

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 422 256**

51 Int. Cl.:

H01L 31/18 (2006.01)

H01L 31/0256 (2006.01)

H01L 31/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.11.2008** **E 08846509 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2013** **EP 2208238**

54 Título: **Celdas solares de bajo coste y métodos para su producción**

30 Prioridad:

09.11.2007 US 986996 P

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

10.09.2013

73 Titular/es:

**SUNPREME INC. (100.0%)
615 PALOMAR AVENUE
SUNNYVALE, CA 94085, US**

72 Inventor/es:

ASHOK, SINHA

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 422 256 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

Celdas solares de bajo coste y métodos para su producción.

Solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica el beneficio de prioridad de la solicitud provisional de los Estados Unidos número de serie 60/986/996, presentada el 9 de Noviembre de 2007, cuya divulgación se incorpora aquí en su totalidad.

Antecedentes

1. Campo de la invención

10 La presente invención se relaciona con celdas fotovoltaicas solares y, más específicamente, con métodos para manufacturar materiales base de bajo coste para tales celdas y métodos para manufacturar celdas de bajo coste y la estructura del dispositivo de celdas resultante.

2. Técnica relacionada

15 La generación de energía convencional a partir de combustibles fósiles representa el reto más grande desde la última edad de hielo para el bienestar del planeta. Entre todas las fuentes de energía alternativas, próximas a la conservación, las celdas fotovoltaicas solares son sin duda las más limpias, ubicuas y potencialmente más
 20 confiables, alternativa en comparación con otras metodologías tales como etanol, potencia hídrica y potencia del viento. El concepto es una unión p-n en estado sólido sencilla que convierte la luz en un pequeño voltaje dc. Las celdas pueden ser apiladas para cargar una batería de automóvil o alimentar una red de energía a través de un inversor DC/AC. De los diversos materiales semiconductores disponibles para este propósito, el silicio comanda el 99% de la producción de celdas solares fotovoltaicas. En comparación con otras celdas solares basadas en
 25 compuestos semiconductores, las cuales tienen eficiencias de conversión más altas, especialmente celdas de área pequeña, el silicio es mucho más abundante en la corteza terrestre y proporciona confiabilidad probada de hasta 30 años en un techo golpeado por el tiempo en diversos climas alrededor del mundo. Además, las técnicas de fabricación comercial a gran escala que utilizan silicio han sido empleadas durante decenas de años y están bien desarrolladas y entendidas. Consecuentemente, el silicio probablemente seguirá siendo el material de base dominante para las celdas solares.

30 Sin embargo, a pesar de los más de 30 años de trabajo, las celdas solares con base en silicio no se han desarrollado hasta su potencial para generación de energía a gran escala. Una barrera principal para tal aceptación es el coste asociado con la fabricación de celdas solares, y especialmente el coste de la materia prima base (sustratos) utilizado para fabricar las celdas solares. El material representa más de la mitad del coste de la
 35 fabricación de la celda solar, en comparación con solo aproximadamente 10% en el caso de los microchips semiconductores, irónicamente, debido a la enorme demanda y a los altos costes de producción, el precio del material de silicio para celdas solares actualmente se incrementa en conjunción con el precio del petróleo. Por ejemplo, durante los últimos pocos años, el costo por kg de material de polisilicio utilizado para producir galletas de silicio solar se ha incrementado dramáticamente, y para las celdas solares de película fina el coste del gas silano
 40 utilizado para depositar la película así como el del gas NF₃ para limpiar un reactor después de la deposición se han incrementado de la misma forma. En contraste, los precios de chips semiconductores (esto es, unidad de memoria o función lógica) han disminuido exponencialmente durante los últimos 30 años, siguiendo la ley de Moore. Esta diferencia en las curvas de aprendizaje puede estar relacionada con las diferencias principales en la tecnología y las contribuciones de coste relativa de los materiales versus el proceso y el diseño para incluso densidad de dispositivo
 45 creciente por unidad de área.

De acuerdo con el estado actual de la técnica, la producción de celdas solares basadas en polisilicio se hace en tres etapas principales. Primero, grandes cantidades de galletas de silicio son producidas para el sustrato – típicamente un millón de galletas por mes para una fabrica de capacidad modesta de 25 MW. Segundo, estas galletas son
 50 procesadas en celdas solares formando una unión p-n y metalización. Tercero, estas galletas luego son “empacadas” en un módulo para instalación en las instalaciones del usuario.

Las galletas de silicio base para las celdas solares se hacen descomponiendo térmicamente gases nocivos que contienen Si-H-Cl, tales como diclorosilano y triclorosilano, para producir polisilicio de alta pureza, en general denominado como el de nueve nueves, esto es, 99.9999999% puro. Estos gases son tanto inflamables como
 55 tóxicos. Sin embargo, debido a los riesgos ambientales y de salud en la gasificación del silicio, operan pocas fábricas en el mundo, por lo cual se produce un cuello de botella para la industria de semiconductores y celdas solares. Fábricas para gasificación de silicio recientemente propuestas enfrentan la resistencia de las comunidades locales con base en preocupaciones ambientales y de seguridad. Estas fábricas también requieren grandes

inversiones de capital y largos tiempos de desarrollo. Consecuentemente, siempre hay un desbalance entre la demanda y el suministro de galletas de silicio desnudo.

5 El silicio puro (llamado polisilicio, después de la desgasificación y descomposición de los compuestos basados en silano) se provee en general en la forma de pellas apropiadas para aplicaciones de semiconductores y celdas solares. Las pellas son entonces fundidas como utilizando una semilla, un bolo de cristal individual o halando cintas multicristalinas. Alternativamente, el polisilicio es fundido en forma cilíndrica. El cilindro halado es cortado con una sierra, conformado el pulido en galletas redondas de 5 - 6 pulgadas, las cuales después de esto pueden ser cortadas en galletas cuadradas. Se aplica entonces para textura un grabado en un agente químico alcalino tal como KOH. Las uniones p-n se forman con difusión en horno de POCl_3 . La pasivación del recubrimiento antirreflectiva se aplica entonces con PECVD SiON . Se aplica la pasta de impresión de plata a la superficie tipo n y se aplica pasta de aluminio en la superficie tipo p. La pasta es entonces sinterizada para formar contactos eléctricos. Finalmente, las celdas son probadas y distribuidas de acuerdo con sus características como por ejemplo, su curva I-V.

15 Los procesos anteriores son bien conocidos y han sido practicados en la industria por muchos años. Sin embargo, mientras que en los semiconductores la mayor parte del coste (esto es, el valor) está en el proceso que transforma la galleta de silicio pulida en un circuito integrado funcional, en la fabricación de celdas solares el proceso que transforma la galleta pulida en una celda solar funcional es menos costoso que el proceso para producir las galletas pulidas en sí mismas. Esto es, en términos comerciales, el proceso de transformar una galleta de silicio en celdas solares no es una etapa de valor agregado alto en la cadena completa de la fabricación de paneles solares. Por lo tanto, cualquier mejoramiento o reducción en los costes para la manufactura de las galletas de partida – en oposición a la mejora de la tecnología de fabricación de celdas - permitiría una reducción drástica en la reducción en el precio de los paneles solares terminados. El documento US 2003/203547 divulga una estructura de celda solar.

20 Para superar el problema de la materia prima de silicio para las celdas solares, se han hecho esfuerzos agresivos junto con dos metodologías principales para reducir la cantidad de silicio consumido por vatio de la celda solar. Estos son:

25 1. Reducción del espesor de la galleta del estándar de 500 μm a aproximadamente 300 μm . Esta metodología está limitada por la resistencia de las galletas, las cuales tienden a romperse durante el transporte a alta velocidad a través del equipo de procesamiento.

30 2. El uso de películas delgadas de diversos materiales para celdas solares tales como silicio, CdTe, CuInGaSe , típicamente sobre vidrio y otros sustratos más baratos. Para permitir la irradiación de luz sobre la celda solar, uno de los electrodos está hecho de un sólido transparente conductor (CTO), tal como InSnOx o ZnO_2 .

35 Entre diversos materiales para celdas solares de película delgada, de nuevo el silicio es el material más efectivo en costes. En la estructura solar, el espesor se reduce a aproximadamente 1 - 10 μm desde 300 - 500 μm para galletas. De estos 1 - 10 μm , la mayor parte del espesor de la película depositada consiste típicamente de una capa amorfa intrínseca no dopada de un polímero se Si-H, abreviada como capa ia-Si:H. Esta capa ia-Si:H es colocada en sándwich entre las películas dopadas tipo n a-Si:H tipo p a-Si:H, provee el volumen necesario para la absorción de la luz solar incidente, por lo tanto se crean los pares electrón-orificio. Estos portadores difunden entonces los electrodos n y p de la celda solar para crear un voltaje fotovoltaico y corriente para la generación de energía. Sin embargo, debido a que las longitudes de onda infrarrojas del espectro solar tienen profundidades de transmisión largas a través del silicio, se pierde una cantidad significativa de la radiación solar, reduciendo por lo tanto la eficiencia de la conversión fotovoltaica. Esto es, la eficiencia cuántica de la conversión se pierde, particularmente en las longitudes de onda más largas del rango infrarrojo. Otra limitación intrínseca de la estructura de película es que la minoría de las longitudes de difusión del portador están limitadas por el espesor de la película a mucho menos de 10 μm . Esta es una cifra de merito para predecir la eficiencia de la celda solar del producto terminado. Para celdas solares basadas en silicio cristalino puro, las longitudes de difusión típicamente son de 80 μm .

45 Hay otras limitaciones fundamentales para las estructuras de celdas solares de película delgada, las cuales hasta ahora han limitado la producción de celdas solares de película delgada aproximadamente 5% del mercado de paneles solares total, en comparación con el 80% para las celdas solares basadas en galletas de silicio. Algunas de estas limitaciones son como sigue:

50 1. El coste del gas silano para depositar las películas de a-Si:H ha estado creciendo rápidamente por la misma razón que el precio del polisilicio, a saber la escasez en capacidades de este gas extremadamente inflamable. Además del silano, los reactores de CVD potenciados con plasma utilizados para producir las películas solares delgadas necesitan grandes cantidades del gas NF_3 especialmente para llevar a cabo la limpieza in situ con plasma del reactor PECVD para asegurar un tiempo de recuperación alto del equipo de producción.

55 2. Con la eficiencia en la conversión fotovoltaica en la celda solar de silicio de película delgada es lenta, algunas veces menor de la mitad de las celdas solares basadas en galletas de silicio.

3. El equipo capital necesario para instalar una fábrica de celdas solares de película delgada, alrededor de 50 millones de dólares, es casi 10 veces que el de una fábrica de celdas solares con base en galletas de silicio de rendimiento de energía comparable. El coste de capital está impulsado principalmente por los reactores CVD de plasma basados en vacío utilizados para depositar las películas de pasivación de a-Si:H y SiN, y los reactores de PVD basados en vacío utilizados para depositar las películas de CTO.

Como puede entenderse de lo anterior, la industria de las celdas solares se ha bifurcado en dos campos: el campo de las celdas solares basadas en galletas de silicio que busca utilizar galletas de silicio altamente puras para tener alta eficiencia en las celdas, y el campo de las películas delgadas que elude el uso de sustratos de galleta de silicio con el fin de reducir costes. Consecuentemente, el campo basado en galletas de silicio está restringido por la disponibilidad de las galletas de silicio puro, mientras que el campo de la película delgada está restringido por la presencia de la conversión debido principalmente a la absorción insuficiente de luz en el sustrato de vidrio, así como por coste del gas SiH₄ necesario para producir una capa de absorción relativamente gruesa de silicio hidrogenado intrínseco.

Resumen

El siguiente resumen de la invención se incluye con el fin de proveer un entendimiento básico de algunos aspectos de características de la invención. Este resumen no es una revisión extensa de la invención y como tal no está previsto para identificar particularmente elementos clave o críticos de la invención o para delinear el alcance de la invención. Su único propósito es presentar algunos conceptos de la invención de una forma simplificada como preludio de la descripción más detallada que se presenta más abajo.

Diversas realizaciones de la presente invención presentan métodos para fabricar sustratos de silicio sin la necesidad de llevar a cabo la gasificación del silicio. Consecuentemente, se evitan los costes y los riesgos de salud y ambientales involucrados en la fabricación de silicio del grado de los nueve nueves. Estos sustratos pueden ser usados para la fabricación de celdas solares con una eficiencia que es comparable e incluso sobrepasan a la de las celdas solares de película delgada.

Las características de la invención apuntan a uno o más de los siguientes asuntos críticos que enfrenta la industria de las celdas solares:

a) disponibilidad y costes de material de silicio "con capacidad solar", tanto para galletas como para películas delgadas

b) coste de capital para fábricas de celdas solares

c) coste por vatio de futuras celdas solares

d) escalabilidad del proceso de producción para volúmenes grandes

e) compatibilidad ambiental y confiabilidad por 25 años.

Las características de la invención permiten alcanzar una solución valiosa en la producción en los problemas antes mencionados, entre otros, fabricando una estructura de celdas que capitaliza en la eficiencia de la conversión de las galletas de silicio a granel y los beneficios de las estructuras de celdas de película delgada. De acuerdo con aspectos de la invención, la celda solar se fabrica utilizando galletas de silicio hechas de silicio de grado metalúrgico de coste muy bajo como sustrato, y fabricando una celda solar de película delgada sobre el sustrato. De acuerdo con características de la invención, las celdas se fabrican depositando películas delgadas de espesor muy pequeño (por ejemplo, 10%) en comparación con las celdas solares de película delgada convencionales. Además de reducir el coste tanto del sustrato como del material de película, la estructura propuesta promete una conversión incrementada de ciencia en comparación con las celdas solares de película delgada convencionales. Esto es, utilizando galletas de silicio de grado metalúrgico la fabricación del sustrato se hace menos nociva y más amigable ambientalmente, a la vez que reduce también el coste de los sustratos. Además, la utilización de galletas de silicio de grado metalúrgico como sustrato, hace que la eficiencia de la conversión se incremente en comparación con estructuras de película delgada formadas sobre vidrio.

Breve descripción de los dibujos

Otros aspectos y características de la invención serán evidentes a partir de la gestión detallada, la cual se hace con referencia a los siguientes dibujos. Debería notarse que la descripción detallada de los dibujos proveen diversos ejemplos no limitantes de diversas realizaciones de la invención, la cual está definida por las reivindicaciones anexas.

Los dibujos acompañantes, los cuales se incorporan y constituyen una parte de esta especificación, ejemplifican las realizaciones de la presente invención y, junto con la descripción, sirven para explicar e ilustrar los principios de la invención. Los dibujos están previstos para ilustrar características de las realizaciones de ejemplo de una manera diagramática. Los dibujos no están previstos para representar cada característica de las realizaciones reales ni dimensiones relativas de los elementos representados, y no están dibujados a escala.

La Figura 1 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención.

La Figura 2 ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención.

La Figura 3 ilustra un proceso de acuerdo con otra realización de la invención.

La Figura 4 ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención.

10 La Figura 5 ilustra otra realización de la invención.

La Figura 6 ilustra otra realización de la invención.

La Figura 7 ilustra otra realización de la invención.

La Figura 8 ilustra otra realización de la invención, la cual es similar a la de la Figura 7, excepto por que los dopantes están invertidos.

15 La Figura 9A ilustra un ejemplo de un proceso para fabricar un sustrato listo para celdas solares, en general denominado aquí como SmartSi™.

La Figura 9B ilustra un ejemplo de un proceso que puede ser utilizado para convertir una galleta SmartSi en una celda solar SmartSi PV.

La Figura 10 ilustra una celda solar completa, fabricada de acuerdo con las realizaciones de la invención.

20 Las Figuras 11A y 11B ilustran realizaciones para celdas solares SmartSi de uniones múltiples.

Las Figuras 12A y 12B ilustran realizaciones para celdas solares SmartSi de uniones múltiples con uniones de difusión.

Las Figuras 13A y 13B ilustran realizaciones de una disposición simétrica de sustrato de silicio metalúrgico en sándwich entre películas delgadas de i-Si/Si:H dopado en ambos lados.

25 Descripción detallada

Las realizaciones de la invención presente proveen métodos para manufacturar celdas solares a costes reducidos, a la vez que se reducen los riesgos para la salud y ambientales involucrados en la manufactura de celdas solares convencionales. Como se anotó en el sitio en la red de Solar Energy del US Department of Energy: "para ser útil como material semiconductor en celdas solares como el silicio debe ser refinado hasta una pureza de 99.9999%" (disponible en <http://www1.eere.energy.gov/solar/silicon.html>). Esto se denomina en general 6N, o silicio grado solar, SoG Si. En contraste con el deseo convencional, la invención presente provee métodos para producir sustratos y celdas solares utilizando silicio grado metalúrgico, MG Si, de pureza de 3N-SN. Diversas realizaciones divulgadas combinan los beneficios de las celdas solares con base en silicio con aquellas de las celdas solares basadas en película delgada para proveer celdas que tienen una eficiencia de conversión de aproximadamente 14%.

30 La Figura 1 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención. En la Figura 1, el proceso comienza en la etapa 100 produciendo pellas de silicio metalúrgico o material de partida reduciendo cuarzo con grafito. El nivel de pureza obtenido puede ser de 99.9% o 99.999% de pureza es decir pureza de aproximadamente tres números hasta aproximadamente cinco nueves. De manera notable, el cuarzo está fácilmente disponible a bajo coste. Además, este proceso elude la etapa de gasificación, evitando por lo tanto el proceso nocivo de gasificación y producción de silano.

40 En la siguiente etapa 200 el polvo es fundido en moldes cuadrados o redondos de 5 pulgadas, 6 pulgadas, 8 pulgadas etc., y el líquido se deja solidificar lentamente en un cilindro con grandes granos de silicio. Opcionalmente, el cilindro solidificado es re-fundido y luego solidificado en secciones, de tal manera que se muevan las impurezas hacia un lado del cilindro. En ese proceso la velocidad de enfriamiento y el gradiente de temperatura se controla en

5 dirección horizontal de tal manera que haga que las impurezas se muevan a la superficie del cilindro y en la dirección vertical para hacer que las impurezas se concentren en las inmediaciones de los grados de silicio. En la etapa 200 el silicio fundido se dopa opcionalmente con una pequeña cantidad de boro para producir p-Si con $1E17-1E18 \text{ cm}^{-3}$ de boro. Alternativamente puede halarse un cristal individual tipo p de la fusión usando el proceso convencional Czochralsky. En la etapa 300 la superficie de los cilindros sólidos es maquinada hasta un estado de pulimiento. En la etapa 400 el cilindro es cortado en galletas de Si, aproximadamente de 20 mils, esto es, 0.020 pulgadas de espesor, usando, por ejemplo, una sierra de diamante o alambre, y luego la superficie es pulida en un lado, mientras que el otro lado es grabado químicamente hasta un acabado suave. El raspado puede ser recolectado para reutilización en el fundido. Una vez la fabricación de la celda solar está terminada (con todos los procesos descritos más abajo terminados) si se desea la galleta puede ser adelgazada adicionalmente de tal forma que la capa p tenga aproximadamente 0.007 pulgadas.

15 La Figura 2 ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención. El proceso comienza con una galleta DSi 200, hecha de silicio "sucio", esto es, silicio metalúrgico de los 3 - 5 nueves obtenido, por ejemplo, mediante el proceso de la realización de la Figura 1. La galleta 200 se expone a POCl_3 a aproximadamente 200°C , utilizando un horno convencional, de tal manera que se provea una capa n sobre la parte superior de la galleta 210 con una concentración de $1.0e16$ átomos $/\text{cm}^3$. Luego se utiliza la cámara de plasma para proveer la capa 220 de SiN sobre la parte superior de la capa 210 tipo n. Luego se utiliza un proceso con POCl_3 a temperatura más alta de 900°C para extraer impurezas de la capa 200 de DSi hacia la capa de vidrio fundido 230. Esto incrementa la pureza de la capa 200 tipo p especialmente alrededor de la unión previamente formada. La capa 230 entonces es dividida de nuevo, por ejemplo, usando retrograbación de un proceso de planarización químico-mecánico (CMP). Esto retira la capa 230 con sus impurezas que fueron extraídas de la capa 200. Finalmente los contactos de plata 240 son colocados sobre la capa 220 dopada con n y se provee un electrodo 250 de aluminio sobre la capa 200. La estructura completa es entonces fusionada alrededor de 700°C para permitir que los electrodos de plata hagan un contacto Óhmico de baja resistencia a la capa 210 de tipo n y el electrodo 250 de aluminio a la capa 200 de tipo p.

25 La Figura 3 ilustra un proceso de acuerdo con otra realización de la invención. El proceso se inicia en la etapa 100 sublimando una capa de 2 μm de espesor de silicio amorfo a partir de un crisol que contiene silicio metalúrgico. Esto debería hacerse a $1000 - 1200^\circ\text{C}$ por debajo del punto de fusión del silicio, en un vacío con fondo Ar de aproximadamente $10E-6$ torr. Esta etapa define la capa de unión activa, relativamente pura puesto que cualquier impureza de carbono metálica no sublima a 1200°C . También, cantidades pequeñas de oxígeno residual en un ambiente de fondo de argón ayudan a catalizar la sublimación a través de la formación de una pequeña cantidad de monóxido de Si sobre la superficie del crisol. En la etapa 200 la galleta se expone a un gas que contiene P, tal como POCl_3 o PBr_3 en un ambiente de O_2 más N_2 o Ar. Esta etapa forma la unión p-n dopando la superficie tipo n permitiendo la difusión hacia fuera de B desde el sustrato "sucio" hacia la etapa de Si limpia sublimada.

35 El lado posterior de la galleta es grabado entonces o sometido a CMP (pulido químicamente-mecánicamente) en la etapa 300 para retirar cualquier vidrio dopado con fósforo. A continuación, en la etapa 400, se utiliza plasma para depositar el recubrimiento antirreflexivo de SiN sobre el lado frontal (tipo n) de la galleta. En la etapa 500 se forman contactos, por ejemplo, puede utilizarse láser para perforar orificios para los contactos. En la etapa 600 se hacen los electrodos conductores, por ejemplo, puede utilizarse pantalla de seda u otra metodología para depositar pasta metálica tanto en el lado frontal como en el posterior para definir el electrodo. La galleta se sinteriza entonces a $600^\circ - 700^\circ\text{C}$ para formar los contactos. La temperatura más alta se utiliza para permitir que la plata penetre a través de la capa completa de SiN en el caso donde se deposita plata con pantalla de seda en el recubrimiento antirreflexivo de SiN sin ningún orificio de contacto perforado con láser a través de esta capa.

45 La Figura 4 ilustra un proceso de acuerdo con una realización de la invención. El proceso se inicia con una galleta 400 de silicio tipo p sucia. Luego se usa un proceso de evaporación para generar una capa de SiOx evaporada 410 sobre la galleta 400. Se provee una capa 420 tipo n (esto puede hacerse a través de la difusión parcial hacia la capa 410, por deposición de la capa Si dopada con fósforo, o por otros medios aceptables) sobre la capa 410 de SiOx. La capa 410 se sella entonces utilizando la capa 430, y se utiliza un obtenedor para halar las impurezas hacia la parte inferior 440 del agua 400 para proveer una capa 400 de pureza potenciada. La parte 440 inferior puede ser retirada entonces antes de depositar las líneas conductoras. De acuerdo con aún otra realización, una galleta de silicio sucio se graba primero para proveer textura sobre su superficie superior. La galleta se trata entonces en un horno de POCl_3 para formar la unión p-n de la galleta. La superficie superior de la galleta se cubre con una capa de SiN depositada por plasma. La galleta se reexpone al POCl_3 para extraer todas las impurezas de metal hacia el lado posterior, y endurecer la unión frente a fugas. El vidrio sobre el lado posterior de la galleta se retira entonces por ejemplo, por grabado del lado posterior. Los agujeros de contacto se forman entonces utilizando, por ejemplo, perforación por láser o grabado por contacto. Los contactos metálicos se forman entonces utilizando tecnología convencional. Aún más, se forma directamente la pasta de plata por pantalla directamente sobre la parte superior de la capa de nitruro depositada por plasma y luego fusionada a aproximadamente 700°C para difundir la plata en la capa dopada con fósforo cerca de la parte superior de la galleta, sin el uso de ningún orificio de contacto.

De manera notable, una vez que se forma la unión p-n de Si metalúrgico, tiene bastantes fugas debido a las

impurezas metálicas en la interfaz de la unión. Un efecto de POCl_3 es formar la capa n para halar las impurezas cerca de la superficie donde se forma la unión. Por lo tanto, esta realización se lleva a cabo una segunda etapa con POCl_3 , a la vez que se protege el lado frontal activo con SiN , con el fin de retirar las impurezas metálicas de la unión frontal hacia el lado posterior de la galleta. Los metales pueden acumularse en un vidrio fundido a baja temperatura sobre el lado posterior de la galleta, y luego retirados por grabado químico o CMP.

En vez de un sustrato de silicio, se puede utilizar un sustrato hecho de acero inoxidable o vidrio recubierto con Si sublimado, y forma una unión p-n allí por difusión a partir de un vidrio B, P giratorio. Esto es diferente del silicio PECVD amorfo depositado para las aplicaciones de panel plano de transistores de película delgada en donde las películas sublimadas no tienen ningún nitrógeno atrapado. Consecuentemente, no deberían degradarse en las etapas de difusión a alta temperatura subsiguientes. Las películas de PECVD pierden eficiencia con el tiempo, probablemente debido a cambios en la composición asociados con la desorción de H.

La Figura 5 ilustra otra realización de la invención. El material de partida para la realización de la Figura 5 es una galleta de silicio metalúrgico multicristalina de bajo coste de pureza aproximadamente de cuatro nueves hasta cinco nueves, esto es, 99.99% a 99.999% hecho por fundición seguida por enfriamiento lento. El silicio metalúrgico se hace simplemente a partir de una reacción química basada en un horno de cuarzo (SiO_2) con grafito (C) ambos encontrados en minas en diversas partes del mundo. Estos dos materiales son esencialmente formas más puras de la arena y el carbón. El grafito podría ser sustituido con otro C puro que contiene subproductos del petróleo o material vegetal orgánico. El polvo de silicio metalúrgico se funde, se agrega una cantidad medida de B al fundido según sea necesario para producir aproximadamente 5×10^{17} átomos cm^{-3} de concentración dopante tipo p. El fundido se enfría lentamente para producir lingotes en forma cilíndrica que contienen granos multicristalinos de silicio con aproximadamente 10 ppm de impurezas tales como Cr, Fe, Ni, Mn y C. El proceso de enfriamiento se ajusta de tal manera que haga que las impurezas se distribuyan en aglomerados atómicos llamados precipitados. Tienen a ser menos activos eléctricamente que los átomos distribuidos homogéneamente, los cuales típicamente ocupan sitios de sustitución eléctricamente activos sobre la red cristalina de silicio. Las impurezas de sustitución actúan como trampas o centros de recombinación de orificios de electrones, lo cual se considera degrada la eficiencia de compresión fotovoltaica de la celda solar, reduciendo la longitud de difusión de los portadores de carga en la capa de absorción de luz. La longitud de difusión puede ser estimada a través de métodos físicos bien conocidos de prueba de la eficiencia cuántica de la conversión de la luz en portadores de carga como función de la longitud de onda de la luz. El material de fundición, el lingote, es maquinado en cilindros más pequeños, cerrado para formar galletas, grabado para retirar daños superficial y luego pulido en uno o en ambos lados de acuerdo con prácticas estándar de la industria. Esta galleta de grado metalúrgico resultante se utiliza como sustrato para producir celdas solares. A diferencia de los sustratos de silicio, utilizados para celdas solares de silicio multicristalinas convencionales, esta realización no requiere el uso de polisilicio de pureza de siete nueves o superior, hechos convencionalmente por reducción de compuestos en fase de vapor de SiH_xCl_y .

El sustrato 500 es sometido a una limpieza predeposición, que involucra típicamente HF 100:1 para retirar cualquier óxido nativo, $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$ para retirar contaminación orgánica y luego HCl para retirar cualquier contaminante metálico. Luego se recubre con una capa muy delgada (10 - 1000 Å), típicamente por debajo de 100 Å, 505 de Si:H intrínseco amorfo no dopado en un equipo estándar de PECVD utilizando un plasma generado en SiH_4 y H_2 sin gases dopantes presentes. A continuación, la parte activa de la unión se forma depositando una capa 510 de a-Si:H dopada con n, la cual puede ser ejecutada convenientemente en el mismo aparato, pero con un plasma que contiene PH_3 además de SiH_4 y H_2 . Esto es seguido por capas sucesivas de óxido conductor transparente 520, tal como ZnO_2 o InSnO y, si es necesario, con el recubrimiento 515 antes reflectivo consistente de SiO_xN_y . Estos forman el electrodo superior a través del cual la luz del sol puede ser transmitida hacia la capa absorbente de silicio a granel. Para una eficiencia de recolección de carga adicional, puede formarse una serie de electrodos consistentes típicamente de pasta de plata sobre la capa 520 de óxido conductor transparente. Para un contacto de baja resistencia a la parte posterior de la estructura de la celda, el lado inferior de la galleta se recubre con una capa 525 de Al, bien sea depositada a través de un proceso PVD o una pasta de pantalla de seda que contiene Al, y luego sinterizado para formar un contacto de baja resistencia.

La estructura de celda solar resultante contiene entonces al menos las siguientes características novedosas. Una unión p-n formada depositando una capa n de película delgada de Si:H amorfo sobre una galleta absorbente hecha de una galleta de silicio metalúrgico multicristalina tipo p, que cuesta aproximadamente 10 veces menos que las galletas de silicio convencionales hechas utilizando polisilicio grado solar o semiconductor. Una capa absorbente de luz de silicio multicristalino metalúrgico tipo p de espesor de 250 - 500 μm , hecha por fundición de polvo de silicio metalúrgico con dopante B en vez de utilizar polisilicio de grado solar mucho más costoso. Una capa intermedia opcional de película de Si:H intrínseca (no dopada) es insertada entre el sustrato metalúrgico tipo p y la película a n-Si:H para pasivar la superficie del silicio metalúrgico que típicamente habrá roto (quebrado) enlaces debido a su naturaleza multicristalina y a impurezas en el material, y por lo tanto mejora la eficiencia de conversión fotovoltaica. La capa ARC 515 puede ser omitida para ahorrar costes, y en vez de ello la superficie del silicio grado metalúrgico puede ser sometida a un proceso de generación de aspereza a través de grabado con KOH para exponer (111) facetas en los granos orientados principalmente (100). Esta rugosidad minimiza la reflexión de la luz de tal manera

que la capa de ARC puede ser innecesaria.

La Figura 6 ilustra otra realización de la invención. La realización de la Figura 6 es similar a la de la Figura 5 excepto que se invierte el dopaje. Esto es, la capa 600 absorbente se fabrica como un silicio metalúrgico tipo n. La capa 610 amorfa depositada es de polaridad opuesta, esto es, tipo p para unión.

- 5 La Figura 7 ilustra otra realización de la invención. La realización de la Figura 7 es similar a la de la Figura 5. Sin embargo, en la realización de la Figura 7, se fabrica una estructura opcional consistente de una película 730 de a-Si:H seguida por una película 735 de a-n Si:H antes de fabricar la capa 725 de aluminio de contacto del lado posterior, de tal manera que se incrementa la eficiencia de conversión con una heterounión con una estructura de capa de pasivación intrínseca que contiene una capa de Si-H intrínseca depositada muy delgada seguida por una
- 10 capa Si-H delgada eléctricamente activa de polaridad opuesta a la del sustrato absorbente. En este aspecto, para las realizaciones descritas de la Figura 5 - 8, el orden de fabricación sugerido está indicado para cada capa ilustrada por letras entre paréntesis. La Figura 8 ilustra otra realización de la invención, la cual es similar a la de la Figura 7, excepto que se invierten los dopantes. Esto es, el sustrato es de silicio grado metalúrgico tipo n, la capa 810 de unión es tipo p, y la capa 835 es tipo n.
- 15 Como puede apreciarse, las realizaciones de las Figuras 5 - 8 proveen una celda solar construyendo una unión de película delgada sobre un sustrato de silicio de grado metalúrgico. Esto tiene la ventaja de una mejor absorbancia de la luz debido a las propiedades del silicio metalúrgico, en comparación con las celdas de películas delgada convencionales que tienen una capa absorbente muy delgada. Consecuentemente, la eficiencia en la conversión se incrementa. Por otro lado, el uso de galletas de silicio metalúrgico provee un bajo coste en comparación con las
- 20 galletas de silicio grado solar o semiconductor convencionales. Además, utilizando las galletas de silicio grado metalúrgico como se describe aquí, se reducen los riesgos de salud y ambientales.

25 El intento con relación a la realización de las Figuras 5 - 8 fue separar las tres funciones involucradas en el proceso PV, el cual convierte la luz en electricidad absorbiendo primero la luz en el silicio para crear pares de orificios de electrones y luego crear una corriente portadora en minoría (electrones) sacando ventaja de la brecha de banda en la unión p-n. Normalmente, en un silicio multicristalino o monocristalino con una estructura de unión p-n difusa, ambos procesos suceden simultáneamente. Las longitudes de difusión del portador de minoría, el cual puede variar de 50 a 100 a 300 μm al ir del silicio multicristalino convencional al cristal de Si Czochralsky al silicio refinado en la zona de flotación de cristal sencillo. Las eficiencias de la conversión PV correspondientes son aproximadamente 18%, 22% y 25%. En el otro extremo, la unión sencilla amorfa depositada en celdas solares de película delgada está

30 basada sobre una capa de a-Si:H intermedia, típicamente de aproximadamente 1 μm de espesor, a la capa absorbente. La longitud de difusión está limitada por el espesor de la capa de película delgada hasta aproximadamente 1 μm . La eficiencia de conversión PV correspondiente es disminuida hasta aproximadamente 6%. En las realizaciones de esta invención la longitud de difusión de portador de minoría no está limitado por la película delgada sino más bien está determinado por las características del sustrato de silicio metalúrgico.

35 Ejemplo I

El silicio grado metalúrgico de tres nueves fue producido por fusión inductiva de pellas de silicio de dos nueves en un crisol de grafito de aproximadamente 1.5 m x 1.5 m, y luego enfriando lentamente hasta una forma cilíndrica durante 24 horas. La costra de la superficie rica en carbono fue retirada, y el cilindro fue triturado en granos o pellas. El material resultante contenía tanto B y P, pero generalmente era tipo p con resistividad en el rango de 0.1 - 1

40 ohmcm. El material resultante fue luego fundido en lingotes de silicio grado metalúrgico de aproximadamente 0.5 m x 1 m, con enfriamiento controlado y ajuste de dopaje. Las galletas de silicio grado metalúrgico fueron fabricadas maquinando un núcleo desde 6 pulgadas a partir del lingote, la superficie del cilindro fue suavizada y luego se cortaron galletas de 500 μm de espesor a partir de los cilindros. Una superficie fue pulida mecánicamente, y ambas superficies fueron ligeramente grabadas para revelar la estructura de grano grande poligonal sobre la parte posterior

45 de la galleta. Esto dio como resultado aproximadamente 500 galletas de silicio grado metalúrgico de cuatro nueves y cinco nueves de pureza. Las galletas fueron acumuladas en dos grupos utilizando mediciones con sonda de cuatro puntos - un grupo de mayoría con resistibilidad de 0.3 - 0.5 ohmcm, y el resto a aproximadamente 1 ohmcm. El perfil de composición SIMS de material tanto 4N como 5N fue similar, con niveles de impureza en metales de transición de $1\text{E}14$ átomos/ cm^3 . Las impurezas metálicas fueron típicamente las asociadas con silicio metalúrgico, a saber Fe, Cr, Mn, Co, Ni, Cu. Además, estaba presente un nivel sustancial de carbono a $1\text{E}15$ átomos cm^{-3} .

50

Se usaron muestras de las galletas para fabricar celdas solares. Se utiliza una herramienta PECVD (deposición por vapor químico potenciado por plasma) para depositar películas delgadas de tipo i a-Si:H, tipo p a-Si:H y tipo n a-Si:H usando un plasma rf en SiH_4 , H_2 con gases dopantes apropiados - PH_3 y B_2H_6 . Se utiliza una herramienta de rociado PVD (Deposición por Vapor en Plasma) para depositar aproximadamente 1000 Å de $\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}_z$ para utilizar un óxido conductor transparente para ambos electrodos superior e inferior. Se utiliza un equipo de grabado para grabar

55 aproximadamente mesas de silicio de 10 μm de profundidad para crear diodos aislados del resto de la galleta. Con este proceso, iniciando con una galleta de silicio grado metalúrgico (100 tipo p de 0.1 Ωcm , se creó una heterounión

sencilla con una estructura de capa de pasivación intrínseca con un contacto posterior difundido p+ y se midió para el diodo I-V y la eficiencia cuántica a través del rango espectral. Con una gráfica de $I/QE \lambda$, la longitud de onda, la pendiente provee la longitud de difusión L en μm . La longitud L y I_{Dsat} son predictores bien conocidos de la eficiencia de la conversión de PV. Esta estructura proveyó un I_{Dsat} de 400 mA y una longitud L de 80 μm , las cuales corresponden a una eficiencia de conversión PV de aproximadamente 20%. Una estructura formada sobre una galleta de silicio grado metalúrgico tipo p de 0.4 Ωcm también trabajó bastante bien con una longitud de difusión de portador de minoría (electrones), L_e de 7 μm que corresponde a una eficiencia en conversión PV de 12 - 13%, asumiendo una estructura con una resistencia en serie bien controlada. Una estructura formada sobre una galleta de silicio grado metalúrgico tipo p de 1.0 Ωcm también trabajó bastante bien con una longitud de difusión del portador de minoría (electrones) L_e de 8 μm lo que corresponde a una eficiencia en conversión PV de 14%, asumiendo una estructura con resistencia en serie bien controlada.

Ejemplo II

Se forma una heterounión sencilla con un dispositivo de capa de pasivación intrínseca sobre sustratos de grado metalúrgico de bajo coste depositando un apilamiento de películas Si:H en nanoescala sobre el frente, esto es, el lado del "dispositivo" y una película de a-Si:H dopada de manera opuesta en el lado posterior de "contacto". Los sustratos de grado metalúrgico obvian la necesidad y costes de adelgazar agresivamente el sustrato de 500 a 250 μm como se hace para los sustratos de Si cristalino. Las galletas más gruesas proveen un manejo más robusto en líneas de proceso automatizadas. Este material evita el coste, tiempo de ciclo y complejidad de los procesos de gasificación, solidificación, fusión y extracción basados en polisilicio, puesto que el dispositivo activo es creado por una película delgada de Si:H justo afuera de la superficie de los sustratos grado metalúrgico que son pasivadas mediante una película de a-Si:H intrínseca a nanoescala.

Los sustratos grado metalúrgico pueden formarse en tamaños estándar, por ejemplo, 6 pulgadas, 8 pulgadas, 12 pulgadas, los cuales pueden ser procesados en un equipo de procesamiento estándar de semiconductores PECVD. En contraste, las celdas solares basadas en películas delgadas convencionales se crean sobre un área grande (generalmente 4 x 6 pies o 6 x 7 pies) de vidrio, lo que requiere cámaras especialmente construidas que tengan un volumen interno grande, lo que causa dificultades en el bombeo a baja presión y produce desperdicio en los gases reactivos utilizados para formar las capas de película delgada. Consecuentemente, estos reactores de PECVD son costosos para su compra y costosos para su operación debido a su alto coste de consumibles (por ejemplo, gases reactivos residuales). El volumen interno alto de estas cámaras construidas especialmente también posee dificultades y costes de mantenimiento. Por el contrario, la formación de película delgada sobre galletas de tamaño estándar puede hacerse en reactores estándar que tienen un volumen interno pequeño, de tal manera que la operación y los asuntos de mantenimiento se minimizan. La estructura del dispositivo de película delgada resultante sobre el sustrato de silicio metalúrgico tiene una eficiencia PV que es aproximadamente dos veces mayor a la de las celdas solares de película delgada gracias a longitudes de difusión del portador de minoría un orden de magnitud más largo en el sustrato de silicio metalúrgico.

Ejemplo III

La Figura 9A ilustra un ejemplo de un proceso para fabricar un sustrato listo para celda solar, generalmente denominado aquí como SmartSi™. La etapa 900 se funde y reduce cuarzo grado metalúrgico en una celda electrónica que contiene un electrodo de grafito y luego se deja enfriar y solidificar para proveer un lingote de aproximadamente dos nueves de silicio metalúrgico. El lingote es roto en pellas, tratado en agentes químicos para eliminar impurezas de la superficie y luego fundido en lingotes. El lingote es entonces raspado de su corteza y roto en trozos de silicio metalúrgico de tres a cuatro nueves. Los trozos resultantes son clasificados de acuerdo con su resistibilidad.

Los trozos clasificados de silicio MG son fundidos en la etapa 915. El fundido se deja solidificar en forma de un lingote, el cual es maquinado en la etapa 920, cortado en galletas y las galletas son pulidas. En la etapa 925 se utiliza una cámara PECVD para formar una capa delgada de silicio amorfo intrínseco, i-a-Si:H, para pasivar la superficie del sustrato MG-Si. En la etapa 930 se utiliza una cámara PECVD para formar una capa tipo n, n-a-Si:H sobre la capa de pasivación. En este punto, se ha creado una galleta 935 "SmartSi" que permite formar una industria de celdas solares PV casi en cualquier lugar del mundo con una pequeña inversión, un número relativamente pequeño de máquinas simples y con muy poco conocimiento técnico. Esto es, como puede apreciarse, todo lo que se requiere para convertir la galleta SmartSi en una celda solar es hacer los contactos frontales y posteriores, y tal vez una capa antirreflectiva y protectora. Esto puede hacerse fácilmente utilizando tecnología de pantalla de seda o de impresión corriente. También como lo muestra la convocatoria, puede llevarse a cabo otra etapa de PECVD 930' para formar una capa 935' tipo p en el lado posterior del sustrato, de tal manera que se mejore el contacto con la capa conductora que seguiría.

La Figura 9B ilustra un ejemplo de un proceso que puede ser usado para convertir una galleta SmartSi en una celda solar Smart-Si PV. Como se notó anteriormente, lo que se requiere es formar contactos en la parte posterior y frontal

del sustrato SmartSi. En cuanto al frente, un método convencional es formar una rejilla metálica conductiva. La metodología usual es diseñar rejillas con muchos dedos delgados conductores que se distribuyen a cada parte de la superficie de la celda. Los dedos de la rejilla deben ser lo suficientemente anchos para conducir bien (con baja resistencia), pero lo suficientemente estrechos de tal manera que no bloqueen mucha de la luz entrante. Esta clase de rejillas mantiene bajas las pérdidas por resistencia a la vez que ensombrecen solamente aproximadamente 3% a 5% de la superficie de la celda. Las rejillas de la superficie superior pueden ser hechas de, por ejemplo, aluminio, plata o metal molibdeno, depositando vapores metálicos sobre una celda a través de una mascarilla, pintándolos a través de un método de impresión de pantalla, o por el uso de la fotolitografía, la cual provee la calidad más alta, pero tiene el coste más grande.

Una alternativa a los contactos de rejilla metálica es una capa de óxido conductor transparente (TCO), tales como óxido de estaño (SnO_2), u óxido de indio y estaño, generalmente conocido como ITO. La ventaja de los TCO es que son casi visibles a la luz entrante y forman un buen puente desde el material semiconductor al circuito eléctrico externo. La realización muestra en la Figura 9B utiliza TCO como los contactos del frente de las celdas. En la etapa 940 la capa de TCO se forma utilizando el proceso CVD. En la etapa 945 los contactos frontales son metalizados utilizando, por ejemplo, una pasta metálica trazada sobre la superficie frontal utilizando una pantalla de seda, impresión, etc. En la etapa 950 el contacto posterior es metalizado para formar electrodos colectores utilizando, por ejemplo, pasta metálica (por ejemplo pasta de plata) trazada sobre la superficie posterior utilizando pantalla de seda, impresión, etc., o asperjando aluminio u otro metal sobre la parte posterior del sustrato. Cuando se utiliza pasta para metalizar el contacto frontal es deseable sinterizar la galleta con el fin de formar un buen contacto óhmico, como se muestra en la etapa 955. En la etapa 960 las galletas son cortadas hasta la forma deseada, por ejemplo, si se llevó a cabo un procesamiento utilizando galletas circulares, en esta etapa pueden ser cortadas en cuadrados. Las galletas son luego clasificadas de acuerdo con la eficiencia en la conversión, de tal manera que de cómo resultado celdas 970 SmartSi PV.

En todas las realizaciones anteriormente descritas, antes de formar cualquiera de las capas el sustrato de MG Si puede ser texturizado en uno o en ambos lado, por ejemplo, grabando en solución alcalina, tal como solución de hidróxido de potasio. El sustrato puede entonces ser enjuagado y secado, por ejemplo, por calentamiento del sustrato. Adicionalmente, la descarga de plasma de gas hidrógeno puede ser utilizada para reducir la cantidad de carbono sobre la superficie del sustrato. La capa de película delgada de silicio amorfo intrínseca puede ser formada en una cámara PECVD utilizando gas silano (SiH_4) mezclado con gas hidrógeno (H_2). La capa delgada de silicio amorfo tipo n puede ser formada en una cámara PECVD utilizando silano, hidrógeno y gas fosfina (PH_3). La capa delgada de silicio amorfo tipo p puede ser formada en una cámara PECVD utilizando silano, hidrógeno y gas diborano (B_2H_6).

La Figura 10 ilustra una celda solar terminada, fabricada de acuerdo a las realizaciones de la invención. La celda solar se forma sobre un sustrato 1000 de silicio grado metalúrgico, el cual en este ejemplo es tipo p dopado. Luego se forma una capa 1005 de silicio amorfo intrínseco sobre el lado posterior, seguido por una capa 1010 de silicio amorfo tipo n. Una capa 1020 de TCO se forma sobre la capa tipo n, y hace contacto, por ejemplo, se forman contactos 1025 de plata sobre el TCO con el buen contacto óhmico formado. Puede formarse un contacto posterior utilizando, por ejemplo, aluminio. En este punto, la celda esta completa y es operacional; sin embargo, con el fin de protegerla de los elementos se lleva a cabo el siguiente procesamiento adicional. El lado frontal es protegido por una capa opcional de película 1015 de resina, por ejemplo, etilén vinil acetato, seguida por vidrio 1045. El lado posterior también puede ser protegido utilizando una película 1035 de resina, seguida por vidrio u otro recubrimiento protector 1040.

Como se muestra en las Figuras 9A y 9B, las realizaciones discutidas anteriormente pueden ser empleadas para manufacturar las galletas SmartSi, las cuales pueden ser procesadas adicionalmente para manufacturar la celda solar SmartSi. De acuerdo con otro aspecto de la invención, una celda solar SmartSi puede ser procesada adicionalmente para manufacturar una celda solar SmartSi de unión múltiple con brechas de bandas múltiples con el fin de potenciar la eficiencia de la conversión fotovoltaica. Una realización de una celda solar SmartSi de uniones múltiples se ilustra en la Figura 11A. En la Figura 11A, un sustrato 1100 de silicio grado metalúrgico es tipo p dopado. La superficie superior del sustrato tipo p es pasivada con una capa delgada 1105 de silicio amorfo intrínseco que tiene átomos de hidrógeno dispersados en la misma y que ocupa enlaces vibrantes de silicio. Esto a veces se denomina como silicio hidrogenado. Una capa de silicio hidrogenado amorfo tipo n delgada, 1110, se forma sobre la capa intrínseca 1105 para formar de esta forma la primera unión p-i-n, como se muestra en la realización de la celda solar SmartSi descrita anteriormente. Las capas 1105 y 1110 intrínseca y de tipo n son relativamente mucho más delgadas que las capas de película delgada típicas de una celda solar de película delgada convencional, puesto que en esta realización la primera estructura de película delgada no necesita funcionar como absorbente de luz, sino que más bien la luz está absorbida en el sustrato de silicio metalúrgico.

Para incrementar la eficiencia en la conversión de las celdas solares SmartSi, se forma ahora una estructura de celda solar de película delgada convencional p-i-n sobre la parte superior de la celda solar SmartSi. Primero, se forma una capa de película delgada tipo p de silicio hidrogenado amorfo 1120 sobre la celda solar SmartSi. Luego

se forma una capa 1125 de película delgada intrínseca de silicio hidrogenado amorfo sobre la capa 1120 tipo p y se forma una capa 1130 de película delgada tipo n amorfa de silicio hidrogenado sobre la capa intrínseca 1125. La capa intrínseca 1125 funciona como otro absorbente de luz y genera pares de orificios de electrones para convertir de esta manera la luz en energía eléctrica. Para recolectar la energía eléctrica se forma un electrodo superior transparente ITO 1135 sobre la capa 1130 y tipo n y luego se forman contactos metálicos 1140 sobre el ITO 1135. Aquí los contactos metálicos 1140 están hechos de plata, por ejemplo, utilizando pasta de plata y luego sinterizando la estructura para formar un buen contacto óhmico. Adicionalmente, un electrodo 1145 metálico se forma en la parte inferior del sustrato 1100. Aquí los contactos 1145 están hechos de aluminio. La Figura 11B ilustra una estructura de multiunión similar, excepto que la pluralidad de las capas está invertida.

Las Figuras 12A y 12B ilustran realizaciones para las celdas solares de unión múltiple SmartSi con unión de difusión. Las realizaciones de las Figuras 12A y 12B son básicamente las mismas excepto que la pluralidad de las capas es inversa. Por lo tanto, la descripción procede solamente con respecto a una de ellas, esto es, la realización de la Figura 12A. En la Figura 12A, un sustrato 1200 de silicio metalúrgico se hace de acuerdo con las realizaciones descritas anteriormente y es de tipo n dopado. Entonces, la capa superior del sustrato se difunde para formar una capa 1260 de difusión tipo p. Esta forma una unión p-n con el sustrato de silicio metalúrgico y provee una región de conversión de la celda solar, similar a la celda solar con base en silicio estándar. Luego se forma una capa delgada de pasivación 1205 de silicio hidrogenado amorfo intrínseco sobre la parte superior de la capa tipo p difusa. Se forma una capa 1215 de silicio hidrogenado amorfo tipo n sobre la capa intrínseca 1205, de tal manera que las capas 1215, 1205 y 1260 formen una unión p-i-n que tiene una brecha de banda diferente que la unión p-n dentro del sustrato 1200 y por lo tanto absorbe luz a diferentes frecuencias. Entonces forma una unión de película delgada p-i-n convencional sobre la parte superior de la capa 1215 formando una capa 1220 de silicio hidrogenado amorfo tipo p, una capa de silicio 1225 de silicio hidrogenado amorfo intrínseco, y una capa 1230 de silicio hidrogenado amorfo tipo n. En esta estructura, la capa intrínseca 1225 es de mucho mayor espesor que la capa intrínseca 1205, puesto que funciona como un absorbente de luz. También, la estructura de película delgada p-i-n tiene una diferente brecha de banda que las estructuras por debajo de ella y por lo tanto absorbe luz en diferentes frecuencias. Por lo tanto, seleccionando cuidadosamente el espesor de las capas, se puede "sintonizar" la estructura para absorber luz en amplios rangos de frecuencias.

Las Figuras 13A y 13B ilustran realizaciones de disposición simétrica de un sustrato de silicio metalúrgico en sándwich entre películas delgadas intrínsecas de Si/Si:H dopado en ambos lados. Las Figuras 13A y 13B son imágenes especulares una de otra, excepto que las polaridades de las capas están invertidas. De acuerdo con lo anterior solamente se explica la Figura 13A. En la Figura 13A, un sustrato 700 de silicio metalúrgico tipo p tiene una capa 705 superior intrínseca y una capa 730 inferior intrínseca, actuando ambas como capas de pasivación en vez de absorbentes. Entonces se forma una capa delgada de silicio 710 hidrogenado amorfo tipo n sobre la parte superior de la capa intrínseca 705, y se forma otra capa tipo n 735 sobre la capa intrínseca 730. Los contactos 720 y 725 son formados entonces como se describe con respecto a otras modalidades.

Debe entenderse que los procesos y técnicas descritos aquí no están relacionados de manera inherente a ningún aparato en particular y pueden ser implementados por cualquier combinación adecuada de componentes. Adicionalmente, los diversos tipos de dispositivos de propósito general pueden ser utilizado de acuerdo con las enseñanzas descritas aquí. También se pueden mostrar ventajosos para construir aparatos especializados para llevar a cabo etapas del método descrito aquí. La invención presente ha sido descrita en relación con ejemplos particulares, los cuales pretenden en todos los aspectos ser ilustrativos en vez de restrictivos. Los experimentados en la técnica apreciarán que diferentes combinaciones de hardware, software y firmware serán adecuados para practicar la presente invención.

La presente invención ha sido descrita en relación con ejemplos particulares, los cuales están previstos en todos los aspectos como ilustrativos en vez de restrictivos. Los experimentados en la técnica apreciarán que muchas combinaciones de hardware, software y firmware serán adecuados para poner en práctica la presente invención. Además, otras implementaciones de la invención serán evidentes para los experimentados en la técnica a partir de la consideración de la especificación y práctica de la invención divulgada aquí. Se pretende que la especificación y ejemplo sean considerados como ejemplos solamente, con un verdadero alcance de la invención indicado por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Una celda solar que comprende:
 un sustrato 500; 600; 700; 800; 1000; 1100; 1200; 1300; 1300' que comprende un silicio grado metalúrgico dopado;
- 5 una primera estructura de película delgada (505, 510; 605, 610; 705, 710; 805, 810; 1005, 1010; 1105, 1115; 1105', 1115'; 1205', 1215'; 1305, 1315; 1305', 1310') formada sobre y en contacto con el lado superior del sustrato,
 una primera estructura de película delgada formada sobre y en contacto con el lado superior del sustrato, formando por lo tanto una unión p-i-n con el sustrato;
- 10 un contacto conductor superior (520; 620; 780; 820; 1020, 1025; 1135, 1160; 1135', 1140; 1235, 1240; 1235', 1240'; 1320; 1320') formados por encima de la estructura de película delgada; conductora
 un contacto conductor inferior (525; 625; 725; 735; 825, 835; 1030; 1145; 1245; 1325; 1325') formados sobre el lado inferior del sustrato; y,
 en donde el sustrato está dopado como uno de un tipo p o n; y donde la estructura de película delgada comprende una capa intrínseca (505; 605; 705; 805; 1005; 1105; 1105' 1205; 1205'; 1305; 1305') formada por encima y en contacto con el sustrato y una capa delgada de contacto dopada (510; 610; 710; 810; 1010; 1115; 1115'; 1215; 1310; 1310') de polaridad opuesta del sustrato formado sobre y en contacto con la capa intrínseca.
- 15
2. La celda solar de la reivindicación 1, en donde al menos una de la capa intrínseca y la capa delgada dopada comprende una capa de silicio amorfo.
- 20 3. La celda solar de la reivindicación 2, en donde al menos una de la capa intrínseca y la capa delgada dopada comprende átomos de hidrógeno dispersados dentro de una capa de silicio.
4. La celda solar de la reivindicación 3, en donde el contacto conductor inferior (725, 735, 825, 335) comprende un dopado del sustrato y la capa conductora (735; 835) de la misma polaridad que el sustrato (700; 800) formado sobre el lado inferior del sustrato y la capa metálica (725; 835) formada sobre la capa conductora dopada, sobre la conductora.
- 25 5. La celda solar de la reivindicación 3, en donde el contacto conductor superior comprende un conductor transparente formado sobre la capa delgada dopada.
6. La celda solar de la reivindicación 4, que comprende adicionalmente una capa intrínseca amorfa (730; 830) formada entre el lado inferior del sustrato (700; 800) y la capa conductora dopada (735; 835).
- 30 7. La celda solar de la reivindicación 1 en donde el sustrato comprende silicio grado metalúrgico de pureza de tres a cuatro nueves.
8. La celda solar de la reivindicación 1, en donde la primera estructura de película delgada (1105, 1115, 1205, 1215) comprende una primera intrínseca y en contacto con la cubierta y una capa (1102; 1205) formada sobre un contacto con el sustrato (1100; 1200) y una primera capa tipo n (1115; 1215) formada sobre y en contacto con la capa intrínseca, y comprende adicionalmente una segunda estructura de película delgada (1120, 1125; 1220, 1225) formada sobre la primera estructura de película delgada y comprendiendo una capa tipo p (1120; 1220) formada sobre y en contacto con la primera capa tipo n (1115; 1215), una segunda capa intrínseca (1125; 1225) formada sobre la capa tipo p (1120; 1220) y que tiene un espesor más alto que la primera capa intrínseca (1105; 1205) y una segunda capa tipo n (1130; 1230).
- 35
9. La celda solar de la reivindicación 8, que comprende adicionalmente una capa de difusión (1260; 1260') formada en sustrato (1000; 1200) siendo la capa de difusión de un tipo o un tipo p.
- 40
10. Método para fabricar una celda solar que comprende:
 formar (920) un sustrato que comprende un silicio de grado metalúrgico dopado con un tipo p;
 formar (935, 930), una primera estructura delgada sobre y en contacto con el sustrato, comprendiendo la estructura de primera película:

la formación (925) de una primera capa intrínseca que comprende una capa de Si:H amorfa no dopada sobre y en contacto con el sustrato;

formar (930) una primera capa dopada que comprende a-Si:H dopado en n sobre y en contacto con la capa intrínseca; y,

5 formar el contacto inferior 950 en el lado inferior del sustrato.

11. El método de la reivindicación 12, que comprende adicionalmente:

formar una segunda estructura de película delgada que comprende una segunda capa dopada sobre la primera capa dopada;

formar una segunda capa intrínseca sobre y en contacto con la segunda capa dopada; y

10 formar una tercera capa delgada dopada sobre y en contacto con la segunda capa intrínseca.

12. El método de la reivindicación 11, en donde el sustrato comprende silicio grado metalúrgico de pureza de tres a cinco nueves.

13. Método de la reivindicación 12, que comprende adicionalmente formar una segunda estructura de película delgada sobre la primera estructura de película delgada.

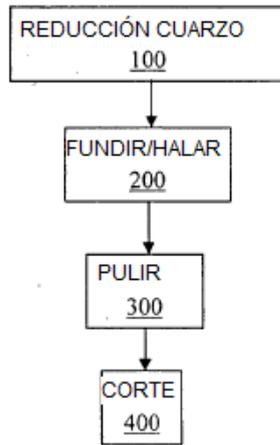


Figura 1

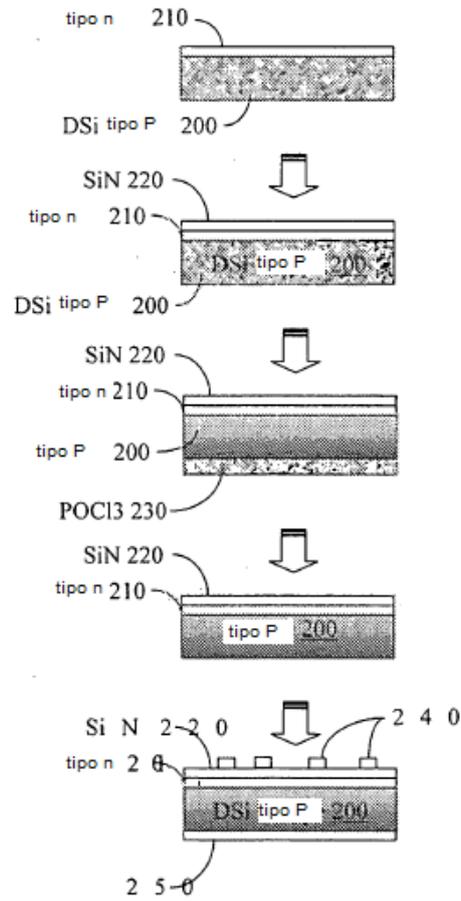


Figura 2

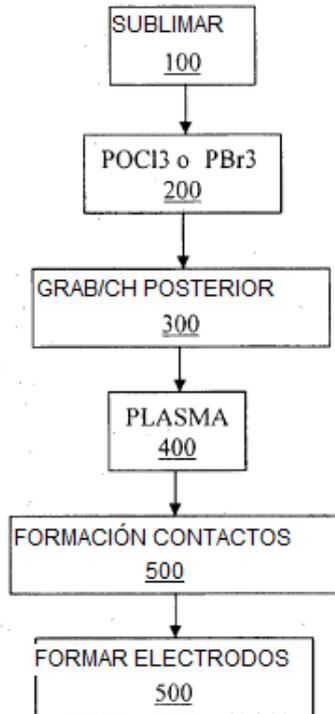


Figura 3

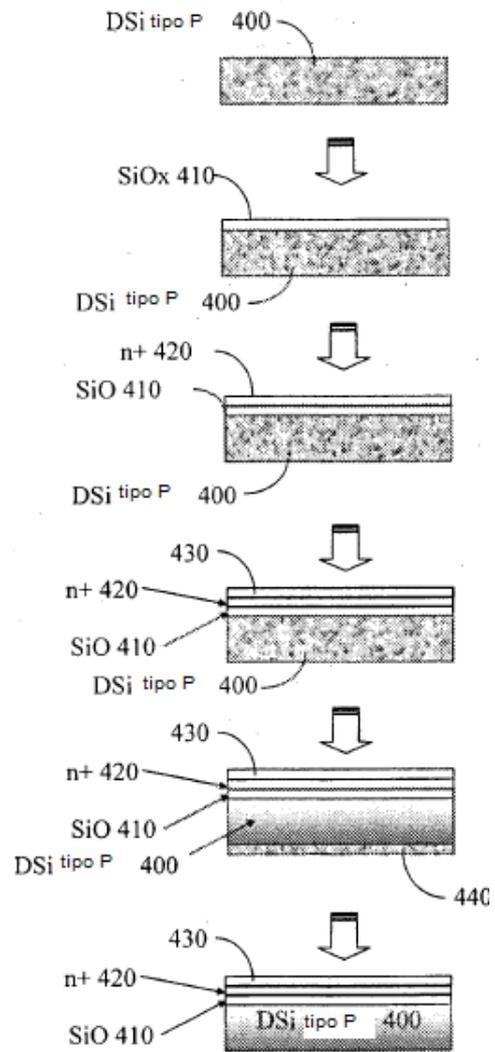
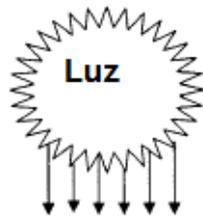
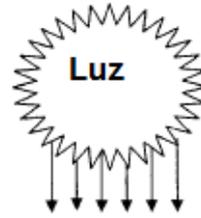


Figura 4



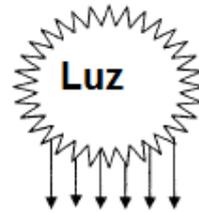
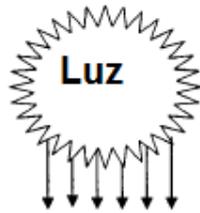
(e) ARC (~500Å)	<u>515</u>
(d) TCO (~3000Å)	<u>520</u>
(c) tipo n a-Si:H (200~2000Å)	<u>510</u>
(b) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>505</u>
(a) Galleta de Si tipo p grado metalúrgico (200-500 um)	<u>500</u>
(f) Contacto Al posterior (0.5µm)	<u>525</u>

Figura 5



(e) ARC (~500Å)	<u>615</u>
(d) TCO (~3000Å)	<u>620</u>
(c) tipo p a-Si:H (200~2000Å)	<u>610</u>
(b) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>605</u>
(a) Galleta de Si tipo n grado metalúrgico (200-500 um)	<u>600</u>
(f) Contacto Al posterior (0.5µm)	<u>625</u>

Figura 6



(g) ARC (~500A)	<u>715</u>
(f) TCO (~3000A)	<u>720</u>
(c) tipo n a-Si:H (200~2000A)	<u>710</u>
(b) i a-Si:H (0-1000A)	<u>705</u>
(a) galleta de silicio tipo p grado metalúrgico (200-500 um)	<u>700</u>
(d) i a-Si:H (0-1000A)	<u>730</u>
(e) tipo p a-Si:H (200-2000A)	<u>735</u>
(h) Contacto Al posterior (0.5µm)	<u>725</u>

(g) ARC (~500A)	<u>815</u>
(f) TCO (~3000A)	<u>820</u>
(c) tipo p a-Si:H (200~2000A)	<u>810</u>
(b) i a-Si:H (0-1000A)	<u>805</u>
(a) galleta de silicio tipo n grado metalúrgico (200-500 um)	<u>800</u>
(d) i a-Si:H (0-1000A)	<u>830</u>
(e) tipo n a-Si:H (200-2000A)	<u>835</u>
(h) Contacto Al posterior (0.5µm)	<u>825</u>

Figura 7

Figura 8

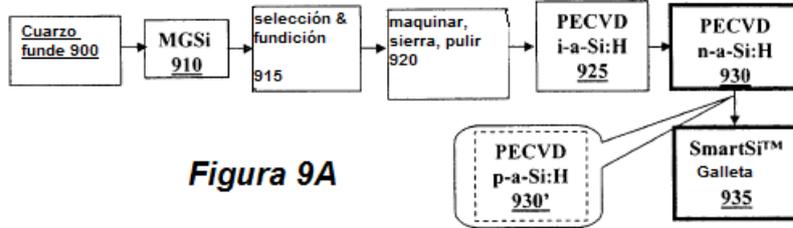


Figura 9A

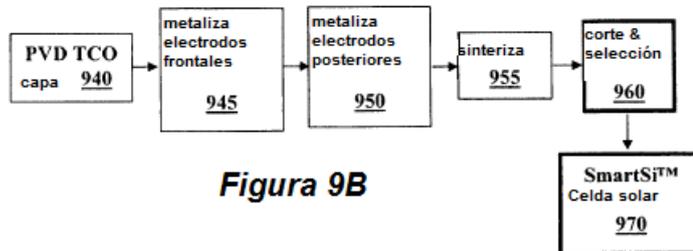


Figura 9B

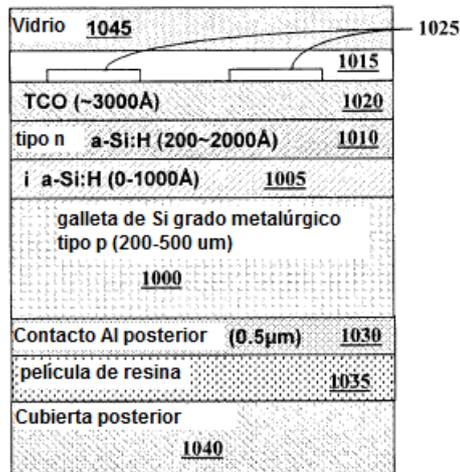
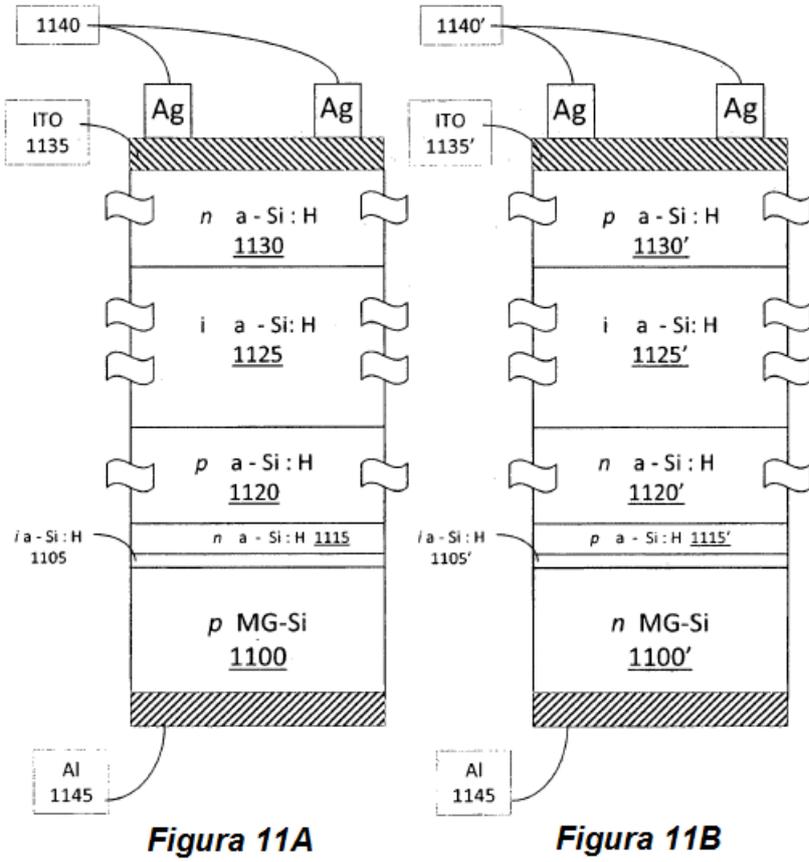
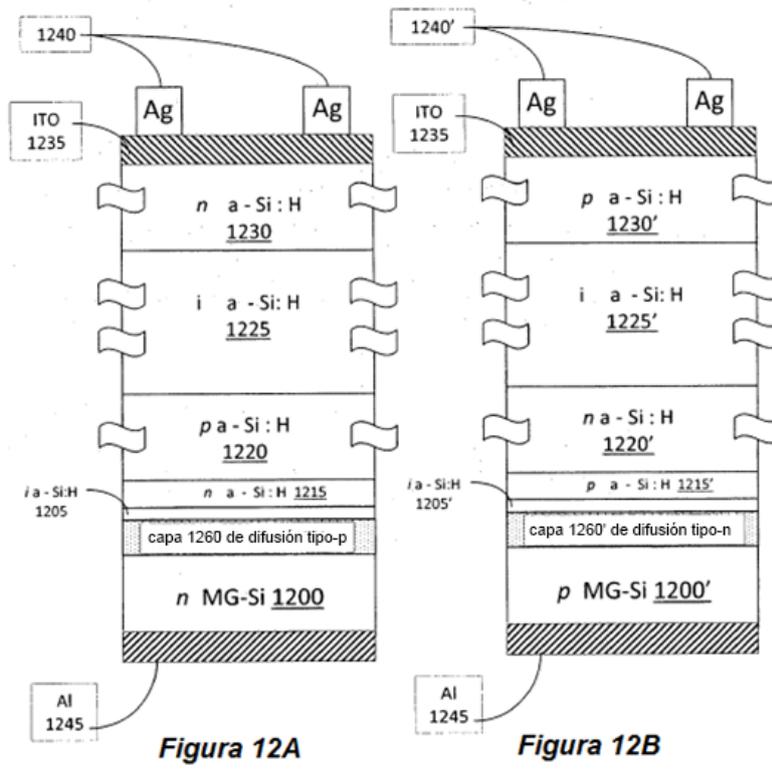
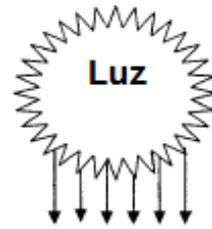
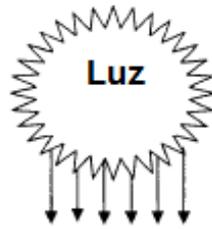


Figura 10







(g) ARC (~500Å)	<u>1315</u>
(f) TCO (~3000Å)	<u>1320</u>
(c) tipo n a-Si:H (200~2000Å)	<u>1310</u>
(b) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>1305</u>
(a) galleta de silicio tipo p grado metalúrgico (200-500 nm)	<u>1300</u>
(d) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>1330</u>
(e) tipo n a-Si:H (200-2000Å)	<u>1335</u>
(h) contacto Al posterior (0.5µm)	<u>1325</u>

(g) ARC (~500Å)	<u>1315'</u>
(f) TCO (~3000Å)	<u>1320'</u>
(c) tipo p a-Si:H (200~2000Å)	<u>1310'</u>
(b) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>1305'</u>
(a) galleta de silicio tipo n grado metalúrgico (200-500 nm)	<u>1300'</u>
(d) i a-Si:H (0-1000Å)	<u>1330'</u>
(e) tipo p a-Si:H (200-2000Å)	<u>1335'</u>
(h) contacto Al posterior (0.5µm)	<u>1325'</u>

Figura 13A

Figura 13B