

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 976 484**

51 Int. Cl.:

H01L 31/18 (2006.01)
H01L 21/30 (2006.01)
H01L 21/266 (2006.01)
H01L 31/0216 (2014.01)
H01L 31/0224 (2006.01)
H01L 31/0368 (2006.01)
H01L 31/072 (2012.01)
H01L 31/0745 (2012.01)
H01L 31/0747 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.09.2014** **E 21191337 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.01.2024** **EP 3930013**

54 Título: **Procedimiento para producir una célula solar fotovoltaica con al menos una heterounión**

30 Prioridad:

27.09.2013 DE 102013219561

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
02.08.2024

73 Titular/es:

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E.V. (100.0%)
Hansastr. 27c
80686 München, DE**

72 Inventor/es:

FELDMANN, FRANK

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 976 484 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 para producir una célula solar fotovoltaica con al menos una heterounión

Una célula solar fotovoltaica es un componente semiconductor plano en el que se generan pares de portadores de carga por absorción de radiación electromagnética incidente y, a continuación, se separan en una unión pn de modo que se crea un potencial entre al menos dos puntos de contacto eléctrico de la célula solar y la energía eléctrica puede ser aprovechada.

La unión pn se puede implementar mediante la formación de una región de emisor correspondiente en un sustrato de semiconductor con un dopaje de base mediante difusión de un dopante de un dopaje de emisor opuesto al dopaje de base, de modo que se crea una unión pn entre la región del emisor y la región con dopaje de base del sustrato de semiconductor.

También es conocido formar el emisor aplicando una o más capas sobre un sustrato de base, en particular aplicando una capa de emisor de silicio amorfo sobre un sustrato de base que compuesto de silicio monocristalino. También en este caso, la capa de emisor presenta un tipo de dopaje que es opuesto al de la base, de modo que se forma una unión pn entre el emisor y la base. Dado que la capa de silicio amorfo del emisor presenta una banda prohibida diferente a la del silicio cristalino de la base, se forma una denominada heterounión pn, de modo que está presente un denominado heteroemisor.

Si el sustrato base y la capa de silicio amorfo presentan el mismo tipo de dopaje, pero diferentes concentraciones de dopaje, también se crea una heterounión, en este caso la denominada "high-low-junction". Tal heterounión se usa para formar heterocontactos:

También se conocen diferentes tipos de contacto físico en la puesta en contacto de las regiones semiconductoras: Normalmente, se aplica una estructura metálica de puesta en contacto directa o indirectamente sobre la región del semiconductor que se va a poner en contacto. En particular, se conoce en este sentido la formación de un contacto óhmico y un contacto Schottky. También se conocen los contactos MOS/MIS como una forma especial de heterocontacto. Una realización especial de contactos MOS/MIS es la siguiente estructura, sustrato/óxido de túnel/capa de poli-Si dopada. Tales tipos de contacto son conocidos para semiconductores y se describen, por ejemplo, en *Peter Würfel, Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts. 2005, Weinheim: Wiley-VCH.* (Heterocontacto: Capítulo 6.6, pág. 127 y sigs.; Contacto Schottky: Capítulo 6.7.1, pág. 131 y sig.; Contacto MIS: Capítulo 6.7.2, pág. 132) y en *Sze, S.M., Semiconductor devices: Physics and Technology. 1985, Nueva York: John Wiley & sons.* (Contacto MOS: Capítulo 5.4, pág. 186; Contacto metal-semiconductor: Capítulo 5.1, pág. 160 y sigs.).

Se denominan heterouniones clásicamente a las uniones entre materiales con bandas prohibidas diferentes. Sin embargo, también se pueden formar heterocontactos disponiendo una capa de túnel entre el sustrato de semiconductor y la capa de heterounión, por ejemplo, como sustrato/óxido de túnel/capa con contenido en silicio o contactos MIS, tal como se describió anteriormente. El término "heterounión" se usa en esta solicitud en este sentido amplio. Por tanto, la propiedad "hetero" de la heterounión puede basarse en una banda prohibida diferente entre el sustrato de semiconductor y la capa de heterounión y/o entre la capa de túnel y la capa de heterounión.

Como ya se mencionó al principio, el término "heterounión" en esta solicitud abarca tanto uniones con capas de diferentes tipos de dopaje, en particular para la formación de heteroemisores, como uniones con capas de los mismos tipos de dopaje, en particular para la formación de heterocontactos.

De manera análoga a la definición introducida con respecto al emisor, aquellos contactos que no son heterocontactos se denominan homocontactos en el presente documento.

Las células solares fotovoltaicas que presentan un heteroemisor y/o un heterocontacto, es decir, al menos una heterounión, se denominan heterocélulas solares. Tales heterocélulas solares se conocen, por ejemplo, por la patente alemana DE 10 2008 030 693 A1 y la patente estadounidense US 2012/0055547 A1.

De la patente estadounidense US 2013/203210 se desprende un procedimiento para producir una célula solar, que comprende generar una heterounión en una cara de un sustrato de semiconductor, heterounión que presenta una capa de heterounión dopada y una capa de túnel dieléctrico dispuesta directamente entre la capa de heterounión y el sustrato de semiconductor. En una etapa de procedimiento adicional, la heterounión se calienta a menos de 200 °C en una atmósfera de hidrógeno.

Por el documento US 2013/122640 A1 se conoce un procedimiento de producción para una célula solar semiconductor sensibilizada con puntos cuánticos. El procedimiento de producción presenta las siguientes etapas: una etapa de formación de puntos cuánticos, en la que se forma una capa semiconductor que contiene un elemento del grupo 4 e InP sobre un sustrato y, a continuación, se realiza un tratamiento térmico del sustrato, incluida la capa semiconductor formada sobre el mismo, para eliminar el indio (In) del mismo, formando así un punto cuántico semiconductor de tipo n que es un punto cuántico del grupo 4 dopado con fósforo (P).

Por el documento Hong Seung *et al.* "Doping- and size-dependent photovoltaic properties of p-type Si-quantum-dot

heterojunction solar cells: correlation with photoluminescence", doi: 10.1016/j.solmat.2007.11.002, se conoce un procedimiento para producir superredes de SiOx/SiO2 dopadas con boro mediante pulverización iónica sobre obleas de Si(100) de tipo n. Mediante un posterior recocido se forman células solares de heterounión de puntos cuánticos (QD) de Si de tipo p y obleas de Si de tipo n.

5 Por el documento DengyuanSong *et al.*, "Structural, electrical and photovoltaic characterization of Si nanocrystals embedded SiC matrix and Si nanocrystals/c-Si heterojunction devices", doi: 10.1016/j.solmat.2007.11.002, se sabe cómo producir películas delgadas de nanocristales de Si (NC de Si) incrustados en una matriz de carburo de silicio (SiC) (NC de Si:SiC) mediante la deposición alterna de carburo de silicio rico en Si (Si1-xCx) y multicapas de SiC casi estequiométricas (Si1-xCx/SiC) por copulverización magnetróica y posterior recocido.

10 La presente invención se basa en el objetivo de mejorar los procedimientos anteriormente conocidos para producir heterocélulas solares.

Este objetivo se consigue mediante un procedimiento según la reivindicación 1. Configuraciones preferidas del procedimiento según la invención se encuentran en las reivindicaciones dependientes, que se incorporan por la presente explícitamente a la descripción como referencia.

15 El procedimiento según la invención para producir una célula solar fotovoltaica con al menos una heterounión, que presenta una capa de túnel, comprende las siguientes etapas de procedimiento:

En una etapa de procedimiento A, se proporciona un sustrato de semiconductor con una base dopada.

20 En una etapa de procedimiento B, se genera una heterounión en al menos una cara del sustrato de semiconductor. La heterounión se forma presentando una capa de heterounión dopada y una capa de túnel dieléctrico dispuesta directamente entre la capa de heterounión y el sustrato de semiconductor. La capa de túnel está formada preferiblemente no dopada (intrínsecamente).

En una etapa de procedimiento C, la capa de heterounión se calienta a al menos 600 °C para mejorar la calidad eléctrica de la heterounión.

25 Se sabe que, en el caso de heterouniones con una capa de túnel dieléctrico, una activación por calentamiento puede mejorar la calidad de la heterounión.

30 Debido al calentamiento se reduce la recombinación del portador de carga, de modo que normalmente se logra como resultado, con una heterounión tratada térmicamente, una tensión de terminal abierto más alta de la célula solar. En la etapa de procedimiento C, tiene lugar, por tanto, un calentamiento al menos de tal manera que una velocidad de recombinación superficial efectiva asociada a la heterounión se reduce al menos para los portadores de carga minoritarios en la cara del sustrato de semiconductor orientada hacia la heterounión.

35 Es esencial que, en una etapa de procedimiento D después de la etapa de procedimiento C, se difunda hidrógeno a la capa de heterounión y/o a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor, calentándose la célula solar a al menos 350 °C en dicha etapa de procedimiento D. Sobre la capa de heterounión se dispone indirectamente una capa metálica de puesta en contacto, que se une de manera eléctricamente conductora a la capa de heterounión para formar un contacto.

La capa de heterounión está configurada con un espesor en el intervalo de 10 nm a 1000 nm.

40 La invención se basa en el sorprendente hallazgo de que, añadiendo la etapas de procedimiento D con difusión de hidrógeno al menos a la capa de heterounión y/o a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor, se obtiene una mejora considerable en el procedimiento anteriormente conocido para producir una célula solar fotovoltaica con al menos una heterounión: Mediante difusión de hidrógeno tal como se describió anteriormente, por un lado, se puede lograr un aumento en la tensión del terminal abierto en comparación con los procedimientos anteriormente conocidos. Además, en la etapa de procedimiento C es posible una variedad considerablemente más amplia de parámetros con respecto al calentamiento de la capa de heterounión sin que se produzcan pérdidas significativas en cuanto a la tensión del terminal abierto. Una activación posiblemente solo parcial o desfavorable de la capa de heterounión en la etapa de procedimiento C se compensa de este modo al menos en cuanto a la tensión del terminal abierto mediante la etapa de procedimiento D del procedimiento según la invención y, además, es posible incluso un aumento global de la tensión del terminal abierto en comparación con los procedimientos anteriormente conocidos.

50 El procedimiento según la invención permite, por tanto, ventanas de proceso más amplias con respecto a parámetros tales como temperatura, constancia de temperatura y duración de la aplicación de calor, por ejemplo, en la etapa de procedimiento C, pero también con respecto a los parámetros de los materiales en cuestión, por ejemplo, la calidad de la capa de túnel y/o de la capa de heterounión. Por medio del procedimiento según la invención, hay, por tanto, más libertad o tolerancias en cuanto a la secuencia del proceso y/o se mejora la célula solar en cuanto a su tensión del terminal abierto.

Una mejora adicional de la tensión del terminal abierto y/o la ampliación de la ventana de proceso anteriormente mencionada se logra difundiendo además, en una forma de realización preferida, en la etapa de procedimiento D después de la etapa de procedimiento C, hidrógeno tanto a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor como a la capa de heterounión.

- 5 El procedimiento según la invención es particularmente adecuado para usar una capa de carburo de silicio con contenido en carbono (capa de SiC). En una forma de realización ventajosa, la capa de heterounión se forma, por tanto, en la etapa de procedimiento B, como capa de SiC, en particular una capa de SiC dopada.

- 10 El uso de una capa de SiC como capa de heterounión se conoce *per se* y se describe en la patente estadounidense US 2012/0055547 A1. Una capa de este tipo tiene la ventaja frente a otras capas de heterounión conocidas, como las capas de heterounión de silicio hidrogenado amorfo (a-Si:H), por ejemplo, de que hay una mayor estabilidad de temperatura, de modo que hay una mayor libertad con respecto a las etapas de proceso después de la aplicación de la capa de heterounión, en particular en relación con las temperaturas empleadas.

- 15 Complejos experimentos han demostrado que, en particular, tales capas de SiC para la activación, es decir, para lograr una calidad eléctrica suficientemente alta para una tensión del terminal abierto alta, requieren, en la etapa de procedimiento C, un calentamiento a una temperatura alta y, además, los efectos positivos solo aparecen en una estrecha ventana de proceso, en particular en una estrecha ventana de temperatura.

- 20 El procedimiento según la invención hace posible utilizar una capa de SiC como capa de heterounión sin tener que atenerse, en la etapa de procedimiento C, a la estrecha ventana de proceso de los procedimientos anteriormente conocidos. Otras capas de heterounión también entran dentro del alcance de la invención, en particular la formación de la capa de heterounión como capa de silicio amorfo (a-Si), capa de óxido de silicio amorfo (a-SiO_x) o capa de nitrato de silicio amorfo (a-SiN_x). La capa presenta en este sentido preferiblemente un porcentaje de silicio de al menos el 70 %, en particular al menos el 80 %. La formación de la capa de heterounión como capa de silicio policristalino o una capa de carburo de silicio amorfo/microcristalino/policristalino (a-SiC/μc-SiC/pc-SiC) también entra dentro del alcance de la invención.

- 25 También entra dentro del alcance de la invención configurar la capa de heterounión con dopaje n o con dopaje p.

- 30 El mayor ancho de banda de las temperaturas que se puede utilizar razonablemente en la etapa de procedimiento C al calentar la capa de heterounión también permite una selección más amplia por lo que respecta a la configuración de la capa de túnel dieléctrico. En particular, el uso de una capa de túnel a base de óxido de silicio, tal como, por ejemplo, una capa de túnel de SiO₂ era crítica en los procedimientos anteriormente conocidos, ya que tal capa de túnel resulta dañada a temperaturas superiores a 900 °C, por lo que se reduce la eficiencia de la célula solar. En los procedimientos anteriormente conocidos, sin embargo, era necesario activar la heterocapa formada como capa de SiC a temperaturas en el intervalo de 900 °C, de modo que existía en este caso un riesgo considerable en combinación, en particular, con el uso de capas de túnel basadas en óxido de silicio. Sin embargo, en el procedimiento según la invención, también son posibles temperaturas más bajas en la etapa de procedimiento C, de modo que es posible de nuevo, con un riesgo considerablemente menor, el uso de otras capas de túnel, tal como, por ejemplo, una capa de túnel a base de óxido de silicio o una de las capas siguientes: capa de HfO₂, capa de Al₂O₃, capa de AlN, capa de AlSiO_x, capa de HfSiO_x.

- 40 En una forma de realización preferida, por lo tanto, en la etapa de procedimiento C, tiene lugar un calentamiento a una temperatura inferior a 900 °C, preferiblemente inferior a 880 °C, de manera especialmente preferida inferior a 850 °C, a fin de evitar daños en la capa de túnel.

Las investigaciones han demostrado que, en la etapa de procedimiento C, al menos la capa de heterounión, preferiblemente toda la célula solar, se calienta a al menos 600 °C, preferiblemente a al menos 700 °C. Esto conduce a un aumento ventajoso de la tensión del terminal abierto, de manera especialmente preferida en combinación con la formación de la capa de heterounión como capa de SiC.

- 45 El calentamiento puede tener lugar mediante RTP (*rapid thermal processing*, procesamiento térmico rápido). En este caso, el calentamiento se lleva a cabo preferiblemente durante un período de tiempo de al menos 3 s, preferiblemente 10 s, preferiblemente en el intervalo entre 3 s y 1 minuto. El calentamiento también puede tener lugar en un horno, en particular un horno tubular. El calentamiento tiene lugar en este caso, preferiblemente durante un período de tiempo de al menos 10 minutos, preferiblemente 60 minutos, de manera especialmente preferida en el intervalo de 10 minutos a 120 minutos.

- 50 En particular cuando se usa una capa de SiC como capa de heterounión, en la etapa de procedimiento C del procedimiento según la invención, hay una ventana de proceso con respecto a las temperaturas al menos en el intervalo de 600 °C a 900 °C, preferiblemente en el intervalo de 700 °C a 880 °C, en la que se consigue un aumento considerable de la tensión del terminal abierto. Esto es, en particular, una mejora con respecto a los procedimientos anteriormente conocidos que utilizan una capa de heterounión de SiC, que requieren necesariamente una temperatura del orden de 900 °C.

En la etapa de procedimiento D, tal como se describió anteriormente, se difunde hidrógeno al menos a la capa de

heterounión y/o a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor. Esto se hace calentando la célula solar a al menos 350 °C. Las investigaciones han demostrado que a partir de esta temperatura se produce una difusión de hidrógeno suficientemente alta. El calentamiento se lleva a cabo preferiblemente al menos durante un período de tiempo de 1 minuto, preferiblemente 10 minutos, preferiblemente 30 minutos.

- 5 En la etapa de procedimiento D tiene lugar preferiblemente un calentamiento a una temperatura inferior a 800 °C, en particular inferior a 600 °C, para evitar el deterioro de la calidad eléctrica de las capas de la célula solar. La activación o activación parcial ya puede tener lugar en la etapa de procedimiento C, de modo que, preferiblemente en la etapa de procedimiento D se selecciona una temperatura por debajo de la temperatura de activación, preferiblemente por debajo de 600 °C.

- 10 En una forma de realización ventajosa del procedimiento según la invención, la capa de heterounión está formada como capa de silicio amorfo, de manera especialmente preferida como capa de carburo de silicio amorfo (a-SiC). El carácter amorfo de una capa de heterounión, en particular una capa de SiC dopada, es ventajoso para la eficacia del heterocontacto. Preferiblemente, por lo tanto, en las etapas de procedimiento C y D, la estructura amorfa de la capa de heterounión se conserva al menos parcialmente, preferiblemente por completo. En el caso de capas típicas de a-SiC, la estructura amorfa se conserva al menos parcialmente porque la capa de heterounión no se calienta a más de 850 °C, preferiblemente no se calienta a más de 700 °C. Las investigaciones han demostrado que el calentamiento a una temperatura en el intervalo de 780 °C a 820 °C, en particular aproximadamente 800 °C, es ventajoso con respecto al efecto de pasivación eléctrica.

- 20 Por tanto, con el procedimiento según la invención es posible por primera vez, en particular cuando la capa de heterounión se forma como capa de SiC, conseguir una alta calidad eléctrica de la heterounión y obtener, aun así, una estructura amorfa de la capa de heterounión.

- 25 En esta forma de realización preferida, es ventajoso configurar la capa de heterounión como capa de heterounión dopada, ya que, debido a las temperaturas en las etapas de procedimiento C y D inferiores a 800 °C, preferiblemente inferiores a 700 °C, hay poca o ninguna difusión de dopantes desde la capa de heterounión al sustrato de semiconductor. De este modo se forma ventajosamente una denominada heterounión abrupta (sin entrada de difusión en el sustrato). Se han configurado células solares de alta eficiencia con heterouniones abruptas, por lo que representan una configuración ventajosa para niveles de eficiencia muy altos.

La provisión del hidrógeno en la etapa de procedimiento D para su difusión a al menos la capa de heterounión y/o a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor se puede realizar de diferentes maneras:

- 30 En una forma de realización preferida, en la etapa de procedimiento D, se lleva a cabo un recocido en una atmósfera de hidrógeno atómico, preferiblemente a una temperatura de aproximadamente 400 °C.

- 35 En particular, el hidrógeno se introduce preferiblemente en la etapa de procedimiento D mediante un procedimiento de pasivación con hidrógeno por plasma remoto (RPHP, *Remote Plasma Hydrogen Passivation*). El procedimiento RPHP es conocido *per se* y se describe, por ejemplo, en S. Lindekugel, *et al.* "Plasma hydrogen passivation for crystalline Silicon thin-films", en Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, España, 2008, págs. 2232-5. Este procedimiento también se conoce con la abreviatura MIRP (*Microwave Induced Remote Plasma*, plasma remoto inducido por microondas).

- 40 El uso de este procedimiento ofrece la ventaja de que se garantiza una introducción eficiente de hidrógeno en la etapa de procedimiento D y, al mismo tiempo, no es necesario un calentamiento a una temperatura superior a 600 °C, de modo que, en particular, se puede obtener una estructura amorfa de la capa de heterounión y no tiene lugar ninguna o solo tiene lugar una pequeña difusión de dopantes desde la capa de heterounión al sustrato de semiconductor.

Alternativa o adicionalmente, en la etapa de procedimiento D se puede introducir hidrógeno, aplicando, en una forma de realización preferida, indirecta o, de manera preferente, directamente una capa con contenido en hidrógeno sobre la capa de heterounión y, a continuación, introduciendo el hidrógeno mediante calentamiento a al menos 350 °C.

- 45 En este caso, la capa con contenido en hidrógeno se aplica, por tanto, indirecta o, de manera preferente, directamente sobre la cara de la capa de heterounión orientada en sentido opuesto al sustrato de semiconductor y el hidrógeno se difunde desde la capa con contenido en hidrógeno mediante calentamiento. También en este caso, la temperatura en la etapa de procedimiento D puede ser preferiblemente inferior a 600 °C, de manera especialmente preferible inferior a 500 °C, a fin de lograr las ventajas mencionadas anteriormente con respecto a obtener una estructura amorfa de la capa de heterounión y evitar la difusión de dopantes desde la capa de heterounión al sustrato de semiconductor.

- 50 En una forma de realización preferida, la capa con contenido en hidrógeno anteriormente mencionada está formada como capa de silicio microcristalino, en particular como capa de carburo de silicio microcristalino hidrogenado ($\mu\text{c-SiC:H}$). Esto tiene la ventaja de que esta capa es más conductora y ópticamente más transparente que, por ejemplo, una capa de a-Si:H. En particular, una capa de $\mu\text{c-SiC}$ puede servir ventajosamente como puesta en contacto transparente y sustituir así a los electrodos transparentes conductores conocidos, por ejemplo, las capas de TCO.

La capa con contenido en hidrógeno también puede estar configurada como capa de nitruro de silicio, en particular

como capa de nitruro de silicio hidrogenado. En este caso, en la etapa de procedimiento D, tiene lugar un calentamiento a una temperatura en el intervalo de 700 °C a 900 °C, pero solamente durante un período de tiempo unos pocos segundos, en particular entre 1 segundo y 30 segundos, preferiblemente entre 1 segundo y 15 segundos. Como resultado, el hidrógeno se difunde de una manera particularmente eficaz en una etapa de procedimiento que requiere mucho tiempo. Debido a la breve exposición al calor, se evita o al menos se reduce una difusión de dopante.

La etapa de procedimiento C se lleva a cabo preferiblemente en una atmósfera de nitrógeno. Esto tiene la ventaja de que la capa de SiC no se oxida/modifica. La oxidación de SiC dañaría tanto la conductividad como la capacidad de puesta en contacto eléctrico.

Una capa metálica de puesta en contacto se dispone indirectamente sobre la capa de heterounión, capa metálica de puesta en contacto que se une de manera eléctricamente conductora a la capa de heterounión para formar una puesta en contacto.

El procedimiento según la invención también ofrece la ventaja de que ahora es posible por primera vez activar la pasivación de heterocontactos no dopados: Esto se debe al hecho de que en la etapa de procedimiento C, la pasivación se ve afectada por la difusión de dopantes: Los dopantes se acumulan en uniones abiertas y/o límites intergranulares y, por lo tanto, reducen el número de defectos. Además, durante la etapa de procedimiento C se genera un perfil de dopaje en el sustrato de semiconductor, que reduce la densidad de portadores de carga minoritarios en la interfaz sustrato de semiconductor/capa túnel, pero por otro lado provoca pérdidas de recombinación en el sustrato de semiconductor (recombinación Auger). La formación de un perfil de dopaje en el sustrato de semiconductor es particularmente ventajosa cuando no se puede garantizar la calidad de la capa de túnel con respecto a la pasivación del sustrato de semiconductor.

En una forma de realización preferida del procedimiento según la invención, la capa de heterounión se forma, por tanto, en la etapa de procedimiento B, al menos en algunas regiones, como capa de heterounión no dopada.

En particular, es ventajoso formar en la capa de heterounión una pluralidad de regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente, generándose en cada caso las regiones con dopaje p y n a una cierta distancia entre sí, de modo que entre regiones con dopaje p y n adyacentes está dispuesta en cada caso una región no dopada de la capa de heterounión.

Por tanto, el procedimiento según la invención se utiliza ventajosamente para la formación de células fotovoltaicas de contacto en la cara trasera con la configuración descrita anteriormente:

Tales células solares fotovoltaicas comprenden un sustrato de semiconductor, normalmente diseñado como sustrato de silicio, con una capa de túnel dispuesta directa o indirectamente sobre la cara trasera del sustrato de semiconductor y una capa de heterounión dispuesta directamente sobre la capa de túnel, que preferiblemente está formada como capa de silicio, en particular como capa de SiC, tal y como se describió anteriormente. La capa de heterounión presenta una pluralidad de regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente.

Las células fotovoltaicas de contacto en la cara trasera son conocidas *per se* y presentan ambas polaridades de puesta en contacto en la cara trasera de la célula solar orientada en sentido opuesto a la incidencia de la luz cuando están en uso, de modo que es posible una conexión más sencilla en el módulo y, en particular, en la cara delantera no es necesario disponer estructuras metálicas de puesta en contacto, de modo que se pueden evitar pérdidas de sombreado debidas a tales estructuras metálicas de puesta en contacto, ya que las estructuras metálicas de puesta en contacto de ambas polaridades pueden disponerse en la cara trasera.

La presente configuración ventajosa se refiere, en este sentido, a una configuración especial de una célula de contacto en la cara trasera de este tipo en la que una capa de túnel se aplica sobre el sustrato de silicio y una capa de heterounión con las regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente, es decir, alternas, se aplica directamente sobre la capa de túnel.

Este tipo de células solares de silicio fotovoltaicas de contacto en la cara trasera tienen un potencial de eficiencia muy alto, ya que, como se describió anteriormente, no tienen sombreado en la cara delantera orientada hacia la incidencia de la luz debido a estructuras metálicas de puesta en contacto y la metalización de la cara trasera se puede optimizar independientemente de restricciones ópticas. En las células solares de silicio de contacto en la cara trasera anteriormente conocidas con emisores difundidos en un sustrato de semiconductor, la recombinación de portadores de carga es dominante, sin embargo, en esta región altamente dopada, en particular en las regiones que están provistas de contactos metálicos, de modo que un emisor dopado o un denominado BSF, es decir, un alto dopaje del tipo dopaje de base representa una limitación de la tensión del terminal abierto de la célula solar.

Por lo tanto, se sabe cómo aumentar la eficiencia disponiendo el emisor y el BSF en la cara trasera de la célula solar, pero separándolos del sustrato mediante una fina capa de túnel dieléctrico; esto da como resultado una heterounión. Esto reduce una densidad de corriente de saturación oscura y, por lo tanto, se pueden lograr tensiones de terminal abierto comparativamente más altas. Una célula solar de este tipo se describe, por ejemplo, en la patente estadounidense US 7.468.485 B1.

Para producir una célula solar de este tipo, se conoce por la patente anteriormente mencionada, y también por las patentes estadounidenses US 2009/0308438 A1 y US 2010/0139764 A1, aplicar una capa de silicio policristalino como capa de heterounión sobre la capa de túnel dieléctrico anteriormente mencionada, a continuación estructurar la capa de silicio policristalino y aplicar sucesivamente fuentes de dopante p y n. Además, se conocen procedimientos para producir tal estructura de célula solar por la patente internacional WO 2012/039831 A1.

La célula solar fotovoltaica formada por medio de una configuración ventajosa del procedimiento comprende, por tanto, preferiblemente un sustrato de semiconductor con una capa de túnel dispuesta directamente sobre una cara trasera del sustrato de semiconductor y una capa de heterounión dispuesta directamente sobre la capa de túnel, capa de heterounión que presenta una pluralidad de regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente.

Con respecto a esta estructura básica, la configuración de esta célula solar se corresponde, por tanto, con las estructuras de células solares descritas anteriormente, conocidas por el estado de la técnica. Entra dentro del alcance de la invención que la célula solar esté configurada presentando otros elementos habituales, tales como estructuras metálicas de puesta en contacto para la puesta en contacto eléctrico, por un lado, de las regiones con dopaje p y, por otro lado, de las regiones con dopaje n y/o que se formen capas y/o estructuraciones adicionales para aumentar la eficiencia, en particular para la pasivación eléctrica de superficies, es decir, reducir las velocidades de recombinación de la superficie y/o aumentar la incidencia de la luz o absorción de luz.

En esta forma de realización preferida, es esencial que en la capa de heterounión se disponga en cada caso una región no dopada entre las regiones con dopaje p y con dopaje n.

La forma de realización preferida del procedimiento según la invención para formar una célula solar de este tipo se basa en el hallazgo del solicitante de que se produce un factor de pérdida considerable, que puede conducir a una reducción de la eficiencia, en la interfaz entre las regiones con dopaje p y n: En esta interfaz, los procedimientos de producción conocidos por el estado de la técnica en particular conducen a una mayor recombinación en la región de carga espacial que se forma en estas interfaces.

Por primera vez, esta célula solar ofrece ahora una estructura de célula solar que, al mismo tiempo, permite una producción económica y evita, aun así, las pérdidas anteriormente mencionadas: Mediante el uso de una capa de heterounión continua, que presenta en cada caso una región no dopada intercalada entre una región con dopaje p y una región con dopaje n, la formación de la región de carga espacial mencionada anteriormente se evita de una manera sencilla y económica y, por lo tanto, se consigue la eficiencia de la célula solar sin un aumento significativo de los costes de procesamiento en comparación con procedimientos anteriormente conocidos o en comparación con procedimientos con una reducción de los costes de procesamiento.

La ventaja se basa, en particular, en el sorprendente hallazgo de que las regiones no dopadas intercaladas de la capa de heterounión pueden, por un lado, impedir eficazmente la formación de tal región de carga espacial, que conduce a mayores pérdidas por recombinación, y, por otro lado, en la capa de heterounión no se produce ninguna pérdida de eficiencia o solo una insignificante debido a la disposición parcial de las regiones no dopadas. La cobertura directa completa de la capa de túnel por una región con dopaje p o n es, según los hallazgos del solicitante con respecto a la eficiencia, menos relevante que el hecho de impedir o al menos reducir las pérdidas anteriormente mencionadas intercalando las regiones no dopadas en cada caso entre una región con dopaje p y una con dopaje n de la capa de heterounión.

La célula solar cumple ahora por primera vez con los requisitos de que una célula solar de silicio con puesta en contacto en la parte trasera permite una alta tensión del terminal abierto y, al mismo tiempo, se puede producir de forma económica en comparación con los procedimientos anteriormente conocidos. A pesar de la gran necesidad de una estructura de célula solar de este tipo para la producción industrial, no había sido posible cumplir estos requisitos con las estructuras anteriormente conocidas y los procedimientos de producción requeridos para ellas.

La forma de realización preferida anteriormente mencionada del procedimiento según la invención permite que la estructura de célula solar descrita anteriormente se forme con un alto grado de eficiencia, en particular porque la entrada de hidrógeno en la etapa de procedimiento D reduce aún más el deterioro de la eficiencia de la célula solar, en particular la tensión del terminal abierto, debido a las regiones no dopadas de la capa de heterounión.

Para formar una heterounión eficaz, la capa de túnel se dispone directamente sobre el sustrato de semiconductor.

Cada región no dopada con una anchura en el intervalo de 10 µm a 1000 µm, preferiblemente en el intervalo de 50 µm a 500 µm, se forma preferiblemente lateralmente, es decir en una dirección paralela a la cara posterior de la célula solar según la invención. Las regiones con dopaje p y n se forman preferiblemente con una anchura en el intervalo de 10 µm a 1000 µm, en particular en el intervalo de 50 µm a 500 µm.

Una capa metálica de puesta en contacto se dispone preferiblemente sobre la capa de heterounión, capa de puesta en contacto que está formada unida de manera eléctricamente conductora a las regiones con dopaje p y a las regiones con dopaje n e interrumpida en las regiones no dopadas.

La capa de puesta en contacto puede configurarse como un sistema multicapa y preferiblemente comprende una o más

capas de uno o más de los siguientes materiales: Ni, Ti, Cu, Al, Ag, o aleaciones de los mismos tales como AlSi, TiN.

Esta célula solar así configurada también tiene la ventaja de que no se forma ningún contacto en las regiones no dopadas de la capa de heterounión. La puesta en contacto eléctrico de las regiones con dopaje p, por una parte, y las regiones con dopaje n, por otra parte, puede tener lugar así de una manera sencilla y económica mediante la aplicación de una capa metálica interrumpida en cada caso en el área superficial de las regiones no dopadas. De esta manera, las regiones con dopaje p y n están completamente cubiertas por la capa metálica sin que –como ocurre con las estructuras de células solares conocidas por el estado de la técnica– se corra el riesgo de una derivación, en particular un cortocircuito, debido a una conexión defectuosa de un contacto metálico con una región dopada de manera opuesta de la capa de heterounión.

Por tanto, la forma de realización preferida del procedimiento también permite una simplificación de los procesos y, por lo tanto, un ahorro de costes con respecto a la puesta en contacto eléctrico de las regiones con dopaje p y n por medio de una capa metálica, mientras que al mismo tiempo se impide el riesgo de derivaciones que minimicen la eficiencia, o al menos se reduce.

A este respecto, entra dentro del marco de la invención que la capa metálica de puesta en contacto se disponga indirectamente sobre la capa de heterounión.

La intercalación de una o más capas entre la capa metálica de puesta en contacto y la capa de heterounión también entra dentro del alcance de la invención, por ejemplo a fin de mejorar la calidad óptica, en particular las propiedades de reflexión de la cara trasera de la célula solar. De manera preferente, la capa metálica de puesta en contacto se forma atravesando localmente las capas intercaladas anteriormente mencionadas con el fin de producir el contacto eléctrico con las regiones con dopaje n o regiones con dopaje p situadas debajo. Sin embargo, a diferencia de las estructuras de células solares conocidas anteriormente, no es necesario que una o, dado el caso, varias capas intercaladas, garanticen un alto nivel de seguridad con respecto al aislamiento eléctrico:

Con las estructuras de células solares anteriormente conocidas, siempre existe el riesgo de que una metalización que sobresalga más allá de los límites de la región de dopaje asociada, por ejemplo, mediante el denominado "spiking" a través de la capa intercalada, también se ponga en contacto con la región dopada de manera opuesta y, por lo tanto, conduzca a las derivaciones anteriormente mencionadas y, por lo tanto, a pérdidas de eficiencia.

En la estructura de célula solar descrita anteriormente, en cambio, las regiones no dopadas intercaladas proporcionan un "tampón" en el que, como se describió anteriormente, la capa metálica de puesta en contacto no forma ningún contacto eléctrico, de modo que incluso en regiones en las que la capa metálica de puesta en contacto sobresale más allá de la región dopada asociada, no se producen pérdidas de eficiencia, ya que en tal región sobresaliente la capa metálica de puesta en contacto solo cubre una región no dopada en la que no se forma ningún contacto eléctrico. En la forma de realización preferida con una o más capas intercaladas entre el sustrato de semiconductor y la capa metálica de puesta en contacto, puede tener lugar así una optimización con respecto a otras propiedades, en particular con respecto a una mejora en la calidad óptica, sin tener que tener en cuenta una configuración de esta capa para impedir un "spiking".

En una forma de realización preferida, por lo tanto, al menos una capa dieléctrica con un índice de refracción en el intervalo de 1 a 3 al menos en el intervalo de longitud de onda de 800 nm a 1200 nm está dispuesta entre la capa de heterounión y la capa de puesta en contacto, de modo que aumenta la calidad óptica de la cara trasera de la célula solar y, por lo tanto, la absorción de luz en la célula solar y, en última instancia, la eficiencia. En particular, resulta ventajoso para ello que la capa dieléctrica cubra toda la superficie del silicio y solo sea penetrada localmente por la capa metálica de puesta en contacto para la puesta en contacto de las regiones con dopaje n y con dopaje p.

La capa de heterounión se puede formar de una manera conocida *per se*. En particular, la configuración de la capa de heterounión como capa de heterounión policristalina, micromorfa o amorfa entra dentro del alcance de la invención. La capa de heterounión se puede configurar como capa de Si policristalino. Esto se debe a que, de este modo, se obtiene la ventaja de que esta presenta una conductividad eléctrica significativamente mayor.

Con el procedimiento según la invención se produce una célula solar de una manera sencilla y económica, que tiene las ventajas mencionadas anteriormente.

En particular, resulta ventajoso generar las regiones con dopaje n y p mediante implantación de iones, en particular implantación de iones dirigida. De esta manera, la estructura deseada de regiones con dopaje p y n y regiones no dopadas intercaladas se puede generar de una manera económica sin la compleja aplicación de capas con contenido en dopantes como fuentes de dopante, por medio de implantación de iones.

Una producción especialmente sencilla y económica es posible en este caso generando las regiones con dopaje p y/o n, preferiblemente las regiones con dopaje p como n, mediante una máscara de sombreado.

En una configuración alternativa del procedimiento según la invención, las regiones con dopaje p y/o n se generan mediante una máscara de laca. Para ello, la máscara de laca se aplica en cada caso en las regiones en las que no debe realizarse un dopaje. Por ejemplo, se puede aplicar primero una máscara de laca que solo deja fuera las regiones

con dopaje p y luego tiene lugar un dopaje correspondiente mediante implantación de iones, sirviendo la máscara de laca como barrera para los iones. A continuación, se retira correspondientemente la máscara de laca. Se aplica una máscara de laca adicional, que deja fuera las regiones con dopaje n que se van a producir.

5 En particular, se ahorran costes con la aplicación de las pastas mediante serigrafía o en un procedimiento de chorro de tinta de una manera conocida *per se*.

Para el contacto independiente de las regiones con dopaje p y las regiones con dopaje n, por otro lado, la capa metálica de puesta en contacto está formada interrumpida en las regiones no dopadas, tal como se describió anteriormente.

10 Preferiblemente, después de la etapa de procedimiento D, se aplica una capa dieléctrica sobre la capa de heterounión en una etapa de procedimiento E', y se aplica una capa metálica de puesta en contacto sobre la capa dieléctrica en una etapa de procedimiento E". De esta manera, como se describió anteriormente, se puede aumentar en particular la calidad óptica de la cara trasera de la célula solar. Preferiblemente, por lo tanto, la capa dieléctrica se aplica cubriendo completamente la capa de heterounión y la capa de puesta en contacto se aplica de tal manera que solo atraviesa localmente la capa dieléctrica para formar un contacto eléctrico con la región con dopaje p o con dopaje n asociada en cada caso. La apertura local de la capa dieléctrica puede tener lugar mediante procedimientos conocidos como la ablación con láser o la aplicación local de pastas de grabado.

15 Para aumentar la calidad óptica, la capa dieléctrica anteriormente mencionada se forma preferiblemente con un índice de refracción en el intervalo de 1 a 3 al menos en el intervalo de longitud de onda de 800 nm a 1200 nm.

El espesor de la capa dieléctrica anteriormente mencionada se sitúa preferiblemente en el intervalo de 50 nm a 1000 nm, de manera especialmente preferida en el intervalo de 70 nm a 400 nm.

20 Entre las etapas de procedimiento E' y E", la capa dieléctrica preferiblemente se abre localmente en cada región con dopaje p y con dopaje n para permitir una puesta en contacto eléctrico con las regiones dopadas en cada caso asociadas con alta calidad al atravesar la capa metálica de puesta en contacto.

25 Para formar la capa metálica de puesta en contacto interrumpida en las regiones no dopadas resulta ventajoso, a fin de lograr un procedimiento de producción rentable y económico, que la capa de puesta en contacto se retira en cada región no dopada situada entre una región con dopaje p y con dopaje n. Esto, a su vez, se puede realizar mediante procedimientos conocidos como la ablación con láser o mediante la aplicación local de medios de grabado.

30 La capa de heterounión está formada preferiblemente como capa de SiC con contenido en carbono. Esto tiene la ventaja de que, mediante el uso de una capa de SiC con contenido en carbono, por un lado se puede modificar la banda prohibida y, por tanto, también las propiedades ópticas. También se sabe que el SiC es adecuado como barrera para la migración del cobre y que se suprime la oxidación de la capa al entrar en la etapa de alta temperatura.

La capa metálica de puesta en contacto contiene preferiblemente cobre, de manera especialmente preferente está formada como capa de cobre. De este modo se obtiene la ventaja de que la conductividad del cobre se sitúa en el intervalo de la de la plata, pero es significativamente más barato.

35 Entra dentro del alcance de la invención disponer varias, en particular dos, estructuras metálicas de puesta en contacto independientes en la cara trasera de la célula solar según la invención de modo que, como es habitual en los puntos de contacto traseros anteriormente conocidos, una estructura metálica de puesta en contacto pone en contacto eléctrico las regiones con dopaje p y la otra estructura metálica de puesta en contacto pone en contacto eléctrico las regiones con dopaje n y las dos estructuras metálicas de puesta en contacto pueden conectarse eléctricamente de manera correspondiente con un circuito externo o con células solares adyacentes en un circuito de módulo.

40 En particular, entra dentro del alcance de la invención que la estructura metálica de puesta en contacto para las regiones con dopaje p se aplique en una etapa de procedimiento independiente a la aplicación de la estructura metálica de puesta en contacto para las regiones con dopaje n y/o que para la estructura de puesta en contacto mencionada en primer lugar se use un metal diferente al de la estructura de puesta en contacto mencionada en segundo lugar. En particular, pueden usarse uno o más de los metales Cr, Ni, Al, Ag, Si, Ti para la puesta en contacto de las regiones con dopaje p. En particular, pueden usarse uno o más de los metales Cr, Ni, Al, Ag, Si, Ti para la puesta en contacto de las regiones con dopaje n.

50 Sin embargo, como se explicó anteriormente, es particularmente ventajoso disponer una capa metálica de puesta en contacto que esté conectada de manera eléctricamente conductora a las regiones con dopaje p y a las regiones con dopaje n y que esté configurada interrumpida en las regiones no dopadas. También en este caso se forma así una estructura metálica de puesta en contacto para las regiones con dopaje p, que está aislada eléctricamente de la estructura metálica de puesta en contacto de las regiones con dopaje n debido a la interrupción en las regiones no dopadas. Sin embargo, al producir estas dos estructuras metálicas de puesta en contacto a partir de una capa metálica de puesta en contacto, se proporciona un proceso de producción particularmente sencillo y económico. En esta forma de realización preferida, las regiones correspondientemente con dopaje p y n se ponen en contacto con la misma capa metálica. Uno de los metales Al, AlSi, Ni, Ag se usa preferiblemente para la puesta en contacto con ambos tipos de dopaje.

El sustrato de semiconductor está configurado preferiblemente como sustrato de silicio, en particular como una oblea de silicio, de manera especialmente preferida como una oblea de silicio monocristalino. La realización del sustrato de silicio como una oblea de silicio multicristalino también entra dentro del alcance de la invención.

El espesor del sustrato de semiconductor se sitúa preferiblemente en el intervalo de 10 μm a 300 μm .

- 5 El espesor de la capa de túnel se sitúa preferiblemente en el intervalo de 0,5 nm a 3 nm.

Las regiones con dopaje p o n están configuradas preferiblemente como regiones alargadas que discurren paralelas y que se extienden aproximadamente por todo el ancho de la oblea de silicio. De manera correspondiente, las regiones no dopadas intercaladas también están configuradas preferiblemente como regiones alargadas que se extienden paralelas a las regiones con dopaje p y n. La formación del denominado dopaje puntual también entra dentro del alcance de la invención.

- 10

La capa de túnel está formada preferiblemente como SiO_2 .

Las regiones con dopaje n se producen preferiblemente mediante implantación de iones usando fósforo y las regiones con dopaje p mediante implantación de iones usando boro.

- 15 El sustrato de semiconductor presenta preferiblemente un dopaje de base de tipo con dopaje de base en el intervalo de 10^{10} - 10^{16} cm^{-3} . Preferiblemente, la base presenta dopaje n y, por consiguiente, las regiones dopadas de manera opuesta, es decir, con dopaje p, de la capa de heterounión son regiones de emisor del tipo de dopaje. La selección inversa de los tipos de dopaje también entra dentro del alcance de la invención, es decir, la formación de la célula solar con el dopaje p como tipo de dopaje de base y el dopaje n como tipo de dopaje de emisor.

- 20 Las regiones de la capa de heterounión que presentan el tipo de dopaje de base están dopadas preferiblemente en el intervalo de 10^{18} cm^{-1} a 10^{21} cm^{-3} . Las regiones de la capa de heterounión que presentan el tipo de dopaje de emisor están dopadas preferiblemente en el intervalo de 10^{18} cm^{-3} a 10^{21} cm^{-3} .

A continuación se explican otras características y configuraciones preferidas con referencia a ejemplos de realización y a las figuras.

- 25 A este respecto, las figuras 1 a 5a muestran un ejemplo de realización de un procedimiento según la invención para la producción de una célula solar fotovoltaica, representando la figura 5b una alternativa, mostrada meramente a modo de ejemplo, para la formación de estructuras metálicas de puesta en contacto.

Las figuras 6 a 9 muestran otro ejemplo de realización de un procedimiento según la invención, en donde se forma una capa de heterounión dopada homogéneamente.

- 30 En las figuras se muestran en cada caso representaciones esquemáticas en sección, en donde están representados fragmentos parciales para una mejor visión global, es decir, la célula solar o su etapa preliminar continúa análogamente hacia la derecha y hacia la izquierda. En las figuras, las mismas referencias indican elementos iguales o equivalentes.

- 35 En el ejemplo de realización de un procedimiento según la invención representado en las figuras se aplica, según la figura 1, una capa de túnel 2 sobre un sustrato de semiconductor 1 configurado como sustrato de silicio. El sustrato de semiconductor 1 está configurado como una oblea de silicio monocristalino. La capa de túnel 2 presenta un espesor en el intervalo de 5 Angstroms a 30 Angstroms, preferiblemente de 10 Angstroms. Está configurado como capa de dióxido de silicio. La capa de túnel también puede estar configurada como un tipo diferente de óxido.

- 40 La capa de túnel se aplica mediante crecimiento químico húmedo. La capa de túnel también se puede depositar utilizando RTO (*Rapid Thermal Oxidation*, oxidación térmica rápida), ALD (*Atomic Layer Deposition*, deposición de capa atómica), PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*, deposición química en fase de vapor mejorada por plasma), LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition*, deposición química en fase de vapor a baja presión) o APCVD (*Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition*, deposición química en fase de vapor a presión atmosférica).

La figura 1 muestra, por tanto, el estado en el que la capa de túnel se ha aplicado directamente sobre la cara trasera del sustrato de semiconductor 1 (mostrado arriba en las figuras 1 a 5).

- 45 En una etapa de procedimiento adicional según la figura 2, se aplica una capa de heterounión 3 no dopada. La capa de heterounión 3 puede estar configurada como capa de heterounión micromorfa, amorfa o policristalina.

El espesor de la capa de heterounión se sitúa entre 10 nm y 1000 nm, preferiblemente alrededor de 30 nm. La capa de heterounión se aplica mediante PECVD. La aplicación de la capa de heterounión 3 mediante LPCVD o APCVD o pulverización catódica también entra dentro del alcance de la invención.

- 50 La figura 2 muestra así el estado en el que la capa de heterounión 3 no dopada se ha aplicado directamente sobre la capa de túnel 2.

Para aumentar la eficacia de dopaje de una etapa de implantación posterior, la capa de heterounión 3 policristalina se forma preferiblemente con granos grandes. Los granos de la capa de heterounión 3 policristalina presentan preferiblemente un diámetro medio superior a 1 μm , preferiblemente superior a 5 μm . La formación de una capa de heterounión policristalina con tales tamaños de grano es conocida *per se* y se describe, por ejemplo, en la patente estadounidense US 2010/0139764 A1, en particular el párrafo [0023].

En una etapa de procedimiento adicional según la figura 3, la capa de heterounión 3 policristalina previamente no dopada se dopa localmente con un dopaje de un tipo de dopaje de emisor. El tipo de dopaje de emisor es opuesto al tipo de dopaje de base. En el presente caso, el sustrato de semiconductor 1 presenta dopaje n. Por tanto, el dopaje de base es un dopaje n y, en consecuencia, el dopaje de emisor es un dopaje p. También entra dentro del alcance de la invención elegir tipos de dopaje inversos, es decir, una base con dopaje p y un emisor con dopaje n.

En la etapa de procedimiento según la figura 3 se forman, por tanto, regiones con dopaje p, mostrándose a modo de ejemplo una región 4 con dopaje p. Para ello, se usa una máscara de sombreado 5, que está dispuesta a una distancia de la capa de heterounión 3. Las flechas de la figura 3 muestran esquemáticamente el haz de iones que, debido a la máscara de sombreado, incide sobre la capa de heterounión 3 solo en aquellas regiones en las que va a generarse la región 4 con dopaje n mediante implantación de iones. También entra dentro del alcance de la invención aplicar una máscara de laca sobre la capa de heterounión 3 en lugar de la máscara de sombreado 5, de manera particularmente preferida mediante serigrafía o un procedimiento de chorro de tinta.

A continuación, en una etapa de procedimiento según la figura 4, se generan regiones con dopaje n mediante implantación de iones. Para una mejor ilustración, solo se muestran dos regiones 6 y 6' con dopaje n en la figura 4.

Las regiones con dopaje p se generan de forma análoga al procedimiento según la figura 3: La capa de heterounión 3 queda cubierta con respecto a la corriente iónica por medio de una máscara de sombreado 5', quedando descubiertas únicamente aquellas regiones en las que se van a generar regiones 6, 6' con dopaje p.

Por lo tanto, las regiones con dopaje n presentan el tipo de dopaje de base, pero están más dopadas que la base: El dopaje de las regiones con dopaje n se sitúa en este caso en el intervalo de 10^{18} cm^{-3} a 10^{21} cm^{-3} .

La figura 4 muestra así el estado en el que se han generado una pluralidad de regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente en la capa de heterounión.

A continuación, la célula solar se calienta (no representado) en una etapa de procedimiento C. Esto da como resultado una activación del dopaje y la cristalización de la capa de heterounión 3 policristalina. El calentamiento representa, por tanto, una etapa de alta temperatura conocida *per se*, hasta al menos 600 °C, en el presente caso de alrededor de 850 °C. La etapa de alta temperatura se lleva a cabo en un horno tubular durante un período de aproximadamente 60 minutos. La etapa de alta temperatura también se puede llevar a cabo como etapa RTP o por medio de un láser. En esta etapa de alta temperatura, el dopante puede difundirse dentro de la capa de heterounión 3, de modo que las regiones 4 con dopaje p y las regiones 6, 6' con dopaje n quedan completamente llenas de dopante. Sin embargo, es esencial que haya en cada caso una región 7, 7' no dopada entre las regiones con dopaje n y las regiones con dopaje p.

En la etapa de alta temperatura, el dopante puede difundirse ligeramente a través de la capa de túnel 2 sin que, como resultado, la eficiencia de la célula solar varíe notablemente. Si la calidad de la capa de túnel es baja, también se puede mejorar la eficiencia.

A continuación, (no representado) según la etapa de procedimiento D, se difunde hidrógeno a la capa de heterounión 3 y a la interfaz entre la capa de túnel 2 y el sustrato de semiconductor 1, en el presente caso mediante calentamiento a 400 °C durante un período de al menos 1 min, preferiblemente de 10 min, preferiblemente de 30 min en una atmósfera con alto contenido de hidrógeno (aproximadamente un 70 % de H_2 , que se ioniza por medio de un plasma de MW).

El ejemplo de realización de un procedimiento según la invención según las figuras 1-4 tiene la ventaja particular de que la proporción de superficie entre el emisor (regiones 4 con dopaje p) y BSF (*Back Surface Field*, campo de superficie posterior), es decir, regiones 6, 6' con dopaje n, y las regiones 7 y 7' no dopadas en la cara trasera de la célula solar, es decir dentro de la capa de heterounión 3, se puede seleccionar libremente y se predefine fácilmente por la configuración de las máscaras de sombreado 5 y 5'. En el procedimiento descrito, las regiones 7 y 7' no dopadas separan en cada caso las regiones 4, 5, 5' muy dopadas adyacentes de modo que se reduce la recombinación de los portadores de carga.

Además, la estructura formada con las regiones 7, 7' no dopadas ofrece otra ventaja significativa en la posterior metalización: Esto se debe a que el silicio solo puede ponerse en contacto eléctrico si la concentración superficial de los portadores de carga en el silicio excede un valor mínimo. Una interfaz de metal/silicio con el silicio no dopado conduce a una resistencia al contacto muy alta y, en términos de aplicación práctica, no da lugar a un contacto eléctricamente conductor. Si, por ejemplo, toda la cara trasera de la capa de heterounión 3 recibe una capa metálica por deposición en fase de vapor, los contactos eléctricamente conductores solo se forman en las regiones 4 con dopaje p y las regiones 6 y 6' con dopaje n, muy dopadas, pero no en las regiones 7 y 7' no dopadas.

Por lo que respecta a la metalización, es decir, la formación de estructuras metálicas de puesta en contacto para la puesta en contacto eléctrico de las regiones 4 con dopaje p, por un lado, y las regiones 6, 6' con dopaje n, por otro lado, se pueden seleccionar diferentes etapas de procedimiento, describiéndose a continuación en las figuras 5a y 5b dos de entre una pluralidad de alternativas, en donde las etapas de procedimiento de la figura 5b no pertenecen a la invención.

Según la figura 5a, sobre la capa de heterounión 3 se aplica en primer lugar una capa dieléctrica 8 con un espesor en el intervalo de 10 nm a 1000 nm, preferiblemente de 70 nm a 400 nm, en el presente caso de aproximadamente 100 nm. Esta capa dieléctrica 8 se abre localmente en las regiones 4 con dopaje p y en las regiones 6 y 6' con dopaje n (por ejemplo, mediante ablación con láser o procesos de grabado local).

La capa dieléctrica 8 cumple dos funciones en particular:

Si la capa dieléctrica 8 se forma con un índice de refracción 1-3 (al menos en el intervalo de longitud de onda de entre 800 nm y 1200 nm), es decir, el índice de refracción es menor que el índice de refracción del sustrato de semiconductor 1, de modo que los fotones que penetran en el sustrato de semiconductor desde la cara delantera (representada abajo en las figuras), pero que no son absorbidos durante un primer paso y, por lo tanto, llegan hasta la capa dieléctrica 8 a través de la capa de túnel 2 y la capa de heterounión 3, son reflejados de nuevo hacia el sustrato de semiconductor 1. La capa dieléctrica 8 actúa así como un espejo óptico para tales fotones, de modo que aumenta la probabilidad de absorción y, por tanto, la eficiencia de la célula solar.

Si se usa cobre para la posterior metalización, la capa dieléctrica 8 se forma adicionalmente como una barrera de difusión, de modo que se impide una difusión de cobre al semiconductor o a las regiones 7, 7' no dopadas de la capa de heterounión 3, que sería perjudicial para la eficiencia.

Sin embargo, debido a la especial configuración y disposición de las regiones no dopadas y dopadas en la capa de heterounión 3 por medio del procedimiento, no es necesario que la capa dieléctrica sea pasivante eléctricamente, porque la pasivación de la cara trasera del sustrato de semiconductor 1 tiene lugar por medio de la capa de túnel 2. Además, la capa dieléctrica 8 puede presentar pequeñas interrupciones, denominados orificios (*pinholes*), ya que, como se describió anteriormente, las regiones 7 y 7' no dopadas no forman contacto eléctrico con una capa metálica.

Por tanto, el procedimiento descrito ofrece la ventaja de que no es necesario cumplir las condiciones de pasivación eléctrica y de evitación de orificios anteriormente mencionadas, de modo que se dispone de más opciones por lo que respecta a la configuración de la capa dieléctrica 8 en comparación con los procedimientos anteriormente conocidos. En particular, la capa dieléctrica 8 se puede formar a partir de nitruro de silicio, óxido de silicio, óxido de titanio, fluoruro de magnesio, nitruro de aluminio u óxido de aluminio. Debido a los menores requisitos, también hay disponible una mayor variedad de opciones de etapas de procedimiento o tipos de aplicación para generar la capa dieléctrica 8.

Como también se muestra en la figura 5a, después de la aplicación de la capa dieléctrica 8 y de la apertura local de esta capa dieléctrica 8, se aplica una capa metálica de puesta en contacto 9, 9', por ejemplo mediante deposición en fase de vapor. La capa de puesta en contacto 9, 9' se retira luego de nuevo localmente en las regiones 10, de modo que la capa de puesta en contacto 9, 9' está formada interrumpida en las regiones 7, 7' no dopadas. La retirada local se realiza mediante ablación con láser o procesos de grabado local. La capa de puesta en contacto 9, 9' también puede retirarse localmente mediante un proceso de desprendimiento conocido *per se*.

Esto da como resultado una primera estructura metálica de puesta en contacto que comprende las regiones 9 de la capa de puesta en contacto y que hace contacto eléctrico con las regiones 6 con dopaje n. Además, se crea una segunda estructura metálica de puesta en contacto que comprende las regiones 9' de la capa de puesta en contacto y que hace contacto eléctrico con las regiones 4 con dopaje p, en donde las estructuras de puesta en contacto tocan y hacen contacto eléctrico con las regiones dopadas situadas debajo en cada caso en las regiones de las cuales se retiró la capa dieléctrica 8.

La figura 5a muestra así el estado después de llevar a cabo una etapa de procedimiento E' en la que la capa dieléctrica 8 se aplica sobre la capa de heterounión 3 y después de una etapa de procedimiento E'' en la que la capa metálica de puesta en contacto 9, 9' se aplica sobre la capa dieléctrica 8.

La figura 5b muestra, a modo de ejemplo, otra variante de configuración de las estructuras de puesta en contacto eléctrico, que no pertenecen a la invención. A diferencia de la figura 5a, no se aplica ninguna capa dieléctrica, sino que solo se deposita una capa metálica 9, 9' por toda la superficie y, a continuación, se retira nuevamente en las regiones 10 mediante ablación con láser o procesos de grabado local. Esto da como resultado una configuración relativamente económica de estructuras metálicas de puesta en contacto igual que en la figura 5a, con la excepción de que no se intercala ninguna capa dieléctrica entre la capa de puesta en contacto 9, 9' y la capa de heterounión 3. La capa metálica se aplica mediante deposición en fase de vapor. Esta variante, en particular, conlleva la ventaja de que en las regiones de solapamiento (en la figura 5b se muestran a modo de ejemplo dos regiones de solapamiento A y B), en las que la capa metálica se extiende más allá de las regiones dopadas después de la estructuración, no hay contacto eléctrico con la capa de heterounión 3 no dopada subyacente. Por tanto, una metalización según la figura 5b representa una variante de producción especialmente sencilla y económica. La figura 5b muestra así el estado después de llevar a cabo una etapa de procedimiento E en la que se aplica directamente sobre la capa de heterounión

3 una capa metálica de puesta en contacto 9, 9', que fue retirada localmente de las regiones 10.

Si la metalización tiene lugar en la variante según la figura 5b, resulta ventajoso configurar la capa de heterounión 3 policristalina no como capa de heterounión pura, sino, por ejemplo, como capa de SiC con contenido en carbono. Al añadir carbono, por ejemplo, se puede aumentar la banda prohibida de la capa de heterounión 3 policristalina y, por lo tanto, su índice de refracción también se puede reducir, al menos en el intervalo de longitud de onda entre 800 nm y 1200 nm, de modo que se forma un espejo óptico eficiente con las ventajas ya mencionadas anteriormente. Además, la difusión de cobre en SiC es significativamente menor que en silicio, de modo que se puede evitar la migración de cobre a la región de carga espacial de la unión pn de la célula solar.

La capa de puesta en contacto 9, 9' se aplica en primer lugar por toda la superficie según la figura 5b y a continuación se estructura. Asimismo, la capa dieléctrica 8 y la capa de puesta en contacto 9, 9' según la figura 5a se aplican en primer lugar por toda la superficie y luego se estructuran en cada caso.

Por tanto, las figuras 5a y 5b muestran en cada caso una célula solar que presenta, como se describió anteriormente, el sustrato de semiconductor 1 con una capa de túnel 2 dispuesta directamente sobre la cara trasera (representada arriba) del sustrato de semiconductor 1 y una capa de heterounión 3 dispuesta directamente sobre la capa de túnel 2. La capa de heterounión 3 presenta una pluralidad de regiones con dopaje n (6, 6') y con dopaje p (4) dispuestas alternativamente. Es esencial que esté dispuesta en cada caso una región no dopada (7, 7') en la capa de heterounión 3 entre las regiones con dopaje n (6, 6') y las regiones con dopaje p (4).

La célula solar así configurada presenta preferiblemente una capa de heterounión 3 continua, es decir preferiblemente una capa de heterounión 3 ininterrumpida que se extiende esencialmente por toda la cara trasera de la célula solar. Como resultado, la superficie trasera del sustrato de semiconductor 1 se pasiva eléctricamente de forma continua (es decir, la velocidad de recombinación superficial es baja) y queda protegida contra la contaminación y otros efectos negativos. También es ventajoso que las metalizaciones 9, 9' se sitúen en un mismo plano y no presenten, por ejemplo, un desplazamiento de escalón entre sí, de modo que se eviten los problemas causados por dichos escalones al conectar la célula solar o al conectarla a un circuito externo o a células solares adyacentes en un módulo de células solares.

En el ejemplo de realización adicional de un procedimiento según la invención representado en las figuras 6 a 9 se aplica, según la figura 6, una capa de túnel 12 sobre un sustrato de semiconductor 11 configurado como sustrato de silicio. El sustrato de semiconductor 11 está configurado como una oblea de silicio monocristalino. La capa de túnel 12 presenta un espesor en el intervalo de 5 Angstroms a 30 Angstroms, preferiblemente de 10 Angstroms. Está configurado como capa de dióxido de silicio. La capa de túnel también puede estar configurada como un tipo diferente de óxido.

La capa de túnel se aplica mediante crecimiento químico húmedo. La capa de túnel también se puede depositar mediante RTO (*Rapid Thermal Oxidation*, oxidación térmica rápida) o ALD (*Atomic Layer Deposition*, deposición de capa atómica), PECVD, LPCVD o APCVD.

La figura 6 muestra así el estado en el que la capa de túnel se ha aplicado directamente sobre la cara delantera y trasera del sustrato de semiconductor 11.

En una etapa de procedimiento adicional según la figura 7 se aplican una capa de heterounión 13 con dopaje n y, a continuación, una capa de heterounión 14 con dopaje p. Las capas de heterounión 13 y 14 pueden estar configuradas como capa de heterounión micromorfa, amorfa o policristalina. Opcionalmente, la capa 13 también puede presentar dopaje p y la capa 14 presentar dopaje n. También es posible la deposición de capas intrínsecas y la posterior implantación de boro o fósforo.

El espesor de la capa de heterounión se sitúa entre 10 nm y 1000 nm, preferiblemente alrededor de 30 nm. La capa de heterounión se aplica mediante PECVD. La aplicación de las capas de heterounión 13 y 14 mediante LPCVD o APCVD o pulverización catódica también entra dentro del alcance de la invención. Cuando se usa el procedimiento LPCVD o APCVD, la deposición por ambas caras es inevitable y, por lo tanto, es particularmente ventajoso depositar una capa no dopada y posteriormente doparla mediante implantación de iones.

A continuación, la célula solar se calienta (no representado) en una etapa de procedimiento C. De esta manera, se puede lograr una activación del dopaje y la cristalización de las capas de heterounión 13 y 14. Por lo tanto, el calentamiento representa una etapa de alta temperatura conocida *per se*, preferiblemente con temperaturas en el intervalo de 600-900 °C. La etapa de alta temperatura se lleva a cabo en un horno tubular. La etapa de alta temperatura también se puede llevar a cabo como etapa RTP o por medio de un láser.

En la etapa de alta temperatura, el dopante puede difundirse ligeramente a través de la capa de túnel 12 sin que, como resultado, la eficiencia de la célula solar varíe notablemente.

La pasivación de hidrógeno (no representada) tiene lugar a continuación en la etapa de procedimiento D a fin de mejorar las propiedades de pasivación.

5 En una etapa de procedimiento adicional según la figura 8, se aplica una capa de TCO 15. Esta capa de TCO sirve para producir la conductividad transversal y acoplar mejor la luz incidente. Esta capa 15 puede estar configurada como ITO, AZO, IO:H y tiene aproximadamente 70 nm de espesor. Opcionalmente, la capa 15 puede no ser TCO, sino una capa de $\mu\text{c-SiC:H}$. Esto ofrece la ventaja anteriormente mencionada de que dona hidrógeno, asegura una cierta conductividad transversal y presenta baja absorción. Sin embargo, la calidad de esta capa no se puede comparar con TCO.

En una etapa de procedimiento adicional según la figura 9, se aplica una capa metálica 16 en la cara delantera en forma de una rejilla de puesta en contacto y en la cara trasera se aplica una capa metálica por toda la superficie.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para producir una célula solar fotovoltaica con al menos una heterounión, que presenta una capa de túnel, que comprende las siguientes etapas de procedimiento:

A proporcionar un sustrato de semiconductor (1, 11) con un dopaje de base;

5 B generar una heterounión en al menos una cara del sustrato de semiconductor, heterounión que presenta una capa de heterounión dopada y una capa de túnel dieléctrico (2) dispuesta directamente entre la capa de heterounión (3, 14) y el sustrato de semiconductor, en donde la capa de heterounión se configura con un espesor en el intervalo de 10 nm a 1000 nm;

C calentar al menos la capa de heterounión para mejorar la calidad eléctrica de la heterounión;

10 caracterizado

por que, en la etapa de procedimiento C, al menos la capa de heterounión se calienta a al menos 600 °C,

por que, en una etapa de procedimiento D después de la etapa de procedimiento C, se difunde hidrógeno a la capa de heterounión y/o a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor, en donde, en la etapa de procedimiento D, la célula solar se calienta a al menos 350 °C

15 y por que sobre la capa de heterounión se dispone indirectamente una capa metálica de puesta en contacto (9, 9'), que se une de manera eléctricamente conductora a la capa de heterounión para formar una puesta en contacto.

2. Procedimiento según la reivindicación 1,

caracterizado por que

20 en la etapa de procedimiento D después de la etapa de procedimiento C, se difunde hidrógeno tanto a la interfaz entre la capa de túnel y el sustrato de semiconductor como a la capa de heterounión.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

la capa de heterounión se forma como capa con contenido en silicio.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

25 caracterizado por que

la capa de heterounión se forma como capa de SiC con contenido en carbono.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

la capa de heterounión se forma como capa con contenido en silicio amorfo en la etapa de procedimiento B y

30 por que la estructura amorfa de la capa de heterounión se obtiene en las etapas de procedimiento C y D sin calentar la capa de heterounión a más de 800 °C.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

35 en las etapas de procedimiento C y D, se evita una difusión de dopante desde la capa de heterounión al sustrato de semiconductor al no calentarse la capa de heterounión a más de 800 °C.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

en la etapa de procedimiento D, el hidrógeno se introduce mediante RPHP.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5,

40 caracterizado por que

el hidrógeno se introduce aplicando una capa con contenido en hidrógeno indirecta o directamente sobre la capa de

heterounión y, a continuación, introduciendo el hidrógeno mediante calentamiento.

9. Procedimiento según la reivindicación 8,

caracterizado por que

la capa con contenido en hidrógeno se forma como capa de silicio microcristalino.

5 10. Procedimiento según la reivindicación 8,

caracterizado por que

la capa con contenido en hidrógeno se forma como capa de nitruro de silicio.

11. Procedimiento según la reivindicación 8,

caracterizado por que

10 en la etapa de procedimiento D, tiene lugar un calentamiento a una temperatura en el intervalo de 700 °C a 900 °C durante un período de tiempo en el intervalo de 0,5 s a 20 s.

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

la etapa de procedimiento C se lleva a cabo en una atmósfera de nitrógeno.

15 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado por que

en la capa de heterounión se forman una pluralidad de regiones con dopaje p y n dispuestas alternativamente, generándose en cada caso las regiones con dopaje p y n a una cierta distancia entre sí, de modo que entre regiones con dopaje p y n adyacentes está dispuesta en cada caso una región no dopada de la capa de heterounión.

20

Figura 1

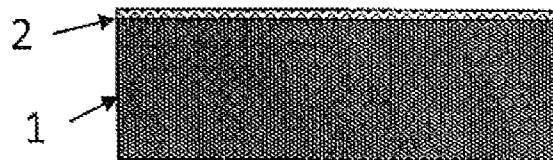


Figura 2

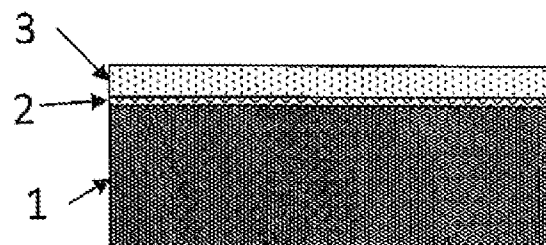


Figura 3

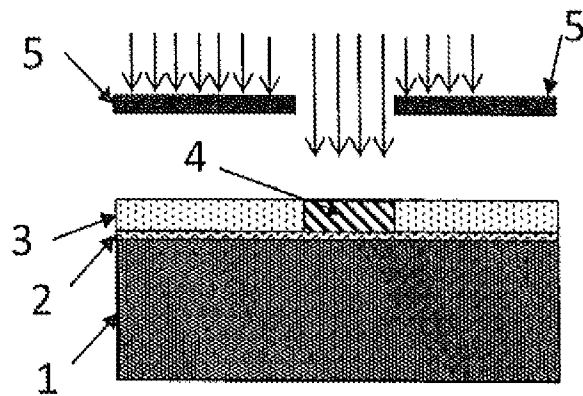


Figura 4

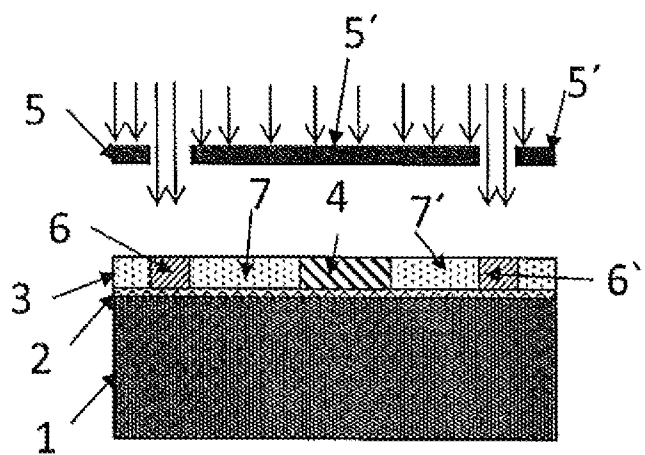


Figura 5a

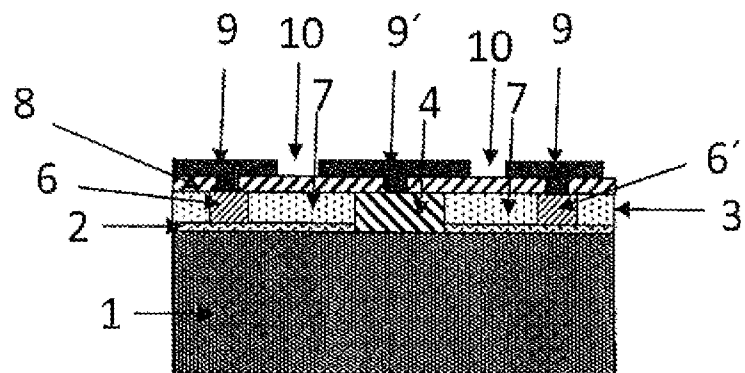


Figura 5b

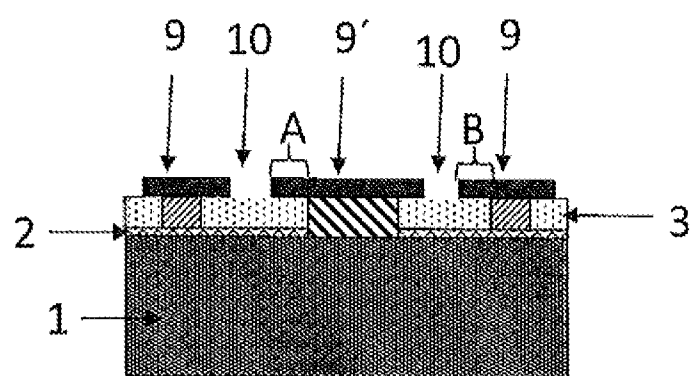


Figura 6

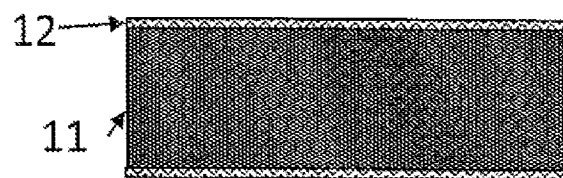


Figura 7

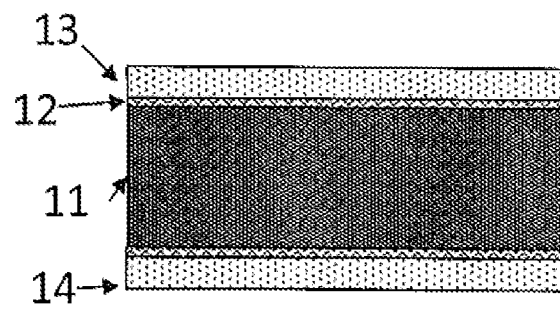


Figura 8

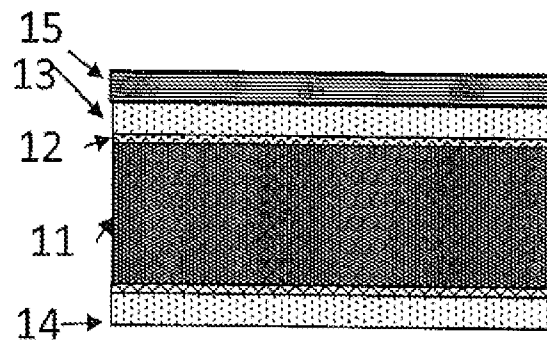


Figura 9

