejemplo mediante iluminación o el funcionamiento de la célula solar en la dirección de paso a temperaturas ligeramente elevadas dentro del intervalo de 50 a 230°C , en donde temperaturas más altas o densidades mayores de portadores de carga excedentes aceleran la transformación de los defectos. En este enfoque, gracias a la transformación de los defectos presentes, no se produce ninguna limitación en relación con el contenido de oxígeno o de boro.

El proceso para el paso de los defectos activos (estado B) al tercer estado "regenerado" C descrito se designa en adelante como "regeneración" y está descrito detalladamente y reivindicado en el documento DE 10 2006 012 920 B3.

La rentabilidad del proceso de regeneración depende esencialmente de la tasa de regeneración o del tiempo necesario para llevar una cantidad suficientemente grande de defectos al estado regenerado C ventajoso. Por consiguiente, un proceso que puede aumentar la tasa de regeneración, y por lo tanto reducir el tiempo necesario, tiene un gran interés económico.

Un objetivo de la presente invención puede consistir, entre otras cosas, en indicar un proceso de producción de un elemento fotovoltaico de tal modo que el proceso designado como "regeneración" pueda ser llevado a cabo de un modo más eficaz, es decir, en menos tiempo y con menores costes, y que, por lo tanto, se pueda aprovechar mejor el potencial de eficiencia de las células solares basadas en silicio. No se ha de excluir la posibilidad de que el proceso de producción descrito también actúe sobre otros defectos en el silicio y que también pueda ser utilizado allí con ligeras adaptaciones.

De acuerdo con una forma de realización de la invención se presenta un procedimiento para producir un elemento fotovoltaico, por ejemplo una célula o módulo solar lista para el uso o una fase previa, que comprende las siguientes etapas:

Preparación de un sustrato de silicio con contenido de oxígeno y dopado con boro, o tal vez también dopado de otro modo, y configuración de una capa emisora para formar una unión pn en la superficie del sustrato de silicio. En este contexto:

(a) se incorpora hidrógeno en el sustrato de silicio;

(b) el sustrato, si es necesario en el proceso concreto, se somete brevemente a una temperatura $> 450^{\circ}\text{C}$, si durante esta fase no se incorpora más hidrógeno en el sustrato de silicio;

(c) el sustrato se mantiene eventualmente en el intervalo de temperatura de 230 - 450°C durante un tiempo determinado y eventualmente durante esta fase se crean portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato, y a continuación en caso dado

(d) el sustrato se mantiene dentro del intervalo de temperatura de 50 - 230°C y durante esta fase se generan portadores de carga minoritarios excedentes.

La etapa de proceso (d) corresponde precisamente al procedimiento según el documento DE 10 2006 012 920 B3.

El procedimiento presentado con las etapas parciales (a) a (c) tiene por objeto modificar un elemento fotovoltaico de tal modo que el proceso descrito en el documento DE 10 2006 012 920 B3 se pueda optimizar y, por lo tanto, llevar a cabo de forma económicamente atractiva.

El sustrato de silicio utilizado en el procedimiento según la invención puede consistir en una oblea producida según el procedimiento de Czochralski, que presenta un dopaje con boro dentro del intervalo de 1×10^{15} a $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Debido a su método de fabricación, una oblea de este tipo presenta una concentración determinada de oxígeno, por ejemplo de 1×10^{17} a 3×10^{18} cm⁻³. No obstante también se pueden utilizar otros sustratos de silicio con contenido de oxígeno y dopados con boro, como por ejemplo obleas de silicio multicristalinas o capas de silicio depositadas sobre un soporte a partir de la fase gaseosa o líquida.

5 De acuerdo con la invención, en la superficie del sustrato de silicio se forma un emisor con el fin de producir la diferencia de potencial (unión pn) necesaria para la separación de pares electrón-hueco. Se trata de un área que por regla general presenta un tipo de semiconductor opuesto al tipo de semiconductor del sustrato. Si el material de dopaje predominante en el sustrato consiste en boro, el sustrato presenta un dopaje p. No se ha de excluir la posibilidad de que, a pesar del dopaje con boro, el tipo de semiconductor del sustrato sea de tipo n si presenta cantidades correspondientes de materiales de dopaje n, como el fósforo. La configuración del emisor puede tener lugar, por
10 ejemplo, mediante una difusión superficial de materiales de dopaje como fósforo (en caso de sustrato de tipo p) o boro (en caso de sustrato de tipo n). Dicha difusión se lleva a cabo por regla general a temperaturas superiores a 800°C. No obstante también se pueden utilizar otros procedimientos para generar una capa emisora correspondiente. Por ejemplo, sobre la superficie del sustrato se puede depositar una capa emisora de polaridad correspondiente a partir
15 de una fase gaseosa o líquida o de un plasma. Otra posibilidad para generar una capa emisora puede consistir en la incorporación por aleación de materiales correspondientes. Además, no es necesario que la superficie del sustrato de silicio esté completamente cubierta. Puede ser suficiente que únicamente un área parcial de la superficie en la cara anterior y/o la cara posterior esté cubierta con una capa emisora.

También es factible el caso en el que el emisor y el sustrato son del mismo tipo de semiconductor, por ejemplo
20 cuando el sustrato y la capa emisora presentan una estructura de bandas muy diferente (heteroestructuras), de modo que en la interfaz se establece una flexión de banda que produce la diferencia de potencial deseada. En un caso límite ni siquiera es necesario utilizar un semiconductor para ello, ya que un metal correspondientemente elegido también puede conducir a dicha flexión de banda (estructuras MIS).

La incorporación de hidrógeno en el sustrato de silicio es forzosamente necesaria en el marco del procedimiento según la invención, ya que un cristal de silicio por regla general no contiene cantidades significativas de hidrógeno.
25

El hidrógeno se puede incorporar con los procedimientos más diversos. Por ejemplo, el hidrógeno se puede liberar y penetrar en el cristal de silicio en el marco de una etapa de temperatura a partir de revestimientos aplicados en una o en las dos caras, como nitruros de silicio hidrogenados (a-SiN_x:H), carburos de silicio hidrogenados (a-SiC_x:H), óxidos de silicio hidrogenados (a-SiO_x:H), oxinitruros de silicio hidrogenados (a-SiO_xN_y:H), óxidos de aluminio hidrogenados (Al₂O₃), silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) o capas similares, que también pueden tener otras funciones (por ejemplo pasivación de la superficie, revestimiento antirreflectante). Los parámetros exactos, en particular en lo que respecta a la temperatura, con los que se produce una liberación del hidrógeno unido a la capa varían de una capa a otra y se describen en diferentes formas de realización. Los expertos pueden deducir formas de realización análogas correspondientes para capas comparables.
30

En este punto se ha de señalar además que la producción de los contactos metálicos puede requerir una etapa de alta temperatura, que también puede conducir a la liberación de hidrógeno desde los revestimientos hidrogenados.
35

De acuerdo con una forma de realización se utiliza nitruro de silicio hidrogenado (a-SiN_x:H) como fuente de hidrógeno, que durante una etapa de alta temperatura a temperaturas superiores a 600°C se reestructura y libera hidrógeno en forma atómica y molecular, que puede penetrar en el sustrato de silicio. En este contexto, la cantidad de hidrógeno liberado puede depender de
40

(a) la composición de la capa antes de la etapa de alta temperatura;

(b) la temperatura máxima;

(c) el perfil de temperatura, en particular la duración de la etapa de alta temperatura.

En general, a temperaturas más altas se libera más hidrógeno a una mayor velocidad. Además es conveniente que el
45 hidrógeno se distribuya por todo el sustrato y en particular que también penetre profundamente en el sustrato.

La regulación de temperatura durante la etapa de alta temperatura se ha de elegir de tal modo que

(I) se alcancen temperaturas superiores a 600°C, que conducen a una liberación de hidrógeno;

(II) la regulación de temperatura y la duración estén concebidas de tal modo que una cantidad suficiente de hidrógeno se difunda dentro del sustrato; y

50 (III) esté asegurada una distribución del hidrógeno en el sustrato.

Esto se puede realizar, por ejemplo, en el marco de un proceso de aleación de los contactos metálicos de una célula solar, en el que se alcanzan temperaturas > 750°C durante unos segundos.

La argumentación con capas similares que liberan hidrógeno en el marco de una etapa de alta temperatura, como por ejemplo carburos de silicio hidrogenados, óxidos de silicio hidrogenados u oxinitruros de silicio hidrogenados, es análoga. Los expertos pueden deducir adaptaciones correspondientes convenientes de la regulación de temperatura.

De acuerdo con otra forma de realización se utiliza óxido de aluminio hidrogenado (Al_2O_3) como fuente de hidrógeno que, en el marco de una etapa de temperatura a temperaturas $> 250^\circ\text{C}$, puede liberar hidrógeno, que puede penetrar en el sustrato. De forma análoga al caso arriba descrito de capas de nitruro de silicio, aquí también se han de elegir correspondientemente la temperatura máxima, el perfil de temperatura y la duración para lograr una concentración de hidrógeno suficientemente alta y bien distribuida en el sustrato. Para favorecer la distribución del hidrógeno en el sustrato, durante la etapa de temperatura se pueden generar portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato. Esto puede tener lugar por ejemplo mediante iluminación, o por ejemplo mediante la aplicación de una corriente externa.

De acuerdo con otra forma de realización, como fuente de hidrógeno se utiliza silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), liberándose hidrógeno en el marco de una etapa de temperatura a temperaturas $> 100^\circ\text{C}$. De forma análoga a los casos arriba descritos de, por ejemplo, capas de nitruro de silicio y óxidos de aluminio, aquí también se han de elegir correspondientemente la temperatura máxima, el perfil de temperatura y la duración para lograr una concentración de hidrógeno suficientemente alta y bien distribuida en el sustrato. Para favorecer la distribución del hidrógeno en el sustrato, durante la etapa de temperatura se pueden generar portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato. Esto puede tener lugar por ejemplo mediante iluminación, o por ejemplo mediante la aplicación de una corriente externa.

De acuerdo con otra forma de realización también se pueden utilizar sistemas multicapa, por ejemplo formados por las capas arriba mencionadas. Por ejemplo, el sistema de capas puede estar configurado de tal modo que la capa adyacente al sustrato sirva como fuente de hidrógeno y que encima de la misma se encuentre al menos una capa adicional.

En este contexto, al menos una de las capas adicionales puede actuar como barrera de difusión de hidrógeno, es decir, que dicha capa adicional es menos permeable que la capa con contenido de hidrógeno subyacente y, por consiguiente, la difusión de hidrógeno a través de esta capa en el marco de una etapa de alta temperatura solo se produce de forma relativamente lenta. En este caso, esta capa sirve como reflector de hidrógeno y el hidrógeno liberado de la fuente de hidrógeno se mantiene mejor en el sustrato. Esto resulta ventajoso, ya que el rendimiento de hidrógeno de la capa fuente, es decir la relación entre la cantidad de hidrógeno difundida y la cantidad liberada, es mejor en este caso y, como se indica más adelante, también se minimiza la salida por difusión a temperaturas más bajas.

En principio también es concebible disponer una capa diferente entre la capa fuente y el sustrato, que no influye en la difusión del hidrógeno de la capa fuente al interior del sustrato. En casos especiales también es concebible una capa de barrera para hidrógeno en el mismo lugar.

La incorporación de hidrógeno en el sustrato también puede tener lugar de otro modo. Por ejemplo, el hidrógeno se puede implantar en el sustrato de silicio, es decir, se aceleran protones correspondientemente y se disparan sobre el sustrato o al interior del mismo. Dependiendo de la elección de los parámetros de proceso, en particular de la energía de los protones y de la dosis de los mismos, se puede producir selectivamente una distribución de hidrógeno en el sustrato. A continuación de la implantación de iones propiamente dicha puede tener lugar una etapa de alta temperatura $> 500^\circ\text{C}$ que, por un lado, ha de sanear deterioros de cristales que se pueden producir con el frenado de los protones y, por otro lado, también puede provocar una redistribución del hidrógeno.

Además, la incorporación del hidrógeno en el sustrato también puede tener lugar, por ejemplo, mediante una introducción por difusión de hidrógeno atómico desde una atmósfera enriquecida con hidrógeno o un plasma con contenido de hidrógeno.

También son concebibles otros procedimientos para la incorporación del hidrógeno en el sustrato de silicio, aunque no se mencionen explícitamente en la presente memoria.

En el marco del procedimiento según la invención también se pretende que el hidrógeno incorporado permanezca en una cantidad suficiente en el sustrato. Para ello se debería evitar que el sustrato esté expuesto durante más tiempo a temperaturas $> 400^\circ\text{C}$, en particular $> 450^\circ\text{C}$, siempre que no haya disponible más hidrógeno de las fuentes arriba mencionadas o de otras, ya que de lo contrario se produce una cantidad considerable de efusión de hidrógeno.

En particular en caso de que la incorporación de hidrógeno requiera temperaturas más altas, por ejemplo en la liberación del hidrógeno desde capas hidrogenadas, como por ejemplo nitruros de silicio, se debería minimizar la duración del intervalo de temperatura en el que la capa suministra menos hidrógeno al sustrato que el que sale por efusión del sustrato.

Además puede resultar desventajoso generar portadores de carga minoritarios excedentes a temperaturas superiores a 400°C , en particular superiores a 450°C , ya que esto puede poner el hidrógeno en un estado de carga más móvil y, por lo tanto, favorecer la efusión del mismo.

Por ejemplo, de acuerdo con la forma de realización con capas de nitruro de silicio hidrogenado (α -SiN_x:H) como fuente de hidrógeno procede evitar el intervalo de temperatura entre 400°C o 450°C y 600-650°C y reducir la temperatura del sustrato en un tiempo breve de temperaturas superiores a 650°C a una temperatura inferior a 450°C, siendo procedente una tasa de enfriamiento en particular por encima de 550°C mayor de 3 K/s, preferiblemente mayor de 30 K/s.

En este punto puede resultar especialmente ventajosa la forma de realización con al menos una capa de barrera de difusión para el hidrógeno, como ya se ha descrito, ya que se impide la efusión del hidrógeno del sustrato incluso en el intervalo de temperatura cuestionable > 400°C o > 450°C. En este caso también pueden ser aceptables menores tasas de enfriamiento superiores a 0,3 K/s.

En el marco del procedimiento según la invención puede resultar ventajoso mantener el sustrato dentro del intervalo de temperatura de 230-450°C durante un tiempo determinado de al menos 10 segundos, a lo sumo 30 minutos. Esto se puede realizar por ejemplo en forma de una meseta o por ejemplo en forma de una rampa de temperatura.

Se ha constatado que el efecto deseado de un aumento de la tasa de regeneración con temperaturas de sustrato crecientes que ha de ser alcanzado mediante el procedimiento según la invención se puede lograr en un tiempo de tratamiento breve. Además, para el efecto perseguido del aumento de la tasa de regeneración en principio no es necesario generar portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato. No obstante, como se indica más adelante, puede resultar ventajoso generar portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato también para influir en la difusión de hidrógeno en el intervalo de temperatura arriba mencionado mediante una manipulación del estado de carga.

De acuerdo con una forma de realización, el sustrato se mantendrá sin generación de portadores de carga minoritarios excedentes a una temperatura dentro del intervalo de 230 a 450°C, en donde unas temperaturas más altas reducen el tiempo de mantenimiento necesario hasta lograr el efecto deseado. A continuación, el sustrato se enfriará a temperatura ambiente con una rampa de temperatura empinada. Después, el sustrato se puede conducir al proceso de regeneración tal como se describe en el documento DE 10 2006 012 920 B3.

De acuerdo con otra forma de realización, el sustrato se mantendrá sin generación de portadores de carga minoritarios excedentes a una temperatura dentro del intervalo de 230 a 450°C, en donde unas temperaturas más altas reducen el tiempo de mantenimiento necesario hasta lograr el efecto deseado. Acto seguido, el sustrato se traslada al intervalo de temperatura de 50 a 230°C, en el que se puede desarrollar el proceso de regeneración de forma análoga a la descrita en el documento DE 10 2006 012 920 B3.

De acuerdo con otra forma de realización, el sustrato se mantendrá con generación de portadores de carga minoritarios excedentes, por ejemplo mediante iluminación, a una temperatura dentro del intervalo de 230 a 450°C, en donde unas temperaturas más altas reducen el tiempo de mantenimiento necesario hasta lograr el efecto deseado. Además de un aumento de la tasa de regeneración, en determinadas circunstancias se puede producir una regeneración parcial o completa también a temperaturas > 230°C. Acto seguido, el sustrato se traslada al intervalo de temperatura de 50 a 230°C, en el que en caso necesario continúa el proceso de regeneración, que puede tener lugar de forma acelerada debido a la regeneración que en parte ya se ha producido.

A continuación se ha de ilustrar a modo de ejemplo una forma de realización completa de un procedimiento según la invención. En esta forma de realización se utiliza nitruro de silicio hidrogenado como fuente de hidrógeno, habiendo sido aplicada la capa solo sobre una cara de una oblea de silicio, mientras que la cara opuesta está completamente cubierta de aluminio. Sobre la capa de nitruro de silicio, que también actúa como revestimiento antirreflectante y capa de pasivación, se encuentra una pasta metálica aplicada localmente por ejemplo mediante serigrafía, que a altas temperaturas ataca la capa de nitruro de silicio y, por consiguiente, establece el contacto con el silicio subyacente. La liberación del hidrógeno desde la capa de nitruro de silicio tiene lugar en el marco de un proceso de aleación típico de la metalización del elemento fotovoltaico, que por regla general tiene lugar a una temperatura superior a 750°C en un horno de cinta.

En la figura 2 está representado un dispositivo en forma de un horno 10 de paso continuo con una configuración especial, que puede ser utilizado para el tratamiento de un sustrato de silicio en el marco de una producción de una célula solar y que está configurado para llevar a cabo una forma de realización del procedimiento de producción descrito en la presente memoria y en particular de la etapa de tratamiento de estabilización que se ha de efectuar en el mismo.

El horno 10 de paso continuo presenta una cinta 14 que se puede mover por medio de rodillos 12 accionados. En un lado 16 de entrada se pueden colocar sustratos de silicio sobre la cinta 14 y después transportar mediante la cinta 14 a través de zonas del horno 10 de paso continuo calentadas a temperaturas diferentes. La superficie de los sustratos de silicio puede haber sido provista previamente de una capa con contenido de oxígeno. De forma complementaria, sobre esta capa con contenido de oxígeno se puede haber imprimido un patrón de pasta metálica, con lo que finalmente se han de formar los contactos metálicos para la célula solar.

En una zona 18 de calentamiento previo están dispuestos uno o más calefactores radiantes 20, con cuya ayuda los sustratos de silicio transportados sobre la cinta 14 se pueden calentar previamente a temperaturas de hasta más de 500°C.

5 En una zona 22 de calentamiento máximo situada a continuación está previsto al menos otro calefactor radiante 24, con cuya ayuda los sustratos de silicio que atraviesan la misma se pueden calentar brevemente a temperaturas de hasta más de 700°C.

10 A continuación está dispuesta una zona 26 de enfriamiento. En esta zona 26 de enfriamiento no solo no está previsto ningún calefactor radiante, sino que incluso está previsto un dispositivo 28 de enfriamiento con cuya ayuda se pueden enfriar activamente los sustratos de silicio que atraviesan dicha zona. El dispositivo de enfriamiento puede estar configurado, por ejemplo, como ventilador para insuflar gas de nitrógeno frío en la zona 26 de enfriamiento.

15 A continuación puede estar dispuesta una zona 30 de mantenimiento de temperatura. En esta zona 30 de mantenimiento de temperatura está previsto otro calefactor radiante 32, con cuya ayuda los sustratos de silicio se pueden mantener en un intervalo de 230°C a 450°C dentro de la zona 30 de mantenimiento de temperatura. En este contexto, la longitud de la zona 30 de mantenimiento de temperatura puede estar dimensionada de tal modo que, con una velocidad de paso dada, un sustrato de silicio transportado por la cinta 14 requiera aproximadamente 10 s para ser transportado a través de la zona 30 de mantenimiento de temperatura, manteniéndose el mismo con ayuda del calefactor radiante 32 a una temperatura deseada dentro del intervalo de temperatura de 230 a 450°C. En particular, la zona 30 de mantenimiento de temperatura puede ser por ejemplo al menos igual de larga, preferiblemente al menos tres veces más larga, preferiblemente al menos seis veces más larga que la zona 22 de calentamiento máximo. El
20 horno de paso continuo completo puede ser por ejemplo más del doble de largo que un horno de paso continuo convencional sin una zona 30 de mantenimiento de temperatura.

25 A continuación, el sustrato de silicio llega a una zona 34 de enfriamiento en la que puede seguir enfriándose. En la zona 34 de enfriamiento puede estar prevista una fuente luminosa 36 potente, por ejemplo en forma de un láser con rayo láser expandido o en forma de una lámpara potente con longitudes de onda que pueden ser absorbidas por el sustrato de silicio, para iluminar los sustratos de silicio que atraviesan dicha zona con intensidades de iluminación de al menos 0,3 kW/m². Dado que, al menos al comienzo de la zona 34 de enfriamiento, los sustratos de silicio todavía están a una temperatura claramente superior a 90°C, de este modo se puede efectuar el proceso de regeneración y se puede estabilizar la eficiencia de las células solares finalmente producidas.

30 Alternativamente o de forma complementaria también se puede prever una fuente luminosa en la zona 30 de mantenimiento de temperatura (no prevista en la configuración representada en la figura 2). Mediante una iluminación adecuada de los sustratos de silicio ya en la zona 30 de mantenimiento de temperatura se puede favorecer eventualmente que el hidrógeno que ha penetrado en los sustratos de silicio adopte un estado ventajoso para una regeneración subsiguiente. Por otro lado, mediante una iluminación adecuada ya dentro de la zona 30 de mantenimiento de temperatura se puede llevar a cabo ya una regeneración al menos parcial o, en caso de un control de proceso adecuado, también completa dentro de los sustratos de silicio.
35

Todos los componentes descritos del horno 10 de paso continuo pueden estar controlados preferiblemente por un control 40 común.

Una vez que los sustratos de silicio han atravesado todo el horno 10 de paso continuo, pueden ser sacados por un lado 38 de salida y sometidos a otras etapas de procesamiento o caracterización.

40 En la figura 3 se muestra a modo de ejemplo una regulación de temperatura durante el paso de la oblea a través de diferentes zonas del horno 10 de cinta.

Al entrar en el horno de cinta y atravesar la zona 18 de calentamiento previo (zona 1), la oblea que actúa como sustrato de silicio primero se calienta hasta que aproximadamente a 650°C comienza la liberación de hidrógeno de la capa de nitruro de silicio hidrogenado depositada sobre la misma y la difusión dentro de la oblea (zona 2). Una vez alcanzada la temperatura máxima en la zona 22 de calentamiento máximo, la liberación de hidrógeno de la capa de nitruro de silicio disminuye de nuevo. Al mismo tiempo ya sale por efusión una parte del hidrógeno previamente difundido dentro de la oblea. Si la temperatura cae por debajo de aproximadamente 650°C, la efusión desde la oblea es superior a la liberación de hidrógeno desde la capa de nitruro de silicio o a la difusión dentro de la oblea, y el contenido de hidrógeno de la oblea disminuye de nuevo. Para evitar esto en la mayor medida posible, la oblea se enfría en la zona 26 de enfriamiento (zona 3) con una rampa de temperatura empinada con una alta tasa de enfriamiento, por ejemplo de más de 20 K/s, y se impide que continúe la efusión del hidrógeno. Acto seguido, la oblea se mantiene dentro del intervalo de temperatura de 230 a 450°C en la zona 30 de mantenimiento de temperatura (zona 4) y, correspondientemente al procedimiento descrito, comienza el proceso que aumenta la tasa de regeneración, que se muestra en una etapa de proceso de regeneración posterior. El tiempo de regeneración requerido posteriormente se puede acortar además mediante una generación de portadores de carga excedentes, por ejemplo mediante iluminación, en la zona 4. Esto
45 no es forzosamente necesario, pero resulta beneficioso para la rentabilidad del proceso completo consistente en el procedimiento descrito en la presente memoria y el procedimiento según el documento DE 10 2006 012 920 B3 ya incluido o que ha de ser llevado a cabo por separado. En la zona 5 puede tener lugar directamente el procedimiento
50
55

de regeneración análogo al del documento DE 10 2006 012 920 B3. No obstante, éste también puede tener lugar opcionalmente por separado.

En la figura 3 está representado de forma complementaria como una línea discontinua 42 un perfil de temperatura típico durante el paso a través de un horno de paso continuo usual, tal como se utiliza convencionalmente, por ejemplo, para el horneado de contactos aplicados por serigrafía. Se puede distinguir que, después de alcanzar una temperatura máxima, los sustratos de silicio se enfrían de forma continua y aproximadamente lineal. En este contexto, el tiempo de permanencia dentro del intervalo de temperatura por encima de 450°C es claramente más largo que en el caso del horno de paso continuo según la invención y, en cambio, el tiempo de permanencia dentro del intervalo de temperatura entre 230°C y 450°C es claramente más corto que en el caso del horno de paso continuo según la invención.

Los expertos deducirán otros detalles, características y ventajas de formas de realización de la invención a partir de la siguiente descripción de un modelo que sirve como base.

A continuación se presenta un modelo con el que se podría explicar el acortamiento de las constantes de tiempo del proceso de regeneración. Se ha de señalar que en el momento de la elaboración de la presente solicitud de patente todavía no se entendían de forma detallada las relaciones causales exactas que conducen al aumento de las tasas de regeneración observadas en el procedimiento según la invención y, por lo tanto, a una ejecución eficiente del proceso de regeneración. Por ello, el modelo presentado no ha de limitar en modo alguno el ámbito de protección definido por las reivindicaciones adjuntas.

Los inventores parten de la base de que el hidrógeno, en particular su cantidad, su estado de unión y su estado de carga en el cristal de silicio, influye de forma decisiva en la transformación de los defectos activos de recombinación en el tercer estado regenerado (estado C), por ejemplo mediante acumulación del hidrógeno en el defecto. Dado que, por regla general, el cristal de silicio presenta muy poco o nada de hidrógeno inmediatamente después del crecimiento cristalino, en primer lugar se ha de introducir hidrógeno en el cristal para posibilitar una transformación al estado regenerado. En principio entran en consideración diferentes fuentes de hidrógeno, tal como se han descrito más arriba.

Por último, los inventores parten de la base de que la procedencia del hidrógeno tiene una importancia secundaria en el marco de este modelo, siempre que haya una concentración suficientemente grande en el cristal del sustrato de silicio en el intervalo de temperatura por debajo de aproximadamente 450°C y que exista una distribución suficientemente homogénea tanto lateralmente como en profundidad. Por encima de aproximadamente 400 o aproximadamente 450°C, el hidrógeno todavía se puede escapar en una medida significativa desde el cristal de silicio al entorno. El procedimiento de producción según la invención descrito tiene esto en cuenta de tal modo que la célula solar que se encuentra en el proceso de producción solo se mantiene el menor tiempo posible en un intervalo de temperatura > 400 o > 450°C, en el que el hidrógeno sale por difusión, pero posteriormente no se suministra más hidrógeno por ejemplo desde una capa.

Además, de acuerdo con investigaciones de los inventores parece verosímil que el estado de unión o el estado de carga del hidrógeno tengan una importancia decisiva. Según ello, el hidrógeno en el intervalo de temperatura por debajo de aproximadamente 500°C se podría encontrar principalmente en al menos dos estados de unión diferentes, por ejemplo en forma de moléculas de H₂ o unido a átomos de boro como pares B-H. Sin embargo, el hidrógeno en una forma unida de este modo no sería suficientemente móvil. La regeneración en esta descripción correspondería a un desprendimiento del hidrógeno, a la posterior difusión en forma atómica y a la acumulación en un defecto correlacionado con boro-oxígeno. En este modelo, la tasa de regeneración, es decir, la tasa de conversión de defectos en estado degradado (estado B) al estado regenerado (estado C) y, por lo tanto, también el tiempo necesario para que se pueda desarrollar el proceso de regeneración, dependen, entre otras cosas, de la facilidad con la que el hidrógeno se puede liberar de su estado unido, bien apoyado puramente de forma térmica, bien mediante un cambio del estado de carga. El procedimiento de producción según la invención descrito puede hacer eventualmente que el hidrógeno se encuentre en una cantidad suficiente en el estado unido solo ligeramente (al menos bajo inyección de portadores de carga) y, por lo tanto, que esté disponible para el proceso de regeneración. Además, la movilidad del hidrógeno atómico después de su disociación depende de su estado de carga. Por regla general, el hidrógeno en el silicio de tipo p presenta una carga positiva y su difusión está dificultada por interacción electrostática en la red cristalina. En cambio, si el hidrógeno se encuentra en el estado de carga neutro, su movilidad es significativamente mayor. Las investigaciones muestran que el estado de carga se puede manipular mediante inyección de portadores de carga (iluminación o mediante aplicación de una corriente). Por lo tanto, por medio de inyección de portadores de carga se puede influir en la movilidad del hidrógeno de tal modo que, gracias a la mayor movilidad, llega más rápido a los defectos en el cristal de silicio y además puede pasivar los mismos debido a su estado de carga.

Por último se ha de señalar que los conceptos "comprenden", "presentan", etc. no han de excluir la presencia de otros elementos adicionales. El concepto "un" tampoco excluye la presencia de una pluralidad de elementos u objetos. Por otro lado, además de las etapas de procedimiento mencionadas en las reivindicaciones, también pueden ser necesarias o ventajosas otras etapas de procedimiento, por ejemplo para terminar por completo una célula solar. Los símbolos de referencia en las reivindicaciones sirven únicamente para una mejor legibilidad y no han de limitar en modo alguno el ámbito de protección de las reivindicaciones.

Lista de símbolos de referencia

	A	Estado inactivo recocido
	B	Estado activo degradado
	C	Estado inactivo regenerado
5	(1)-(5)	Zonas de calentamiento
	10	Horno de paso continuo
	12	Rodillos accionados
	14	Cinta
	16	Lado de entrada
10	18	Zona de calentamiento previo
	20	Calefactor radiante
	22	Zona de calentamiento máximo
	24	Calefactor radiante
	26	Zona de enfriamiento
15	28	Dispositivo de enfriamiento
	30	Zona de mantenimiento de temperatura
	32	Calefactor radiante
	34	Zona de enfriamiento
	36	Fuente luminosa
20	38	Lado de salida
	40	Control
	42	Curva de temperatura en un horno de paso continuo convencional

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para producir un elemento fotovoltaico con eficiencia estabilizada, que presenta las siguientes etapas:
preparar un sustrato de silicio;
5 configurar una capa emisora en una superficie del sustrato de silicio;
configurar contactos eléctricos en el sustrato de silicio;
caracterizado por que el procedimiento presenta además una etapa de tratamiento de estabilización, que presenta:
10 incorporar hidrógeno en el sustrato de silicio, incorporándose el hidrógeno a temperaturas superiores a 650°C y llevándose a cabo un enfriamiento subsiguiente hasta 450°C con una rampa con una tasa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 10 K/s; y a continuación
generar portadores de carga minoritarios excedentes en el sustrato de silicio mientras el sustrato de silicio se encuentra a una temperatura superior a 230°C.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa de tratamiento de estabilización comprende además una etapa de mantenimiento del sustrato de silicio dentro de un intervalo de temperatura entre 230°C y 450°C durante un tiempo de al menos 10 s, preferiblemente al menos 30 s, después de la incorporación del hidrógeno en el sustrato de silicio.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que los portadores de carga minoritarios excedentes se generan en una etapa de procedimiento subsiguiente después del mantenimiento del sustrato de silicio dentro del intervalo de temperatura entre 230°C y 450°C.
4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que los portadores de carga minoritarios excedentes se generan en una etapa de procedimiento común junto con el mantenimiento del sustrato de silicio dentro del intervalo de temperatura entre 230°C y 450°C.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el enfriamiento subsiguiente hasta 450°C se lleva a cabo con una rampa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 20 K/s, más preferiblemente de al menos 30 K/s, aún más preferiblemente de al menos 60 K/s.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que los portadores de carga minoritarios excedentes se generan mediante iluminación con una intensidad de iluminación superior a 0,3 kW/m², preferiblemente superior a 1 kW/m², más preferiblemente superior a 3 kW/m², con luz con longitudes de onda inferiores a 1180 nm.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que los portadores de carga minoritarios excedentes se generan a una temperatura del sustrato de silicio entre 230°C y 450°C, preferiblemente entre 230°C y 400°C, más preferiblemente entre 230°C y 350°C y aún más preferiblemente entre 230°C y 300°C.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, que presenta además un depósito de una capa con contenido de hidrógeno sobre al menos una superficie del sustrato de silicio, que actúa como fuente de hidrógeno en la incorporación de hidrógeno en el sustrato de silicio.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que la capa con contenido de hidrógeno consiste en una capa de nitruro de silicio hidrogenado.
10. Procedimiento según la reivindicación 8 o 9, en el que la capa con contenido de hidrógeno está cubierta con al menos una capa que es menos permeable al hidrógeno que la capa con contenido de hidrógeno.
11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el sustrato de silicio se reviste con una capa con contenido de hidrógeno y el sustrato de silicio se transporta a continuación a través de zonas de temperatura adecuadamente regulada en un horno de paso continuo.
12. Dispositivo para tratar un sustrato de silicio en el marco de una producción de un elemento fotovoltaico, estando configurado el dispositivo como un horno (10) de paso continuo para realizar la etapa de tratamiento de estabilización de un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11,
en el que el dispositivo está configurado con una pluralidad de zonas (1, 2, 3, 4, 5; 18, 22, 26, 30, 34) que se pueden regular con temperaturas diferentes y presenta un dispositivo (36) de iluminación, pudiendo regularse la temperatura de las zonas de tal modo y estando configurado el dispositivo, incluido el dispositivo de iluminación, de tal modo que un sustrato de silicio que atraviesa el horno de paso continuo en primer lugar se

calienta a una temperatura superior a 650°C en una zona (22) de calentamiento máximo, después se enfría a una temperatura inferior a 450°C en una zona (26) de enfriamiento con una tasa de enfriamiento por encima de 550°C de al menos 10 K/s, y después se mantiene a una temperatura entre 230°C y 450°C en una zona (30) de mantenimiento de temperatura y, al mismo tiempo o a continuación, el sustrato de silicio se ilumina con una intensidad de iluminación superior a 0,3 kW/m² a una temperatura superior a 230°C.

- 5
13. Dispositivo según la reivindicación 12, en el que la zona (30) de mantenimiento de temperatura está configurada de tal modo que el sustrato de silicio se mantiene a una temperatura entre 230°C y 450°C durante al menos 10 s.
- 10 14. Dispositivo según una de las reivindicaciones 12 y 13, que presenta además un dispositivo (28) de enfriamiento para el enfriamiento activo del sustrato de silicio dentro de la zona (26) de enfriamiento.
15. Dispositivo según la reivindicación 14, en el que el dispositivo de enfriamiento presenta un ventilador para insuflar gas refrigerante en la zona (26) de enfriamiento.

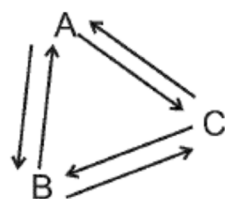


Fig. 1

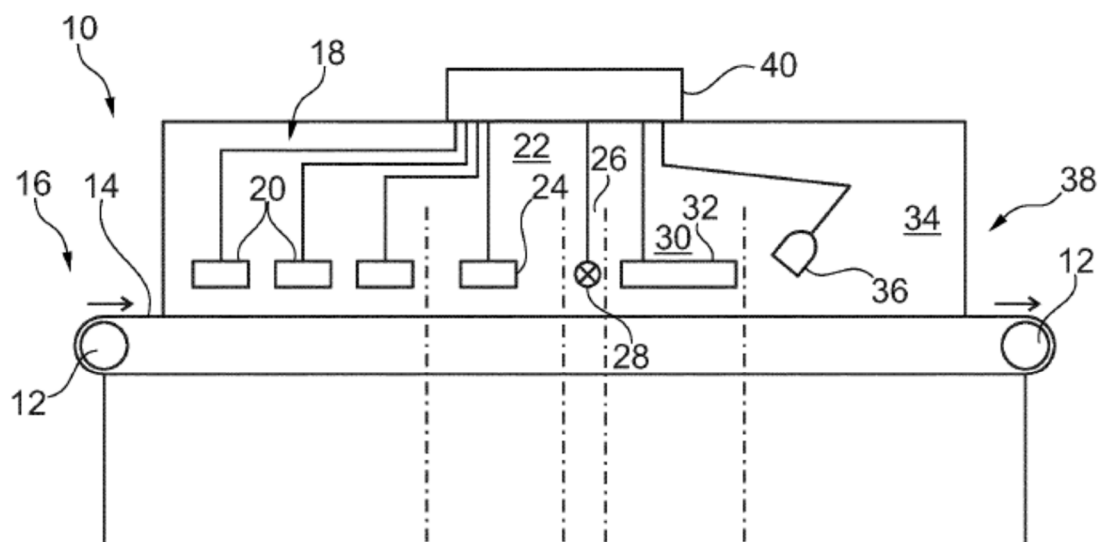


Fig. 2

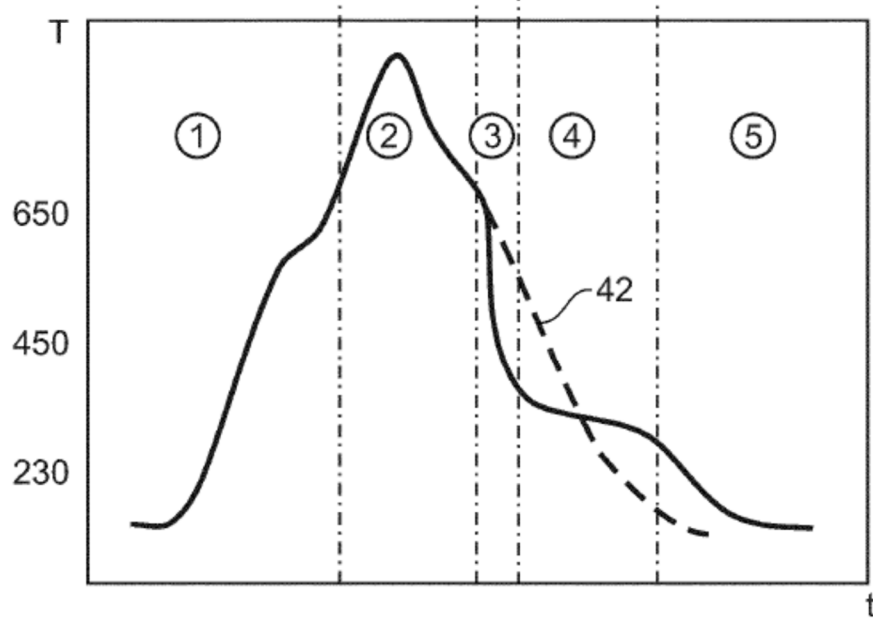


Fig. 3