

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 523 441**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/18** (2006.01)

**H01L 31/0216** (2014.01)

**H01L 31/068** (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.11.2008** **E 08850615 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.08.2014** **EP 2220689**

54 Título: **Procedimiento de fabricación de una célula solar con una doble capa dieléctrica de pasivación superficial y una correspondiente célula solar**

30 Prioridad:

**14.11.2007 DE 102007054384**

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

**26.11.2014**

73 Titular/es:

**INSTITUT FÜR SOLARENERGIEFORSCHUNG  
GMBH (50.0%)  
AM OHRBERG 1  
31860 EMMERTHAL, DE y  
TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN  
(50.0%)**

72 Inventor/es:

**SCHMIDT, JAN y  
HOEX BRAM DR.**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 523 441 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 de fabricación de una célula solar con una doble capa dieléctrica de pasivación superficial y una correspondiente célula solar

**Campo de la invención**

- 5 La presente invención se refiere a un procedimiento para fabricar una célula solar con una doble capa dieléctrica de pasivación superficial y a una correspondiente célula solar.

**Antecedentes de la invención**

- 10 Un requisito decisivo para obtener un alto grado de eficacia en las células solares es lograr una supresión muy eficaz de las pérdidas por recombinación superficial. Con este fin, la superficie de las células solares debe estar pasivada de la mejor forma posible, de manera que los pares de portadores de cargas, generados en el interior de la célula solar por la luz incidente y que difunden hacia las superficies del sustrato de la célula solar, no se recombinen en la superficie de la célula solar, con lo cual ya no estarían disponibles para contribuir al grado de eficacia de la célula solar.

- 15 En células solares de laboratorio, este problema se resuelve a menudo por el crecimiento de dióxido de silicio a temperatura más elevada (por ejemplo, >900°C). Sin embargo, dado que una etapa procedimental a temperatura elevada de este tipo representa un considerable coste añadido en el procesamiento de las células solares, en la actualidad se suele renunciar a una pasivación superficial de este tipo para la fabricación a nivel industrial de células solares.

- 20 Una dificultad adicional de la oxidación a temperatura elevada es la sensibilidad del silicio policristalino, de precio más favorable, a las temperaturas altas, que en este material puede dar lugar a una reducción considerable de la calidad del material, es decir, de la duración de los portadores de carga y, por consiguiente, a pérdidas del grado de eficacia.

- 25 Una alternativa a temperatura baja es la pasivación superficial con nitruro de silicio o carburo de silicio amorfos, que se puede llevar a cabo a temperaturas de 300-400°C, por ejemplo, mediante deposición química de vapor asistida por plasma (PECVD, o "*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*"). Una pasivación superficial de este tipo se describe, por ejemplo, en T. Lauinger et al.: "Record low surface recombination velocities on 1 Ωcm p-silicon using remote plasma silicon nitride passivation", *Appl. Phys. Lett.* 68, 1232-1234 (1996), y en I. Martin et al., "Surface passivation of p-type crystalline silicon by plasma enhanced chemical vapor deposited amorphous SiC<sub>x</sub> films", *Appl. Phys. Lett.* 79, 2199-2201 (2001). Sin embargo, las capas dieléctricas producidas de esta forma sólo se pueden utilizar de manera limitada en células solares de alta eficiencia de gran superficie, puesto que pueden contener una alta densidad de los llamados "*pinholes*", es decir pequeños orificios o poros en la capa y, por consiguiente, no se pueden aislar de forma adecuada. Adicionalmente, su efecto de pasivación se basa principalmente en una densidad muy alta de cargas positivas dentro de las capas dieléctricas que puede conducir, por ejemplo, en la pasivación de la cara posterior de las células solares, cuando se usan obleas de silicio de tipo p, a la formación de una capa de inversión, a través de la cual se puede producir la salida de una corriente de pérdida adicional de portadores de cargas minoritarios de la base de la célula solar hacia los contactos de la cara posterior (lo que se denomina "*shunt parasitario*"). Sobre superficies de silicio p<sup>+</sup> con un fuerte dopaje de boro, el nitruro de silicio puede dar lugar incluso a una despasivación a causa de la elevada densidad de carga positiva, en comparación con una superficie p<sup>+</sup> no pasivada.

- 40 Se han obtenido muy buenas pasivaciones tanto sobre superficies p como p<sup>+</sup> con capas de silicio amorfo que también se pueden producir mediante deposición química de vapor asistida por plasma a temperaturas de recubrimiento muy bajas (típicamente, <250°C), tal como se describe, por ejemplo, en S. Dauwe et al.: "Very low surface recombination velocities on p- and n-type silicon wafers passivated with hydrogenated amorphous silicon films", *Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, Nueva Orleans, EE.UU. (2002), pág. 1246; y en P. Altermatt et al.: "The surface recombination velocity at boron-doped emitters: comparison between various passivation techniques", *Proceeding of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresde (2006), pág. 647.

- 50 La propiedad de pasivación superficial de estas capas de silicio amorfo puede ser, no obstante, muy sensible a los tratamientos térmicos. En los actuales procesos industriales de células solares, la metalización se lleva a cabo a menudo mediante la técnica de serigrafía en la que típicamente se produce, como última etapa del procedimiento, el recocido de los contactos en un horno continuo de infrarrojos, a temperaturas entre aprox. 800°C y 900°C. Aun cuando las células solares se exponen a estas temperaturas elevadas durante sólo pocos segundos, esta etapa de recocido puede dar lugar a una degradación considerable del efecto de pasivación de las capas de silicio amorfo.

- 55 Asimismo, se pueden lograr buenos resultados de pasivación con capas de óxido de aluminio mediante deposición química de vapor secuencial (deposición atómica de capas, ALD), por ejemplo, aprox. a 200°C y recocidas a continuación aprox. a 425°C. Por lo general, en la deposición química de vapor secuencial dentro de un ciclo de deposición, por lo general sólo se deposita un único estrato molecular de material que se debe depositar sobre la superficie del sustrato. Dado que un ciclo de deposición tiene una duración típica de aprox. 0,5 a 4 segundos, se

obtienen velocidades de deposición correspondientemente bajas. La deposición de capas de óxido de aluminio con un grosor adecuado para ser usado como capa antirreflectante o como reflector de la cara posterior requiere, por lo tanto, duraciones de deposición que han hecho pensar que, hasta la fecha, el uso de estas capas en células solares fabricadas a escala industrial no es interesante desde el punto de vista comercial.

- 5 El documento US 2006/157733 A1, así como Hoex et al.: "Excellent passivation of highly doped p-type Si surfaces by negative-charge-dielectric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", 11 de septiembre, 2007 (2007-09-11), *Applied Physics Letters* vol. 91, página 112107, describen procedimientos de pasivación de una superficie de silicio de una célula solar que comprenden la deposición de una capa dieléctrica compuesta por óxido de aluminio.

### Compendio de la invención

- 10 Puede existir la necesidad de una célula solar y de un procedimiento de fabricación de una célula solar en la/el que, por una parte, se pueda lograr una buena pasivación de la superficie de la célula solar y, por otra parte, se puedan evitar al menos parcialmente los inconvenientes anteriormente mencionados de las actuales capas de pasivación superficial. En especial, se debe lograr la posibilidad de una producción de células solares que sea viable a escala industrial y tenga un costo favorable, con una muy buena pasivación superficial.
- 15 Este requisito se puede satisfacer mediante el objeto de las reivindicaciones independientes. En las reivindicaciones dependientes se describen formas de realización convenientes de la presente invención.

Según un primer aspecto de la presente invención, se propone un procedimiento para la fabricación de una célula solar de silicio que comprende las etapas siguientes: puesta a disposición de un sustrato de silicio; deposición de una primera capa dieléctrica sobre una superficie del sustrato de silicio mediante deposición química de vapor secuencial, en la que la primera capa dieléctrica comprende óxido de aluminio; y deposición de una segunda capa dieléctrica sobre una superficie de la primera capa dieléctrica, en donde los materiales de las primera y segunda capas dieléctricas son diferentes y en donde en la segunda capa dieléctrica incluye hidrógeno.

20

Este primer aspecto de la presente invención se puede considerar como basado en el concepto siguiente: se detalla un procedimiento para la fabricación de células solares de silicio con una capa dieléctrica de pasivación para reducir las pérdidas por recombinación superficial. La capa dieléctrica de pasivación se compone de dos capas parciales, de una capa muy delgada que contiene óxido de aluminio, que se forma por deposición química de vapor secuencial ("*Atomic Layer Deposition*", ALD), así como por una capa más gruesa, por ejemplo, de óxido de silicio, nitruro de silicio o carburo de silicio, que se puede depositar, por ejemplo, por deposición química de vapor asistida por plasma ("*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*", PECVD) sobre la capa de óxido de aluminio.

25

La doble capa dieléctrica generada durante el procedimiento según el primer aspecto hace posible la pasivación de campos tanto fuerte como débilmente dopados de la superficie de la célula solar del tipo de conductividad p o n. Es posible obtener una pasivación estable, que conserva sus propiedades de pasivación también tras la etapa de recocido en el intervalo de temperaturas de 800 a 900°C para la remanencia de los contactos metálicos. Al mismo tiempo, la capa dieléctrica de pasivación puede tener también propiedades ópticas ventajosas, es decir, en su aplicación sobre la cara anterior de la célula solar, la capa puede actuar como capa antirreflectante eficaz y en su aplicación sobre la cara posterior de la célula solar, la capa de pasivación puede formar, junto con una metalización de toda la superficie de la cara posterior, un espejo eficaz para fotones con energías próximas a las bandas prohibidas del silicio, para mejorar la llamada "*Light Trapping*", es decir, la captura de luz por reflexión interna múltiple en la célula solar. Además, en la pasivación de la cara posterior con material semiconductor estándar para células solares del tipo de conductividad p, es posible evitar el conocido efecto negativo del "*shunt parasitario*" del nitruro de silicio.

30

35

40

La clave para comprender el adecuado efecto de pasivación y la excelente estabilidad térmica de la capa apilada según la invención se puede apreciar en la combinación de la interfaz Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atómicamente plana, en caso ideal, que se forma en el procedimiento ALD de manera natural, y las capas de SiO<sub>x</sub>, SiN<sub>x</sub> o SiC<sub>x</sub> con un fuerte contenido de hidrógeno tales como las que se forman, por ejemplo, en el procedimiento PECVD. Una parte del hidrógeno de las capas depositadas por el procedimiento PECVD puede difundir a través de la capa ultrafina de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pasivar el la interfaz de silicio con los enlaces insaturados de silicio.

45

A continuación, se explicarán las características, los detalles y las posibles ventajas de realizaciones del procedimiento de fabricación según la invención.

- 50 El sustrato de silicio que se pone a disposición puede ser una lámina delgada ("*wafer*" / oblea) de silicio mono- o policristalino o, también, una capa delgada de silicio.

La superficie que se debe recubrir puede ser la cara anterior del sustrato de la célula solar que, durante el uso, está orientada hacia la luz incidente. En este caso, la segunda capa dieléctrica se aplica, preferiblemente, como capa antirreflectante, es decir, con un grosor con el que se producen interferencias negativas para la luz incidente y la luz reflejada. El grosor se puede seleccionar dentro del intervalo de aproximadamente 50 hasta 150 nm, dependiendo del índice de refracción del material utilizado para la segunda capa dieléctrica.

55

De manera alternativa, la superficie que se debe recubrir puede ser la cara posterior del sustrato de la célula solar que, durante el uso, está dispuesta para evitar la luz incidente. En este caso, la segunda capa dieléctrica está formada, preferiblemente, como lo que se denomina reflector de la cara posterior, de modo que la luz, en particular la luz infrarroja, que atraviesa toda la célula solar se refleje de la forma más amplia posible en esta cara posterior y recorra, por lo tanto, nuevamente el sustrato de la célula solar.

Antes de la deposición de la primera capa dieléctrica, la superficie del sustrato de silicio se puede limpiar a fondo para eliminar todas las impurezas del mismo que pudieran alterar la capa dieléctrica que se va a depositar a continuación. De forma especial, se puede decapar ligeramente la superficie del sustrato de silicio, por ejemplo, en una solución que contiene, por una parte, un agente oxidante y, por otra parte, ácido fluorhídrico (HF) que corroe el óxido de silicio oxidado. Un método de limpieza adecuado, conocido en la fabricación de células solares, es por ejemplo el denominado proceso RCA.

Según una realización del procedimiento según la invención, para la deposición química de vapor secuencial de la primera capa dieléctrica, el sustrato de silicio se trata inicialmente con un compuesto que contiene aluminio y que muestra al menos alguno de los componentes  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{Al}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}$  y  $(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)\text{N}:\text{AlH}_3$ , de manera que sobre la superficie del sustrato de silicio se deposite una capa que contiene aluminio. Seguidamente, la capa que contiene aluminio se oxida en una atmósfera que contiene oxígeno.

Durante el tratamiento del sustrato de silicio con el compuesto que contiene aluminio, el compuesto que contiene aluminio se puede adherir a la superficie de silicio en los puntos en los que entra en contacto con la superficie de silicio. Se puede producir una reacción química con la superficie de silicio, lo que se designa también como quimisorción. De este modo se pueden formar, en un caso ideal, estratos monomoleculares de moléculas del compuesto que contiene aluminio. En este caso, puede ser conveniente que el estrato molecular pueda ser casi perfectamente compacto, es decir, seleccionando correctamente los parámetros del proceso tales como duración y temperatura durante el tratamiento, la totalidad de la superficie de silicio se recubre con moléculas del compuesto que contiene aluminio. De esta forma, la primera capa dieléctrica que se genera seguidamente puede ser esencialmente compacta a nivel atómico o molecular.

En una etapa subsiguiente del proceso, se oxida el estrato molecular de compuesto que contiene aluminio que se ha depositado anteriormente. Esto se puede llevar a cabo, por ejemplo, mediante un tratamiento con oxígeno o un gas que contiene oxígeno. Para acelerar las reacciones químicas, el oxígeno se puede poner a disposición en forma de un plasma de  $\text{O}_2$  rico en energía (deposición asistida por plasma), en donde puede ser conveniente que la ignición del plasma de  $\text{O}_2$  no se efectúe directamente sobre los sustratos, sino en una cámara separada, dirigiéndolo entonces hacia los sustratos (el procedimiento llamado "ALD por plasma remoto"). De manera alternativa, el oxígeno se puede alimentar a temperaturas elevadas (deposición asistida térmicamente). Se forma, en este caso, una capa que contiene al menos moléculas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y que, preferiblemente, está compuesta completamente por moléculas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . De esta manera, es posible depositar un estrato esencialmente monomolecular de moléculas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , con un grosor de aproximadamente 1,2 Angström (0,12 nm).

El proceso descrito anteriormente se puede repetir múltiples veces hasta alcanzar el grosor suficiente de la capa de óxido de aluminio. En este caso, resulta conveniente que las moléculas del compuesto que contiene aluminio no puedan adherirse sobre sí mismas, sino que lo hagan sobre las moléculas de aluminio que se oxidan posteriormente. De este modo, la primera capa dieléctrica se puede construir estrato a estrato, con lo que se obtiene una muy alta homogeneidad y, por lo tanto, una capa de buena calidad.

Todo el proceso de deposición secuencial se puede llevar a cabo en una cámara común en la que se alimentan, en primer lugar, el compuesto que contiene aluminio, que a continuación se hace circular y en la que, seguidamente, se introduce la atmósfera que contiene oxígeno, antes de poder repetir el procedimiento desde el comienzo.

Una ventaja fundamental de la deposición química de vapor secuencial es que se recubre uniformemente toda la superficie del sustrato. La deposición tiene lugar de manera independiente de la geometría de la superficie del sustrato, es decir, se adapta a la superficie. Por lo tanto, la primera capa dieléctrica se deposita de forma homogénea con el mismo grosor. Este aspecto resulta especialmente favorable en células solares de superficie texturizada o en células solares con canales que deben establecer un contacto eléctrico entre la cara anterior y la cara posterior de la célula solar (las denominadas células solares EWT ("*emitter wrap through*")), puesto que se puede garantizar la pasivación de toda la superficie relevante de la célula solar.

Según una realización del procedimiento según la invención, la segunda capa dieléctrica contiene nitruro de silicio, óxido de silicio y/o carburo de silicio. Estos materiales exhiben muy buenas propiedades ópticas tales como, por ejemplo, una alta transparencia prácticamente para todo el espectro solar. Por lo tanto, son apropiados en especial como capa antirreflectante. Además, las capas dieléctricas formadas con estos materiales pueden contener una fracción importante de hidrógeno, lo cual puede contribuir a la pasivación adicional de la célula solar.

Según una realización del procedimiento según la invención, la segunda capa dieléctrica se fabrica mediante un procedimiento PECVD. Este procedimiento, en el que se hacen reaccionar reactantes tales como, por ejemplo, silano ( $\text{SiH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y/o metano ( $\text{CH}_4$ ) por ignición de un

plasma, puede generar capas dieléctricas de alto valor cualitativo de nitruro de silicio, óxido de silicio o carburo de silicio que, adicionalmente, pueden exhibir un elevado contenido de hidrógeno.

5 Según una realización del procedimiento según la invención, la segunda capa dieléctrica se deposita de manera que posea una fracción de hidrógeno de al menos 1 % en átomos, preferiblemente, de al menos 2% en átomos y, más preferiblemente, de al menos de 5% en átomos. El hidrógeno depositado puede difundir, al menos de forma parcial, a través de la primera capa dieléctrica subyacente y contribuir en esta zona a la pasivación mediante la saturación de los enlaces libres de silicio ("*dangling bonds*" / enlaces no saturados). Se ha demostrado que esta contribución puede ser todavía mayor que en el caso en el que se deposita directamente un dieléctrico que contiene hidrógeno sobre una superficie de silicio.

10 Según una realización del procedimiento según la invención, tras la deposición de la segunda capa dieléctrica, se lleva a cabo una etapa de tratamiento a temperatura elevada, a temperaturas superiores a 600°C, preferiblemente superiores a 700°C o, más preferiblemente, superiores a 800°C. Una etapa de tratamiento a altas temperaturas de este tipo se puede utilizar, por ejemplo, para un procesamiento posterior en el que se efectúa el recocido de los contactos metálicos de la célula solar, que han sido impresos anteriormente sobre la superficie de la célula solar por serigrafía. En este caso, la etapa de tratamiento a altas temperaturas puede tener una ventaja adicional, como es  
15 que el hidrógeno contenido en la segunda capa dieléctrica difunda fácilmente a través de la primera capa dieléctrica debido a las temperaturas elevadas, y pueda saturar los enlaces de silicio todavía libres, lo que puede conducir a una mejora adicional del efecto de pasivación.

20 Según una realización del procedimiento según la invención, la primera capa dieléctrica se deposita con un grosor menor que 50 nm, preferiblemente menor que 30 nm y, más preferiblemente, menor que 10 nm. La primera capa dieléctrica ofrece excelentes propiedades de pasivación superficial, incluso con grosores muy reducidos, debido a la elevada calidad lograda por la deposición química de vapor secuencial. Cuanto más delgada sea la capa, mayor es la velocidad con la que se puede depositar, si bien el grosor mínimo debe ser aproximadamente de 0,5 nm, preferiblemente de aproximadamente 2 nm, para garantizar la compacidad de la capa.

25 Según una realización del procedimiento según la invención, la segunda capa dieléctrica se deposita con un grosor mayor de 50 nm, preferiblemente mayor de 100 nm y, más preferiblemente, mayor de 200 nm. Tal como se ha descrito anteriormente, el grosor de la segunda capa dieléctrica se puede determinar de acuerdo con su función como capa antirreflectante o como reflector de la cara posterior.

30 Según un segundo aspecto de la presente invención, se propone una célula solar que posee un sustrato de silicio; una primera capa dieléctrica que contiene óxido de aluminio sobre una superficie del sustrato de silicio; y una segunda capa dieléctrica sobre una superficie de la primera capa dieléctrica, en donde los materiales de las primera y segunda capas dieléctricas son diferentes y en donde la segunda capa dieléctrica incluye hidrógeno.

35 Hay que señalar que las realizaciones, características y ventajas de la invención se describen principalmente haciendo referencia al procedimiento de fabricación según la invención. Sin embargo, el experto en la técnica reconocerá tanto en la descripción anterior como en la que se ofrece a continuación que, mientras no se indique lo contrario, las realizaciones y características de la invención se pueden transferir, de manera análoga, también a la célula solar según la invención. De forma especial, las características de las diferentes realizaciones se pueden combinar entre sí de cualquier forma.

40 En resumen, el procedimiento o la célula solar se distinguen, de acuerdo con aspectos y realizaciones de la presente invención con respecto a procedimientos ya conocidos para la pasivación superficial de células solares de silicio cristalino o células solares recubiertas de esta forma, por los siguientes puntos, entre otros:

- i. se puede lograr la pasivación superficial requerida para la realización de un alto grado de eficacia de la célula solar también después de una etapa de recocido en un intervalo de temperaturas de 800 a 900°C;
- ii. es posible pasivar muy bien superficies de silicio de los tipos n y p con dopajes tanto bajos como elevados;
- 45 iii. debido a la alta densidad de carga negativa en la capa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sobre silicio de tipo p, bajo la capa de pasivación en el silicio no se induce una capa de inversión, con lo que resulta posible evitar esencialmente el efecto perjudicial de un "*shunt* parasitario";
- iv. las capas no presentan "*pinholes*";
- v. de manera sencilla, se pueden obtener muy buenas propiedades ópticas del sistema de capas, que se  
50 pueden adaptar de forma simple a los requisitos de la célula solar mediante el grosor y la composición de, por ejemplo, la capa depositada por PECVD, de modo que el sistema de capas se puede formar, por ejemplo, como capa antirreflectante sobre la cara anterior de la célula solar o como reflector de infrarrojos sobre la cara posterior de la célula solar, en combinación con la metalización de toda la superficie sobre la capa de pasivación.

55 **Breve descripción de los dibujos**

Otras características y ventajas de la presente invención resultarán evidentes para el experto en la técnica a partir de la siguiente descripción de un ejemplo de realización que, no obstante, no se debe considerar que limita la invención, así como haciendo referencia al dibujo anexo.

Fig. 1 ilustra de forma esquemática una célula solar según una realización de la presente invención.

## 5 Descripción detallada de realizaciones

A continuación, se ofrece un ejemplo de realización del procedimiento de fabricación según la invención.

Una lámina de silicio 1, cuyo procesamiento como célula solar aún no ha finalizado, en la cual se ha difundido, por ejemplo anteriormente, un emisor en una superficie y cuya superficie ha sido limpiada a fondo, se incorpora en una cámara de recubrimiento evacuada y se alimenta a la cámara un compuesto que contiene Al tal como, por ejemplo,  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$  como reactante. Mediante quimisorción, las moléculas del reactante se depositan sobre la superficie de silicio hasta que la superficie esté saturada. A continuación, se retiran de la cámara las moléculas del reactante que no han experimentado quimisorción, por ejemplo purgando la cámara con un gas de purga tal como, por ejemplo, nitrógeno.

Seguidamente, se procede a la ignición de un plasma de  $\text{O}_2$  sobre la superficie de silicio que se va a pasivar o en una cámara separada, y los radicales de oxígeno reaccionan con las moléculas quimisorbidas para formar  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Se genera una capa de óxido de aluminio que, en el caso ideal, es monomolecular. La temperatura de la lámina de silicio se mantiene lo más constante posible a una temperatura dentro del intervalo entre temperatura ambiente y  $450^\circ\text{C}$ .

Después de un ciclo de este tipo, la cámara de recubrimiento se evacúa nuevamente y se inicia un nuevo ciclo. Este proceso se repite hasta alcanzar el grosor deseado de la capa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Con el fin de que la duración del recubrimiento completo sea lo más reducida posible, la capa de recubrimiento de la capa 3 de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se limita a aproximadamente 5 nm, es decir, el procedimiento de recubrimiento ALD se repite entre aproximadamente 40 y 50 veces, de manera que se obtenga una duración del recubrimiento completo de aproximadamente 20 hasta 200 seg.

La variante del procedimiento ALD descrita en este documento se designa como "ALD asistida por plasma" y es bien conocida en la bibliografía, véase, por ejemplo, C.W. Jeong et al., Plasma-assisted atomic layer growth of high-quality aluminum oxide thin films, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, 285-289 (2001). En los ensayos se ha demostrado que se puede lograr una pasivación superficial especialmente buena evitando que el plasma tenga contacto directo con el sustrato, puesto que cuando se produce dicho contacto se pueden producir daños en la superficie del sustrato causados por bombardeo iónico; por el contrario, la ignición del plasma se lleva a cabo en una cámara separada, a partir de la cual los radicales se pueden dirigir seguidamente hacia la superficie del sustrato. Esta variante procedimental se designa como "ALD asistida por plasma remoto" y se describe, por ejemplo, en el documento US 7.410.671.

De manera alternativa, la capa delgada 3 de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se puede depositar también mediante ALD térmica tal como lo describen en la bibliografía M. Ritala et al., Atomic layer deposition of oxide thin films with metal alkoxides as oxygen sources, *Science* 288, 319-321 (2000).

A continuación, la capa delgada 3 de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , depositada sobre la lámina de silicio, se recubre en un reactor de PECVD con una capa delgada 5 de óxido de silicio, en el marco de un proceso continuo de alta velocidad de recubrimiento. La temperatura de recubrimiento se encuentra en este caso en un intervalo entre temperatura ambiente y  $450^\circ\text{C}$ . Los gases utilizados con  $\text{SiH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ .

En este contexto, el  $\text{N}_2\text{O}$  se puede sustituir también por  $\text{CO}_2$ . Además, es posible depositar una capa de nitruro de silicio mediante el intercambio de  $\text{N}_2\text{O}$  por  $\text{NH}_4$ , o depositar una capa de carburo de silicio mediante el intercambio de  $\text{N}_2\text{O}$  por  $\text{CH}_4$ . Si la deposición se produce a una temperatura menor que  $400^\circ\text{C}$ , un posterior recocido durante aprox. 30 min dentro de un intervalo de temperaturas de 400 a  $500^\circ\text{C}$  puede tener una influencia positiva para alcanzar la calidad óptima de pasivación del sistema de capas.

Por último, se aplican los contactos metálicos 7,9 sobre la cara anterior y la cara posterior del sustrato de silicio recubierto, por ejemplo por medio de serigrafía, y se someten a recocido en un horno en continuo a aproximadamente  $700$  a  $900^\circ\text{C}$ .

En resumen, y expresado con otras palabras, se pueden describir aspectos de la presente invención de la forma siguiente:

Se propone un procedimiento para formar una capa apilada en el que la capa apilada está compuesta por dos capas parciales:

- i. una capa fina muy delgada (por ejemplo,  $\leq 10$  nm) de óxido de aluminio, que se forma por deposición química de vapor secuencial (Deposición de Capa Atómica, ALD) a partir de un gas que contiene aluminio (por ejemplo, trimetilaluminio  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ ), así como

- ii. una capa fina más gruesa (> 30 nm) que contiene óxido de silicio, que se puede formar, por ejemplo, por deposición química de vapor asistida por plasma (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*, PECVD) a partir de los gases silano ( $\text{SiH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

5 La segunda capa puede ser, en lugar de una capa fina de óxido de silicio, una capa fina que contenga nitruro de silicio, formada por PECVD a partir de los gases silano ( $\text{SiH}_4$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), o una capa fina que contenga carburo de silicio, formada a partir de los gases silano ( $\text{SiH}_4$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ). Las capas finas de óxido de silicio, nitruro de silicio o carburo de silicio, depositadas mediante PECVD, tienen un muy alto contenido de hidrógeno (por ejemplo, > 5% en átomos) y, por lo tanto, en la etapa de recocido actúan como fuente de hidrógeno en el intervalo de temperaturas de 700 a 900°C. El hidrógeno difunde a través de la capa ultrafina de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y pasiva los enlaces insaturados (“*dangling bonds*”) de la interfaz de  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , lo cual conduce a una muy buena pasivación superficial tras la etapa de recocido. Mediante la combinación según la invención de los dos procedimientos de deposición ALD y PECVD es posible generar una capa de pasivación altamente apropiada y estable al recocido para células solares.

10

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la fabricación de una célula solar de silicio, que comprende las etapas siguientes:
- Preparación de un sustrato de silicio (1);
- 5 Deposición de una primera capa dieléctrica (3) sobre una superficie del sustrato de silicio mediante deposición química de vapor secuencial, en donde la primera capa dieléctrica tiene óxido de aluminio; caracterizado por
- Deposición de una segunda capa dieléctrica (5) sobre una superficie de la primera capa dieléctrica (3), en donde los materiales de las primera y segunda capas dieléctricas son diferentes y en donde en la segunda capa dieléctrica incluye hidrógeno.
- 10 2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que para la deposición de la primera capa dieléctrica, el sustrato de silicio se somete a un tratamiento inicial con un compuesto que contiene aluminio y que posee al menos alguno de los componentes  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{Al}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}$  y  $(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)\text{N}:\text{AlH}_3$ , de manera que sobre la superficie del sustrato de silicio se deposita una capa que contiene aluminio, y en donde, a continuación, la capa que contiene aluminio se oxida en una atmósfera que contiene oxígeno.
- 15 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 o 2, en el que la segunda capa dieléctrica contiene un material seleccionado del grupo que comprende nitruro de silicio, óxido de silicio y carburo de silicio.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la segunda capa dieléctrica se fabrica por medio de un procedimiento PECVD.
- 20 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la segunda capa dieléctrica se deposita de tal manera que tiene una fracción de hidrógeno de al menos 1% en átomos, preferiblemente de al menos 2% en átomos y, más preferiblemente, de al menos 5% en átomos.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que tras la deposición de la segunda capa dieléctrica, se lleva a cabo una etapa a temperatura elevada, a temperaturas mayores que  $600^\circ\text{C}$ , preferiblemente mayores que  $700^\circ\text{C}$  y, más preferiblemente, mayores que  $800^\circ\text{C}$ .
- 25 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la primera capa dieléctrica se deposita con un grosor menor que 50 nm, preferiblemente menor que 30 nm y, más preferiblemente, menor que 10 nm.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que la segunda capa dieléctrica se deposita con un grosor mayor que 50 nm, preferiblemente mayor que 100 nm y, más preferiblemente, mayor que 150 nm.
9. Célula solar que posee:
- un sustrato de silicio (1);
- 30 una primera capa dieléctrica (3) que tiene óxido de aluminio, sobre una superficie del sustrato de silicio (1);
- caracterizada por
- una segunda capa dieléctrica (5) sobre una superficie de la primera capa dieléctrica (3),
- en donde los materiales de las primera y segunda capas dieléctricas son diferentes, y en donde la segunda capa dieléctrica incluye hidrógeno.
- 35 10. Célula solar según la reivindicación 9, en la que la primera capa dieléctrica se deposita por deposición química de vapor secuencial, de modo que es esencialmente compacta a nivel atómico.
11. Célula solar según las reivindicaciones 9 o 10, en la que la segunda capa dieléctrica contiene un material seleccionado del grupo que comprende nitruro de silicio, óxido de silicio y carburo de silicio.
- 40 12. Célula solar según una de las reivindicaciones 9 a 11, en la que la primera capa dieléctrica tiene un grosor menor que 50 nm, preferiblemente menor que 30 nm y, más preferiblemente, menor que 10 nm.
13. Célula solar según una de las reivindicaciones 9 a 12, en la que la segunda capa dieléctrica tiene un grosor mayor que 50 nm, preferiblemente mayor que 100 nm y, más preferiblemente, mayor que 150 nm.

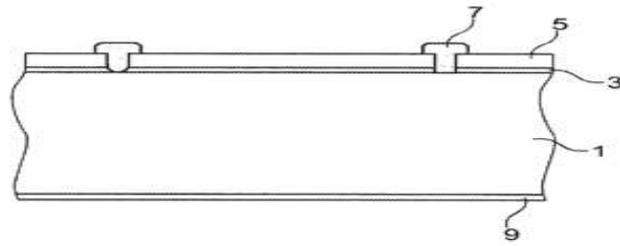


Fig. 1