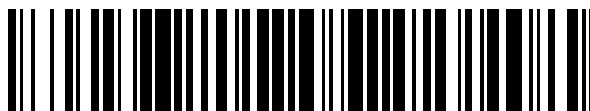


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 548 875**

51 Int. Cl.:

H01L 31/18 (2006.01)

H01L 31/0236 (2006.01)

H01L 31/0288 (2006.01)

H01L 31/0725 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.11.2011** **E 11784723 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.07.2015** **EP 2643858**

54 Título: **Dispositivo semiconductor y procedimiento para su fabricación**

30 Prioridad:

24.11.2010 DE 102010061831

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

21.10.2015

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

SCHADE, WOLFGANG

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 548 875 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

Dispositivo semiconductor y procedimiento para su fabricación

La invención se refiere a un procedimiento para fabricar un dispositivo semiconductor que absorbe luz en el que al menos una superficie parcial de un sustrato semiconductor se irradia con una pluralidad de pulsos láser de una longitud previamente establecible. Además, la invención se refiere a un dispositivo semiconductor para la conversión de radiación electromagnética en energía eléctrica que contiene un sustrato semiconductor cristalino con una primera cara y una segunda cara opuesta, estando introducido un agente de dopaje al menos en un volumen parcial del sustrato semiconductor adyacente a la primera cara de modo que entre el volumen parcial y el sustrato semiconductor está configurada una primera transición pn. Dispositivos semiconductores del tipo mencionado al inicio se pueden usar como células fotovoltaicas para el suministro de energía o como fotodetector para demostrar radiación electromagnética.

Por el documento WO 2006/086014 A2 es conocido un procedimiento del tipo mencionado al inicio. De acuerdo con este procedimiento conocido se debe irradiar la superficie de un sustrato semiconductor en presencia de un compuesto que contiene azufre con pulsos láser cortos con una duración de 50 fs a 500 fs. Mediante la excitación no lineal del sustrato semiconductor mediante los pulsos láser, la superficie del sustrato semiconductor se funde parcialmente y se traspasa parcialmente a un estado gaseoso. De este modo se produce una rugosidad superficial y una fase policristalina o amorfa. Además se introduce azufre como agente de dopaje en el sustrato semiconductor. Un sustrato semiconductor tratado de acuerdo con este procedimiento conocido muestra una absorción de luz aumentada con respecto a silicio no tratado para longitudes de onda por debajo de la energía de banda prohibida. El rendimiento de la conversión de energía de energía óptica en energía eléctrica asciende a este respecto aproximadamente a un 2,4 %.

El documento US 2010/052088 da a conocer un procedimiento para fabricar un dispositivo semiconductor que absorbe luz que contiene la siguiente etapa: Irradiar una superficie parcial de una cara de un sustrato semiconductor con una pluralidad de pulsos láser de modo que al menos la superficie parcial de esta cara se dota de una modificación superficial, configurándose una transición pn con una energía de banda prohibida que es más pequeña que la energía de banda prohibida del sustrato semiconductor.

Partiendo de estos procedimientos conocidos, la invención se basa en el objetivo de mejorar el rendimiento de una célula fotovoltaica del tipo mencionado al inicio. Además, la invención se basa en el objetivo de proporcionar una célula solar más eficaz o un fotodetector más sensible.

El objetivo se consigue de acuerdo con la invención mediante un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 y un dispositivo semiconductor de acuerdo con la reivindicación 8.

De acuerdo con la invención se reconoció que la forma de pulso de los pulsos láser, en la que se puede influir mediante una modulación de la amplitud y/o de la polarización, afecta a la estructura superficial, a la fase de material policristalina o amorfa que se produce, a la concentración de los agentes de dopaje y/o a su actividad eléctrica. De este modo se puede influir en amplios límites en las propiedades eléctricas, la estructura superficial y/o la composición de material mediante la elección de la forma de pulso.

De acuerdo con la invención, la estructuración superficial y/o la formación de determinadas fases previamente establecidas en la superficie se realizan con pulsos láser con una duración de algunos femtosegundos. En la irradiación de la superficie del sustrato semiconductor se excitan electrones del cuerpo sólido, produciéndose debido a las potencias pico de pulso elevadas un gas de electrones sobresaturado. A este respecto, el sustrato semiconductor se ioniza localmente. Finalmente se emite la energía del gas de electrones a la red cristalina, lo que conduce a la ablación o evaporación de una parte del material. La masa evaporada forma un flujo de partículas que se extiende con velocidades de hasta $10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dentro del flujo de partículas se produce una onda de retroceso debido al cambio de densidad dentro de la fase gaseosa. Esta onda de choque se propaga también en una dirección alejada de la superficie del sustrato semiconductor, aunque con una velocidad mayor que el flujo de partículas. Por tanto, la onda de choque se refleja en la superficie límite del flujo de partículas hacia la atmósfera circundante. Al incidir la onda de choque de nuevo sobre la superficie del sustrato semiconductor, ésta se acopla en la capa superficial líquida. De este modo se producen cambios de densidad en la capa superficial que en el caso del enfriamiento de la capa líquida conducen a la formación de material policristalino y/o amorfo en la superficie.

Se ha reconocido que la superficie ya se endurece tras aproximadamente 500 ps, de modo que este proceso vuelve a empezar de nuevo con cada pulso láser entrante. De acuerdo con la invención se propone ahora adaptar la forma de pulso de los pulsos láser a una forma deseada previamente establecible de modo que dentro de un pulso láser tienen lugar varias aportaciones de energía de forma directamente sucesiva antes de que la superficie vuelva a estar completamente endurecida. De este modo es posible generar varias ondas de choque internas con una dinámica temporal fijamente definida, de modo que la formación de la capa superficial policristalina se puede manipular de manera controlada o se puede evitar. De este modo se producen en el procedimiento de acuerdo con la invención cristalitas más grandes con proporciones de superficie/volumen menores, de modo que se reduce el número de los centros de recombinación. De este modo se aumenta la corriente fotoeléctrica generada y, finalmente, el rendimiento

de una célula solar o la sensibilidad de un fotodetector.

Un dispositivo semiconductor que absorbe luz en el sentido de la presente invención está diseñado para absorber fotones y provocar una separación de carga en el material semiconductor. Los portadores de carga de desequilibrio generados de este modo se pueden proporcionar en algunas formas de realización de la invención como corriente eléctrica o tensión eléctrica en elementos de conexión del elemento constructivo.

En algunas formas de realización de la invención puede estar previsto que el sustrato semiconductor se exponga a un compuesto que contiene azufre, mientras que al menos un pulso láser incide sobre la superficie del sustrato. En este caso, el compuesto que contiene azufre se puede disociar mediante la radiación láser incidente, de modo que átomos de azufre se integran en una capa próxima a la superficie del sustrato semiconductor. En algunas formas de realización de la invención se puede generar de este modo un dopaje n, de modo que en la superficie irradiada de un sustrato semiconductor dopado de tipo p se puede formar una transición pn. En algunas formas de realización de la invención, el dopaje puede formar una pluralidad de estados electrónicos dentro de la banda prohibida, de modo que se forma una banda intermedia de estados electrónicos dentro de la banda prohibida del material semiconductor. De este modo se puede posibilitar o al menos mejorar la absorción de fotones con una energía que es más pequeña que la energía de banda prohibida del sustrato semiconductor.

En algunas formas de realización de la invención, la longitud previamente establecible de un pulso láser puede ascender a aproximadamente de 10 fs a aproximadamente 1 ns. En el sentido de la presente descripción, la longitud de los pulsos láser designa a este respecto la longitud total de un pulso, pudiendo tener pulsos individuales un intervalo temporal de 10 μ s a 100 ns. De ello cabe diferenciar la subestructura de la amplitud y/o de la fase dentro de un pulso, que puede variar en una escala temporal considerablemente más corta, por ejemplo, dentro de 0,1 fs – 1,0 fs o dentro de 1 fs - 10 fs.

En algunas formas de realización de la invención, la tasa de repetición puede estar situada entre 1 kHz y 10 MHz. La tasa de repetición describe a este respecto el intervalo temporal de dos pulsos láser. En cambio, la subestructura de un pulso individual puede variar con una frecuencia de algunos THz (10^{12} Hz). Por un lado, los valores elegidos aseguran que la superficie del sustrato semiconductor se relaja completamente tras la incidencia de un pulso láser individual, es decir, vuelve en un estado termodinámicamente estable. En cambio, máximos de amplitud individuales de la subestructura de un pulso láser se pueden acoplar a los electrones ligados y/o la red del sustrato semiconductor en un estado excitado, de modo que se posibilita el control coherente del sistema de mecánica cuántica formado por el sustrato semiconductor. Esto permite influir en la estructura superficial, en la fase de material policristalina o amorfa que se produce, en la concentración de los agentes de dopaje y/o en su actividad eléctrica mediante la elección de la forma de pulso de los pulsos láser.

En algunas formas de realización de la invención, la fabricación del dispositivo semiconductor que absorbe luz se puede realizar mediante la irradiación con una única forma de pulso previamente establecible de los pulsos láser. En otras formas de realización de la invención, el procedimiento para fabricar un dispositivo semiconductor que absorbe luz se puede dividir en una pluralidad de etapas de fabricación, usándose en al menos dos etapas de fabricación diferentes formas de pulso de los pulsos láser. Esto posibilita, por ejemplo, el dopaje mediante átomos extraños con una primera forma de pulso y la creación de una estructura superficial previamente establecible mediante una segunda forma de pulso que es diferente a la primera forma de pulso. De este modo se puede obtener un resultado optimizado en cada etapa de procedimiento.

En algunas formas de realización de la invención, la amplitud de un pulso láser individual puede estar modulada de modo que ésta tiene tres máximos, teniendo al menos un máximo una primera amplitud y teniendo al menos un máximo una segunda amplitud que es diferente a la primera amplitud. En algunas formas de realización de la invención, la amplitud entre los máximos puede disminuir hasta un valor inferior a un 15 % de la primera y/o la segunda amplitud durante un intervalo de tiempo inferior a 5 fs. Un procedimiento de este tipo posibilita una descarga de material de un estado excitado de los electrones próximos a la superficie del sustrato semiconductor. Además, el procedimiento descrito puede provocar que una capa superficial licuada del sustrato semiconductor se lleve a una disposición atómica favorable mediante el campo eléctrico del pulso láser hasta que ésta recristalice o se solidifique. De este modo se puede producir en algunas formas de realización de la invención una capa superficial policristalina que tiene cristalitas más grandes con una proporción de superficie/volumen menor. En algunas formas de realización de la invención también se puede evitar la producción de una capa superficial policristalina. Finalmente, en algunas formas de realización de la invención se puede influir en la textura superficial del sustrato semiconductor mediante la elección de la forma deseada de los pulsos láser.

En algunas formas de realización de la invención en una siguiente etapa de procedimiento, al menos una superficie parcial del sustrato semiconductor puede estar dotada de una capa de contacto. La capa de contacto puede contener un metal o una aleación. En algunas formas de realización de la invención, la capa de contacto puede tener una estructura de varias capas y estar compuesta por varias capas individuales delgadas.

En algunas formas de realización de la invención, la capa de contacto puede formar un contacto óhmico sobre el sustrato semiconductor. De este modo, portadores de carga generados durante el funcionamiento se pueden separar en el dispositivo semiconductor aplicando una tensión eléctrica y se pueden demostrar o usar como

corriente eléctrica. Siempre que una superficie parcial del sustrato semiconductor esté provista de la capa de contacto se pueden usar otras zonas de superficie o superficies parciales del sustrato semiconductor durante el funcionamiento del dispositivo semiconductor para el acoplamiento de luz. Siempre que un sustrato semiconductor tenga zonas de superficie que se procesaron mediante una irradiación de una pluralidad de pulsos láser de una longitud y forma de pulso previamente establecibles y otras zonas de superficie que no se procesaron de manera correspondiente, pueden estar previstas diferentes capas de contacto que están en contacto con unas u otras zonas de superficie. Para ello, las diferentes capas de contacto pueden tener diferentes composiciones de material y/o diferentes relaciones de ligado.

En algunas formas de realización de la invención, el sustrato semiconductor se puede recocer tras la irradiación con una pluralidad de pulsos láser. De este modo, en algunas formas de realización de la invención se pueden curar estados defectuosos de la red cristalina y/o agentes de dopaje pueden difundir dentro del sustrato semiconductor y/o agentes de dopaje se pueden activar electrónicamente. En algunas formas de realización de la invención, el dispositivo semiconductor puede tener propiedades eléctricas mejoradas cuando el sustrato semiconductor se recoció tras la irradiación con una pluralidad de pulsos láser.

En algunas formas de realización de la invención, la modificación superficial obtenida mediante una forma de pulso previamente establecible mediante la irradiación con una pluralidad de pulsos láser puede tener una pluralidad de elevaciones en forma de columna que tienen un diámetro de aproximadamente 0,3 μm a aproximadamente 1 μm y una extensión longitudinal en la dirección de la normal de superficie de aproximadamente 1 μm a aproximadamente 5 μm . Por un lado, elevaciones en forma de columna del tipo mencionado pueden mejorar la absorción de luz, de modo que aumenta la eficacia cuántica de un dispositivo semiconductor de acuerdo con la invención. Además, elevaciones del tipo mencionado permiten una fácil contactabilidad mediante una capa de contacto, de modo que está asegurada la adhesión durante la vida útil del dispositivo semiconductor.

En algunas formas de realización de la invención, el sustrato semiconductor puede contener o estar compuesto por silicio dopado de tipo p y el agente de dopaje puede estar elegido a partir de nitrógeno y/o fósforo y/o arsénico y/o azufre. De este modo, mediante una irradiación de la superficie del dispositivo semiconductor con una pluralidad de pulsos láser de una forma deseada previamente establecible en presencia de un compuesto que contiene nitrógeno, fósforo, azufre o arsénico se puede obtener una transición pn cuando el compuesto se disocia mediante la radiación láser y, a continuación, los agentes de dopaje se integran en el material del sustrato semiconductor. Siempre que la forma de pulso de los pulsos láser esté adaptada al esquema de absorción del compuesto usado para el dopaje, la disociación se puede realizar mediante un control coherente, de modo que la integración del agente de dopaje se realiza de manera previamente establecible.

En algunas formas de realización de la invención, el dispositivo semiconductor propuesto puede contener al menos una célula fotovoltaica o puede estar compuesto por al menos una célula fotovoltaica. En este caso, la capa de contacto de la primera cara del sustrato semiconductor puede formar con una primera capa de contacto sobre la segunda cara una primera célula fotovoltaica y la capa de contacto de la primera cara puede formar junto con una segunda capa de contacto de la segunda cara una segunda célula fotovoltaica que están integradas de forma monolítica en un sustrato semiconductor. De este modo se pueden realizar dos células fotovoltaicas que absorben luz de una longitud de onda diferente sobre un único sustrato semiconductor, de modo que aumenta el rendimiento global de la célula fotovoltaica. Las dos células fotovoltaicas integradas de forma monolítica en un sustrato semiconductor se pueden poner en contacto independientemente entre sí, se pueden conectar entre sí en una conexión en paralelo para aumentar la corriente de inicio o se pueden conectar entre sí en una conexión en serie para aumentar la tensión de inicio del dispositivo semiconductor.

A continuación, la invención se debe explicar en más detalle mediante figuras sin limitar la idea inventiva general. A este respecto muestran:

La figura 1 un primer ejemplo de realización de una forma de pulso de los pulsos láser que se pueden usar para la fabricación de un dispositivo semiconductor que absorbe luz.

La figura 2 muestra un segundo ejemplo de realización de una forma de pulso de los pulsos láser que se pueden usar para la fabricación de un dispositivo semiconductor que absorbe luz.

La figura 3 muestra la dependencia de la longitud de onda de la absorción de un dispositivo semiconductor de acuerdo con la invención en el que se usaron diferentes formas de pulso de los pulsos láser para la fabricación.

La figura 4 muestra una sección transversal a través de un dispositivo semiconductor de acuerdo con una forma de realización de la invención.

La figura 5 muestra la vista desde arriba de la cara inferior de un dispositivo semiconductor de acuerdo con la presente invención.

La figura 6 muestra de manera esquemática la estructura de un dispositivo para la fabricación de un dispositivo semiconductor de acuerdo con la presente invención.

La figura 7 muestra un diagrama de flujo del procedimiento propuesto de acuerdo con la invención.

La figura 8 muestra los lados anterior y posterior y la sección transversal de una célula solar de acuerdo con la invención y de una célula solar conocida.

5 La figura 9 muestra dos imágenes de microscopio electrónico de barrido de dos superficies de silicio que se trataron con diferentes pulsos láser.

10 La figura 1 muestra la intensidad de la luz láser emitida en la ordenada y el tiempo en femtosegundos en la abscisa. Se representa el desarrollo de la amplitud de luz de una forma de pulso a modo de ejemplo de un pulso láser que se puede usar en el procedimiento propuesto para la fabricación de un dispositivo semiconductor que absorbe luz. El desarrollo de amplitud muestra ocho máximos que se emiten de manera aproximadamente equidistante dentro de 0,4 fs. El valor absoluto de la amplitud de cada máximo es más grande que el valor máximo del máximo anterior. Entre los mismos, la amplitud disminuye hasta un valor mínimo que también crece.

15 Una vez alcanzado el valor máximo, la amplitud se devuelve al valor inicial en un desarrollo de curva aproximadamente con simetría de espejo. Tras una pausa de una duración previamente establecible se puede repetir de forma cíclica el desarrollo de curva representado en la figura 1. En el caso del desarrollo de curva representado en la figura 1 se puede tratar del desarrollo temporal de la amplitud de un pulso láser o de un fragmento de un pulso láser que en total tiene una mayor expansión temporal.

20 La figura 2 muestra una segunda forma de realización de una forma de pulso de acuerdo con la presente invención. En el ejemplo de realización de acuerdo con la figura 2 está previsto un desarrollo de curva con tres máximos, alcanzándose en la zona central del desarrollo de curva un máximo con una amplitud grande que está flanqueado por dos máximos con una amplitud más pequeña. Entre los mismos, el desarrollo de curva cae hasta un valor cerca del valor cero. En algunas formas de realización de la invención, el valor mínimo puede comprender menos que un 10 % del valor máximo adyacente, menos que un 5 % o menos que un 1 %. En algunas formas de realización de la invención, la amplitud puede disminuir con respecto a su mínimo hasta cero.

25 Tal como se muestra de forma ejemplar mediante las figuras 1 y 2 para la amplitud o la intensidad, también se puede modular la polarización de un pulso láser en un patrón previamente establecible o en una forma deseada previamente establecible.

30 La figura 3 muestra la capacidad de absorción de un dispositivo semiconductor propuesto de acuerdo con la invención. El dispositivo semiconductor contiene a este respecto un sustrato semiconductor que fundamentalmente está compuesto por silicio. Además, el sustrato semiconductor puede contener agentes de dopaje y/o contaminaciones habituales. El sustrato semiconductor se irradió con una pluralidad de pulsos láser con una forma de pulso previamente establecible y, a este respecto, se expuso a un compuesto que contiene azufre. De este modo se produce al menos una superficie parcial con una modificación superficial que puede tener una estructura superficial modificada, una fase de material policristalina o amorfa y/o una concentración de azufre previamente establecible.

35 En la figura 3 se representa ahora la absorción en la ordenada con respecto a la longitud de onda en la abscisa. A este respecto, la curva A muestra el desarrollo de la absorción de un sustrato semiconductor que se procesó con pulsos láser cuya forma de pulso está representada en la figura 1. La curva B muestra el desarrollo de la absorción para un sustrato semiconductor en cuyo procesamiento se emplearon pulsos láser con la forma de pulso mostrada en la figura 2.

40 A partir de la figura 3 se puede apreciar que, para longitudes de onda inferiores a 1100 nm, la absorción está situada en un valor de aproximadamente 0,95. Esta absorción se debe a excitaciones electrónicas entre la banda de valencia y la banda de conducción del silicio usado. Siempre que la energía de fotones disminuya por debajo de la energía de banda prohibida, la absorción disminuye rápidamente. Luz infrarroja puede aparecer ahora en las zonas de superficie modificadas por la irradiación con los pulsos láser. A este respecto, la absorción de acuerdo con el desarrollo de curva A es siempre menor que la absorción de acuerdo con el desarrollo de curva B. Por consiguiente, mediante la modulación de acuerdo con la invención de la amplitud y/o de la polarización de los pulsos láser empleados para el procesamiento de material se puede mejorar considerablemente el comportamiento de absorción de un dispositivo semiconductor para energías de fotones por debajo de la energía de banda prohibida. De este modo se puede aumentar el rendimiento de una célula solar fabricada con el procedimiento propuesto o la sensibilidad de un fotodetector fabricado con el procedimiento de acuerdo con la invención.

55 La figura 4 muestra una sección transversal a través de una célula solar tandem monolítica propuesta de acuerdo con la invención. La célula solar está formada sobre un sustrato 100. El sustrato 100 puede contener o estar compuesto por silicio. Además, el sustrato 100 puede contener contaminaciones inevitables, por ejemplo, carbono, oxígeno o hidrógeno. En algunas formas de realización de la invención, el sustrato 100 puede ser conductor de p. Para ello, el sustrato 100 puede estar dopado, por ejemplo, con galio, aluminio o boro. El sustrato 100 tiene una primera superficie 101 y una segunda superficie 102 opuesta. En algunas formas de realización de la invención, el grosor del sustrato 100 puede ascender a de aproximadamente 50 μm a aproximadamente 1000 μm .

En un volumen parcial 110 adyacente a la primera cara 101 se puede introducir un agente de dopaje que provoca una conductividad n del volumen parcial 110. En algunas formas de realización se pueden usar nitrógeno, fósforo o arsénico como agente de dopaje. El volumen parcial 110 puede tener un grosor de aproximadamente un 2 % a aproximadamente un 20 %, en algunas formas de realización de aproximadamente un 5 % a aproximadamente un 10 % del grosor del sustrato 100.

En la superficie límite entre el volumen parcial 110 y el volumen restante del sustrato 100 se forma de este modo una primera transición pn 21.

Sobre la primera cara 101 está dispuesta al menos una capa de contacto 210. La capa de contacto 210 puede estar realizada como revestimiento parcial de la primera cara 101, de modo que permanecen zonas no cubiertas de la primera cara 101 a través de las que puede penetrar radiación de luz 30 en el volumen del sustrato 100 en el funcionamiento de la célula solar. En el ejemplo de realización representado, la capa de contacto 210 tiene un patrón de rayas o rejilla que discurre de manera transversal al plano de corte. Por tanto, la capa de contacto 210 está representada de manera continua en la figura 4. Superficies parciales no cubiertas de la primera superficie se encuentran entonces por delante y por detrás del plano de dibujo.

La segunda cara 102 opuesta del sustrato 100 se irradia en presencia de un compuesto que contiene azufre, por ejemplo, SF_6 o H_2S , con pulsos láser de una duración previamente establecible entre aproximadamente 10 fs y aproximadamente 1 ns, en particular de aproximadamente 50 fs a aproximadamente 500 fs. Los pulsos láser tienen a este respecto una forma de pulso previamente establecible que se obtiene mediante una modulación de la amplitud y/o de la polarización. En función de la forma de pulso, de la intensidad, de la tasa de repetición y/o del número de los pulsos individuales y en función de la concentración del compuesto que contiene azufre se producen por debajo de las zonas de superficie 240 irradiadas volúmenes parciales 120 en los que está modificada la composición química y/o la fase del material del sustrato 100.

Por ejemplo, en los volúmenes parciales 120 puede existir una concentración de azufre que provoca la formación de una banda defectuosa en la banda prohibida del sustrato semiconductor 100. En algunas formas de realización puede existir un material policristalino o un material amorfo en los volúmenes parciales 120. Finalmente, la superficie 240 puede estar estructurada, de modo que se forman zonas de superficie que sobresalen en forma de columna de la superficie 102 con un diámetro de 0,3 μm a 1 μm y una longitud de 1 μm a 5 μm . Los volúmenes parciales 120 pueden tener una extensión longitudinal de 2 μm a 20 μm a lo largo del vector de normal de la segunda cara 102.

En la superficie límite del volumen parcial 120 hacia el interior del sustrato 100 se forma una segunda transición pn 22.

Sobre la segunda cara 102 se encuentra además una segunda capa de contacto 220 que cubre al menos en parte las zonas de superficie no procesadas mediante los pulsos láser de la segunda cara 102.

Además está dispuesta sobre la segunda cara 102 una tercera capa de contacto 230 que cubre al menos en parte las zonas de superficie 240 procesadas con la radiación láser.

Las capas de contacto 210, 220 y 230 pueden contener o estar compuestas por un metal o una aleación. En algunas formas de realización de la invención, las capas de contacto 210, 220 y 230 pueden tener una estructura de múltiples capas.

En el funcionamiento del dispositivo semiconductor de acuerdo con la figura 1, incide luz solar o luz artificial 30 sobre la primera cara 101 del sustrato 100. La luz solar puede penetrar en el sustrato 100 a través de la primera cara 101. En la primera transición pn 21 se absorbe la parte visible de la luz solar 30, esto es, la parte con una longitud de onda inferior a 1100 nm o una energía de fotones por encima de la energía de banda prohibida. La absorción de la luz provoca una separación de carga, es decir, una excitación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. A través de la primera capa de contacto 210 y la segunda capa de contacto 220, los portadores de carga separados se pueden extraer como corriente del dispositivo semiconductor.

La parte infrarroja de la luz 30, es decir, luz con una longitud de onda de más de aproximadamente 1100 nm, penetra el sustrato 100, ya que la energía de fotones es inferior a la energía de banda prohibida. El sustrato 100 y el volumen parcial 110 aparecen casi transparentes para esta luz infrarroja. La luz infrarroja llega sobre la segunda transición pn 22 que, debido a el dopaje de átomos de azufre y/o al efecto de los pulsos láser ultracortos en la fabricación, forma estados electrónicos en la banda prohibida. De este modo se reduce la banda prohibida eficaz, de modo que se puede absorber la luz infrarroja en la segunda transición pn 22. A este respecto se producen de nuevo portadores de carga libres que se pueden extraer como corriente del dispositivo semiconductor a través de la primera capa de contacto 210 y la tercera capa de contacto 230.

A diferencia de células solares de silicio convencionales, el elemento constructivo propuesto de acuerdo con la invención, por tanto, también puede usar al menos en parte la parte infrarroja del espectro solar para la producción de energía. Esta parte infrarroja asciende aproximadamente a una tercera parte de la intensidad global irradiada. De este modo aumentan el rendimiento y el rendimiento energético de la célula solar. A diferencia de células solares tándem conocidas hasta el momento que absorben la parte infrarroja del espectro en un material de una banda

prohibida más pequeña como, por ejemplo, arsénico de galio, la célula solar propuesta de acuerdo con la invención se puede integrar de forma monolítica en un único sustrato, de modo que resulta una estructura mecánicamente robusta y económica. En algunas realizaciones de la invención, la radiación térmica que se produce en el funcionamiento de un aparato se puede convertir al menos en parte en energía eléctrica.

5 La figura 5 muestra la segunda cara 102 del sustrato 100 en una vista desde arriba. Se pueden apreciar las zonas de superficie 240 que se modificaron mediante una irradiación con pulsos láser de una forma de pulso previamente establecible para posibilitar la absorción de luz infrarroja. La zona de superficie 240 tiene en el ejemplo de realización representado una forma básica a modo de peine con una pluralidad de zonas de superficie 241 alargadas que están unidas entre sí mediante una zona 242 que discurre aproximadamente de manera ortogonal.

10 La tercera capa de contacto 230 cubre una superficie parcial de la superficie 240 modificada, estando la tercera capa de contacto 230 dispuesta aproximadamente de manera céntrica sobre los ejes de simetría de las zonas de superficie 241 y 242.

También la segunda capa de contacto 220 tiene una forma básica a modo de peine, interviniendo la capa de contacto 220 en los espacios intermedios entre dos zonas de superficie 241 adyacentes. Evidentemente, la estructura interdigital representada en la figura 5 se debe entender solo a modo de ejemplo. En otras formas de realización de la invención, la estructuración lateral de las capas de contacto 220 y 230 y la superficie base de la superficie 240 modificada mediante los pulsos láser también pueden estar elegidas de otra manera.

La figura 6 muestra de forma ejemplar un dispositivo para la fabricación de los dispositivos semiconductores propuestos de acuerdo con la invención. En la figura 6 se representa una cámara de vacío 50 que aloja el sustrato semiconductor 100. El espacio interior de la cámara de vacío 50 se puede evacuar mediante una bomba de vacío no representada, por ejemplo, con una presión inferior a 10^{-2} mbar, inferior a 10^{-4} mbar, inferior a 10^{-6} mbar o inferior a 10^{-8} mbar.

En la cámara de vacío 50 está conectado un sistema de suministro de gas 56. El sistema de suministro de gas 56 sirve para introducir un compuesto gaseoso que contiene azufre con una presión y/o una composición previamente establecibles en la cámara 50. Por ejemplo, el sistema de suministro de gas 56 puede introducir SF_6 y/o H_2S en el espacio interior de la cámara de vacío 50. La presión puede ascender a entre 1200 mbar y 10^{-3} mbar. La presión y/o el flujo de masa se pueden mantener en valores previamente establecibles mediante dispositivos de regulación correspondientes.

La cámara de vacío 50 tiene al menos una ventana de entrada 55 a través de la que se pueden acoplar pulsos láser de una forma de pulso previamente establecible en el espacio interior de la cámara de vacío para provocar a continuación en el sustrato semiconductor 100 modificaciones superficiales y/o dopajes.

Los pulsos láser 400 se generan mediante un láser de femtosegundos 300 conocido en sí. El láser de femtosegundos puede contener, por ejemplo, un láser de zafiro de titanio. La frecuencia central de los pulsos láser se puede adaptar mediante una multiplicación de frecuencia a una frecuencia deseada previamente establecible. En algunas formas de realización de la invención, la duración de pulso de un pulso láser individual puede ascender a entre 10 fs y 1 ns. En algunas formas de realización de la invención, la duración de pulso puede ascender a de 10 fs a aproximadamente 50 fs o a de aproximadamente 50 fs a aproximadamente 500 fs.

Para la generación de una forma de pulso deseada, los pulsos láser 400 se dividen de forma espectral en un primer elemento dispersivo 310. El elemento dispersivo 310 puede contener, por ejemplo, una rejilla o un prisma. Los pulsos láser 400 se reproducen tras el primer elemento dispersivo 310 en un foco intermedio en el que está dispuesto un manipulador 340. Á continuación se alimenta la luz a un segundo elemento dispersivo 320 cuyo efecto es inverso al efecto del primer elemento dispersivo 310.

Por ejemplo, el manipulador 340 puede contener un modulador de luz espacial y/o al menos un polarizador. De este modo se pueden modificar la forma de pulso o la subestructura temporal de los pulsos de luz 400 emitidos por la fuente de luz láser 300 mediante una modificación de la polarización y/o de la amplitud y/o de la fase. A este respecto, la modificación de la subestructura temporal es posible de manera sencilla y con solo tiempos de conmutación cortos. De acuerdo con la invención se reconoció que la longitud de onda del láser es en gran parte insignificante. Es crucial para la modificación superficial del sustrato 100 en gran parte la subestructura temporal de los pulsos láser 400.

El manipulador 340 se activa por un dispositivo de control 350 que en algunas formas de realización de la invención también puede contener un circuito de regulación para adaptar la subestructura temporal de los pulsos 400 a una forma deseada previamente establecible. Debido a los tiempos de conmutación cortos, la modificación superficial del sustrato 100 se puede realizar en función del resultado deseado con una única forma de pulso o con una pluralidad de diferentes formas de pulso que se aplican de forma secuencial.

La figura 7 ilustra otra vez en forma de un diagrama de flujo el procedimiento de fabricación de acuerdo con la invención. En la primera etapa de procedimiento 710 se proporciona un sustrato semiconductor cristalino que está dotado de una primera cara y de una segunda cara opuesta. Al menos en un volumen parcial adyacente a la primera

cara está introducido un agente de dopaje, de modo que en el sustrato semiconductor se forma una primera transición pn. En algunas formas de realización de la invención, el sustrato semiconductor puede estar dotado de un agente de dopaje. Asimismo, el sustrato semiconductor ya puede estar dotado de una primera capa de contacto 210 en la primera etapa de procedimiento 710 que evacua de la primera cara 101 la corriente que se produce posteriormente en el funcionamiento.

El sustrato 100 se pone en contacto con un compuesto que contiene azufre de una composición y concentración previamente establecibles. Para ello, en la etapa de procedimiento 720 se puede usar una cámara de vacío, tal como se explica mediante la figura 6. En otras formas de realización de la invención se puede aplicar el compuesto que contiene azufre como película líquida sobre el sustrato.

Finalmente, en la tercera etapa de procedimiento 730 se elige una forma de pulso o una subestructura temporal con la que se debe realizar la modificación superficial del sustrato 100.

Finalmente, en la cuarta etapa de procedimiento 740, la superficie del sustrato 100 se irradia al menos en parte con un número previamente establecible de pulsos o de una duración de irradiación previamente establecible. Esto puede conducir a la integración de átomos de azufre en una capa próxima a la superficie del sustrato 100. En algunas formas de realización de la invención, de forma alternativa o acumulada, la estructura cristalina del sustrato 100 se puede fundir de modo que se convierte en una estructura policristalina o amorfa. Finalmente, en algunas formas de realización de la invención se puede realizar una rugosidad o estructuración con elevaciones en forma de columna.

En algunas formas de realización de la invención se puede repetir la etapa de procedimiento 720, 730 y 740 tras la irradiación con una primera forma de pulso y en presencia de un primer compuesto que contiene azufre para de este modo optimizar adicionalmente las propiedades eléctricas y/o mecánicas del dispositivo semiconductor. En particular pueden actuar también pulsos láser sobre la superficie del sustrato sin que un compuesto que contiene azufre entre en contacto con la superficie. En este caso, en la etapa de procedimiento 720, la atmósfera circundante se elige de manera correspondiente.

Tras la última actuación de pulsos láser o la última realización de la etapa de procedimiento 740, el sustrato 100 se puede recocer en una etapa de procedimiento 750 opcional. Para ello es adecuada una temperatura entre 340 K y 700 K, en particular de 400 K a 500 K. Mediante el recocido, agentes de dopaje se pueden difundir y/o activar electrónicamente dentro del sustrato 100. En algunas formas de realización también se puede omitir esta etapa de procedimiento.

En la última etapa de procedimiento 760, las capas de contacto 220 y 230 se aplican sobre la segunda cara 102 de modo que se puede evacuar corriente eléctrica del dispositivo semiconductor.

La figura 8 muestra en la parte izquierda de la imagen los lados anterior y posterior y una sección transversal a través de una célula solar conocida. En la parte derecha de la imagen de la figura 8 se representan los lados anterior y posterior y una sección transversal a través de una célula solar de acuerdo con la invención. La figura 8 aclara también cómo se puede estructurar una célula solar conocida mediante pocas etapas de procedimiento de modo que se convierte en una célula solar de acuerdo con la invención.

La figura 8 muestra en la primera columna la vista desde arriba de la primera cara 101 del dispositivo semiconductor 10. La primera cara 101 está configurada como superficie de entrada de luz a través de la que puede entrar luz en el volumen del dispositivo semiconductor 10. Además está dispuesta sobre la primera cara 101 la capa de contacto 210. La capa de contacto 210 está realizada como revestimiento parcial de la primera cara 101, de modo que se forman primeras superficies parciales que están cubiertas por la capa de contacto 210 y segundas superficies parciales que pueden servir como superficies de entrada de luz.

La segunda cara 102 del dispositivo semiconductor 10 conocido está cubierta por toda la superficie con una capa de contacto 250. Las capas de contacto 250 y 210 sirven para evacuar los portadores de carga generados mediante la iluminación del dispositivo semiconductor 10 del volumen del sustrato 100 y volverlos útiles como señal de medición de un fotodetector o como potencia eléctrica de una célula fotovoltaica.

Este dispositivo semiconductor conocido representado en la parte izquierda de la imagen de la figura 8 tiene el inconveniente ya representado de que luz con una energía de fotones, que es más pequeña que la energía de banda prohibida, llega de la primera cara 101 casi sin absorción sobre la segunda cara 102 del sustrato 100 sin generar portadores de carga eléctricos libres en el sustrato 100. Por tanto, esta parte de la luz irradiada no está disponible para la producción de corriente.

Este dispositivo semiconductor 10 conocido en sí se puede procesar ahora adicionalmente de acuerdo con el procedimiento representado en la figura 7 de modo que se convierte en un dispositivo semiconductor de acuerdo con la invención. Para ello, en una primera etapa de procedimiento, solo se tiene que eliminar la capa de contacto 250 sobre la segunda cara 102 del sustrato 100. La eliminación de la capa de contacto 250 se puede realizar mediante una etapa de corrosión química en mojado o en seco, mediante pulido o pulverización catódica. La segunda cara 102 preparada de este modo se puede modificar entonces al menos en parte mediante una

iluminación con pulsos láser conformados de manera correspondiente en caso de una presencia opcional de un compuesto que contiene azufre y, a continuación, se puede dotar de capas de contacto 220 y 230, tal como ya se describió anteriormente en relación con la figura 7. De este modo se puede formar la sección transversal descrita en la figura 4 de un dispositivo semiconductor 10 o la segunda cara 102 descrita mediante la figura 5 del dispositivo semiconductor 10.

La figura 9 muestra imágenes de zonas de superficie 240 de un sustrato de silicio 100 que se obtuvieron mediante la actuación de pulsos láser de diferentes formas de pulso.

Las imágenes de acuerdo con la figura 9 se crearon con un microscopio electrónico de barrido. Las figuras 9a y 9b aclaran que se puede influir en límites amplios en la textura de la superficie.

La superficie mostrada en la figura 9a tiene una estructuración relativamente plana. De este modo se puede mejorar la puesta en contacto de la superficie mediante una capa de contacto 230. Una mejora de la puesta en contacto se supone a este respecto cuando la resistencia de transición entre el sustrato 100 y la capa de contacto 230 es menor y/o la adhesión de la capa de contacto 230 en la segunda cara 102 del sustrato 100 está aumentada.

La figura 9b muestra una zona de superficie 240 que está estructurada de manera más profunda. De este modo se mejora la absorción de luz con respecto a la superficie mostrada en la figura 9a, de modo que una intensidad óptica previamente establecible puede generar una cantidad de carga más grande en el sustrato 100. Por tanto, el procedimiento de acuerdo con la invención permite estructurar de manera diferente superficies parciales 240 de la segunda cara 102 del sustrato 100, de modo que cada superficie parcial puede cumplir de manera óptima la función asignada a la misma.

Evidentemente, la invención no está limitada a las formas de realización representadas en las figuras. Por tanto, la descripción anterior no se debe entender como limitadora sino como explicativa. Las siguientes reivindicaciones se tienen que entender de modo que una característica mencionada existe en al menos una forma de realización de la invención. Esto no excluye la presencia de características adicionales. Siempre que las reivindicaciones y la descripción anterior definan "primeras" y "segundas" características, entonces esta denominación sirve para diferenciar dos características del mismo tipo sin fijar una jerarquía.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para fabricar un dispositivo semiconductor (10) que absorbe luz, que contiene las siguientes etapas:

proporcionar un sustrato (100) con una primera cara (101) y una segunda cara (102) que contiene o está compuesto por silicio dopado de tipo p,
Introducir un agente de dopaje en al menos un volumen parcial (110) del sustrato semiconductor (100) adyacente a la primera cara (101), de modo que entre el volumen parcial (110) y el sustrato semiconductor (100) se forma una primera transición pn (21) con una primera energía de banda prohibida,
Irradiar al menos una superficie parcial (240) de la segunda cara (205) del sustrato semiconductor (100) en presencia de un compuesto que contiene nitrógeno, fósforo, azufre o arsénico con una pluralidad de pulsos láser (400) de una longitud previamente establecible, adaptándose la forma de pulso de los pulsos láser (400) mediante una modulación de la amplitud y/o de la polarización a al menos una forma deseada previamente establecible de modo que al menos la superficie parcial (240) de la segunda cara (102) se dota de una modificación superficial, formándose una segunda transición pn (22) con una segunda energía de banda prohibida, siendo la segunda energía de banda prohibida más pequeña que la primera energía de banda prohibida y comprendiendo la modificación superficial una rugosidad o una estructuración y/o fundiéndose la estructura cristalina del sustrato (100) de modo que se convierte en una estructura policristalina o amorfa.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** el sustrato semiconductor (100) se expone a un compuesto que contiene azufre, mientras que al menos un pulso láser (400) incide sobre la superficie (240) del sustrato (100).

3. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 o 2, **caracterizado porque** la longitud previamente establecible de los pulsos láser (400) asciende a de aproximadamente 10 fs a aproximadamente 1 ns.

4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** la amplitud de un pulso láser (400) individual se modula de modo que éste presenta tres máximos, teniendo al menos un máximo una primera amplitud y presentando al menos un máximo una segunda amplitud.

5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** en una siguiente etapa de procedimiento al menos una superficie parcial del sustrato semiconductor (100) se dota de una capa de contacto (210, 220, 230).

6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** el sustrato semiconductor (100) se recoce tras la irradiación con una pluralidad de pulsos láser (400).

7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** la amplitud de un pulso láser (400) individual se modula de modo que éste tiene al menos dos máximos, disminuyendo la amplitud entre los máximos hasta un valor inferior a un 15 % del valor máximo más grande durante un intervalo de tiempo inferior a 5 fs.

8. Dispositivo semiconductor (10) para la conversión de radiación electromagnética en energía eléctrica, que contiene un sustrato semiconductor (100) cristalino con una primera cara (101) y una segunda cara (102) opuesta que contiene o está compuesto por silicio dopado de tipo p, estando introducido un agente de dopaje al menos en un volumen parcial (110) adyacente a la primera cara del sustrato semiconductor (100) de modo que entre el volumen parcial (110) y el sustrato semiconductor (100) está formada una primera transición pn (21), **caracterizado porque** al menos una primera superficie parcial (240) de la segunda cara (102) está dotada de un agente de dopaje y una modificación superficial de modo que está formada una segunda transición pn (22), estando el agente de dopaje seleccionado a partir de N y/o P y/o As y/o S y comprendiendo la modificación superficial una rugosidad o estructuración y/o habiéndose fundido la estructura cristalina del sustrato (100) de modo que se convirtió en una estructura policristalina o amorfa, de modo que la primera transición pn (21) está diseñada para absorber luz con una energía de fotones por encima de la energía de banda prohibida del sustrato semiconductor (100) y la segunda transición pn (21) está diseñada para absorber luz con una energía de fotones por debajo de la energía de banda prohibida del sustrato semiconductor (100).

9. Dispositivo semiconductor de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizado porque** la modificación superficial de la primera superficie parcial presenta una pluralidad de elevaciones en forma de columna que tienen un diámetro de aproximadamente 0,3 µm a aproximadamente 1 µm y una extensión longitudinal de aproximadamente 1 µm a aproximadamente 5 µm.

10. Dispositivo semiconductor de acuerdo con las reivindicaciones 8 o 9, **caracterizado porque** la primera superficie parcial (240) contiene silicio policristalino con un tamaño granular de 1 µm a 100 µm.

11. Dispositivo semiconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 10, **caracterizado porque** la primera cara (101) está dotada de al menos una capa de contacto (210) que está realizada como revestimiento parcial de la primera cara (101) y porque la segunda cara (102) está dotada de al menos dos capas de contacto (220, 230).

12. Dispositivo semiconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 11, **caracterizado porque** una capa de contacto (220) de la segunda cara establece un contacto eléctrico con el sustrato semiconductor (100) y la otra capa de contacto (230) establece un contacto eléctrico con la primera superficie parcial (240) de la segunda cara (102).
- 5 13. Dispositivo semiconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 12, **caracterizado porque** la capa de contacto (210) sobre la primera cara (101) forma con la capa de contacto (220) sobre la segunda cara (102) una primera célula fotovoltaica y la capa de contacto (210) de la primera cara forma con la capa de contacto (230) de la segunda cara (102) una segunda célula fotovoltaica que están integradas de forma monolítica en un sustrato semiconductor (100).
- 10 14. Dispositivo semiconductor de acuerdo con la reivindicación 13, **caracterizado porque** la primera y la segunda células fotovoltaicas están conectadas en paralelo entre sí.

Fig. 1

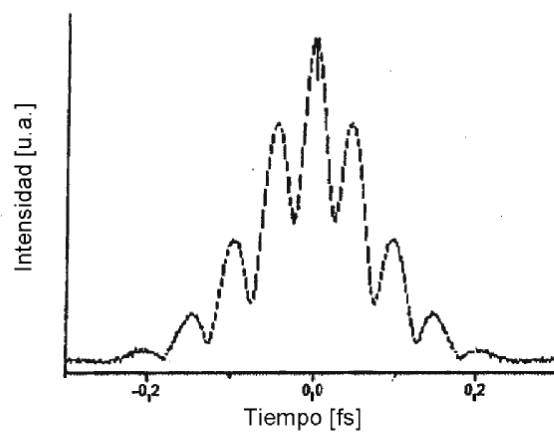


Fig. 2

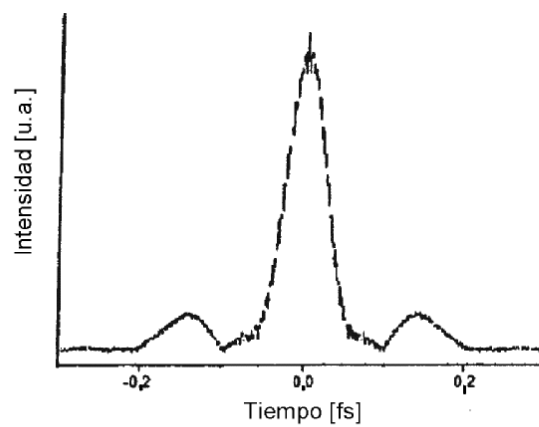
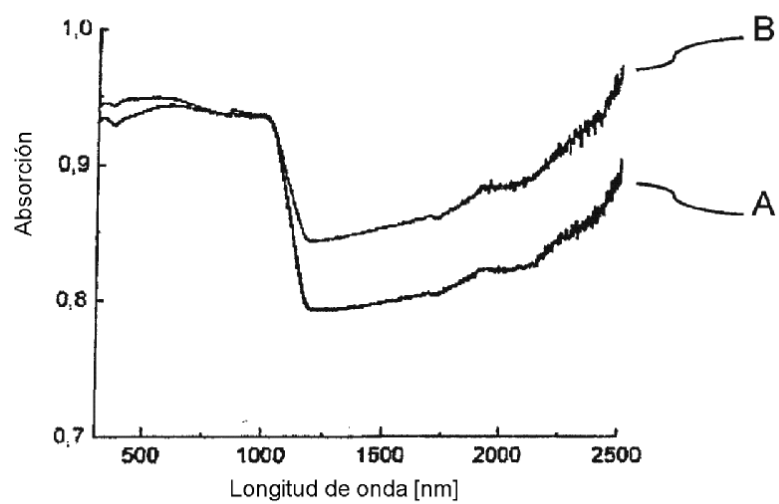


Fig. 3



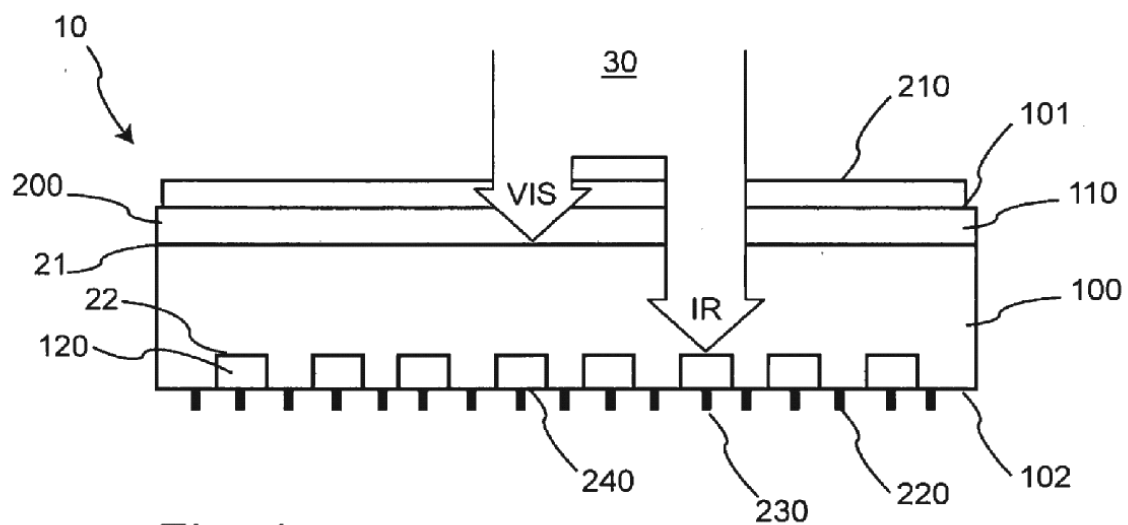


Fig. 4

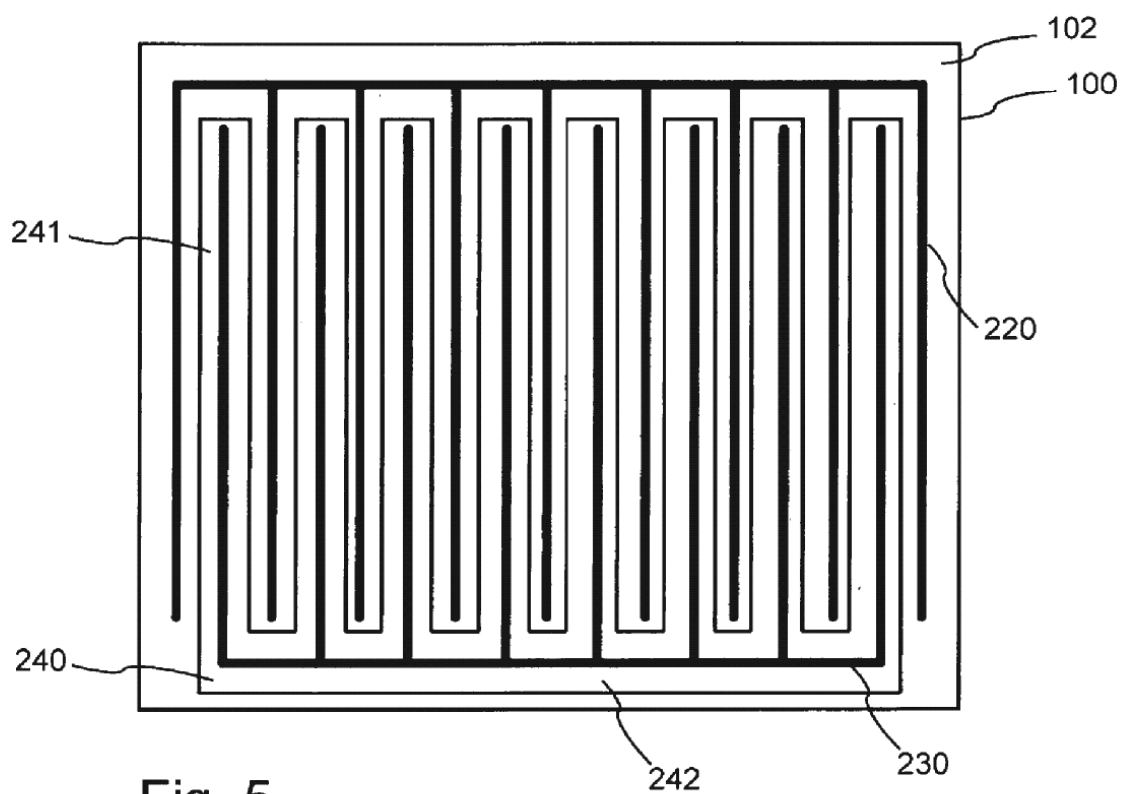
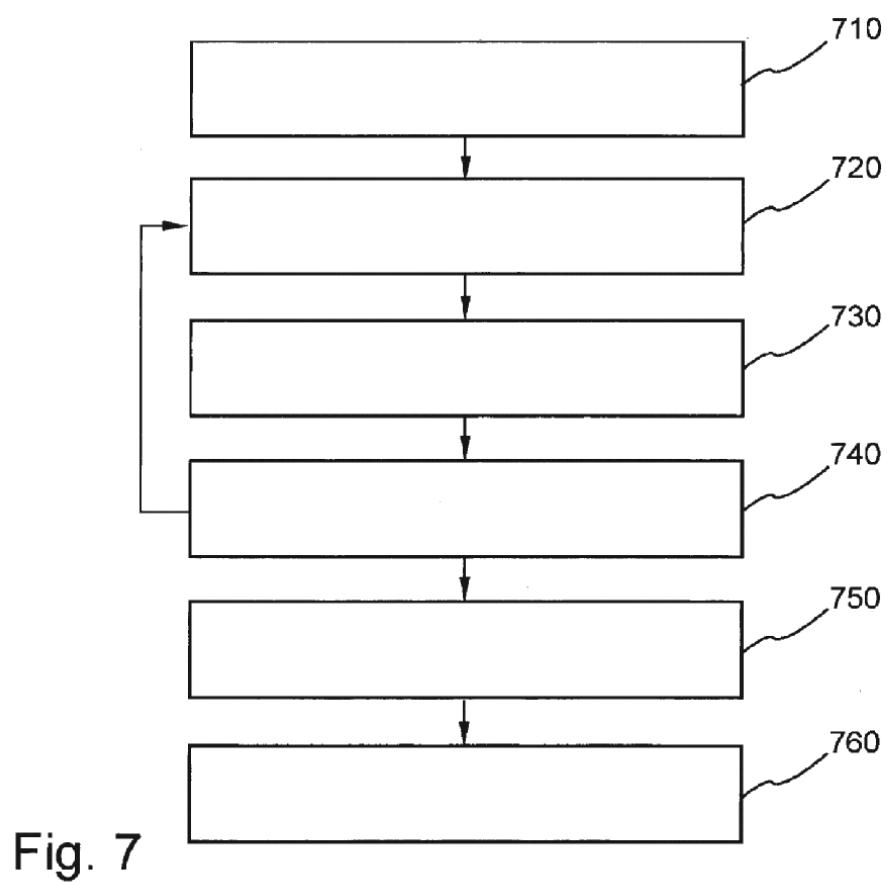
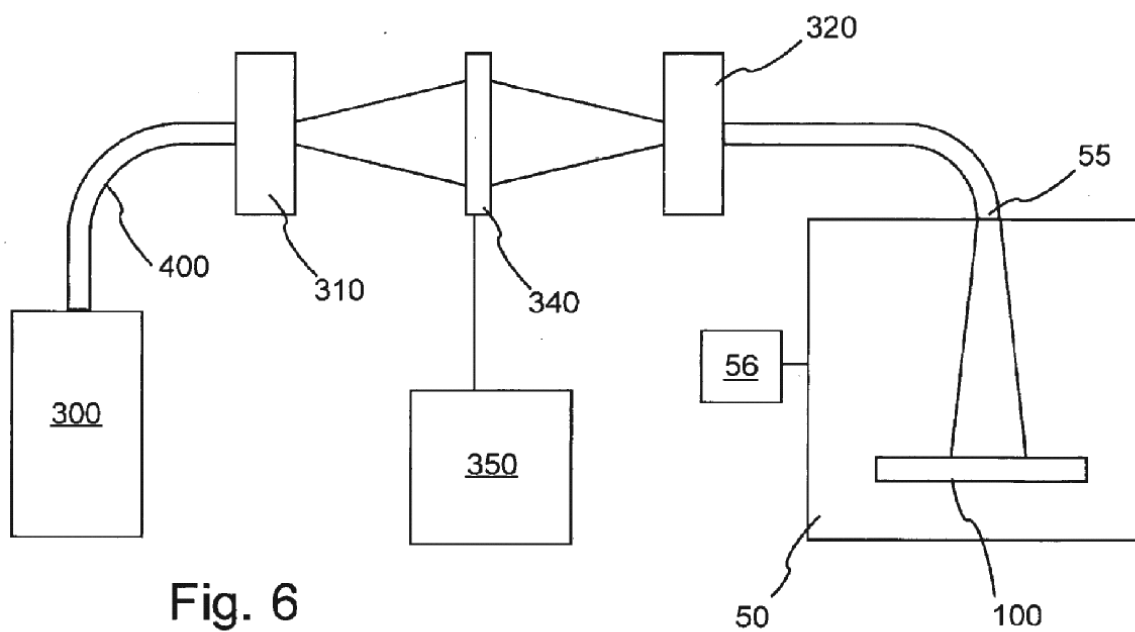


Fig. 5



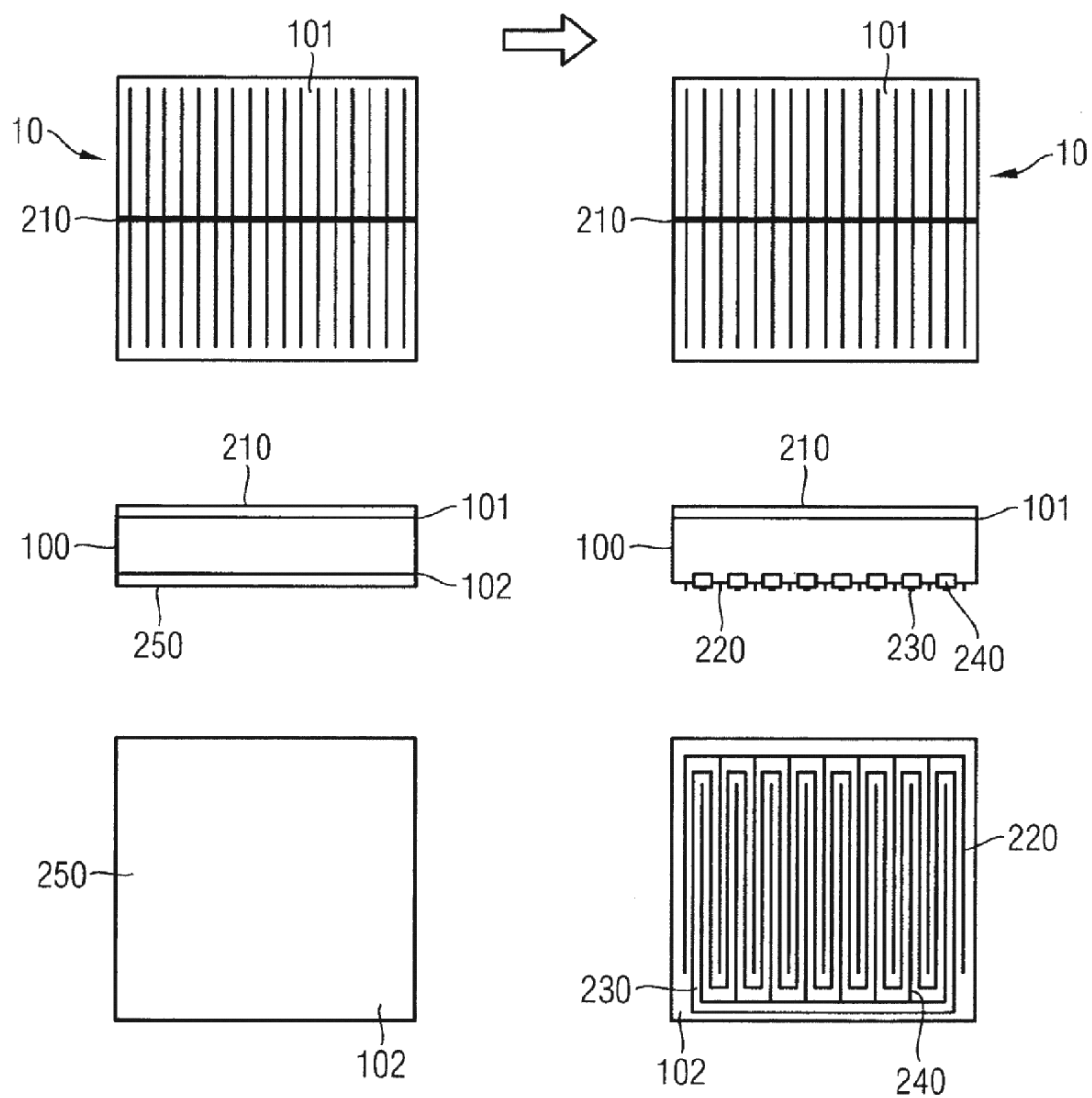


Fig. 8

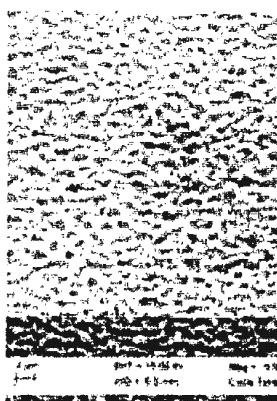


Fig. 9a

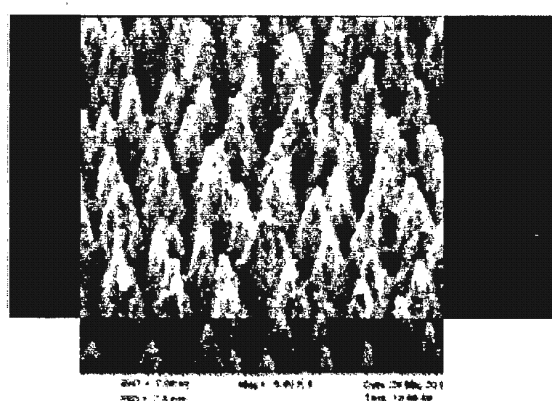
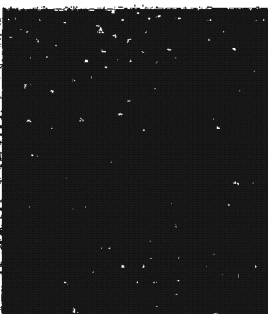


Fig. 9b