

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 815 556**

51 Int. Cl.:

H01L 31/078 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.11.2016 PCT/EP2016/078005**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.05.2017 WO17085186**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.11.2016 E 16797573 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.06.2020 EP 3378104**

54 Título: **Celda solar con varios absorbedores conectados entre sí mediante contactos selectivos de portador de carga**

30 Prioridad:

19.11.2015 DE 102015015017

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

30.03.2021

73 Titular/es:

**INSTITUT FÜR SOLARENERGIEFORSCHUNG
GMBH (100.0%)
Am Ohrberg 1
31860 Emmerthal, DE**

72 Inventor/es:

PEIBST, ROBBY

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 815 556 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

Celda solar con varios absorbedores conectados entre sí mediante contactos selectivos de portador de carga

Campo de la invención

La presente invención se refiere a una celda solar, en particular una celda solar en tándem con varios absorbedores.

5 Antecedentes de la técnica

Las celdas solares se utilizan para convertir la energía de la luz solar en energía eléctrica aprovechando el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, dependiendo del material absorbedor, solo una determinada parte del espectro solar puede utilizarse de manera eficiente. Si el absorbedor se compone, por ejemplo, de un material semiconductor, los fotones con energías por debajo de la banda prohibida no pueden contribuir directamente a la generación de pares de electrones y huecos y, por lo tanto, apenas se absorben. Los fotones con energías muy por encima de la banda prohibida generan pares de electrones y huecos, pero los electrones y los huecos se termalizan desde los estados excitados de mayor energía a estados de menor energía cerca de los bordes de banda y al hacerlo emiten la diferencia de energía en forma de calor.

Una posibilidad de minimizar estos dos mecanismos de pérdida en el área de los fotones de alta y baja energía es utilizar dos o más absorbedores hechos de diferentes materiales, cada uno de los cuales convierte eficientemente la energía de radiación de diferentes áreas del espectro solar en energía eléctrica. El absorbedor o los absorbedores que utilizan eficientemente fotones de alta energía para la conversión de energía fotovoltaica y transmiten eficientemente los fotones con energías más bajas al/a los absorbedor(es) subyacente(s) se ubican preferentemente sobre un lado de la celda solar que mira hacia la radiación solar.

Esta estructura de celda solar denominada celda solar en tándem o celda multifunción se conoce desde hace mucho tiempo, por ejemplo, del documento US 4.496.788, y ya se está comercializando en el área de celdas solares espaciales altamente eficientes o en el área de las celdas solares terrestres, en las que la luz solar se concentra sobre una pequeña superficie mediante ópticas.

STEVE ALBRECHT ET AL: "Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature", ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE, Vol. 9, N.º 1, 27. Octubre de 2015, páginas 81-88, divulga una celda solar en tándem.

Sería deseable poder utilizar celdas solares en tándem también para aplicaciones fotovoltaicas terrestres no concentrantes. Para hacer esto, los altos costos de fabricación y materiales de las celdas solares en tándem convencionales deben reducirse significativamente. Para ello, es aconsejable construir celdas solares en tándem sobre celdas solares de silicio (monocristalino o multicristalino) relativamente económicas y relativamente eficientes, es decir, aplicar sobre el absorbedor de silicio uno o más absorbedores hechos de materiales distintos del silicio cristalino. Serían posibles materiales que permitan una conversión de energía fotovoltaica para energías de fotones por debajo de la banda prohibida de silicio de 1,12 eV, con lo que un absorbedor de este tipo se aplicaría sobre el lado del absorbedor de silicio que mira en dirección opuesta a la radiación solar. De forma alternativa, sobre el lado del absorbedor de silicio que mira hacia la radiación solar se podrían aplicar absorbedores hechos de materiales que transmiten de manera eficiente fotones con energías por debajo de 1,4 eV y utilizan de manera eficiente fotones de mayor energía para la conversión de energía fotovoltaica.

Por su parte, las celdas solares de silicio con una sola unión pn se están desarrollando constantemente. Se puede lograr una mejora significativa en la eficiencia de conversión de energía mejorando la calidad de la pasivación de la superficie. Las capas de pasivación dieléctrica, como, por ejemplo, óxidos de silicio (SiOx), nitruros de silicio (SiNx) u óxidos de aluminio (Al₂O₃), aíslan eléctricamente las áreas cubiertas en cada caso, de modo que se requieren contactos adicionales no pasivados para la extracción de portadores de carga. Típicamente, un metal se encuentra localmente directamente adyacente al silicio cristalino, por lo cual se forma una interfase rica en defectos y, por lo tanto, altamente activa en recombinación. En contraste con esto, los denominados contactos selectivos de portador de carga ofrecen la posibilidad no solo de una excelente pasivación de las superficies cubiertas con ellos, sino también de extraer selectivamente un tipo de portador de carga, es decir, electrones o huecos, del absorbedor de silicio en esas áreas.

El término "contacto selectivo de portador de carga" abarca diferentes modos de realización. Los más conocidos por esto en el campo de la energía fotovoltaica de silicio son las heterouniones entre el silicio amorfo rico en hidrógeno y el absorbedor de silicio cristalino. Sin embargo, las propiedades eléctricas de estas heterouniones a menudo se degradan fuertemente a temperaturas superiores a 200°C. Una alternativa conocida de la electrónica bipolar, que en los últimos años se ha investigado cada vez más también en la energía fotovoltaica, son los contactos selectivos de portador de carga que se componen de un óxido interfacial delgado (o más generalmente en un dieléctrico interfacial) y una capa de silicio dopado, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino depositada sobre aquel. El óxido interfacial también se conoce a veces como óxido de túnel, en el que el mecanismo de transporte de corriente físico dominante a través del óxido sigue siendo objeto de debates científicos actuales. Dependiendo de si la capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino en el óxido interfacial está dopada n o p, el contacto selectivo de

5 portador de carga es transparente o permeable a los electrones o huecos y bloquea el respectivo otro tipo de portador de carga cerca de la interfase entre el óxido y el absorbedor de silicio. Los contactos selectivos de portador de carga que se componen de un óxido interfacial delgado y una capa de silicio dopado, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino depositado sobre aquel son en su mayoría estables a temperaturas de proceso de al menos 1050°C. Su excelente calidad de pasivación es típicamente independiente del tipo de capas que se encuentran sobre ellos.

Sumario de la invención y de modos de realización

Puede existir la necesidad de una celda solar en tándem que presente un alto grado de eficiencia y/o que se pueda fabricar de forma sencilla y económica.

10 En particular, puede ser necesario realizar una celda solar en tándem con silicio cristalino como material para un absorbedor de tal manera que la superficie del absorbedor de silicio orientada hacia el otro absorbedor esté muy bien pasivada, de modo que independientemente de las propiedades de las capas adyacentes a esta pasivación se minimiza una recombinación de electrones y huecos generados en el absorbedor de silicio en esta superficie del absorbedor de silicio.

15 Puede ser necesario realizar una celda solar en tándem con silicio cristalino como material para un absorbedor de tal manera que se pueda extraer un tipo de portador de carga de manera muy eficiente en la superficie del absorbedor de silicio orientada hacia el otro absorbedor, de modo que la subcelda compuesta principalmente por el absorbedor de silicio esté eléctricamente bien conectada a la subcelda adyacente.

Además, puede ser necesario formar un contacto de túnel entre la subcelda que se compone principalmente del absorbedor de silicio cristalino y la subcelda que se compone principalmente de un material absorbedor diferente.

20 Además, puede ser necesario realizar una celda solar en tándem con silicio cristalino como material para un absorbedor de tal manera que surjan posibilidades adicionales para el ajuste fino de las densidades de corriente generadas en las subceldas.

25 Además, puede ser necesario utilizar un proceso de producción en la producción de una celda solar en tándem con silicio cristalino como material para un absorbedor, en el que ciertas etapas implican temperaturas de proceso superiores a 200°C.

Las necesidades mencionadas en primer lugar pueden satisfacerse con el objetivo de la reivindicación independiente de la presente solicitud. Las necesidades mencionadas amén de ello pueden satisfacerse con el objetivo de al menos una de las reivindicaciones dependientes de la presente solicitud.

30 De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se describe una estructura de celda solar en tándem que presenta al menos dos absorbedores para convertir energía de radiación en energía eléctrica, en la que un primer absorbedor se compone de silicio cristalino. Para el o los otros (segundos) absorbedores, se puede usar una gran cantidad de materiales, cada uno de los cuales utiliza otros rangos espectrales del espectro solar de manera eficiente para la conversión de energía fotovoltaica. La celda solar en tándem es de estructura monolítica, es decir, las subceldas individuales están conectadas en serie y sus absorbedores se apilan preferentemente uno encima del otro, en gran parte paralelos entre sí. El lado del absorbedor de silicio cristalino que mira hacia el absorbedor adyacente hecho de un material diferente del silicio cristalino presenta un contacto selectivo de portador de carga. Si el absorbedor de silicio cristalino está incrustado entre dos absorbedores hechos de otros materiales, ambos lados del absorbedor de silicio presentan contactos selectivos de portador de carga. De acuerdo con la presente invención, los contactos selectivos de portador de carga se componen de un dieléctrico interfacial delgado (por ejemplo, un óxido interfacial), por ejemplo, una capa de dióxido de silicio de solo unos pocos nanómetros de espesor, y una capa amorfa o parcialmente cristalina o policristalina predominantemente (es decir, en más del 50%) de silicio depositada sobre aquella. Esta última puede, por ejemplo, estar dopada n, por lo que el contacto selectivo de portador de carga enviaría eficientemente los electrones generados en el absorbedor de silicio a las capas adyacentes y bloquearía los huecos generados en el absorbedor de silicio cerca de la interfase entre el absorbedor de silicio y el óxido interfacial. De forma alternativa, la capa amorfa o parcialmente cristalina o policristalina que se compone predominantemente de silicio puede doparse p, por lo cual el contacto selectivo de portador de carga transferiría eficientemente los huecos generados en el absorbedor de silicio a las capas adyacentes y bloquearía los electrones generados en el absorbedor de silicio cerca de la interfase entre el absorbedor de silicio y el óxido interfacial.

50 Con un dopado suficientemente alto de la capa amorfa o parcialmente cristalina o policristalina que se compone predominantemente de silicio, se puede formar un contacto de túnel entre esa y la capa adyacente.

Sin restringir la invención, los aspectos y modos de realización pueden considerarse, entre otros, como basados en el conocimiento y las ideas que se describen a continuación.

55 Como se señaló en la introducción, se reconoció que para aplicaciones terrestres no concentradas o de baja concentración, se prefieren conceptos económicos de celdas solares en tándem, por ejemplo, construidas monolíticamente sobre un sustrato de silicio relativamente económico, como, por ejemplo, una oblea de silicio. Se considera ventajoso utilizar el sustrato de silicio no solo como portador mecánico, sino también como uno de al menos

dos absorbedores activos en la estructura de la celda solar en tándem. Se puede suponer que la interfase entre el silicio cristalino y la capa adyacente a él, que pertenece a la subcelda adyacente hecha de un material diferente, presenta una alta densidad de estados de interfase. Por ejemplo, la última capa, si también es cristalina, podría presentar una constante de red diferente a la del silicio. Incluso si la capa adyacente al silicio cristalino y perteneciente a la subcelda adyacente hecha de un material diferente presenta una microestructura amorfa, es probable una alta densidad de estados de defecto en la interfase entre esta capa y el silicio cristalino.

Los pares de portadores de carga de electrones y huecos generados en el absorbedor de silicio pueden recombinarse en estos estados de interfase, por lo cual se reduciría significativamente el rendimiento de la celda.

Ahora se ha reconocido que sería ventajoso pasivar la interfase entre el silicio cristalino y la capa adyacente a ese, la cual pertenece a la subcelda adyacente hecha de un material diferente, es decir, minimizar la densidad del estado de la interfase y, por tanto, las pérdidas por recombinación. Las capas dieléctricas depositadas sobre el silicio cristalino que se utilizan habitualmente para la pasivación en celdas solares con un solo absorbedor de silicio cristalino son desventajosas para la estructura de celda solar de acuerdo con la presente invención. En el caso de la deposición de área completa, las capas dieléctricas de este tipo aislarían eléctricamente la subcelda de silicio de la subcelda adyacente, por lo cual que no estaría garantizada la conexión altamente conductora requerida de todas las subceldas. La abertura local de la capa de aislamiento dieléctrico que se utiliza normalmente en celdas solares con un solo absorbedor de silicio cristalino implicaría un flujo de corriente lateral dentro de las subceldas. La conductividad transversal requerida para esto en todas las subceldas para ambos tipos de portadores de carga –electrones y huecos– generalmente no se da en la estructura de la celda solar de acuerdo con la presente invención, al menos no en las subceldas típicamente muy delgadas hechas de un material diferente del silicio.

Un contacto selectivo de portador de carga que se compone, por ejemplo, de un óxido interfacial delgado y una capa dopada, amorfa o parcialmente cristalina o policristalina, predominantemente de silicio depositada sobre aquel, el cual se encuentra sobre la superficie del absorbedor de silicio orientada hacia la subcelda adyacente, ofrece aquí ventajas decisivas: Por un lado, asegura una excelente pasivación de la superficie del absorbedor de silicio y minimiza, por tanto, las pérdidas de recombinación que se producen en este punto. Por otro lado, un contacto selectivo de portador de carga de este tipo también transmite un tipo de portador de carga sobre toda la superficie, es decir, electrones en el caso de una capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino dopada n y huecos en el caso de una capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino dopada p sobre el óxido interfacial, a la subcelda adyacente. Por tanto, el flujo de corriente tiene lugar preferentemente de forma puramente vertical y no es necesaria una conductividad transversal lateral en cada subcelda para ambos tipos de portadores de carga.

También se reconoció que en el caso de una estructura monolítica de una celda solar en tándem es ventajosa una conexión eléctrica altamente conductora de las subceldas mediante contactos de túnel. Para ello, son ventajosos niveles altos de dopaje en las capas contiguas que forman el contacto de túnel, ya que niveles altos de dopaje implican anchos de zona de carga espacial pequeños y, por tanto, altas probabilidades de túnel. Para cumplir este requisito en el lado de la subcelda de silicio, el absorbedor de silicio podría estar altamente dopado en su superficie. Sin embargo, un alto dopaje introducido directamente en el silicio cristalino también implica pérdidas de recombinación significativas, ya que la vida útil del portador de carga minoritario en el área altamente dopada es muy corta debido a la recombinación Auger.

También para ello, un contacto selectivo de portador de carga, aplicado preferentemente directamente sobre la superficie del absorbedor de silicio y que se compone, por ejemplo, de un óxido interfacial delgado y una capa de silicio dopado, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino depositada sobre ese, ofrece ventajas significativas: Dado que los portadores de carga minoritarios ya se bloquean en la interfase entre el absorbedor de silicio y el óxido interfacial, ni siquiera alcanzan la capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino depositada sobre aquella. Por tanto, la vida útil del portador de carga minoritario en la última capa es irrelevante. Por tanto, el dopado de la capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino se puede seleccionar para que sea suficientemente alto (es decir, por ejemplo, superior a 10^{18} , preferentemente superior a 10^{19} y más preferentemente superior a 10^{20} cm^{-3}) para crear de manera segura un contacto de túnel conductor a la subcelda adyacente, sin que ello implique pérdidas por recombinación Auger en esa capa.

Además, se reconoció que en una celda solar en tándem de estructura monolítica que corresponde a una conexión en serie de todas las subceldas, la intensidad de corriente debe ser de la misma en magnitud a través de todas las subceldas. Esto supone un diseño de las subceldas individuales de tal manera que la corriente de generación en cada subcelda sea la misma en magnitud. Si este no es el caso, fluyen corrientes de compensación no deseadas dentro de la celda en tándem que en determinadas circunstancias afectan significativamente el rendimiento de la celda. Un ajuste exacto de la corriente de generación en todas las subceldas es muy exigente. Otras condiciones marginales pueden establecer límites aquí, por ejemplo, un espesor máximo limitado de subceldas hechas de un material distinto al silicio cristalino.

De acuerdo con un modo de realización de la presente invención, podría resultar ventajoso utilizar el espesor y/o el dopaje de la capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino como un grado de libertad adicional para el ajuste fino de las corrientes de generación. Dependiendo del grosor y del dopaje, se pueden utilizar interferencias constructivas o destructivas para reflejar parte de la radiación incidente hacia la subcelda hecha de un material

diferente del silicio cristalino o para transmitirla específicamente a la subcelda de silicio. Dependiendo del dopaje y del espesor, una absorción tiene lugar en la capa de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino, por ejemplo, en combinación con la excitación de portadores de carga libres a estados de mayor energía. Esta luz entonces ya no está disponible para la generación de pares de electrón-hueco en el absorbedor de silicio, de modo que se reduce la corriente de generación en la subcelda de silicio. Esta reducción corresponde a una pérdida óptica. No obstante, en determinadas circunstancias puede resultar ventajoso para el rendimiento global de la celda aceptar esta pérdida óptica con el fin de minimizar las pérdidas eléctricas debidas a una desviación de las corrientes de generación en las subceldas individuales.

Además, se reconoció que las ventajas mencionadas anteriormente también se pueden lograr, bajo determinadas circunstancias, con otros contactos selectivos de portador de carga, es decir, con alternativas a la doble capa que se compone de un óxido interfacial delgado y una capa dopada, amorfa o parcialmente cristalina o policristalina, que se compone predominantemente de silicio, depositada sobre aquel.

Por ejemplo, las heterouniones entre el absorbedor de silicio cristalino y una capa de silicio amorfo que contiene hidrógeno depositada sobre el mismo presentan propiedades similares, en particular con respecto a una pasivación superficial excelente.

No obstante, los contactos selectivos de portador de carga que se componen de un óxido interfacial delgado y una capa dopada, amorfa o semicristalina o policristalina compuesta predominantemente por silicio que está depositada sobre aquel ofrecen una ventaja importante en lo que respecta a la integración en un proceso de fabricación de celdas: Las propiedades eléctricas de estos contactos selectivos de portador de carga son muy estables a la temperatura y, por tanto, permiten el uso de etapas de proceso posteriores con temperaturas de proceso de hasta 1000°C y superiores. Por el contrario, por ejemplo, las heterouniones entre el absorbedor de silicio cristalino y las capas de silicio amorfo que contienen hidrógeno depositadas sobre aquel ya se degradan a temperaturas superiores a 200°C, lo que implica una severa restricción en lo que respecta a posibles procesos de fabricación para la celda solar en tándem.

Además, se reconoció que la estructura de celdas solares en tándem de acuerdo con la presente invención permite una gran flexibilidad con respecto a los posibles materiales para las subceldas que no se componen de silicio cristalino. Serían concebibles subceldas con absorbedores hechos de semiconductores compuestos III-V, II-VI y I-III-VI, con absorbedores hechos de perovskitas y con absorbedores hechos de germanio o silicio amorfo. En todos los casos, puede ser ventajoso aplicar, sobre una superficie del absorbedor de silicio que está orientada hacia un absorbedor adyacente, un contacto selectivo de portador de carga compuesto por un óxido interfacial delgado (u otro dieléctrico interfacial) y una capa dopada, amorfa o parcialmente cristalina o policristalina compuesta predominantemente por silicio depositada sobre aquel, ya que sus propiedades eléctricas y ópticas son independientes del tipo de capas adyacentes.

Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la presente invención resultarán evidentes para un experto en la técnica a partir de la siguiente descripción de modos de realización ejemplares y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que ni la descripción ni los dibujos deben interpretarse como una restricción de la invención.

La figura 1 y la figura 2 muestran una representación esquemática de celdas solares en tándem de acuerdo con posibles modos de realización de la presente invención.

Los detalles que se representan en las figuras se ilustran en cada caso solo esquemáticamente y no se reproducen fielmente a escala. En particular, los espesores de capa y las proporciones representados no corresponden a las condiciones reales, en las que las capas aplicadas a un sustrato son significativamente más delgadas que las representadas en las figuras.

Descripción detallada de modos de realización preferidos

La figura 1 muestra una representación esquemática de una celda solar en tándem de acuerdo con el primero de los dos modos de realización preferidos de la presente invención.

Como se representa en la figura 1, la celda solar en tándem presenta dos absorbedores 104, 108 diferentes hechos de materiales diferentes. De forma alternativa, también podrían utilizarse tres o más materiales de absorbedor diferentes. En cualquier caso, de acuerdo con la presente invención, un primer absorbedor está constituido por silicio (108 en la figura 1).

El absorbedor de silicio 108 puede ser, por ejemplo, una oblea de silicio cristalino, en particular monocristalino o multicristalino. Opcionalmente se eliminó el daño de la sierra de las superficies del absorbedor de silicio 108. El absorbedor de silicio 108 presenta típicamente espesores en el intervalo de 30 a 500 µm, preferentemente de 50 a 300 µm. Las dimensiones laterales están típicamente en el intervalo de 0,1 x 0,1 cm² a 200 x 200 cm². El absorbedor de silicio 108 puede estar dopado p, dopado n o sin dopar, o bien ser intrínseco. El absorbedor de silicio 108 presenta preferentemente un tipo de dopaje uniforme, es decir, está dopado p en todo su espesor, dopado n en todo su espesor

o sin dopar, o bien es intrínseco, en todo su espesor. Las concentraciones de dopaje pueden variar a lo largo el espesor. Una posible morfología superficial del absorbedor de silicio 108 es un lado frontal y posterior planos, como se representa en la figura 1. De forma alternativa, por ejemplo, el lado frontal y/o el lado posterior del absorbedor de silicio 108 pueden estar texturados.

- 5 El segundo absorbedor 104 está hecho de un material diferente del silicio. En el modo de realización de la presente invención representado en la figura 1, el segundo absorbedor 104 está hecho de un material que transmite luz con energías de fotones por encima de la banda prohibida de silicio de 1,12 eV, pero por debajo de una energía de, por ejemplo, 1,2-2,2 eV o 1,2-1,9 eV, preferentemente 1,4-1,8 eV, en gran medida al absorbedor de silicio 108 subyacente y absorbe efectivamente luz con energías de fotones más altas y la utiliza para generar pares de electrones-huecos.
- 10 De forma alternativa, el absorbedor 108 también podría componerse de un material que absorbe luz con energías de fotones por debajo de la banda prohibida de silicio de 1,12 eV y la utiliza para generar pares de electrones-huecos, con lo que el segundo absorbedor 104 se ubicaría en este caso, a diferencia de lo representado en la figura 1, sobre el lado del absorbedor de silicio 108 que mira en dirección opuesta a la iluminación 100.

- 15 Los posibles materiales para el segundo absorbedor 104 de acuerdo con el modo de realización de la invención representado en la figura 1 son semiconductores con una banda prohibida más alta que el silicio, por ejemplo, semiconductores compuestos de la clase de material III-V, II-VI y I-III-VI, materiales orgánicos con un intervalo energético entre el nivel de energía más alto ocupado y el nivel de energía más bajo desocupado por encima de 1,3 eV, así como un compuesto de sustancias orgánicas e inorgánicas, por ejemplo, de la clase de material de perovskitas. El espesor del segundo absorbedor 104 debe adaptarse al material respectivo, en el que la longitud de
- 20 difusión de los portadores de carga minoritarios en el absorbedor 104 implica un límite superior y el requisito de absorción efectiva de la luz implica un límite inferior con respecto al espesor del absorbedor 104. Por ejemplo, para un segundo absorbedor 104 de la clase de material de los semiconductores III-V con una banda prohibida directa, el espesor del absorbedor 104 estaría en el intervalo de 0,05 - 50 μm , preferentemente en el intervalo de 0,5 μm - 5 μm . El espesor preferido para un segundo absorbedor 104 de la clase de material de la perovskita estaría en un intervalo
- 25 de 0,05 μm - 3 μm . El segundo absorbedor puede presentar un tipo de dopaje uniforme, es decir, estar dopado p en todo su espesor, dopado n en todo su espesor o sin dopar, o bien ser intrínseco, en todo su espesor. Las concentraciones de dopaje pueden variar a lo largo el espesor.

- La doble capa adyacente al absorbedor de silicio 108 hecha de, por ejemplo, un óxido interfacial 107 delgado y, en el caso del modo de realización representado en la figura 1, una capa 106 de silicio dopado p, amorfo o parcialmente
- 30 cristalino o policristalino es clave para la invención. Juntas, las capas 107 y 106 forman lo que se conoce como contacto selectivo de portador de carga. En el modo de realización representado en la figura 1, este es transparente para los huecos generados en el absorbedor de silicio 108, y los transfiere de manera eficiente a las capas ubicadas encima. Sin embargo, los electrones generados en el absorbedor de silicio 108 se bloquean, en el modo de realización que se representa en la figura 1, cerca de o en la interfase entre el absorbedor de silicio 108 y el óxido interfacial 107,
- 35 y como resultado no pueden llegar a las capas ubicadas encima. Por tanto, se minimizan las pérdidas por recombinación en la superficie del absorbedor de silicio cubierto con las capas 107, 106, independientemente de las propiedades de las capas ubicadas encima. El contacto selectivo de portador de carga que se compone de la doble capa 107, 106 está ubicado sobre el lado del absorbedor de silicio 108 que mira hacia el otro absorbedor 104. Si, a diferencia de lo representado en la figura 1, el otro absorbedor 104 está ubicado sobre el lado del absorbedor 108 que
- 40 mira en dirección opuesta a la luz o si un tercer absorbedor se encuentra allí, el lado del absorbedor de silicio 108 que mira en dirección opuesta a la luz también estaría limitado por un contacto selectivo de portador de carga de este tipo.

- En la bibliografía, el óxido interfacial 107 se denomina a veces óxido de túnel, con lo que no es necesario que el transporte del portador de carga a través de este óxido se base forzosamente en túneles. El óxido interfacial 107 se puede aplicar sobre el absorbedor de silicio 108 de diversas formas. Por ejemplo, son posibles oxidaciones térmicas,
- 45 oxidación química húmeda, oxidaciones por irradiación en presencia de ozono, así como procesos de deposición química en fase gaseosa. El espesor preferente del óxido interfacial 106 está en el intervalo de 0,5-5 nm. La capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino también puede depositarse por medio de varios procedimientos. Los procesos de deposición química en fase gaseosa, ya sea apoyados por excitación de plasma o excitación térmica, son adecuados para este propósito. Sin embargo, también son posibles procesos alternativos, por
- 50 ejemplo, la pulverización catódica o la impresión o el recubrimiento por centrifugación de sustancias que contienen silicio, para la deposición de la capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino. El dopado p de la capa 106 requerido en el modo de realización representado en la figura 1 puede tener lugar in situ durante la deposición de la capa o también después. Para un dopaje posterior son posibles procesos, como, por ejemplo la difusión térmica desde la fase gaseosa, la implantación de iones con curación posterior o la aplicación de dopantes
- 55 por medio de procesos de impresión o recubrimiento por centrifugación y posterior introducción térmica. La concentración de dopante en la capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino debe ser preferentemente superior a 10^{18} cm^{-3} para permitir la formación de un contacto de túnel con la capa 105 ubicada encima. En este caso, la capa 105 ubicada encima sirve para la extracción de electrones del primer absorbedor 104 y generalmente está dopada en la dirección opuesta a la capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o
- 60 policristalino. Para permitir una formación de túneles, esta capa 105 ubicada encima puede estar dopada de forma similar a la capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino, es decir, una concentración de dopaje puede ser preferentemente superior a 10^{18} cm^{-3} . El espesor de la capa 106 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino se encuentra típicamente en el intervalo de 5-1000 nm, preferentemente en el intervalo de 10-300 nm.

Se lo puede variar de manera específica para adaptar la densidad de corriente generada en el absorbedor 108 de silicio a la densidad de corriente generada en el absorbedor 104 variando la interferencia y/o la absorción en la capa 106. Si la capa de silicio 106 es amorfa, parcialmente cristalina o policristalina depende de las condiciones de deposición y/o del postratamiento térmico de esta capa, con lo que la microestructura de la capa 106 generalmente es irrelevante para la presente invención.

Además de estos componentes, que se han descrito en detalle, la celda solar en tándem de acuerdo con la figura 1 puede presentar otras estructuras, cuya realización precisa no es relevante para la presente invención. De acuerdo con la figura 1, estas son:

- 10 - Una capa 103 para la extracción de huecos del absorbedor 104, así como una capa 105 para la extracción de electrones del absorbedor 104. Estas pueden ser, por ejemplo, capas semiconductoras adecuadamente dopadas, en particular si el propio absorbedor 104 se compone de un material semiconductor, o también materiales que con el absorbedor 104 forman una heterounión con estructura electrónica adecuada o bien con alineación de banda adecuada. En el modo de realización de la invención representado en la figura 1, la capa 105 para la extracción de electrones del absorbedor 104 es adyacente al contacto selectivo de portador de carga 107, 106 que es transparente para los huecos del absorbedor 108 de silicio. Opcionalmente se forma un contacto de túnel entre la capa 106 de silicio dopado p, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino y la capa 105 para la extracción de electrones del absorbedor 104. La propia capa 105 puede presentar una alta selectividad, es decir, puede ser transparente o permeable a los electrones generados en el absorbedor 104, pero bloquear los huecos generados en el absorbedor 104 y, por tanto, minimizar la recombinación en el lado del absorbedor 104 cubierto con la capa 105.
- 15 - Tanto la capa 105 como la capa 103 deben ser lo más transparentes posible a la luz sobre una amplia gama del espectro solar.
- 20 - Una capa 109 para la extracción de electrones del absorbedor 108 de silicio. Esa puede estar compuesta, por ejemplo, por silicio dopado n cristalino y, como se representa en la figura 1, cubrir todo el lado posterior del absorbedor 108 de silicio o estar limitada solo a las áreas de los contactos de lado posterior 111. Alternativamente, la capa 109 también puede componerse de varias subcapas, por ejemplo, de un óxido interfacial, así como de una capa de silicio dopado n, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino. Otras posibilidades de realizar la capa 109 son materiales semiconductores distintos del silicio cristalino que con el absorbedor 108 de silicio forman una heterounión con una estructura de banda adecuada. También son posibles capas orgánicas con propiedades electrónicas adecuadas.
- 25 - Una capa 102 para reducir la reflexión en lado frontal de la celda solar y/o para pasivarla. Esa debe ser lo más transparente posible a la luz sobre la gama de todo el espectro solar.
- 30 - Una capa 110 para aumentar la reflexión interna en el lado posterior de la celda solar y/o para pasivarla. Esa puede ser, por ejemplo, una capa dieléctrica o una pila de capas de capas dieléctricas, por ejemplo, óxido de silicio, nitruro de silicio u óxido de aluminio. También es concebible estructurar el lado posterior del absorbedor de silicio para aumentar la reflexión interna.
- 35 - Una metalización de lado frontal 101 y una metalización de lado posterior 111. Mientras que la metalización de lado frontal 101, si no se compone de un material transparente, no se puede aplicar en toda el área, a diferencia de lo que se representa en la figura 1, es completamente posible una metalización de lado posterior en toda el área. Los materiales posibles son metales con buena conductividad, como cobre, plata, oro, platino, níquel, titanio, paladio y aluminio, opcionalmente en combinación con otros componentes para mejorar el contacto con las capas 103 y 110.
- 40 - Es concebible que diseños especiales de estas estructuras asuman varias funciones al mismo tiempo, de modo que las estructuras individuales se vuelvan superfluas. Por ejemplo, la capa 103 para la extracción de huecos del absorbedor 104 puede al mismo tiempo reducir la reflexión del lado frontal de la celda solar, de modo que la capa 102 sea superflua.

Los posibles procesos de producción para las capas 102, 103, 104, 105 dependen en gran medida de los materiales utilizados. Si una de estas capas está compuesta por un material semiconductor, esa puede depositarse directamente sobre las capas subyacentes, por ejemplo, por medio de pulverización catódica, por medio de evaporación, por medio de epitaxia de haz molecular, por medio de deposición química en fase gaseosa o con la ayuda de otro procedimiento. De forma alternativa, el absorbedor 104, posiblemente junto con una o más de las capas 105, 103, 102, 101, podría producirse por separado y luego conectarse mecánica, eléctrica y ópticamente a las capas subyacentes. Para ello, se pueden utilizar procedimientos como la adhesión, pero también el pegado por medio de un adhesivo conductor transparente. Si una de las capas se compone de un material orgánico o un material de la clase de perovskitas, se pueden utilizar además procesos de deposición, como el recubrimiento por centrifugación y diferentes procesos de impresión. Por regla general, estos procesos de producción están asociados a un cierto balance de temperatura, por ejemplo con temperaturas de proceso superiores a 200°C. El hecho de que las propiedades eléctricas del contacto selectivo de portador de carga que se compone del óxido interfacial 107 delgado y la capa 106 de silicio dopado p, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino no se degraden necesariamente incluso a temperaturas de proceso de hasta 1100°C permite la aplicabilidad de procesos de producción para las capas 105, 104, 103, 102 que están afectados por la temperatura.

La figura 2 muestra una representación esquemática de una celda solar en tándem de acuerdo con el segundo de los dos modos de realización preferentes de la presente invención.

La diferencia esencial con el modo de realización representado en la figura 1 es que la capa 201 de silicio amorfo o parcialmente cristalino o policristalino no está dopada p como la capa 106, sino que está dopada n. Como resultado, el contacto selectivo de portador de carga que se compone del óxido interfacial 107 y de la capa 201 de silicio dopado n, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino se hace transparente o permeable a los electrones generados en el absorbedor de silicio 108, y los transfiere eficientemente a las capas ubicadas encima. Sin embargo, los huecos generados en el absorbedor de silicio 108 se bloquean, en el modo de realización que se representa en la figura 2, cerca de o en la interfase entre el absorbedor de silicio 108 y el óxido interfacial 107, y como resultado no pueden llegar a las capas ubicadas encima. Por tanto, se minimizan las pérdidas por recombinación en la superficie del absorbedor de silicio cubierto con las capas 107, 201, independientemente de las propiedades de las capas ubicadas encima. Con respecto a los espesores de capa, dopaje y procesos de producción, la capa 201 de silicio dopado n, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino es idéntica a la capa de silicio 106 dopado p, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino, de modo que aquí se remite a la descripción detallada dada anteriormente.

En el lado del absorbedor de silicio 108 que mira en dirección opuesta a la luz, de acuerdo con la realización de la invención representada en la figura 2, es necesaria la extracción de los huecos generados en el absorbedor 108. La capa 202 asume esta tarea. Esa puede estar compuesta por, por ejemplo, silicio cristalino dopado p y, como se representa en la figura 2, cubrir todo el lado posterior del absorbedor de silicio 108, o limitarse solo a las áreas de los contactos de lado posterior 111. De forma alternativa, la capa 202 también puede estar compuesta por varias subcapas, por ejemplo, por un óxido interfacial y una capa de silicio dopado p, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino. Otras posibilidades de realizar la capa 201 son materiales semiconductores distintos del silicio cristalino que con el absorbedor 108 de silicio forman una heterounión con una estructura de banda adecuada. También son posibles capas orgánicas con propiedades electrónicas adecuadas.

Además, las posiciones de la capa 103 para la extracción de huecos del absorbedor 104 y de la capa 105 para la extracción de electrones del absorbedor 104 están invertidas en la figura 2 en comparación con la figura 1. La capa 103 para la extracción de huecos del absorbedor 104 está ahora ubicada sobre el lado del absorbedor 104 que mira en dirección opuesta a la luz y, por tanto, es directamente adyacente a la capa 201 de silicio dopado n, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino. Se puede formar un contacto de túnel entre las capas 201 y 103 de acuerdo con el modo de realización de la invención representado en la figura 2. Las diversas formas posibles de realizar las capas 103, 105 son idénticas a la descripción de ambas capas dada anteriormente.

En resumen, de acuerdo con un modo de realización, se describe una estructura de celda solar en tándem, que presenta las siguientes características:

(a) Estructura monolítica con al menos dos materiales de absorbedor diferentes (104 y 108) para la conversión de energía fotovoltaica

(b) Un absorbedor 108 compuesto por silicio cristalino

(c) Un contacto selectivo de portador de carga ubicado sobre el lado del absorbedor de silicio 108 que está orientado hacia el absorbedor 104 adyacente

(d) Estructura del contacto selectivo de portador de carga formada por un óxido interfacial 107 delgado y una capa dopada p (106) o n (201) amorfa, parcialmente cristalina o policristalina, principalmente hecha de silicio, aplicada sobre aquel.

El contacto selectivo de portador de carga formado por las capas 107 y 106 o 201 asegura una excelente pasivación superficial del absorbedor de silicio cristalino 108, así como la extracción selectiva de un tipo de portador de carga de este último sobre toda la superficie. Se consigue, por tanto, un flujo de corriente vertical, de modo que no se requiere conductividad transversal lateral en cada subcelda. La formación de un contacto de túnel con la capa adyacente se puede lograr mediante un alto dopaje de la capa 106 o 201. El espesor y/o el dopaje de la capa 106 o 201 se pueden utilizar para unificar las corrientes de generación en las subceldas individuales. La estabilidad de temperatura de las capas 107, 106 o bien 201 permite el uso de etapas de producción posteriores con temperaturas > 400°C.

Listado de referencias

- 100: Luz solar
- 101: Metalización de lado frontal
- 102: Pasivación de lado frontal y capa antirreflejos
- 5 103: Capa para la extracción de huecos del primer absorbedor
- 104: Primer absorbedor de un material diferente del silicio cristalino
- 105: Capa para la extracción de electrones del primer absorbedor
- 106: Capa de silicio dopado p, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino
- 107: Óxido interfacial
- 10 108: segundo absorbedor de silicio cristalino
- 109: Capa para la extracción de electrones del segundo absorbedor
- 110: Pasivación de lado posterior y espejo de lado posterior
- 111: Metalización de lado posterior
- 201: Capa de silicio dopado n, amorfo o parcialmente cristalino o policristalino
- 15 202: Capa para la extracción de huecos del segundo absorbedor

REIVINDICACIONES

1. Celda solar con al menos dos absorbedores (104, 108) diferentes de materiales diferentes para convertir energía de radiación en energía eléctrica con absorción en en cada caso rangos espectrales diferentes, en la que:
 - (a) la celda solar es de estructura monolítica,
 - 5 (b) un primer absorbedor (108) se compone de silicio cristalino, y
 - (c) sobre un lado del primer absorbedor (108) orientado hacia un segundo absorbedor (104) adyacente está ubicado un contacto selectivo de portador de carga que para un tipo de contacto de portador de carga seleccionado de un grupo que comprende huecos y electrones es más permeable que para el en cada caso otro tipo de portador de carga, y que pasiva bien la superficie correspondiente del primer absorbedor (108), caracterizado por que
 - 10 (d) el contacto selectivo de portador de carga está formado por una capa de un dieléctrico interfacial (107) delgado y una capa dopada p (106) o dopada n (201), amorfa, parcialmente cristalina o policristalina hecha principalmente de silicio, aplicada sobre el mismo.
2. Celda solar de acuerdo con la reivindicación 1, en la que la capa de silicio (106, 201) amorfa, parcialmente cristalina o policristalina está altamente dopada de tal manera que se posibilita un contacto de túnel con una capa (105, 103) aplicada sobre la misma.
- 15 3. Celda solar de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en la que los efectos de interferencia y/o absorción de luz en la capa (106, 201) de silicio amorfo, parcialmente cristalino o policristalino se ajustan de manera selectiva adaptando un espesor de capa y/o un dopaje, para hacer coincidir una densidad de corriente generada en el primer absorbedor (108) con una densidad de corriente generada en el segundo absorbedor (104).
- 20 4. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que el dieléctrico interfacial es un óxido interfacial.
5. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira hacia y/o que mira en dirección opuesta a la radiación solar (100) está compuesto por un material de perovskita.
- 25 6. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira hacia y/o que mira en dirección opuesta a la radiación solar (100) está compuesto por un semiconductor compuesto III-V.
7. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira hacia y/o que mira en dirección opuesta a la radiación solar (100) está compuesto por un semiconductor compuesto I-III-VI.
- 30 8. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira hacia y/o que mira en dirección opuesta a la radiación solar (100) está compuesto por un semiconductor compuesto II-VI.
9. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira en dirección opuesta a la radiación solar (100) está compuesto por germanio o una mezcla de silicio-germanio.
- 35 10. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que un segundo absorbedor (104) ubicado sobre el lado que mira hacia la radiación solar (100) está compuesto por silicio amorfo.
- 40 11. Celda solar de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en la que el dieléctrico interfacial es cualquier dieléctrico interfacial con excepción de un óxido interfacial.

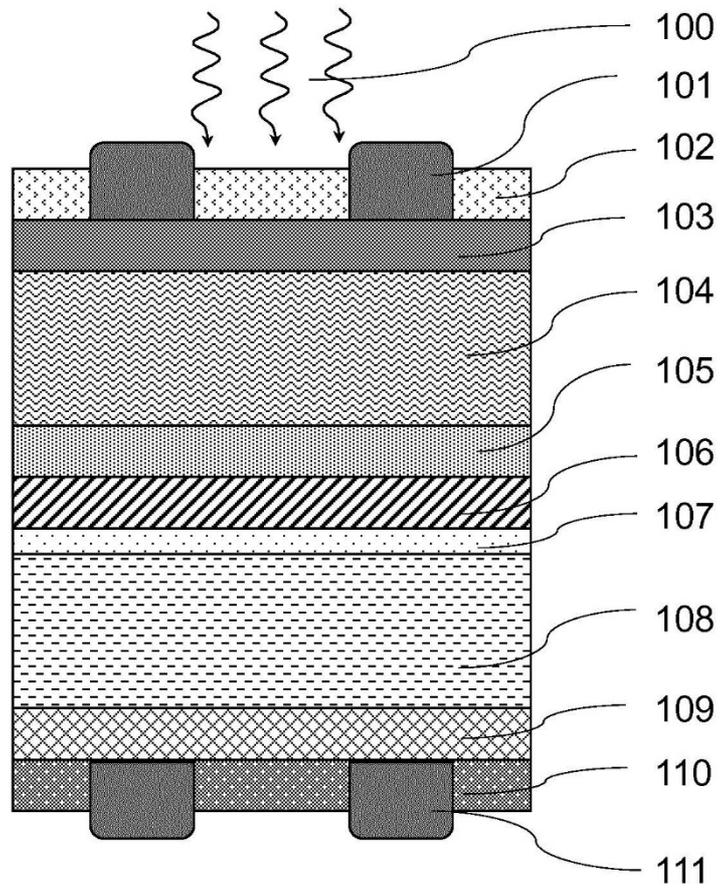


Fig. 1

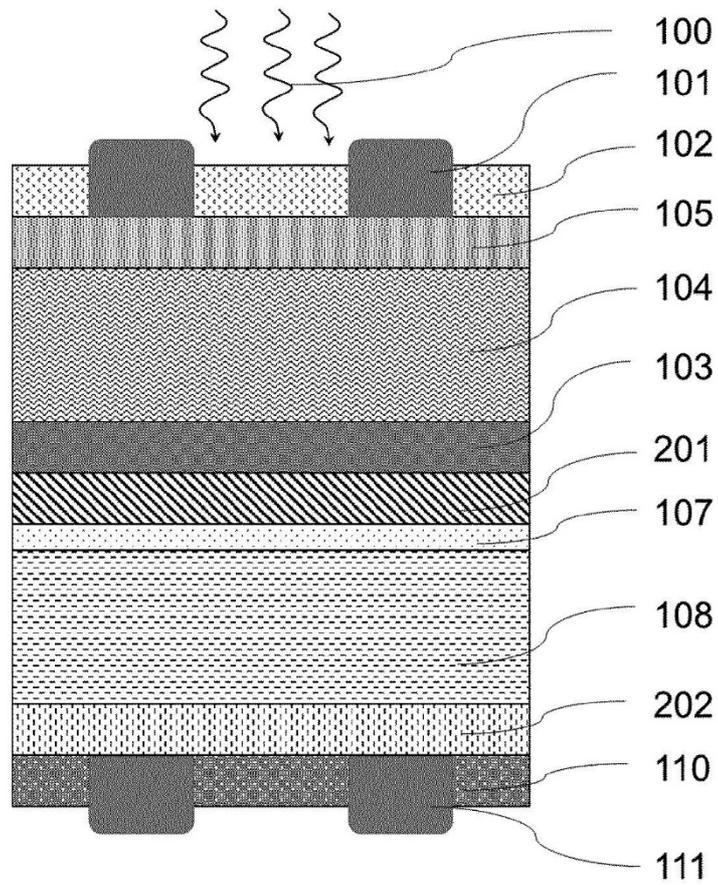


Fig. 2